

УДК 553.493.6.068.36

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ НА КОРАХ ВЫВЕТРИВАНИЯ КАРБОНАТИТОВ (К ПРОБЛЕМЕ ГЕНЕЗИСА УНИКАЛЬНЫХ РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТОМТОР, РОССИЯ)

© 2021 г. А. В. Лапин^а, *, И. М. Куликова^а, **, О. А. Набелкин^а

^аИнститут минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов,
ул. Вересаева, 15, Москва, 121357 Россия

*e-mail: lapin@imgre.ru

**e-mail: imkulikova@gmail.com

Поступила в редакцию 11.03.2020 г.

После доработки 28.10.2020 г.

Принята к публикации 23.12.2020 г.

Приводится сравнительный анализ состава и строения поверхностных фаций кор выветривания карбонатитов месторождений Чуктукон (Россия) и Сеис Лагос (Бразилия) и ультрабогатых редкометалльных руд месторождения Томтор (Россия). Показано, что главные геохимические тенденции формирования ультрабогатых редкометалльных руд томторского типа и поверхностных фаций кор выветривания имеют противоположную направленность. Полученные результаты не подтверждают генетической связи уникальных томторских руд с поверхностными фациями кор выветривания карбонатитов, но свидетельствуют в пользу их более позднего образования в связи с процессом восстановления эпигенеза продуктов выветривания карбонатитов под воздействием растворов, дренирующих перекрывающие коры угленосные отложения. Для поверхностных фаций кор выветривания карбонатитов впервые установлено широкое распространение явлений жидкостного расщепления коллоидного раствора на марганцовистую и железистую фракции, а также выявлена активная латеральная коллоидная миграция титана из вмещающих пород.

Ключевые слова: карбонатиты, коры выветривания, поверхностные фации, эпигенез.

DOI: 10.31857/S0024497X21030046

В последние десятилетия сформировалось представление о корях выветривания (КВ) карбонатитов, как об одной из наиболее продуктивных редкометалльных рудных формаций. Этому способствовали открытие, разведка и освоение целого ряда уникальных по своим параметрам месторождений ниобиевых (Араша, Каталан в Бразилии и др.) и ниобиево-редкоземельных руд (Маунт-Вельд в Австралии и др.). Некоторые месторождения, такие как Томтор в России, отличаются настолько большим разнообразием рудных компонентов (включая ниобий, титан, лантаноиды, иттрий, скандий, ванадий и целый ряд других) и их высокими концентрациями, что руды этих месторождений могут рассматриваться как природные концентраты.

Проведенные ранее исследования позволили выявить сложную внутреннюю структуру рудной формации и разработать геолого-генетическую классификацию месторождений в зависимости от условий гипергенного минералообразования. Согласно этой классификации, выделяются три главных типа месторождений, которые различа-

ются особенностями строения профиля выветривания, составом гипергенных продуктов и их рудоносностью [Лапин, 1988; Лапин, Толстов, 1995]. Среди них: 1) месторождения гидрослюдистых КВ карбонатитов (Белозиминское, Татарское, Россия; Анжико, Бразилия и др.); 2) месторождения латеритных КВ карбонатитов (Чуктуконское, Татарское II, Россия; Араша, Бразилия; Маунт Вельд, Австралия и другие); 3) особую группу составляют месторождения эпигенетически измененных латеритных КВ карбонатитов, которые пока представлены единственным объектом – Томторским месторождением ультрабогатых комплексных редкометалльных руд.

Как показывает практика, наиболее широко распространены месторождения латеритных КВ карбонатитов, которые достигают максимальной мощности 300–400 и более метров, отличаются наиболее глубоким химическим преобразованием субстрата, развитием зрелого зонального профиля выветривания и нередко присутствием хорошо выраженных поверхностных фаций продуктов выветривания.

Характерной особенностью латеритных КВ карбонатитов является зональное строение профиля выветривания с инверсионным типом зональности, при котором некоторые ограниченно подвижные компоненты, такие как P_2O_5 и SiO_2 , выносятся из верхних горизонтов профиля и пересаждаются в глубоких его горизонтах. В итоге типичный профиль латеритного выветривания карбонатитов включает верхнюю зону выщелачивания и гидролиза, представленную остаточными латеритными охрами существенно лимонитового состава и нижнюю зону цементации или вторичного переотложения компонентов, которая состоит из верхнего лимонит-франколитового горизонта и нижнего лимонит-франколит-кварцевого горизонта.

В охрах сосредоточены основные ресурсы ниобия и редкоземельных элементов — инертных компонентов, испытывающих остаточное накопление вместе с легкогидролизуемым железом, в то время как лимонит-франколитовые породы концентрируют значительные ресурсы богатых фосфатных руд со средним содержанием P_2O_5 15–20%.

Приведенный зональный профиль выветривания реализуется в структурных корах, которые развиваются путем гипергенного преобразования карбонатитов “*in situ*” и могут наследовать некоторые структурные элементы исходных пород. Главным явлением, нарушающим относительно стационарные условия этого процесса, служит усадка продуктов выветривания вследствие сокращения объема за счет выноса легкорастворимых карбонатных компонентов.

Вместе с тем профиль выветривания, как правило, завершается специфическими поверхностными образованиями, которые формируются при непосредственном влиянии и прямом контакте с такими факторами, как наличие земной атмосферы, поверхностных водоемов и водотоков, присутствие органического вещества и т.д. Эти поверхностные образования отличаются от подстилающих структурных кор целым рядом особенностей состава и строения, и могут рассматриваться в качестве поверхностных фаций кор выветривания карбонатитов. Поверхностные фации представляют собой результат совместного действия процессов выветривания и осадкообразования, которые сопровождаются более активной латеральной миграцией вещества как в виде коллоидных и истинных растворов, так и в форме механической взвеси. Благодаря этому в формировании поверхностных фаций КВ карбонатитов начинает вовлекаться вещество пород, слагающих прилегающие территории, в особенности доминирующих в районе пород. Это служит одной из причин того, что поверхностные фации кор вследствие их разубоживания в отношении редких металлов чаще всего остаются за пределами

рудных блоков и до сих пор не привлекали особого внимания.

Однако эта ситуация в настоящее время изменилась. Во-первых, были выявлены месторождения КВ карбонатитов с хорошо развитыми поверхностными фациями, такие как Сеис Лагос в Бразилии, где эти фации образуют зону мощностью в несколько десятков метров и по своему составу и рудоносности могут представлять практический интерес. Кроме того, важным стимулирующим фактором стало открытие в России уникального комплексного редкометалльного Томторского месторождения. Аномальные Nb–TR–Sc руды этого месторождения слагают плащеобразную залежь на латеритных корах выветривания карбонатитов.

При всей определенности такой геологической позиции этих руд в настоящее время нет единого мнения об их генезисе. Конкурируют две главные, принципиально различные концепции их формирования. Согласно одной из них, ультрабогатые руды рассматриваются как “деллювиально-озерные россыпи” или “переотложенные” КВ карбонатитов [Коноплев и др., 1992]. Согласно другой, уникальные руды томторского типа представляют собой эпигенетически измененные латеритные КВ карбонатитов, а аномально высокие параметры этих руд обусловлены суммированием рудоконцентрирующих эффектов двух этапов гипергенеза — окислительного этапа поверхностного выветривания и восстановительного эпигенетического этапа, который устанавливается после перекрытия кор более молодыми осадками, содержащими мощные пласти буроуголя [Лапин, 1995; Лапин, Толстов, 1995].

Главные различия между этими концепциями, которые определяют прогнозно-поисковые критерии для руд томторского типа, заключаются в том, что осадочно-россыпная концепция предполагает формирование ультрабогатых руд на открытой поверхности земли под влиянием поверхностных факторов, в то время как согласно эпигенетической концепции горизонт богатых руд формируется после перекрытия КВ более молодыми осадками на этапе эпигенеза кор, который связан с воздействием на гипергенные продукты восстановленных грунтовых вод, дренирующих угленосные отложения. Очевидные противоречия между двумя концепциями неизбежно вызывают повышенный интерес к поверхностным фациям и к процессам эпигенеза КВ карбонатитов. Одновременно с этим последние результаты геологоразведочных работ обеспечили дополнительные возможности анализа процессов, протекающих как на открытой поверхности КВ карбонатитов, так и при эпигенетических преобразованиях перекрытых кор на более представительном материале.

Учитывая это, главной задачей настоящей статьи является обоснование выбора одной из альтернативных концепций, что позволило бы более надежно ориентировать прогнозирование и поиски ультрабогатых руд, аналогичных рудам Томтора – пока единственного представителя нового перспективного типа комплексных редкометалльных месторождений. С этой целью проведен сравнительный анализ поверхностных фаций КВ карбонатитов, сформировавшихся на открытой поверхности, и эпигенетических образований на корах, возникающих после их перекрытия осадочными породами, которые могут вызывать радикальные изменения физико-химической обстановки гипергенеза.

Главными объектами исследования служили латеритные КВ карбонатитов, включая их поверхностные фации в Чуктуконском месторождении на Чадобецком поднятии (Россия). При анализе поверхностных фаций КВ карбонатитов использовался также литературный материал по зарубежным месторождениям. Особое внимание при этом уделено новым данным по бразильскому месторождению Сеис Лагос, в котором поверхностные фации КВ слагают мощную зону (около 40 м) и представлены весьма разнообразными по составу и структуре типами пород [Giovannini, 2013; Giovannini et al., 2017].

Анализ эпигенетических преобразований КВ карбонатитов после их перекрытия более молодыми отложениями и изменения физико-химической обстановки гипергенеза выполнен на материалах Томторского и Чуктуконского месторождений.

Аналитическая часть исследований включала рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) образцов, который проводился с помощью модернизированного микроанализатора “Samebaх-microbeam”. Условия анализа: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 30–50 нА, диаметр электронного пучка 2–4 мкм. Для анализа использовались аналитические $K\alpha$ -линии характеристического излучения для F, Na, Mg, Al, Si, P, K, Ca, Sc, Ti, V, Mn, Fe; $L\alpha$ -линии для Y, Zr, Nb, Ba, La, Ce, Nd, Dy, Er, Yb, Tb, Tm, Lu; $L\beta$ -линии для Pr, Sm, Gd, Pr, Eu, Ho; $M\alpha$ -линии для Th, Pb и $M\beta$ -линия U с учетом поправок на взаимное наложение линий. Полный расчет концентраций проводился с помощью стандартных расчетных программ Setzaf, CalcZaf и PAP; использовались массовые коэффициенты поглощения Хенке [Henke et al., 1993]. Растровые изображения получены в обратно-рассеянных электронах (BSE – back-scattered electrons) с увеличением $\times 100$ –2000.

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ФАЦИИ КОР Выветривания карбонатитов

Очевидно, что практически все месторождения КВ карбонатитов какое-то время имели выход на земную поверхность и подвергались воздействию поверхностных факторов. Вследствие этого поверхностные фации кор, вероятно, были распространены достаточно широко. Однако во многих случаях, благодаря процессам эрозии, они сохранились лишь фрагментарно. Тем не менее, поверхностные фации КВ карбонатитов сравнительно неплохо изучены. Прежде чем перейти к характеристике эталонных объектов с широким распространением и наиболее полным проявлением поверхностных фаций, приведем краткий обзор этих фаций, основанный на литературных данных.

