

УДК 553.493.5+553.493

УНИКАЛЬНАЯ ПОЛИКОМПОНЕНТНАЯ РУДНАЯ ФОРМАЦИЯ КОР ВЫВЕТРИВАНИЯ КАРБОНАТИТОВ: НОВЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ — Fe, Mn, Ti, V

А.В. Лапин¹, А.В. Толстов^{2,3}, О.А. Набелкин¹, И.М. Куликова¹

¹ Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов, 121357, Москва, ул. Вересаева, 15, Россия

² Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

³ Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677000, Якутск, просп. Ленина, 39, Россия

На основании результатов изучения месторождений Чуктукон и Томтор (Россия), Сеиш Лагос (Бразилия) показана реальная возможность расширения сырьевого потенциала кор выветривания карбонатитов за счет нетрадиционных типов руд и рудных компонентов, включая Fe, Mn, Ti и V. Выявлено влияние некоторых новых факторов рудоносности кор выветривания карбонатитов, таких как восстановительный эпигенез продуктов выветривания, особенности состава и рудоносности карбонатитового субстрата, роль процессов латеритной миграции вещества, а также жидкостного фракционирования коллоидных растворов в поверхностных фациях коры. Получены дополнительные аргументы в пользу представления о корах выветривания карбонатитов как уникальной поликомпонентной рудной формации, сырьевой потенциал которой, кроме традиционных Nb, La, Ce и P, включает легкие и тяжелые лантаноиды, Y, Sc, Fe, Mn, Ti, V, Sr, Ba, Al и Ga.

Коры выветривания карбонатитов, факторы рудоносности, железо, марганец, титан, ванадий, поверхностные фации, латеритная миграция вещества, фракционирование коллоидов

UNIQUE MULTICOMPONENT Fe, Mn, Ti, V MINERALIZATION IN LATERITE PROFILES OF WEATHERED CARBONATITES: NEW PROSPECTS

A.V. Lapin, A.V. Tolstov, O.A. Nabelkin, I.M. Kulikova

Data from the Chuktukon, Tomtor (Russia), and Morro dos Seis Lagos (Brazil) mineral deposits demonstrate that the mineral potential of laterite produced by weathering of carbonatites can be extended with Fe, Mn, Ti, and V, which are commonly beyond the conventional ore production. Several previously unknown factors have been revealed, which control the mineral potential of laterite: reduction of weathering products, composition and ore contents of carbonatite, lateral and vertical migration of elements, as well as liquid fractionation of colloids in upper zones of weathering profiles. The reported study provides additional arguments for the idea that laterite derived from carbonatites stores unique multicomponent mineralization of heavy lanthanides, Y, Sc, Fe, Mn, Ti, V, Sr, Ba, Al, and Ga, besides the common target commodities of Nb, La, Ce, and P.

Weathering of carbonatite, mineral potential, Fe, Mn, Ti, V, surface zone, migration of elements in laterite profiles, fractionation of colloids

ВВЕДЕНИЕ

Коры выветривания карбонатитов (КВК) представляют собой эффективную рудоконцентрирующую геохимическую систему. С ними связана целая серия уникальных по своим параметрам месторождений Nb, REE, Y, Sc, P и некоторых других компонентов. Как было установлено, причина повышенной продуктивности и аномально высоких параметров месторождений этой рудной формации заключается в ярко выраженной геохимической и рудной специализации карбонатитового субстрата (Nb, La, Ce, P и др.). Также весьма эффективны рудоконцентрирующие механизмы, действующие в корах выветривания карбонатитов и ведущие к резкому повышению параметров оруденения первичных пород [Лапин, Толстов, 1991, 1995, 2011].

Как показывает сравнительный анализ месторождений КВК [Лапин, 1988], эта рудная формация неоднородна и в зависимости от условий гипергенеза в ней могут быть выделены три главных типа месторождений, различающихся по составу и характеру рудоносности:

- 1) месторождения кор выветривания гидрослюдистой фации (Белозиминское, Татарское I и др.);
- 2) месторождения кор выветривания латеритной фации (Чуктукон, Араша, Татарское II, Маунт-Вельд и др.);
- 3) месторождения эпигенетически измененных латеритных кор выветривания карбонатитов (Томтор, отдельные участки Чуктуконского месторождения).

© Лапин А.В., Толстов А.В., Набелкин О.А., Куликова И.М., 2024

✉ e-mail: tols61@mail.ru

Месторождения первых двух типов формируются в обычной для процессов выветривания окислительной обстановке и различаются между собой интенсивностью гипергенных преобразований, зависящих, в свою очередь, от начальной кислотности вод, более высокой в условиях латеритной фации. Месторождения третьего типа имеют более сложную историю формирования, которая характеризуется сменой этапов гипергенеза и переходом от окислительных условий поверхностного выветривания к восстановительным — на эпигенетическом этапе. Геологическая ситуация, определяющая смену этапов гипергенеза и переход от окислительных условий к восстановительным, возникает в тех случаях, когда коры, сформировавшиеся в окислительной обстановке, перекрываются более молодыми угленосными отложениями и начинают подвергаться воздействию восстановленных бескислородных вод.

Как было показано ранее [Кравченко и др., 1990; Лапин, Толстов, 1991; Лапин, Толстов, 1995; Лазарева и др., 2015], главный и наиболее универсальный рудоконцентрирующий механизм, который реализуется в различных фациальных условиях выветривания (как в латеритной, так и в гидрослюдистой фации) и в различных гипергенных обстановках — окислительной и восстановительной, — это механизм остаточного накопления инертных рудных компонентов, связанный с растворением и выносом подвижных компонентов субстрата. Несмотря на универсальность этого механизма, его проявления весьма специфичны в каждом из фациальных типов кор выветривания, а также и на окислительном, и восстановительном этапах гипергенеза [Лапин, 1995].

В условиях гидрослюдистой фации с более низкой начальной кислотностью вод рудоконцентрирующий эффект обеспечивается только за счет растворения и выноса карбонатов, в то время как силикатные и фосфатные компоненты карбонатитов сохраняют устойчивость и накапливаются в остаточных продуктах. В условиях латеритной фации рудоконцентрирующий эффект значительно усиливается, поскольку при более высокой начальной кислотности вод становятся неустойчивыми и выносятся не только карбонаты, но силикаты и апатит. При этом остаточное концентрирование испытывают наиболее устойчивые редкометалльные и редкоземельные компоненты (Nb, La, Ce, Y и др.), а также легкогидролизуемые элементы, такие как Fe и Mn.

Важно, что в остаточных продуктах выветривания накапливаются не только рудные компоненты, имеющие собственные минеральные формы (пироклор, колумбит и др.), но и те компоненты, которые присутствуют в карбонатитах в виде изоморфной примеси в растворимой карбонатной и иных формах. К ним относятся лантаноиды, иттрий, скандий и другие полезные компоненты. Благодаря этому, рудный комплекс карбонатитов обогащается новыми компонентами, а интенсивность оруденения существенно возрастает.

Из-за различий в соотношении масс инертных и подвижных компонентов степень концентрирования рудных компонентов в остаточных продуктах гидрослюдистой и латеритной фаций существенно отличается. Так, в остаточных охрах гидрослюдистой фации она обычно составляет от двух до четырех, в то время как в латеритных охрах она значительно выше и варьирует от четырех до восьми. Соответственно, в рудах, представленных остаточными охрами месторождений гидрослюдистой фации, среднее содержание Nb_2O_5 обычно находится в пределах 0.5—0.7 %, а в охристых рудах месторождений латеритной фации оно варьирует от 1.5 до 2.8 % и более.

Механизм остаточного накопления инертных рудных компонентов за счет выноса подвижных наиболее эффективен в корах выветривания, сформировавшихся в течение двух последовательно проявленных этапов гипергенеза — окислительного и восстановительного. Именно с такими корах связаны уникальные сверхбогатые комплексные редкометалльные руды томторского типа. Аномально высокая продуктивность руд этого типа обусловлена суммированием рудоконцентрирующих эффектов двух этапов гипергенеза — окислительного этапа поверхностного выветривания и восстановительного эпигенетического этапа, который устанавливается после перекрытия кор более молодыми угленосными осадками. Особый синэргетический эффект последовательного проявления окислительного и восстановительного этапов гипергенеза достигается благодаря тому, что железо и марганец, инертные на первом этапе и накапливающиеся до предельно высоких концентраций, на эпигенетическом этапе восстанавливаются, в результате чего становятся подвижными и выносятся, обеспечивая повторное резкое концентрирование сохраняющих инертность редких металлов. Суммарная степень концентрирования редких металлов (Nb, Ta, La, Ce, Pr, Nd, Y, Sc и др.) в рудах этого типа по отношению к исходным карбонатитам достигает 15—20-кратной величины. Соответственно, в рудах томторского типа средние содержания Nb_2O_5 варьируют от 3—4 до 6 %, в отдельных блоках достигая до 12 %, а средние содержания редкоземельных оксидов (РЗО) составляют 10—15 %, достигая в отдельных блоках 20 % и более.