В условиях хорошей обводненности в заболоченных депрессиях и мелких водоемах на КВ формируется горизонт плотных натечных или оолитовых бурых железняков [Лапин, Куликова, 2017]. В засушливых условиях пустынь и полупустынь, благодаря поровой капиллярной миграции грунтовых вод к поверхности, на рыхлых охристых продуктах выветривания формируется так называемая “кираса” или “канга” – более плотный панцирь железняков. Вследствие относительного обогащения поверхностных образований железом и марганцем они, как правило, беднее редкими металлами по сравнению с рыхлыми охрами, на которых они формируются.

Разубоживание поверхностных фаций по редким металлам усугубляется более интенсивной латеральной миграцией вещества в этой зоне, что сопровождается добавлением к материалу КВ карбонатитов дополнительных компонентов из окружающих пород. Среди таких компонентов наиболее значительная роль обычно принадлежит глинозему, иногда титану и кремнезему, которые могут поступать как в коллоидной форме, так и в виде механической примеси в форме обломочных зерен кварца и рутила. Как будет показано ниже, в некоторых случаях титан становится наиболее важным дополнительным компонентом поверхностных фаций КВ карбонатитов.

Обратимся теперь к конкретным объектам. Один из них – Чуктуконское месторождение латеритных КВ кальцитовых и анкерит-кальцитовых карбонатитов. Месторождение интересно широким развитием структурно-вещественных типов поверхностных фаций КВ карбонатитов, хотя и сохранившихся фрагментарно, а также и тем, что является пока единственным объектом, в котором локально и в сравнительно небольших масштабах обнаружены ультрабогатые редкометалльные руды, аналогичные рудам Томторского месторождения.

Второй объект – бразильское месторождение латеритных КВ сидеритовых карбонатитов Сеис Лагос обсуждается на основе литературных данных, ставших доступными благодаря недавним публикациям А. Жиованнини с соавторами [Giovannini, 2013; Giovannini et al., 2017]. Месторождение отличается значительной мощностью и большим разнообразием структурно-вещественных типов поверхностных фаций КВ карбонатитов. Чуктуконское месторождение – типичный пример латеритных кор выветривания карбонатитов – характеризуется обычными для этого типа месторождений строением профиля выветривания и составом гипергенных продуктов. Большая часть профиля выветривания (обычно до глубины 150–200 м от поверхности) представлена лимонитовыми охрами, содержащими Sr-, Ba- и Се-пирохлор, монацит и минералы группы крандаллита.

Нижние горизонты профиля (ниже зоны охр) сложены литофицированными, кусковатыми и песчано-дресвянистыми породами, главными минералами которых являются гетит, франколит и кварц. Мощность зоны гетит-франколитовых и гетит-кварцевых пород достигает 100–150 м. Между этими породами наблюдаются постепенные переходы с четкой тенденцией к смене франколита кварцем по мере увеличения глубины.

Поверхностные фации КВ карбонатитов представлены оолитовыми и натечными сливными бурыми железняками, которые встречаются в верхних частях охристого горизонта в виде более или менее крупных фрагментов и дресвянистого материала, иногда в виде сплошного горизонта, мощность которого, как правило, не превышает первых метров.

По составу среди бурых железняков различаются существенно железистые (менее 5.0% MnO) и марганцево-железистые (более 5.0% MnO) разновидности. Химический состав бурых железняков и подстилающих их охристых продуктов выветривания карбонатитов приведен в табл. 1. Сопоставление состава поверхностных железняков и охристых продуктов выветривания показывает, что первые, как правило, существенно богаче окисным железом, но беднее редкими металлами – ниобием и редкими землями. Содержание кремнезема, глинозема и марганца в поверхностных фациях варьирует в широких пределах, что отчасти может быть связано с дополнительным приносом кремнезема и глинозема из окружающих пород, а в случае марганца – с перераспределением железа и марганца.

Рассмотрим некоторые детали состава и строения марганцево-железистых и существенно железистых бурых железняков Чуктуконского месторождения. Марганцево-железистые бурые железняки отличаются широким распространением колломорфных текстур в виде зональных натечных

(рис. 1а, б, табл. 2) и почковидных (см. рис. 1в, г, табл. 3) агрегатов с ритмичным чередованием зон марганцовистого состава, которые различаются содержанием марганца и бария, и отжимания железистой гетитовой фазы в краевые зоны и в интерстиции между натечными агрегатами и почковидными выделениями марганцовистой фазы.

Особый интерес представляют структуры, свидетельствующие о разделении коллоидного раствора на марганцовистую и железистую фазы в ходе процесса, аналогичного жидкостной несмесимости. Примеры подобных структур показаны на рис. 2. Марганцовистая фаза, имеющая состав голландита, выделяется из железистой матрицы гетитового состава в виде правильной системы серповидных вrostков, разделяющих овальные обособления количественно преобладающей железистой фазы (см. рис. 2а, б), либо в форме мелких шаровидных образований, иногда сливающихся в агрегаты и неправильные скопления (см. рис. 2в, г). Состав марганцовистой и железистой фаз, образующихся в результате жидкостной несмесимости, приведен в табл. 4.

На рис. 2д показан сходный процесс жидкостного разделения коллоидного раствора на марганцовистую и железистую фазы, который выражается в появлении тонкой эмульсионной вкрапленности марганцовистой фазы в матрице гетитового состава, укрупнении эмульсии и стягивании ее в сплошные прослойки марганцовистой голландитовой фазы.

Таким образом, для марганцево-железистых бурых железняков, слагающих поверхностные фации КВ карбонатитов, характерны колломорфные структуры жидкостного разделения на несмешивающиеся марганцовистую и железистую фракции, которым соответствуют голландитовая и гетитовая фазы.

В марганцево-железистых бурых железняках иногда встречаются оолитовые структуры. Однако они более характерны для пород существенно железистого состава. Ядра оолитов в этих породах обычно сложены агрегатом гетита с монацитом, флоренситом, иногда скоплениями монацита или флоренсита, реже обломками зерен кварца или пирохлора. Округлые и изометричные ядра оолитов окружены тонкозернистыми концентрическими оболочками гетита и хлорита (рис. 3а, табл. 5). Размер оолитов варьирует от 100 до 500 мкм, иногда до нескольких миллиметров. Иногда среди железняков встречаются более крупные фрагменты пород подстилающего их охристого гетитового горизонта, заключенные в тонкозернистые концентрические оболочки гетита и хлорита. Среди оолитовых бурых железняков выделяются участки бобового строения, в которых овальные гетитовые ядра бобовин, состоящие из гетита с микровключениями монацита, окруже-

Таблица 1. Химический состав натечных и оолитовых бурых железняков и латеритных охр месторождения Чуктукон (мас. %)

Компоненты	1	2	3	4	5	6
SiO ₂	9.02	1.00	12.8	8.60	1.43	5.93
TiO ₂	1.28	0.12	0.10	2.13	0.63	1.34
Al ₂ O ₃	9.78	1.11	0.53	6.70	5.24	5.97
Fe ₂ O ₃	52.94	78.90	74.4	56.50	81.5	50.42
FeO	не обн.	0.71	не обн.	не обн.	не обн.	не обн.
MnO	4.79	0.13	0.67	7.30	4.10	8.35
MgO	0.11	0.15	0.20	0.41	не опр.	0.30
CaO	0.36	0.52	0.20	0.72	0.34	1.80
Na ₂ O	0.13	<0.05	0.15	0.10	не опр.	0.10
K ₂ O	0.20	<0.05	0.02	0.13	не опр.	0.10
Nb ₂ O ₅	0.60	0.52	–	0.37	0.42	1.85
TR ₂ O ₃	4.08	3.60	1.74	2.54	2.42	5.76
P ₂ O ₅	3.18	2.00	1.12	2.90	2.20	5.10
CO ₂	–	0.43	–	–	–	0.66
H ₂ O ⁺	11.45	10.77	–	–	–	11.63
SO ₃	0.12	–	0.10	0.15	–	0.26
BaO	1.76	не обн.	0.68	3.85	0.53	–
V	0.21	–	0.15	0.22	0.059	–
Сумма	100.1	99.96	92.26	92.26	98.87	99.57

Примечание. 1–4 – натечные бурые железняки; 5 – оолитовые бурые железняки; 1–3, 5 – породы существенно железистые; 4 – породы марганцово-железистые; 6 – латеритные охры.

Таблица 2. Результаты микроанализа марганцевистой (голландит) и железистой (гетит) фаз в зональных натечных агрегатах бурых железняков (мас. %)

Компоненты	Зональные натечные агрегаты												
	1а*								1б				
	1**	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
MgO	–	–	0.04	0.03	0.05	0.04	0.02	0.13	–	0.09	0.04	0.03	0.10
Al ₂ O ₃	0.02	0.07	0.15	0.28	0.23	0.10	–	0.06	–	0.06	0.08	0.06	0.12
SiO ₂	–	–	–	3.14	3	–	–	0.07	–	0.02	–	–	3.18
BaO	5.32	6.3	7.24	–	–	3.61	3.40	12.06	6.45	11.62	5.19	3.25	0.11
MnO ₂	82.79	88.74	86.95	0.31	0.51	89.31	91.4	82.21	88.27	84.82	89.33	91.25	0.24
Fe ₂ O ₃	0.10	0.18	0.34	75.67	76.54	1.25	0.06	0.05	0.04	0.17	0.23	0.07	76.29
Сумма	88.24	95.3	94.72	79.43	80.32	94.32	94.88	94.58	94.79	96.78	94.87	94.67	80.04

Примечание. * – проанализированы участки агрегатов, изображенные на рис. 1а, б; ** – точки анализа (см. рис. 1а, б).

ны оторочкой гематита (см. рис. 3б, табл. 6). Размер бобовин варьирует от 300 до 1000 мкм.