Второй главный гипергенный механизм наращивания рудного потенциала карбонатитовых комплексов касается перспектив их фосфатного оруденения. Этот механизм реализуется при формировании латеритного профиля выветривания карбонатитов, особенностью которого является инверсионный характер зональности и развитие на глубоких горизонтах профиля зоны вторичного фосфатного обогащения за счет переотложения фосфора, вынесенного из верхних горизонтов коры выветривания. В ре-

зультате этого при латеритном выветривании карбонатитов, которые содержат обычную апатитовую минерализацию (около 3—4 % P_2O_5) и не представляют практического интереса, формируются богатые остаточно-инфильтрационные и инфильтрационные апатит-франколитовые и лимонит-франколитовые руды с содержанием более 15—20 % P_2O_5 , имеющие важное промышленное значение.

Рассмотренные эффективные рудоконцентрирующие геохимические механизмы определяют высокую продуктивность КВК на главные рудные компоненты — Nb, PЗО, Y, Sc и P, и формирование ряда уникальных месторождений, таких как Араша (Nb), Маунт-Вельд (Nb, Ta, La, Ce), Ковдор (P_2O_5). Вместе с тем в последнее время появились новые объекты, существенно отличающиеся высокими концентрациями других нетрадиционных для месторождений КВК компонентов, накопление которых связано с некоторыми особыми условиями функционирования зоны гипергенеза карбонатитов либо со спецификой первичного карбонатитового субстрата. К таким компонентам, имеющим хорошие промышленные перспективы, относятся Fe, Mn, Ti и V. На примере новых перспективных объектов, таких как Чуктукон и Томтор (Россия) и Сеиш Лагос (Бразилия), ниже рассматриваются особенности распределения этих компонентов в главных типах месторождений КВК с акцентом на условиях их концентрирования. Это позволит существенно расширить рудный комплекс месторождений КВК и наметить новые дополнительные факторы концентрирования полезных компонентов этой рудной формации.

ЖЕЛЕЗО

Известно, что с карбонатитовым этапом связано формирование крупных промышленных бадделлит-апатит-магнетитовых месторождений (Ковдор, Палабора и др.), которые формировались в результате раннего процесса фракционирования рудных компонентов карбонатитов. Благодаря этому, железорудный потенциал коренных пород карбонатитового этапа оценивается достаточно высоко. Сами карбонатиты эволюционируют в направлении возрастания железистости порообразующих карбонатов от кальцитовых к анкерит-кальцитовым, анкеритовым и сидеритовым разновидностям. В целом можно констатировать, что коренные породы карбонатитового этапа обладают значительным потенциалом для формирования в их корах выветривания высоких концентраций Fe и сопутствующих элементов — Mn, Ti и V.

В продуктах выветривания карбонатитов оксиды железа являются главными химическими компонентами, как правило, количественно преобладающими над другими компонентами. По преобладающему составу коры выветривания карбонатитов относятся к группе фосфатно-железистой формации. Особая роль оксида железа в продуктах выветривания карбонатитов обусловлена тем, что железо, присутствующее в карбонатитах в различных минеральных формах (оксиды, сульфиды, силикаты, карбонаты и др.), в поверхностных условиях легко окисляется, гидролизует и осаждается *in situ* в виде оксидов и гидроксидов. Это и определяет доминирующее инертное поведение железа в зоне гипергенеза и его накопление в остаточных продуктах выветривания. Как было отмечено выше, степень концентрирования инертных компонентов в остаточных продуктах выветривания зависит от соотношения массовых количеств инертных и подвижных компонентов. Поэтому содержание оксидов железа в остаточных продуктах гидрослюдистой фации выветривания кальцитовых и анкерит-кальцитовых карбонатитов значительно ниже, чем в продуктах более интенсивного латеритного выветривания (13—31 и 46.5—63.0 % соответственно). Содержание оксидов железа в продуктах выветривания карбонатитов зависит и от железистости исходных пород. Так, в охристых продуктах латеритного выветривания сидеритовых карбонатитов месторождения Сеиш Лагос содержание оксидов железа повышается до 78—82 %. Несмотря на сравнительно высокие содержания оксида Fe в остаточных латеритных охрах, их тонкодисперсное строение и наличие существенной примеси Si, Al и P в большинстве месторождений не позволяет ни эффективно обогащать эти руды по Fe, ни непосредственно использовать их в качестве природно-легированного (Nb, La, Ce и др.) металлургического сырья [Баранов и др., 2018; Баранов, Толстов, 2022].