Некоторые разновидности существенно железистых бурых железняков по строению сходны с породами марганцово-железистого состава и представлены прожилковидными выделениями окислов и гидроокислов железа, имеющими на-

течное, почковидное, часто симметрично зональное строение с последовательным отложением минералов на стенках трещин и нередко сохранением пустот в осевой части таких выделений. Во многих случаях зональные натечные и почковидные образования представлены двумя близкими по составу железистыми фазами (см. рис. 3в, г,

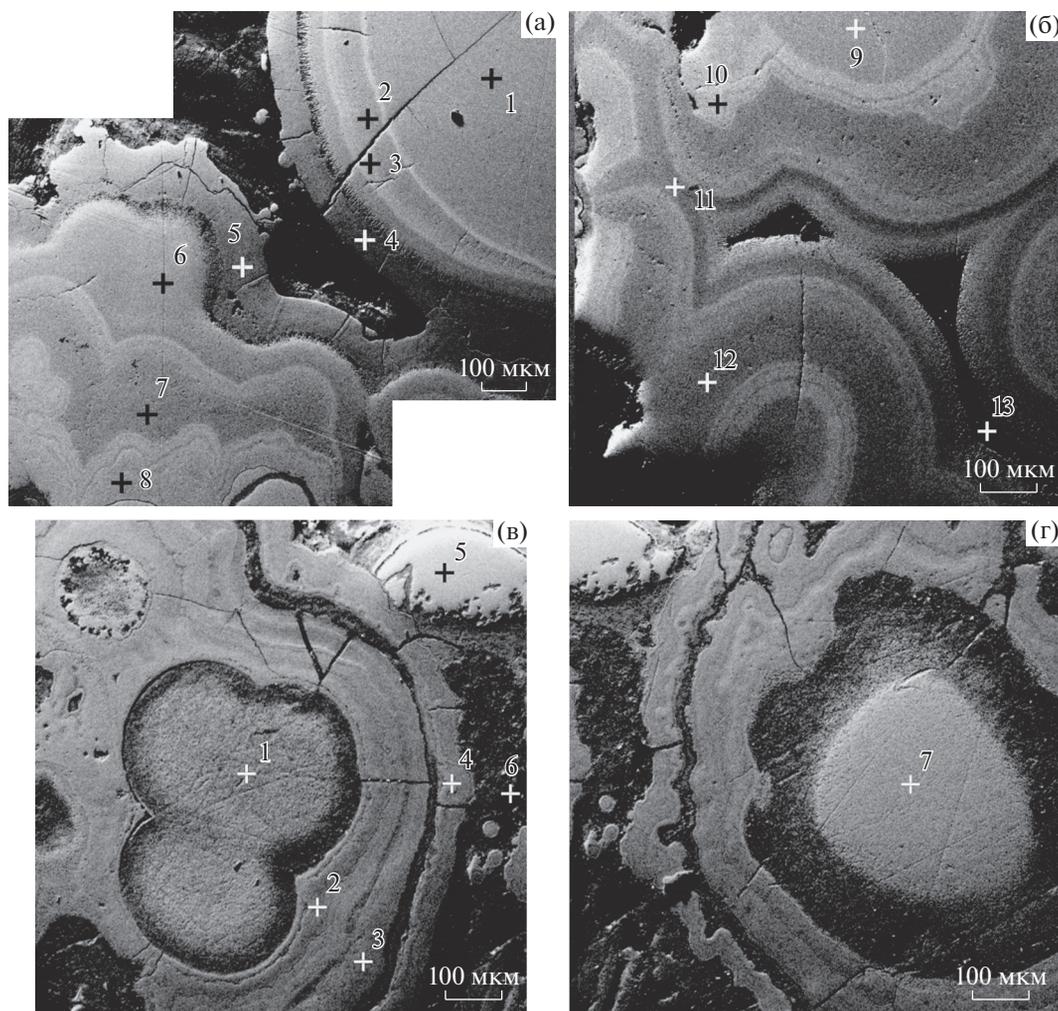


Рис. 1. Концентрически-зональные натечные (а, б) и почковидные (в, г) агрегаты в марганцово-железистых бурых железняках.

Тонкие концентрические зоны агрегатов представлены голландитовой фазой с различным содержанием марганца и бария; железистая гетитовая фаза (наиболее тонкая зона) “отжимается” в краевые зоны и интерстиции агрегатов. BSE-изображение. Цифры – точки анализа, химический состав см. табл. 2, 3.

табл. 7), которые резко различаются по содержанию воды (гетитом и гидрогетитом), что указывает на возможность проявления несмесимости жидких фаз с разной степенью гидратации в коллоидных растворах.

Дополнительной фазой, участвующей в жидкостном разделении коллоидного раствора, как и в случае марганцово-железистых железняков, является органическое вещество, которое стягивается в пустоты, сохраняющиеся в породе после коагуляции железистых фаз. Причем эти пустоты используются также идиоморфными кристаллами барита, не характерными для марганцово-железистых железняков, в которых весь барий поглощается голландитовой фазой.

Разновидностью бурых железняков натечного почковидного облика являются породы с характерным фестончатым строением (рис. 4а, б), в ко-

торых коагуляция коллоидного раствора часто начинается с появления пористого гетитового агрегата, обрастающего затем тонкими зональными фестончатыми оболочками гетита и гидрогетита, и заканчивается широкими зонами почковидного гетита, часто имеющими глобулярное строение. Остающиеся свободными пустоты в породе нередко заполняются органическим веществом, содержащим примесь мельчайших минеральных частиц кварца, циркона и других минералов.

Особенностью строения колломорфных структур, характерных для поверхностных фаций КВ карбонатитов, является присутствие в них фрагментов пород подстилающего охристого горизонта. Они встречаются в ядрах оолитов, почковидных, глобулярных и натечных образований. Присутствие таких фрагментов особенно характерно для зоны КВ, переходной между поверхностными

Таблица 3. Результаты микроанализа марганцевистой (голландит) и железистой (гетит) фаз зональных почковидных образований в бурых железняках (мас. %)

Компоненты	Зональные почковидные образования					
	1в*					1г
	1**	2	3	4	5	7
Na ₂ O	0.43	—	<0.05	—	0.23	0.09
CaO	0.26	0.31	—	—	—	0.14
SrO	0.19	0.03	—	—	—	0.08
BaO	7.43	0.59	0.05	0.03	13.06	7.58
PbO	0.13	—	—	<0.10	—	—
UO ₂	—	—	0.18	—	—	—
Nb ₂ O ₃	0.01	—	0.24	—	—	—
ZrO ₂	—	0.22	0.30	—	0.27	—
Fe ₂ O ₃	2.16	77.91	83.83	82.39	0.46	0.32
MnO ₂	61.05	3.09	2.19	0.29	84.47	81.83
Al ₂ O ₃	0.15	1.44	0.59	1.63	—	0.02
V ₂ O ₃	0.05	0.30	0.39	0.39	0.08	—
Ta ₂ O ₅	0.09	—	—	<0.09	0.11	—
P ₂ O ₅	0.18	0.68	—	—	—	0.04
SiO ₂	0.12	2.23	—	—	—	0.03
Сумма	72.26	86.80	87.76	84.73	98.68	90.13

Примечание. * — проанализированы участки агрегатов, изображенные на рис. 1в, г; ** — точки анализа (см. рис. 1в, г).

фациями и охристым горизонтом. Внутренние структуры этих фрагментов, так же как и охр, подстилающих поверхностные фации, являются одной из характерных разновидностей коагуляционных структур коллоидных растворов.

Основу коагуляционных структур составляет пористая ажурная решетка, образованная сросшимися удлинёнными индивидами гетита (см. рис. 4в, г). Строение решетки осложняется развитием на структурообразующих удлинённых индивидах гетита наростов, которые при срастании друг с другом образуют решетку второго порядка. По некоторым признакам, удлинённые индивиды гетита, составляющие решетку первого порядка, имеют трубчатое строение. Есть основания предполагать, что удлинённые трубчатые образования гетита состоят из сросшихся между собой полых глобул (микронного размера). Подобные глобулярные структурные конструкции гетита недавно были описаны М.Н. Малеевым [Малеев, 2016] в Кремниковском месторождении Болгарии.

Таким образом, детальное изучение поверхностных фаций КВ карбонатитов Чуктуконского месторождения, которые представлены различными по составу и структуре разновидностями бурых железняков, показало преобладание в этих породах структуры коагуляции коллоидных рас-

Таблица 4. Результаты микроанализа марганцевистой (голландит) и железистой (гетит) фаз в структурах жидкостного разделения (мас. %)

Компоненты	Структуры жидкостного разделения Мп- и Fe-фаз в бурых железняках		
	2а*		2в
	13**	14	9
Na ₂ O	—	—	<0.05
BaO	12.64	0.19	13.10
PbO	—	—	0.19
ΣLn ₂ O ₃	0.20	—	—
Nb ₂ O ₃	0.27	0.26	—
ZrO ₂	—	—	0.13
Fe ₂ O ₃	4.93	78.04	0.12
MnO ₂	82.63	3.39	86.39
Al ₂ O ₃	0.07	2.88	0.05
V ₂ O ₃	—	—	0.04
P ₂ O ₅	0.07	0.17	—
SiO ₂	0.07	2.14	—
Сумма	100.87	87.08	100.03

Примечание. * — проанализированы участки агрегатов, изображенные на рис. 2а, в; ** — точки анализа (см. рис. 2а, в).

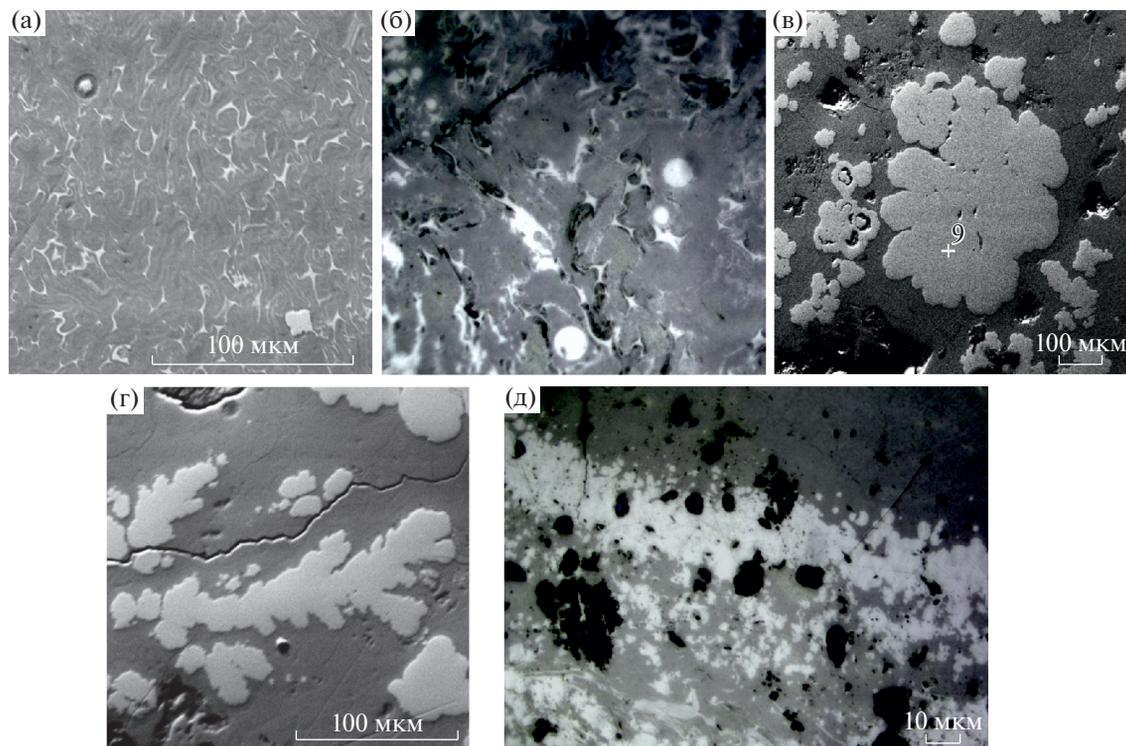


Рис. 2. Структуры жидкостного разделения Mn–Fe матрицы в бурых железняках на марганцовистую (светлая) и железистую (темная) фазы.
 а, б – серповидные выделения марганцовистой фазы (голландита) разделяют округлые каплевидные обособления железистой (гетитовой) фазы; видны отдельные шаровидные обособления голландитовой фазы; в, г – слипание шаровидных обособлений голландита в агрегаты изометричной и неправильной формы в матрице железистого (гетитового) состава; д – эмульсионные выделения марганцовистой фазы (голландит, более светлая) в железистой гетитовой фазе (более темная), эмульсионные выделения марганцовистой фазы под воздействием гравитации стягиваются в сплошные прослои. BSE-изображение.