Вместе с тем среди месторождений КВК в последнее время удалось выделить особый тип рудных объектов, отличающихся исключительно благоприятным соотношением концентраций доминирующих оксидов железа и второстепенных примесей кремнезема, глинозема и фосфора. Примером может служить месторождение латеритных кор выветривания сидеритовых карбонатитов Сеиш Лагос (Бразилия). Коры выветривания этого месторождения, образующиеся по поздним феррокарбонатитам, наследуют характерные для них низкие концентрации алюмосиликатных и фосфатных компонентов. Структурные коры выветривания этого месторождения отличаются исключительно высокими, близкими к предельному, содержаниями оксидов Fe при относительно низких концентрациях примесных компонентов (Table 1, см. дополнительные материалы, https://sibran.ru/journals/Suppl_Lapin_206.pdf). Эти руды не требуют дополнительного обогащения по Fe и после агломерации могут быть использованы в качестве металлургического сырья. Технологические исследования, выполненные компанией Геологической службы Бразилии (CPRM), показали, что природный состав латеритных руд месторождения Сеиш Ла-

гос позволяет применить прямую восстановительную плавку этих руд для получения низколегированных сталей наиболее экономичным способом. Более подробные сведения о месторождении Сеиш Лагос приводятся в последующих разделах, посвященных месторождениям марганца и титана.

Что касается месторождений эпигенетически измененных кор выветривания карбонатитов, то процессы восстановительного эпигенеза приводят к перераспределению железа с развитием эпигенетической зональности. Как уже отмечалось, при эпигенетическом преобразовании кор выветривания, перекрытых угленосными отложениями, железо охристых продуктов восстанавливается, становится подвижным и выносится из верхнего осветленного горизонта зоны эпигенеза, переотлагаясь затем в виде сидерита в сопряженном нижнем горизонте этой зоны. Химический состав латеритных охр и зональных продуктов их эпигенеза — осветления и сидеритизации — приводится в Table 2 (см. доп. материалы).

В итоге восстановительный эпигенез кор выветривания становится мощным рудоконцентрирующим фактором для тех компонентов (Nb, La, Ce, Y, Sc, Ti, V и др.), которые сохраняют инертность и испытывают остаточное накопление за счет выноса Fe из верхнего горизонта зоны эпигенеза продуктов выветривания [Лалин, Толстов, 1991; Игнатов и др., 2022].

МАРГАНЕЦ

Близость химических свойств марганца и железа определяет общее сходство их геохимического поведения в процессе выветривания карбонатитов. В окислительных условиях поверхностного выветривания марганец и железо легко гидролизуются и накапливаются, занимая доминирующее положение в остаточных охристых продуктах.

При этом железо и марганец присутствуют в остаточных продуктах в самостоятельных минеральных формах (железо — в форме гетита, гидрогетита и гематита, марганец — в форме псиломелана, голландита, рамселлита и др. минералов) и нередко в локальных участках латеритного профиля выветривания обнаруживают обратные тенденции распределения (рис. 1). Примечательно, что распределение марганца в остаточных охристых продуктах выветривания во многих случаях прямо коррелируется с распределением бария (рис. 2), что указывает на преобладающую роль в породах единой минеральной

формы этих компонентов. Практика показывает, что их общим минералом преимущественно является соединение из группы голландита. Тесное родство гипергенных аморфных минералов марганца отмечалось и раньше [Слукин, 1973].

Тенденция к конкуренции Fe и Mn и их дисгармоничному распределению в остаточных продуктах профиля выветривания карбонатитов достигает максимума и преобразуется в антагонистические отношения компонентов при включении механизма разделения и пространственного обособления этих компонентов. Такой механизм был впервые установлен недавно в поверхностных фациях латеритных кор выветривания

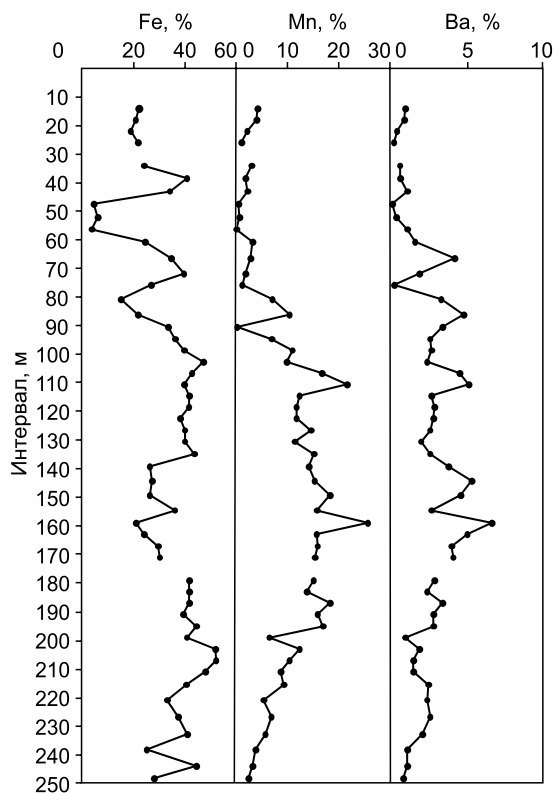


Рис. 1. Распределение железа, марганца и бария в верхней части профиля латеритного выветривания карбонатитов, по данным опробования одной из буровых скважин месторождения Чуктукон.

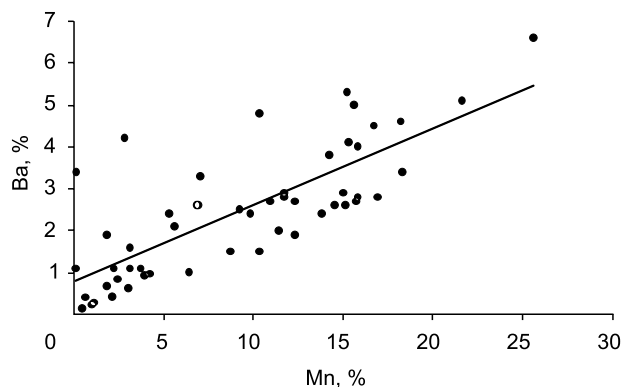


Рис. 2. Зависимость между содержаниями марганца и бария в латеритных охрах, по данным опробования одной из буровых скважин месторождения Чуктукон.

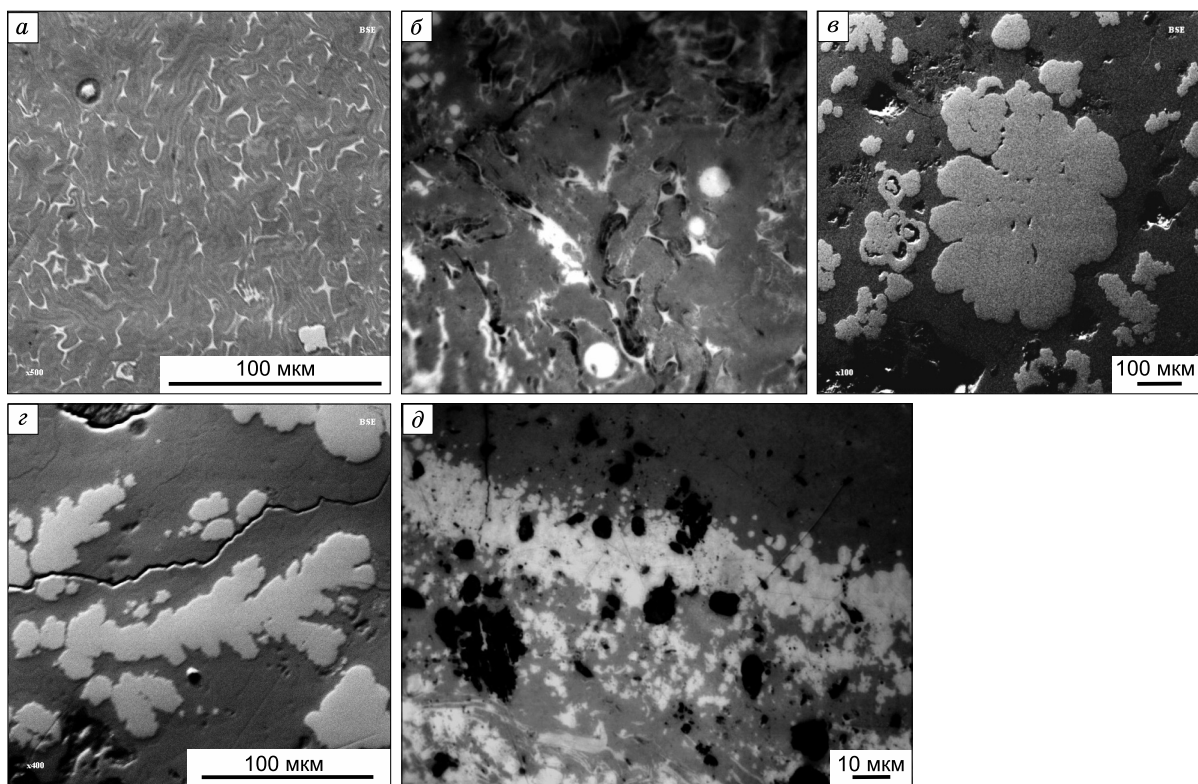


Рис. 3. Структуры жидкостного разделения Mn-Fe бурых железняков на марганцовистую (светлая) и железистую (темная) фазы:

a, б — серповидные выделения марганцовистой фазы (голландита) разделяют округлые каплевидные обособления железистой гетитовой фазы; видны отдельные шаровидные обособления голландитовой фазы; *в, з* — 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 гравитационно стягиваются в сплошные прослои. PCMA, BSE-изображение, массив Чадобец.