творов и явлений жидкостного фракционирования коллоидов. Последние могут быть результатом как разделения коллоидов на фазы близкого состава, различающиеся по степени гидратации (гетит, гидрогетит), так и расслоения растворов на фракции разного состава – гетитовую и голландитовую.

Структурные особенности марганцево-железистых бурых железняков, выявленные на Чукотском месторождении и свидетельствующие о жидкостном фракционировании коллоидного раствора, могут иметь более широкое значение. Они позволяют более обоснованно интерпретировать особенности состава, строения и условия формирования поверхностных фаций КВ карбонатитов на месторождениях, в которых разделение на марганцовистую и железистую фазы в этих фациях проявлено в геологических масштабах и при определенных условиях может иметь практическое значение. К таким объектам относится бразильское месторождение Сеис Лагос. Комплекс Сеис Лагос занимает площадь 16 км² и состоит из трех тел округлой формы диаметром 55, 0.75 и 0.5 км. Согласно [Gomes et al., 1990], этот

комплекс преимущественно сложен феррокарбонатитами при подчиненном развитии бейфорситов, сиенитов и карбонатитовых брекчий. Вмещающие породы представлены гнейсами, гранитами, гранодиоритами и мигматитами комплекса Гуианенсе.

Главные минералы феррикарбонатитов – сидерит и барит; породы содержат горсейксит, бастнезит, пирохлор [Giovannini et al., 2017]. На карбонатитах развиты латеритные КВ, мощность которых в среднем составляет 250 м, иногда достигает 450 м [Issler, 1978]. В корях выветривания оконтурены значительные ресурсы ниобиевых руд со средним содержанием Nb₂O₅ 2.85%; главными минералами-носителями ниобия в них являются Nb-рутил и Nb-брукит.

В последнее время детальные исследования строения и состава верхней части профиля латеритного выветривания феррикарбонатитов (до глубины 100 м) с хорошо развитыми поверхностными фациями были выполнены А. Жиованнини [Giovannini, 2013; Giovannini et al., 2017]. Нижняя часть вскрытой бурением коры выветривания (от 40 до 100 м ниже поверхности) сложена

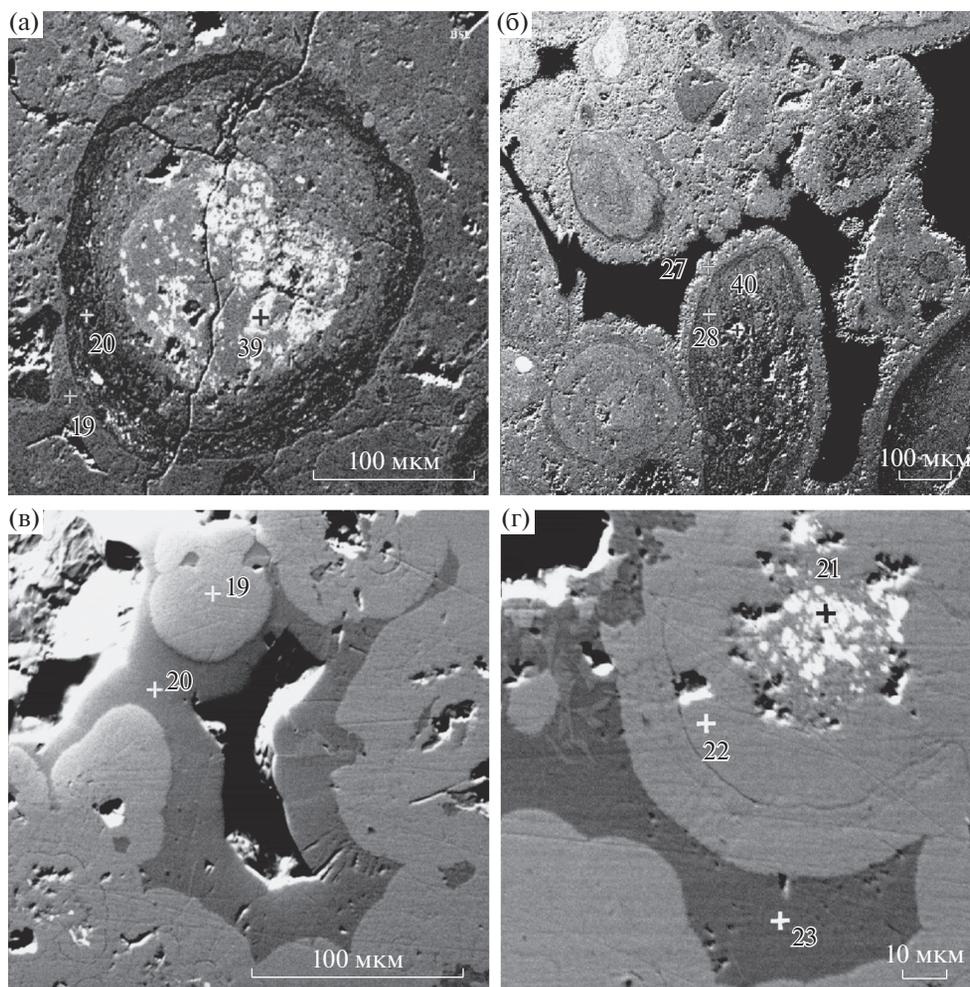


Рис. 3. Бурые железняки оолитового (а), бобового (б), натечного (в) и почковидного (г) строения. а – оолиты состоят из ядра, сложенного монацит (светлое)-гетитовым (серое) агрегатом, и концентрической оболочки тонкозернистого гетита (темно-серое); б – бобовины состоят из агрегатов гетита с включениями монацита, окруженных оторочкой гематита; в, г – натечные (в) и почковидные (г) агрегаты зонального строения с чередованием зон гетита и гидрогетита; в центре некоторых почковидных выделений видны агрегаты, состоящие из гетита и монацита. BSE-изображение.

красными и бурими охрами, состоящими из гетита (75%) и гематита (25%) с примесью флоренсита, церианита, Nb-рутила и Nb-брукита; Се-пироксид присутствует на глубине более 79 м. Верхние 40 м разреза представлены разнообразными по составу и структуре поверхностными фациями КВ карбонатитов. В основании этой части разреза, сходной по валовому составу с железистыми охрами структурных кор низов разреза, располагается горизонт марганцовистых пород, состоящий преимущественно из голландита, гематита и гетита с примесью церианита и со спорадическим присутствием пиролюзита.

Среди поверхностных фаций кор выветривания сверху вниз выделяются следующие горизонты (рис. 5): 1) пизолитовые коры (горизонт А, мощность горизонта 2.2 м); 2) обломочные коры (горизонты В и D, 6.8 и 2.75 м); 3) пятнистые коры

(горизонт С, 8 м); 4) красные оолитовые коры с оолитами Nb-брукита (горизонт Е, 12 м); 5) марганцовистые коры (горизонт F, 9 м).

Структурные коры, слагающие более однородную часть разреза (см. рис. 5) представлены горизонтами G (19 м) и H (38 м).

В табл. 8 приведен химический состав каждого из выделенных горизонтов, а также состав сидеритовых карбонатитов, дайка которых вскрыта буровой скважиной во вмещающих гранито-гнейсах вблизи участка развития КВ карбонатитов. Из таблицы следует, что вскрытые горизонты КВ карбонатитов, за исключением марганцовистого горизонта, близки по валовому химическому составу и различаются главным образом структурно-текстурными особенностями.

Таблица 5. Результаты микроанализа минералов (монацита, гетита) оолитовых бурых железняков (мас. %)

Компоненты	Оолитовые бурые железняки		
	3а*		
	19**	20	39
SiO ₂	1.92	2.25	0.18
SrO	–	–	0.20
Y ₂ O ₃	–	–	1.20
ΣLn ₂ O ₃	–	–	45.10
P ₂ O ₅	–	–	23.27
ThO ₂	–	–	0.16
CaO	0.11	0.32	0.94
Na ₂ O	–	–	0.02
Al ₂ O ₃	2.90	4.11	1.08
TiO ₂	0.43	0.16	0.23
BaO	–	–	0.22
MnO	0.51	0.17	0.27
Fe ₂ O ₃	88.98	88.25	17.10
V ₂ O ₃	–	–	0.14
Nb ₂ O ₅	0.27	0.15	0.21
UO ₂	–	–	0.04
Sc ₂ O ₃	–	–	0.03
Ta ₂ O ₅	–	–	0.09
Сумма	–	–	90.73
	Лантаноиды		
La ₂ O ₃	–	–	21.45
Ce ₂ O ₃	–	–	16.18
Pr ₂ O ₃	–	–	1.27
Nd ₂ O ₃	–	–	5.21
Sm ₂ O ₃	–	–	0.67
Gd ₂ O ₃	–	–	0.32
Ho ₂ O ₃	–	–	<0.13
Er ₂ O ₃	–	–	<0.11
Yb ₂ O ₃	–	–	<0.08
ΣLn ₂ O ₃	–	–	45.10

Примечание. * – проанализирован участок агрегата, изображенный на рис. 3а; ** – точки анализа (см. рис. 3а): 19, 20 – гетит, 39 – монацит.

Поверхностные фации КВ выделяются присутствием пизолитовых, оолитовых и обломочных текстур. С учетом данных, полученных при изучении поверхностного горизонта бурых железняков Чуктуконского месторождения, в основании разреза поверхностных фаций, вероятно, следует поместить породы марганцовистого го-

ризонта, для которого наиболее приемлемой является гипотеза жидкостного разделения коллоидного раствора на марганцовистую и железистую фракции.

Некоторые дополнительные детали строения профиля выветривания и особенности поведения компонентов в поверхностных фациях и структурных корах выявляются при сопоставлении химического состава индивидуальных проб, отобранных по разрезу КВ карбонатитов (рис. 6). Приведенные на этом рисунке кривые распределения ряда характерных компонентов в профиле выветривания, прежде всего, подтверждают положение границы между поверхностными фациями и структурными корах. Первым свойственна большая вариативность состава и значительные колебания величин содержания компонентов в отдельных горизонтах. Для вторых характерно более стабильное поведение компонентов при сохранении единой общей тенденции к изменению их содержания по вертикали. Исключение составляют редкоземельные элементы, колебания величин содержания которых показывают резкий локальный максимум внутри горизонта бурых охр, нарушающий тенденцию стабильного поведения компонентов. Детальный анализ распределения REE в профиле выветривания, а также выявленные ранее закономерности поведения церия в КВ карбонатитов [Лапин, Куликова, 2017] позволяют предположить, что ураганное содержание церия в одной из проб обусловлено фракционированием REE в КВ, вызванным окислением церия до четырехвалентного состояния, его экстракцией из редкоземельных минералов и концентрированным локальным переосаждением в виде церианита.