анкерит-кальцитовых карбонатитов Чуктуконского месторождения на Чадобецком поднятии (юг Сибирской платформы, Россия). Здесь обнаружено явление жидкостного фракционирования коллоидного раствора на марганцевую и железистую фазы, которое может лежать в основе процесса разделения и селективного концентрирования железа и марганца в корах выветривания карбонатитов [Лапин и др., 2021]. Примеры структур, иллюстрирующих подобное явление жидкостной несмешиваемости коллоидного раствора, приведены на рис. 3.

Доминирующая железистая гетитовая фаза обособляется в форме шаровидных капель, промежутки между которыми заполняет пленочная интерстициальная марганцовистая фаза голландитового состава (см. рис. 3, *a, б*). По мере увеличения марганцовистой фазы вначале появляются ее мелкие шаровидные обособления, которые затем сливаются в агрегаты и неправильные скопления (см. рис. 3, *в, з*). Составы марганцовистой и железистой фаз, образующихся в результате жидкостной несмешиваемости коллоидного раствора, приведены в табл. 3 (см. доп. материалы). Иногда жидкостное расслоение коллоидного раствора проявляется также в виде тонкой эмульсионной вкрапленности марганцовистой фазы в матрице гетитового состава, укрупнении эмульсии и стягивания ее в сплошные прослои марганцовистой фазы (см. рис. 3, *д*).

Выявленный механизм разделения железа и марганца в коллоидных растворах кор выветривания карбонатитов позволяет прогнозировать возможность появления практически значимых концентраций марганца, обусловленных этим механизмом. Подобный прогноз получил подтверждение в открытом сравнительно недавно бразильском месторождении Сеиш Лагос. Комплекс Сеиш Лагос площадью 16 км² состоит из трех тел округлой формы диаметром 5.50; 0.75 и 0.50 км [Gomes et al., 1990]. Комплекс преимущественно сложен феррокарбонатитами при подчиненном развитии бефорситов и сецитов. Главные минералы феррокарбонатитов — сидерит и барит, породы содержат горсейскит, пирохлор и бастнезит [Giovannini et al., 2017]. На карбонатитах развиты латеритные коры выветривания, мощность

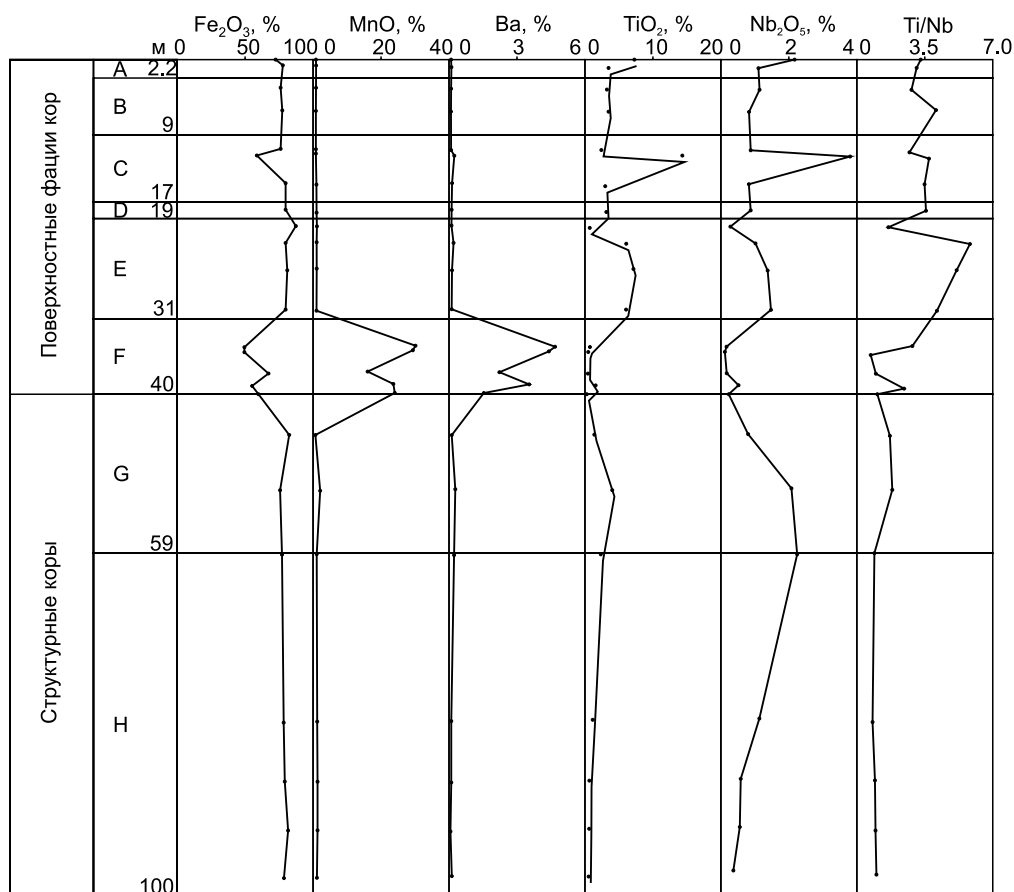


Рис. 4. Распределение главных компонентов и редких металлов, а также отношений Ti/Nb в поверхностных фациях и структурных корах выветривания сидеритовых карбонатитов месторождения Сеиш Лагос, по [Giovannini, 2013].

Буквенные обозначения горизонтов приведены в тексте.

которых достигает 450 м [Issler, 1976]. В корах выветривания оконтурены значительные ресурсы Ti-Nb руд со средними содержаниями Nb_2O_5 2.85 %, главными рудными минералами этих руд являются Nb-рутил и Nb-брукит.

Детальные исследования верхней части профиля выветривания сидеритовых карбонатитов (до глубины 100 м) недавно выполнены А. Жиованини [Giovannini, 2013; Giovannini et al., 2017].

Согласно нашей интерпретации этих результатов [Лапин и др., 2021], нижняя часть вскрытой бурением коры выветривания (от 40 до 100 м ниже поверхности) сложена структурными кора́ми, которые представлены красными и бурыми охрами, состоящими из гетита (75 %) и гематита (25 %) с примесью флоренсита, церианита, Nb-рутила и Nb-брукита; Се-пирохлор присутствует на глубинах свыше 79 м. Верхние 40 м разреза представлены разнообразными по составу и структуре поверхностными фациями кор выветривания карбонатитов. Среди поверхностных фаций кор выветривания выделяются сверху вниз следующие горизонты (рис. 4):

- 1) пизолитовые коры (горизонт А, мощность горизонта 2.2 м);
- 2) обломочные коры (горизонты В и D, 6.80 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).

В основании поверхностных фаций, сходных по валовому химическому составу с железистыми охрами структурных кор выветривания, низов разреза, располагаются горизонты марганцовистых пород (G, H), состоящих преимущественно из голландита, гетита и гематита с примесью церианита и спорадическим присутствием пиролюзита. Химический состав марганцовистых пород приведен в Table 1 (ан. 5), состав главного минерала марганца показан в Table 4 (см. доп. материалы).

График распределения железа, марганца и бария в верхней части латеритного профиля выветривания сидеритовых карбонатитов месторождения Сеиш Лагос приведен на рис. 4. Он свидетельствует о том, что выявленное ранее разделение коллоидных растворов зоны гипергенеза карбонатитов на марганцовистую и железистую фракции [Слепцов и др., 2019; Лапин и др., 2021] в определенных условиях сопровождается концентрированием марганца с образованием многометровых горизонтов марганцевых руд, которые могут иметь практическое значение. Гармоничное соотношение кривых распределения Mn и Ba на графике (см. рис. 4), соответствует преимущественно голландитовой минеральной форме марганца в марганцовистом рудном горизонте.

В пределах Томторского рудного поля высокие концентрации марганца впервые были отмечены геологами Центральной комплексной тематической экспедиции (ЦКТЭ) ПГО «Якутскгеология» А.Н. Орловым и Н.А. Москвиным в керне скв. D1 НПО «Севморгео». Впоследствии эта скважина была продублирована другой выработкой (скв. № 3665), которая подтвердила полученные первые результаты высоких содержаний марганца в карбонатизированных корах выветривания (на уровне 20—30 % MnO) на 30-метровый интервал (Table 5, см. доп. материалы) [Энтин и др., 1990].

Подводя итог анализа поведения Mn в КВК, отметим следующие наиболее существенные особенности. Во-первых, содержание Mn в корах выветривания зависит от его концентрации в породах субстрата, которая возрастает в эволюционном ряду карбонатитов от кальцитовых (0.2—0.5 % MnO) до анкеритовых (1.5—2.0 % MnO) и сидеритовых (6.0—8.0 % MnO) пород [Толстов, 2006; Лапин, Толстов, 2011]. Во-вторых, его содержание зависит от условий выветривания, в частности, от различий в степени концентрирования инертного марганца в остаточных продуктах гидрослюдистой и латеритной фаций. Так, например, в остаточных продуктах латеритного выветривания анкерит-кальцитовых и кальцит-доломитовых карбонатитов Чуктуконского месторождения содержание MnO варьирует от 10 до 15 % и более. Наиболее благоприятные условия для концентрирования Mn возникают в связи с возможностью разделения Mn-Fe коллоидных растворов и пространственного обособления марганцовистой фракции в условиях аэрации и интенсивного обводнения, характерных для приповерхностных фаций кор выветривания. В этих условиях формируются марганцовистые руды, содержащие более 20 %, а в богатых участках — до 61.6 % MnO (Сеиш Лагос) [Issler, 1976].