Другое следствие, вытекающее из анализа распределения компонентов в профиле выветривания (см. рис. 6), заключается в стабильно высоком содержании окисного железа как в структурных корах, так и в поверхностных фациях, с тенденцией к некоторому повышению содержания в последних. Эта тенденция нарушается в нижнем горизонте поверхностных фаций, где резко увеличивается концентрация марганца.

Наконец, еще одной примечательной особенностью распределения компонентов является заметное повышение концентраций глинозема и титана в поверхностных фациях по сравнению со структурными корах, при значительной вариативности величин содержания обоих компонентов в отдельных горизонтах поверхностных фаций. Это может указывать на дополнительный привнос глинозема и титана из окружающих пород. При этом содержание глинозема заметно уменьшается в структурных корах, но затем остается стабильным, тогда как содержание титана в структурных корах продолжает плавно снижать-

ся, что может указывать на более высокую подвижность титана в коллоидных растворах, участвующих в корообразовании.

Весьма показательны данные о поведении ниобия в профиле выветривания. Первое, что обращает на себя внимание, — это общее сходство кривых распределения ниобия и титана, что говорит о преобладании единого для них минерал-носителя — Nb-рутила и Nb-брукита. Вместе с тем, характер распределения величины отношения Ti/Nb в профиле выветривания выявляет более сложную картину. График распределения (см. рис. 6) подтверждает существование границы между структурными корами и поверхностными фациями, демонстрирует стабильность отношения Ti/Nb в структурных корках и резкое повышение его величины в поверхностных фациях. Вероятной причиной этого может служить высокая подвижность титана в коллоидных растворах, участвующих в формировании поверхностных фаций, и значительный дополнительный привнос этого элемента из окружающих пород. Этот дополнительно привносимый титан-гель содержит некоторое количество ниобия, однако отношение Ti/Nb в нем значительно выше, чем в структурных корках.

Бразильское месторождение КВ карбонатитов Сеис Лагос, располагающее мощными, разнообразными, хорошо сохранившимися поверхностными фациями, позволяет получить новые данные о КВ и их поверхностных фациях, развитых на сравнительно редко встречающихся сидеритовых карбонатитах. Это месторождение также демонстрирует некоторые существенные общие особенности поверхностных фаций КВ карбонатитов. Среди тех, которые обусловлены спецификой состава субстрата, отметим, прежде всего, предельно высокие концентрации окисного железа как в структурных корках, так и в поверхностных фациях. Это объясняется низким содержанием в субстрате алюмосиликатных и фосфатных компонентов, которые могли бы составить конкуренцию железу в корках выветривания. Другая особенность, которая, вероятно, связана с составом окружающих карбонатитов пород, заключается в повышенной подвижности и активной миграции титана не только в поверхностных фациях, но и в структурных КВ. Коэффициент концентрации титана в отдельных горизонтах коры выветривания по отношению к исходному субстрату достигает аномальных значений и составляет 30 и более.

Особая роль титана в КВ месторождения Сеис Лагос проявляется в присутствии значительных ресурсов Ti–Nb руд, главными рудными минералами которых являются Nb-рутил и Nb-брукит. По мнению отдельных авторов, высокая активность титана в КВ этого месторождения, вероят-

Таблица 6. Результаты микроанализа минералов (гематита, гетита, монацита) бобовых бурых железняков (мас. %)

Компоненты	Бобовые бурые железняки		
	36*		
	27**	28	40
SiO ₂	2.56	0.68	0.16
SrO	—	—	0.30
Y ₂ O ₃	—	—	0.86
ΣLn ₂ O ₃	—	—	56.36
P ₂ O ₅	—	—	28.23
ThO ₂	—	—	0.12
CaO	0.03	0.78	1.13
Na ₂ O	—	—	0.07
Al ₂ O ₃	0.57	8.24	0.07
TiO ₂	0.01	1.31	0.11
BaO	—	—	0.44
MnO	0.03	2.61	0.39
Fe ₂ O ₃	98.37	76.77	4.41
ZrO ₂	—	—	0.07
PbO	—	—	0.06
Nb ₂ O ₅	0.11	2.22	0.11
Ta ₂ O ₅	—	—	0.20
Сумма	101.70	92.61	93.21
La ₂ O ₃	—	—	32.92
Ce ₂ O ₃	—	—	17.22
Pr ₂ O ₃	—	—	1.19
Nd ₂ O ₃	—	—	4.68
Sm ₂ O ₃	—	—	<0.12
Gd ₂ O ₃	—	—	0.20
Dy ₂ O ₃	—	—	0.14
Yb ₂ O ₃	—	—	<0.08
ΣLn ₂ O ₃	—	—	56.36

Примечание. * — проанализирован участок агрегата, изображенный на рис. 36; ** — точки анализа (см. рис. 36): 27 — гематит, 28 — гетит, 40 — монацит.

но, способствовала деструкции кристаллической структуры первичного пироклора и переходу ниобия в более стабильную форму титановых оксидов. Однако, несмотря на реальность процесса постепенной деструкции кристаллической структуры пироклора в латеритных КВ карбонатитов, ряд фактов позволяет предполагать, что Nb-рутил, наряду с пироклором, является первичной формой Nb и Ti в сидеритовых карбонатитах, ко-

Таблица 7. Результаты микроанализа минералов (гетита и монацита) натечных и почковидных выделений в буром железняке (мас. %)

Компоненты	Натечные и почковидные агрегаты в буром железняке				
	Зв*		Зг**		
	19	20	21	22	23
SiO ₂	3.68	3.04	1.93	3.21	2.62
SrO	—	—	0.63	0.05	—
Y ₂ O ₃	—	—	0.72	0.04	—
ΣLn ₂ O ₃	0.10	—	22.14	0.35	0.52
P ₂ O ₅	1.05	0.74	12.63	0.97	0.59
ThO ₂	—	—	1.26	—	—
CaO	—	—	1.65	0.13	—
Na ₂ O	—	—	—	—	0.05
Al ₂ O ₃	0.92	2.97	1.22	1.86	2.96
TiO ₂	—	—	0.08	—	—
BaO	0.24	—	0.12	0.08	—
MnO ₂	0.14	—	0.55	1.37	1.78
Fe ₂ O ₃	87.21	76.79	54.93	87.76	78.77
PbO	—	—	0.24	0.19	—
Nb ₂ O ₅	0.15	0.04	—	0.07	—
Сумма	93.49	83.58	98.13	96.13	87.30
			Ln ₂ O ₃		
La ₂ O ₃	—	—	4.48	<0.05	—
Ce ₂ O ₃	0.10	—	9.98	—	—
Pr ₂ O ₃	—	—	1.31	—	—
Nd ₂ O ₃	—	—	5.39	—	<0.10
Sm ₂ O ₃	—	—	0.58	0.12	0.20
Gd ₂ O ₃	—	—	0.21	—	—
Tb ₂ O ₃	—	—	0.18	0.23	0.11
Er ₂ O ₃	—	—	—	—	<0.11
Tm ₂ O ₃	—	—	—	—	—
Yb ₂ O ₃	—	—	—	—	0.16
ΣLn ₂ O ₃	0.10	—	22.14	0.35	0.36

Примечание. * и ** — проанализированы участки агрегата, изображенные на рис. 3в, г; точки анализа (см. рис. 3в): 19 и 20 — гетит и гидрогетит (см. рис. 3г), 21 — гетит, монацит, 22, 23 — гетит, гидрогетит.

торая сменяется в КВ более устойчивым в зоне гипергенеза Nb-брукитом.

Среди результатов, которые демонстрируют некоторые общие закономерности развития поверхностных фаций КВ карбонатитов, отметим следующие. Положение границы между структурными корами и поверхностными фациями четко устанавливается по переходу от зоны со стабильным уровнем содержания и величинами

отношения рассматриваемых компонентов (в корях) — к зоне повышенной их вариативности (в поверхностных фациях). Далее, содержание окисного железа в поверхностных фациях стремится к предельным значениям или (в КВ сидеритовых карбонатитов) сохраняется на предельно высоком уровне. Поверхностные фации КВ карбонатитов формируются в условиях более активной латеральной миграции компонентов из окру-

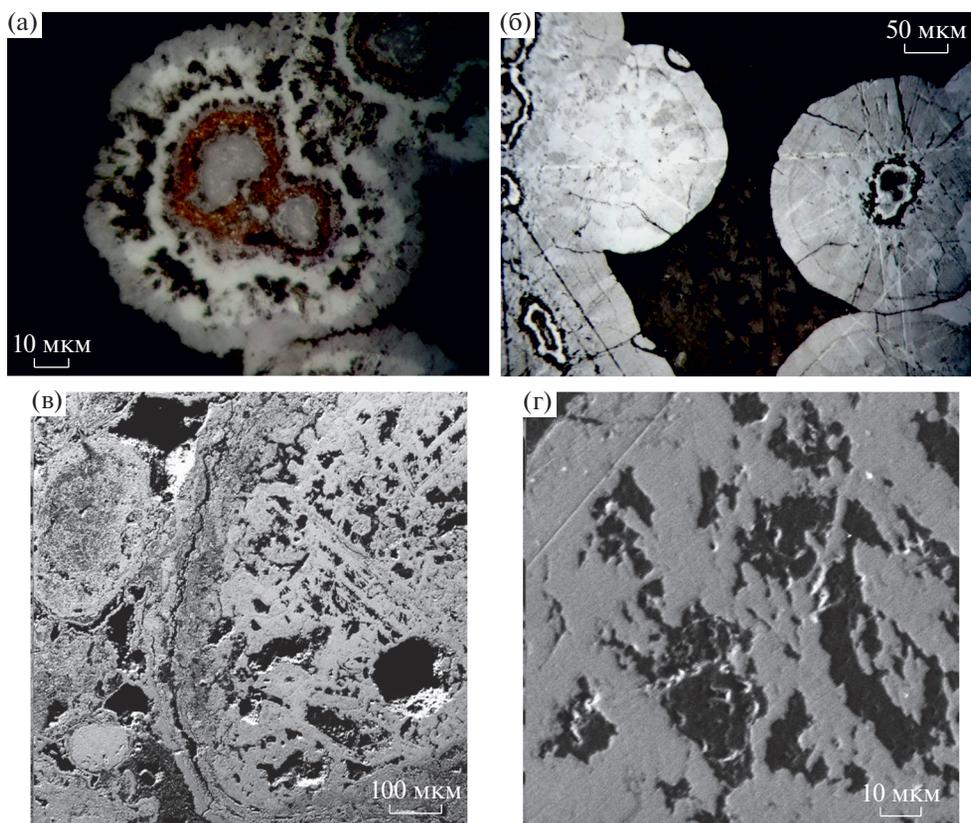


Рис. 4. Микрофотографии аншлифов бурых железняков с концентрически-зональными фестончатыми образованиями (а) и глобулярными выделениями гетита (б); BSE-изображения – фрагмент оолита с ядром, состоящим из гетита и заключенным в тонкозернистую гетитовую оболочку (в), и деталь строения гетитового ядра (г).

жающих пород. Наиболее активными мигрантами при этом являются глинозем, иногда также титан.

Пример месторождения Сеис Лагос подтверждает предполагаемую эффективность процесса жидкостного разделения коллоидной системы на марганцовистую и железистую фракции при формировании поверхностных фаций и возможность концентрирования марганцовистой голландитовой фазы до промышленно значимого уровня.

Особенностью поверхностных фаций является общее снижение в них концентраций редких металлов (Nb, TR) по сравнению со структурными корами. Это объясняется как ростом содержания окисного железа, так и значительным привносом ряда компонентов (Al_2O_3 и др.) из окружающих пород. Пример месторождения Сеис Лагос подтверждает эту закономерность для редкоземельных окислов. Что касается ниобия, то дополнительный привнос титана сопровождается и локальным ростом концентрации Nb, однако среднее содержание Nb в поверхностных фациях все же заметно ниже, чем в сопряженных с ними структурных корях.

Для решения вопроса о генезисе уникальных ультрабогатых редкометалльных руд Томторского месторождения необходимо отметить, что наиболее существенные особенности поверхностных фаций КВ карбонатитов – предельно высокие или близкие к ним содержания в них окисного железа, а также четкая тенденция к снижению содержания редких металлов – не свойственны томторским рудам. Весьма показательны также и то, что среди многочисленных месторождений КВ карбонатитов с развитыми поверхностными фациями отсутствуют образования, аналогичные уникальным рудам Томтора. Рассмотрим теперь некоторые характерные особенности ультрабогатых редкометалльных руд Томторского месторождения, которые играют ключевую роль в решении проблемы генезиса этих руд.

УЛЬТРАБОГАТЫЕ РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫЕ РУДЫ ТОМТОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ – РЕЗУЛЬТАТ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ЭПИГЕНЕЗА ПРОДУКТОВ ВЫВЕТРИВАНИЯ КАРБОНАТИТОВ

Уникальность Томторского месторождения, отсутствие аналогов среди месторождений КВ

Таблица 8. Химический состав поверхностных фаций, структурных кор выветривания и сидеритовых карбонатов (мас. %)

Компоненты	Поверхностные фации КВ					Структурные КВ		Сидеритовые карбонаты
	1	2	3	4	5	6	7	
SiO ₂	0.56	0.53	0.31	0.16	0.42	0.48	1.04	0.66
Al ₂ O ₃	1.95	1.70	2.51	0.47	0.40	0.33	0.46	1.17
Fe ₂ O ₃ (total)	77.63	80.87	74.23	85.59	57.76	82.40	82.22	52.46
MgO	не обн.	не обн.	0.01	0.01	не обн.	0.01	0.01	3.04
CaO	не обн.	не обн.	0.01	0.01	не обн.	0.01	0.01	0.22
Na ₂ O	0.02	не обн.	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
K ₂ O	0.01	не обн.	0.01	не обн.	0.02	0.03	0.01	0.06
TiO ₂	5.52	1.08	6.63	4.99	0.45	2.69	0.91	0.18
P ₂ O ₅	0.44	0.58	1.72	0.34	0.16	0.22	0.39	1.30
MnO	0.04	0.00	0.10	0.27	26.65	0.90	0.32	7.72
LOI*	10.10	9.93	10.33	5.30	8.72	9.15	10.96	—
CO ₂	—	—	—	—	—	—	—	24.38
BaO	0.04	0.04	0.09	0.06	3.23	0.23	0.11	4.28
Nb ₂ O ₅	1.59	0.89	1.76	0.99	0.22	1.97	1.34	0.15
La ₂ O ₃	0.04	0.07	0.15	0.03	0.02	0.10	0.12	0.86
Ce ₂ O ₃	0.15	0.19	0.35	0.26	0.74	0.48	1.16	—
Σ	98.07	95.90	98.24	98.46	98.80	98.99	99.07	96.48

Примечание. 1–5 – поверхностные фации: 1 – пизолитовые коры (среднее из 2 анализов), 2 – обломочные коры (среднее из 3 анализов), 3 – пятнистые коры (среднее из 3 анализов), 4 – оолитовые коры (среднее из 4 анализов), 5 – марганцовистые коры (среднее из 5 анализов); 6, 7 – структурные коры: 6 – красные охры (среднее из 2 анализов), 7 – бурые охры (среднее из 5 анализов); 8 – сидеритовые карбонаты (среднее из 4 анализов).

* – LOI = п.п.п.

лей. Грунтовые воды, фильтрующиеся через угленосные осадки, приобретают ярко выраженный восстановленный характер. Попадая в предельно окисленные железистые продукты выветривания, они становятся мощным фактором их эпигенетического преобразования, которое сопровождается эффективным остаточным концентрированием редких металлов за счет восстановления и выноса железа и марганца.

Восстановительный эпигенез железистых продуктов выветривания с развитием сопряженных процессов их осветления (оглеения) и сидеритизации хорошо известен благодаря фундаментальной работе А.И. Перельмана [1968] и исследованиям некоторых других авторов [Булгакова, 1967; Куземкина, 1962].

Для подобных образований, встречающихся в бокситовой формации, Г.И. Бушинский использовал термин “проточный диагенез”, вероятно более приемлемый для осадочных пород [Бушинский, 1971]. Этот термин применялся и при обсуждении генезиса огнеупорных глин, сформированных на элювиальных равнинах под торфя-

ными верховыми болотами. Для того чтобы подчеркнуть сходство этих процессов с условиями формирования уникальных томторских руд, для последних можно было бы использовать термин “проточный восстановительный эпигенез КВ карбонатов”.

Томторское месторождение – пример проявления восстановительного эпигенеза в КВ карбонатов, в которых он являлся высокоэффективным: поскольку высокие концентрации металлов, уже накопившиеся в КВ, были преобразованы в уникальные концентрации в породах зоны эпигенеза, не достигаемые в других типах месторождений.

В табл. 9 приведен средний химический состав пород, слагающих основные горизонты латеритного профиля выветривания карбонатов и продуктов их эпигенеза. Эпигенезу чаще всего подвергаются латеритные охры, но иногда, в эродированных участках кор выветривания, также и лимонит-франколитовые породы.

Горизонт богатых руд, или верхний осветленный горизонт зоны эпигенеза, представлен двумя

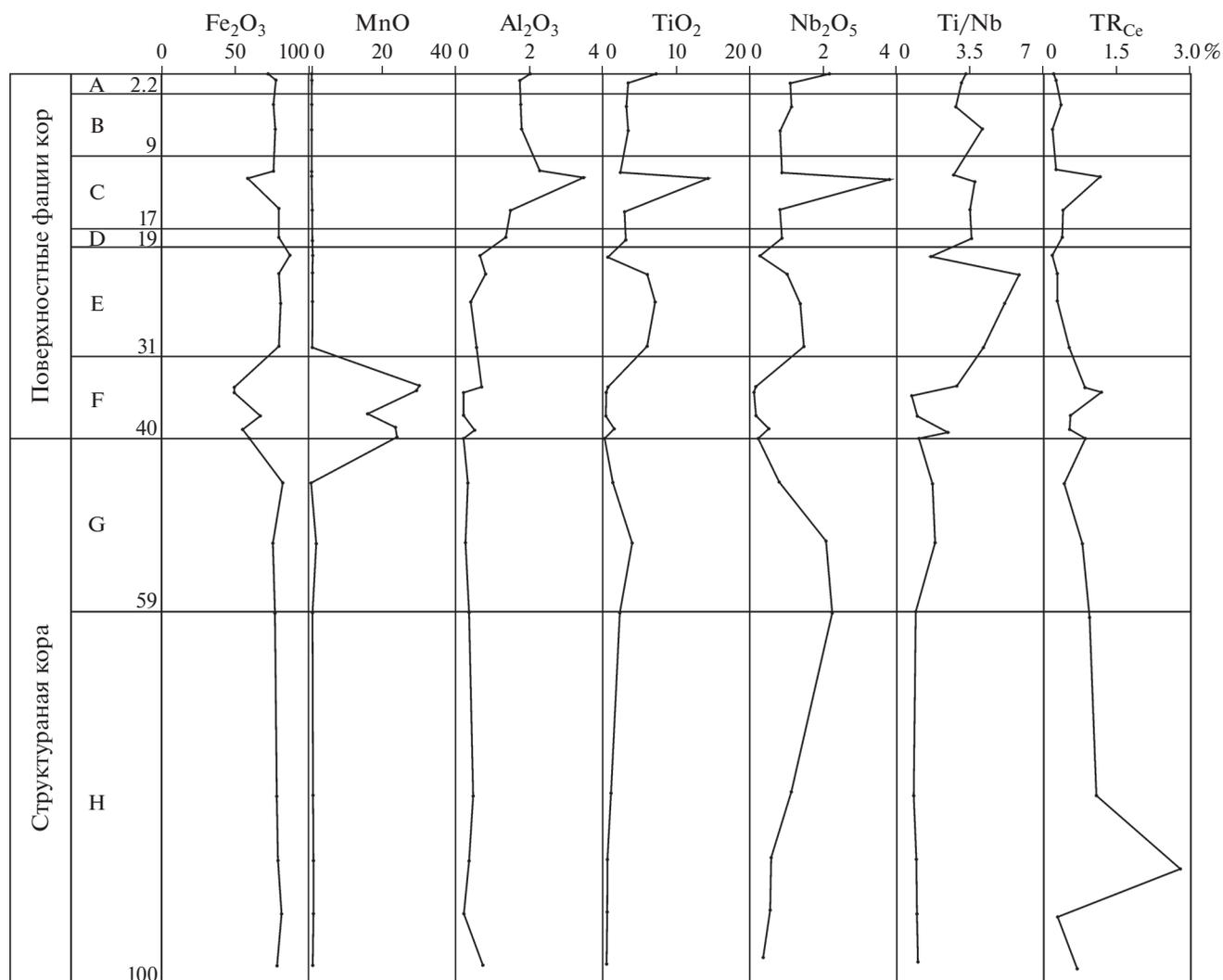


Рис. 6. Распределение главных химических компонентов и редких металлов, а также величины отношения Ti/Nb в поверхностных фациях и структурных корах выветривания сидеритовых карбонатитов месторождения Сеис Лагос (по [Giovannini, 2013]). Буквенные обозначения горизонтов соответствуют рис. 5.

главными минеральными типами руд – монацит-пироксеновыми и крандаллит-монацит-пироксеновыми (см. табл. 9, анализы 5, 6) рудами. К ним добавлены каолинит-крандаллит-пироксеновые породы (см. табл. 9, анализ 7), которые завершают один из главных процессов эпигенетического преобразования продуктов выветривания – привнос глинозема из пород, перекрывающих кору, который способствует прогрессирующей смене монацита крандаллитом и, наконец, каолинитом.

Второй главный тренд имеет более фундаментальное значение, поскольку определяется восстановительной обстановкой эпигенеза, и с ним связан существенный рост концентраций редких металлов в продуктах эпигенеза по сравнению с латеритными охрами. Он заключается в многократном понижении содержания окисного желе-

за в осветленных продуктах выветривания при одновременном относительном возрастании в них доли закисного железа. Последняя достигает своего максимума в пределах горизонта сидеритовых пород. Вынос восстановленных подвижных форм железа из осветленного горизонта является эффективным механизмом остаточного концентрирования инертных редких металлов (Nb, La, Ce, Y, Sc и др.).

Указанные тенденции изменения состава продуктов выветривания при эпигенезе имеют противоположную направленность. Доминирование тенденции к восстановлению и выносу железа создает благоприятные условия для концентрирования редких металлов, в то время как прогрессирующий привнос глинозема частично компенсирует уменьшение общего объема вещества при вы-

Таблица 9. Химический состав гипергенных продуктов латеритного профиля выветривания карбонатитов и их эпигенетически измененных разностей (мас. %)

Компоненты	Гипергенные продукты латеритного профиля КВ карбонатитов			Эпигенетически измененные продукты выветривания					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	3.82	7.44	35.98	8.70	5.88	9.42	23.96	3.92	8.82
TiO ₂	1.42	0.74	0.35	7.30	4.77	7.34	6.23	1.40	0.82
Al ₂ O ₃	1.66	0.72	0.62	15.25	5.13	17.83	25.36	2.55	0.84
Fe ₂ O ₃	49.72	24.99	31.54	9.01	11.54	8.36	5.34	30.63	20.40
FeO	5.46	3.49	2.41	5.90	10.54	4.72	0.71	19.72	3.53
MnO	4.64	2.72	1.49	0.61	1.48	0.38	0.17	4.30	2.96
MgO	0.72	0.66	0.28	0.25	0.26	0.24	0.26	0.80	0.75
CaO	5.93	27.45	8.91	3.04	3.49	2.92	2.44	5.36	27.34
K ₂ O	0.05	0.05	0.05	0.31	0.07	0.37	0.41	0.12	0.24
Na ₂ O	0.17	0.19	0.10	0.20	0.25	0.19	0.08	0.14	0.36
P ₂ O ₅	6.24	20.15	6.78	13.90	11.69	14.47	15.88	4.85	20.23
SO ₃	0.25	0.25	0.25	0.63	0.61	0.64	0.36	0.28	0.12
CO ₂	5.16	0.19	3.21	2.70	5.80	1.92	0.14	13.71	5.74
Nb ₂ O ₅	1.54	0.86	0.53	4.70	7.68	3.94	1.58	1.22	0.84
TR ₂ O ₃	4.50	1.80	1.12	10.72	17.64	9.08	4.85	—	—
Сумма	91.28	91.70	93.62	83.22	86.83	82.42	87.76	88.99	92.99

Примечание. 1–3 – гипергенные продукты латеритного профиля выветривания карбонатитов: 1 – лимонитовые охры (среднее из 32 ан.), 2 – лимонит-франколитовые породы (среднее из 24 ан.), 3 – лимонит-франколит-кварцевые породы (среднее из 12 ан.); 4–9 – эпигенетически измененные продукты выветривания: 4 – осветленные продукты выветривания или руды богатого горизонта (среднее из 64 ан.), 5 – пироклор-монацитовые руды (среднее из 22 ан.), 6 – пироклор-алюмофосфатные руды (среднее из 42 ан.), 7 – каолинит-крандаллитовые руды, 8 – лимонит-сидеритовые породы (среднее из 14 ан.), 9 – сидерит-франколитовые породы.

носе железа, что заметно ослабляет эффект остаточного концентрирования редких металлов.

Поведению компонентов при эпигенетических преобразованиях продуктов выветривания карбонатитов посвящен ряд специальных публикаций [Лапин, 1995; Лапин, Толстов, 2011]. Здесь приведем кривые распределения главных компонентов в зоне эпигенеза продуктов выветривания карбонатитов по результатам опробования одной из опорных буровых скважин (рис. 7). На рисунке изображен фрагмент разреза зоны гипергенеза кальцит-анкеритовых карбонатитов Томторского месторождения, включающий (сверху вниз): пермские угленосные осадки, перекрывающие коры выветривания и представленные преимущественно обломочным материалом каолинизированных нефелиновых сиенитов, снесенных с краевых частей массива; продукты восстановительного эпигенеза латеритных охр (осветленные охры, или ультрабогатые Nb–TR–Sc руды, и сидеритизированные охры); продукты латеритного выветривания карбонатитов (лимонитовые охры и лимонит-франколитовые породы).

При анализе распределения компонентов в этой части разреза, прежде всего, обратим внимание на различия в поведении компонентов в поверхностных фациях КВ и в процессах эпигенеза продуктов выветривания. Можно выделить несколько различающихся групп компонентов.

Компоненты первой группы – TiO₂ и Al₂O₃ – в наибольшей степени концентрируются в перекрывающих коры осадках и частично мигрируют из них в продукты эпигенеза.

Компоненты второй группы – Fe₂O₃ и FeO. Содержание окисного железа заметно возрастает на границе между перекрывающими коры выветривания осадками и продуктами эпигенеза КВ карбонатитов; затем оно вновькратно увеличивается при переходе к сидеритизированным и, особенно, неизменным латеритным охрам, что отражает процесс осветления (оглеения) в верхнем, наиболее продуктивном горизонте зоны эпигенеза латеритных охр. Содержание закисного железа становится значимым в верхнем осветленном горизонте зоны эпигенеза и достигает максимума в сопряженном с ним горизонте сидеритизированных охр. В целом, в зоне эпигенеза явно выражена

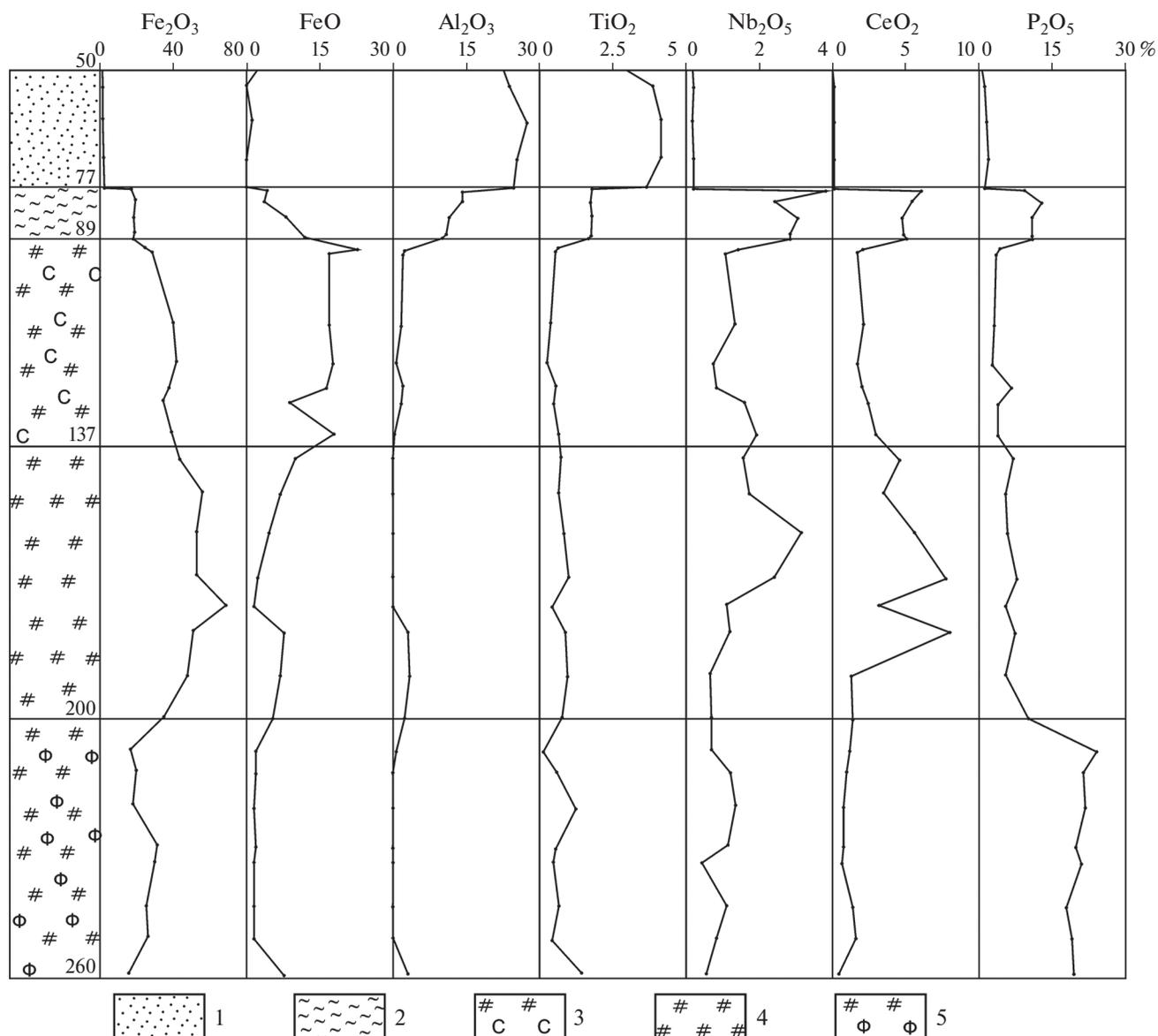


Рис. 7. Распределение главных химических компонентов и редких металлов в верхней части зоны гипергенеза карбонатитов Томторского месторождения, включающей перекрывающие коры пермские угленосные отложения (1), горизонты латеритных охр (4) и лимонит-франколитовых пород (5) и продукты восстановительного эпигенеза латеритных охр, представленные сидеритизированными (3) и осветленными (2) охрами. По результатам опробования одного из буровых пересечений зоны гипергенеза карбонатитов.

частичная замена окисного железа на закисное, что соответствует восстановительному характеру эпигенетического процесса. Как отмечалось выше, общее снижение суммарного содержания железа в верхнем горизонте зоны эпигенеза обеспечивает эффективное остаточное концентрирование в этом горизонте инертных редких металлов (Nb, TR и других).

Компоненты третьей группы – Nb₂O₅, TR₂O₃. Величины содержания редких металлов дают устойчивый максимум в верхнем осветленном горизонте зоны эпигенеза. Они резко падают в пе-

рекрывающих коры осадочных породах и снижаются, оставаясь достаточно высокими в продуктах выветривания карбонатитов. Обращает внимание тот факт, что ураганные содержания ниобия и церия в отдельных пробах латеритных охр превышают их концентрации в ультрабогатых рудах зоны эпигенеза. В целом, характер распределения редких элементов в приведенном фрагменте зоны гипергенеза карбонатитов согласуется с концепцией заимствования редких металлов из продуктов выветривания карбонатитов и их остаточного концентрирования в верхнем горизонте зоны

эпигенеза за счет выноса из него восстановленных форм железа и марганца.

Таким образом, приведенные данные о распределении породообразующих и редкометалльных рудных компонентов в гипергенном профиле Томторского месторождения (см. рис. 7) не подтверждают связи ультрабогатых комплексных руд этого месторождения с поверхностными фациями кор выветривания карбонатитов, но, наряду с другими аргументами [Лапин и др., 2019], убедительно свидетельствуют в пользу эпигенетической природы этих руд, которая обусловлена сменной окислительных условий гипергенеза на восстановительные.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты сравнения состава и строения поверхностных фаций КВ карбонатитов и уникальных ультрабогатых редкометалльных руд Томторского месторождения, выполненного для уточнения генетической интерпретации томторских руд, показали следующее.

В месторождениях КВ карбонатитов с развитыми поверхностными фациями отсутствуют аналоги ультрабогатых редкометалльных руд томторского типа.

Главные геохимические тенденции формирования поверхностных фаций КВ карбонатитов и ультрабогатых томторских руд имеют противоположную направленность. В поверхностных фациях четко проявлена тенденция к повышению содержания окисного железа при снижении концентрации редких металлов, тогда как формирование ультрабогатых руд Томтора сопровождается существенным снижением содержания окисного железа при росте относительной доли его закисной формы одновременно с эффективным остаточным концентрированием редких металлов.

Полученные результаты объясняют уникальность Томторского месторождения, открытого почти полвека назад, и отсутствие новых находок ультрабогатых руд томторского типа в многочисленных месторождениях латеритных КВ карбонатитов с хорошо развитыми поверхностными фациями. Как следует из приведенных данных, коры выветривания, сформировавшиеся на открытой поверхности, действительно не обеспечивают условий, необходимых для формирования ультрабогатых редкометалльных руд томторского типа. Формирование подобных руд требует участия дополнительных факторов, способных изменить геохимические тенденции, характерные для процессов гипергенного минералообразования. Результаты изучения Томторского месторождения свидетельствуют о том, что такими факторами являются: перекрытие кор выветривания более молодыми осадками, обогащенными

органическим углеродом, процессы углефикации, битуминизации органического вещества и переход к восстановительным условиям гипергенеза при воздействии на коры грунтовых вод, дренирующих угленосные отложения.

Положение об отсутствии аналогов томторских ультрабогатых руд, на наш взгляд, только отчасти является справедливым. Руды, аналогичные томторским, но в масштабах, которые едва ли могут иметь самостоятельное значение, встречаются в Чуктуконском месторождении на Чадобецком поднятии. В этом месторождении с типичным латеритным профилем выветривания кальцитовых и анкерит-кальцитовых карбонатитов верхняя поверхность кор осложнена большим количеством локальных эрозионных и усадочных депрессий, которые заполнены более молодыми бокситоносными осадками. В некоторых депрессиях в составе бокситоносных отложений встречаются пласты бурых углей, углистых и лигнитовых глин. Именно к этим и только к этим депрессиям приурочено развитие на охристых продуктах латеритного профиля горизонта ультрабогатых руд, по составу и содержанию редких металлов аналогичных томторским рудам. Мощность горизонта варьирует от 3–5 до 8 м, содержание Nb_2O_5 достигает 4–6%, TR_2O_3 – до 15–20%. Рудам сопутствует сопряженный горизонт сидеритизации латеритных охр.

Пример Чуктуконского месторождения наряду с приведенными выше данными о поверхностных фациях КВ карбонатитов не подтверждает гипотезу осадочного происхождения ультрабогатых руд Томторского месторождения (как “перетолженных” КВ), но убедительно свидетельствует в пользу концепции их образования в результате восстановительного эпигенеза продуктов латеритного выветривания карбонатитов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные данные подтверждают вывод о том, что образование ультрабогатых редкометалльных руд томторского типа – это результат сочетания целого ряда благоприятных факторов, обеспечивающих условия для суммирования и синэнергии рудоконцентрирующих эффектов последовательных процессов формирования продуктивных редкометалльных карбонатитов, их латеритного выветривания и, наконец, восстановительного эпигенеза продуктов выветривания. Как показывает практика, особую роль при этом играет остаточное концентрирование инертных редких металлов при выветривании карбонатитов и восстановительном эпигенезе продуктов выветривания, обусловленное выносом значительных объемов подвижных при этих процессах компонентов.

Так, коэффициенты концентрирования инертных редких металлов в латеритных охрах, по отношению к кальцитовым и анкерит-доломит-кальцитовым карбонатитам, варьируют от 4.0 до 7.0; аналогичные коэффициенты в осветленных продуктах восстановительного эпигенеза латеритных охр составляют от 1.5 до 4.5. Суммарное влияние этих процессов обеспечивает достижение уникальных параметров ультрабогатых руд томторского типа даже в случае исходного субстрата, близкого к параметрам обычных карбонатитов (Nb_2O_5 – около 0.2–0.4%; TR_2O_3 – около 1.0%).

Результаты проведенных исследований, определяющие в качестве необходимого условия формирования ультрабогатых руд томторского типа участие восстановительного эпигенеза перекрытых КВ карбонатитов, существенно конкретизируют прогнозно-поисковые критерии для руд этого типа. Это создает перспективы открытия новых месторождений ультрабогатых редкометалльных руд.

Полученные результаты изучения поверхностных фаций КВ карбонатитов имеют и самостоятельное значение. Исследование Чуктуконского месторождения выявило преобладание коллоидных структур среди поверхностных образований на КВ карбонатитов, которые формировались при доминирующей роли коллоидных растворов. При этом в марганцово-железистых бурых железняках установлено широкое развитие процесса жидкостного разделения коллоидного раствора на марганцовистую и железистую фракции. Выполненные А. Жиованнини [Giovannini, 2013] детальные исследования месторождения КВ сидеритовых карбонатитов Сеис Лагос с мощными, хорошо сохранившимися поверхностными фациями не только подтвердили известные закономерности развития поверхностных фаций, но и дополнили их новыми элементами.

Выявлены четкие признаки границы между поверхностными фациями и структурными КВ карбонатитов. Эта граница фиксируется по резкому переходу от выдержанных, стабильных трендов изменения содержаний и отношений компонентов в структурных корах выветривания к повышенной вариативности этих параметров в поверхностных фациях.

Подтверждена повышенная миграция компонентов коллоидных растворов из окружающих пород при формировании поверхностных фаций кор выветривания карбонатитов. Наиболее активными мигрантами являются глинозем и, в некоторых случаях, титан. Коллоидной миграции титана сопутствует некоторое количество ниобия, что может ослаблять тенденцию к снижению общего содержания редких металлов в поверхностных фациях кор выветривания.

Пример месторождения Сеис Лагос дал дополнительные аргументы в пользу жидкостного разделения марганцово-железистых коллоидных растворов на марганцовистую и железистую фракции и показал возможность реализации этого процесса в геологических масштабах, которые допускают концентрирование марганцовистой фазы до промышленно значимого уровня.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Булгакова А.П.* Наложённая гипергенная минерализация в богатых железных рудах Лебединского месторождения КМА // *Коры выветривания*. Вып. 8. М.: Наука, 1967. С. 50–66.
- Бушинский Г.И.* Геология бокситов. М.: Недра, 1971. 366 с.
- Коноплев А.Д., Кузьмин В.И., Эпштейн Е.М. и др.* Геолого-минералогические особенности делювиально-озерной россыпи на коре выветривания редкометалльных карбонатитов // *Минералогия и геохимия россыпей*. М.: Наука, 1992. С. 111–113.
- Кузнецкина Е.М.* О некоторых вторичных процессах в мезозойских бокситах Северо-Западного Тургай // *Коры выветривания*. Выпуск 4. М.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 195–209.
- Лапин А.В.* Типы месторождений в корах выветривания карбонатитов // *Геология руд. месторождений*. 1988. № 4. С. 76–87.
- Лапин А.В.* Дифференциальная подвижность компонентов в зоне гипергенеза как ведущий фактор формирования месторождений кор выветривания карбонатитов // *Геохимия*. 1995. Т. 33. № 7. С. 933–949
- Лапин А.В., Куликова И.М.* Коллоидное минералообразование в корах выветривания карбонатитов // *Новые данные по минералогии и геохимии редкометалльных месторождений* / Отв. ред. А.А. Кременецкий. М.: ИМГРЭ, 2017. С. 52–86.
- Лапин А.В., Толстов А.В.* Месторождения кор выветривания карбонатитов. М.: Наука, 1995. 208 с.
- Лапин А.В., Толстов А.В.* Минералогия кор выветривания карбонатитов. М.: ГЕОКАРТ, ГЕОС, 2011. 308 с.
- Лапин А.В., Толстов А.В., Куликова И.М.* Уникальные ультрабогатые редкометалльные руды месторождения Томтор и проблема их генезиса // *Минералогия*. 2019. Т. 5. № 3. С. 70–87.
- Малеев М.Н.* Самоорганизация глобулярных структур минералов неотокита, гетита, гематита, опала и гиалита // *Тезисы конференции “300-летие Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН”*. М.: Минмузей РАН, 2016.
- Перельман А.И.* Геохимия эпигенетических процессов. М.: Недра, 1968. 321 с.
- Giovannini A.L.* Contribuição à geologia e geoquímica do carbonatito e da jazida (Nb, ETR) de Seis Lagos (Amazonas) / *Dissertação do título de Mestre em Geociências, área de concentração em Geoquímica*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013. 128 p.
- Giovannini A.L., Bastos Neto A.C., Porto C.G., Pereira V.P., Takehara L., Barbanson L., Bastos Pedro H.S.* Mineralogy and geochemistry of laterites from the Morro dos Seis Lagos

Nb (Ti, REE) deposit (Amazonas, Brazil) // *Ore Geol. Rev.* 2017. V. 88. P. 461–480.

Gomes C.B., Ruberti E., Morbidello L. Carbonatite complexes from Brazil. A review // *J. S. Amer. Earth. Sci.* 1990. V. 3(1). P. 51–63.

Henke B.L., Gullikson E.M., Davis J.C. X-ray interactions: photoabsorption, scattering, transmission, and reflections

at $E = 50\text{--}30000$ eV, $Z = 1\text{--}92$ // *Atomic Data and Nuclear Data Tables.* 1993. V. 54. P. 181–342.

Issler R.S. The Seis Lagos carbonatite complex // *Proceedings of the First International Symposium on Carbonatites*, 20–27 June, 1976. Poços de Caldas, Minas Gerais, Brazil, 1978. P. 233–240.

Surface Formations on the Weathering Crusts of Carbonatites (To Genesis Problem of Unique Rare-Metal Ores from Tomtor Deposit, Russia)

A. V. Lapin¹, *, I. M. Kulikova¹, **, O. A. Nabelkin¹

¹*Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystalchemistry of rare elements, Veresaeva str., 15, Moscow, 121357 Russia*

**e-mail: lapin@imgre.ru*

***e-mail: imkulikova@gmail.com*

A comparative analysis of composition and structure of the surface facies of carbonatites weathering crusts from the Chucktukon (Russia) and Seis Lagos (Brazil) deposits and ultra-rich rare-metal ores from Tomtor deposit (Russia) is presented. It is shown that the main geochemical trends in the formation of ultra-rich rare-metal ores of the Tomtor type and weathering crusts surface facies are opposite. The obtained results do not confirm the genetic link between the unique Tomtor ores and the surface facies of the weathering crusts of carbonatites, but serve as evidence of their later formation in connection with the reductive epigenesis of the carbonatite weathering products under the influence of solutions, draining the overlying coal-bearing deposits. Wide distribution of the phenomena of colloidal solution liquid layering into manganese and ferruginous fractions was established for the first time for surface facies of carbonatites weathering crusts, and an active lateral colloidal migration of titanium from the host rocks was revealed.

Keywords: carbonatites, weathering crusts, surface facies, epigenesis.