ТИТАН

Титан считается одним из важных рудных компонентов карбонатитовых комплексов. В ультраосновных породах он концентрируется в перовскит-титаномагнетитовых рудах. Щелочные породы также содержат повышенные концентрации Ti, который присутствует в форме шорломита, сфена, титаномагнетита и других минералов. Однако его концентрации обычно не достигают промышленно значимого уровня.

В карбонатитах минералы Ti относятся к характерным аксессуарам и маркируют различные стадии эволюции этих пород [Округин, Толстов, 2017; Округин и др., 2019]. Дизаналит и кальцитрит характерны для ранних кальцитовых карбонатитов. Кальцитовые и доломит-кальцитовые карбонатиты с клиногумитом и тетраферрифлогопитом содержат ильменит. В поздних сидеритовых и кутнагоритовых карбонатитах появляются рутил и Nb-рутил. При этом концентрация Ti в карбонатитах обычно не превышает 0.1 % и не достигает практически значимого уровня.

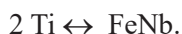
Анализ геохимического поведения Ti в корах выветривания карбонатитов дает основание относить его к группе инертных компонентов, которые накапливаются в остаточных продуктах выветривания. Степень концентрирования инертных компонентов, включая Ti, в остаточных продуктах гидрослюдистой ($K_{ин} = 2—4$) и латеритной ($K_{ин} = 4—8$) фаций обычно не обеспечивает повышение содержаний титана до практически значимого уровня. Однако в последнее время среди месторождений КВК обнаружены некоторые объекты, которые могут рассматриваться в качестве перспективных источников Ti. Анализ этих объектов показывает, что в них реализуются особые, дополнительные геохимические механизмы концентрирования Ti, несвойственные обычным месторождениям кор выветривания карбонатитов. В одном из объектов — Томторском месторождении уникальных комплексных Nb-REE-Sc руд — таким механизмом служил восстановительный эпигенез латеритных кор выветривания карбонатитов [Лапин и др., 2019].

Как уже отмечалось, исключительно высокие концентрации главных рудных компонентов и необычайно широкий набор попутных компонентов, включая титан, которые в обычных условиях не достигают практически значимого уровня, являются следствием более сложной истории формирования этих руд и суммирования рудоконцентрирующих эффектов двух этапов гипергенеза — окислительного этапа поверхностного выветривания и эпигенетического восстановительного. Среднее содержание TiO_2 в уникальных томторских рудах, состоящих из пирохлора и монацита с переменным количеством минералов группы крадаллита, по данным опробования, составляет около 7 %. Необычно высокие концен-

трации Ti объясняются преобладающей тенденцией его инертного поведения как в условиях латеритного выветривания карбонатитов, так и при последующем восстановительном эпигенезе продуктов выветривания.

Главный минерал титана в уникальных томторских рудах — Nb-рутил — присутствует в двух генерациях (Table 6, см. доп. материалы). Ниобиевый рутил первой генерации (до 17.12 % Nb₂O₅) встречается в виде неправильных мелких зерен (до 3—5 мкм) и более крупных корродированных кристаллов, постоянно содержит примесь Fe (до 6.0 % Fe₂O₃), V (до 2.28 % V₂O₃), Sc (до 0.09 % Sc₂O₃) (см. Table 6, анализы 2—9).

Минерал второй генерации (см. Table 6, анализы 1, 10—12) с максимально высоким содержанием Nb₂O₅ (более 28 %) и железа (более 6 % Fe₂O₃) встречается в виде полосчатых обособлений, обрамляющих струевидные выделения ксенотима и гоэцит-флоренсита в зонах позднего рассланцевания руд. Наблюдаемая в минерале прямая корреляция между содержаниями ниобия и железа и их обратная корреляция с содержанием титана указывает на изоморфные замещения титана по схеме:



Разрабатываемая технология обогащения томторских руд в качестве одного из необходимых условий предполагает попутное получение титанового продукта, и это месторождение входит в число перспективных источников титана. Следует отметить, что присутствие Nb-рутила характерно не только для эпигенетически измененных, но и для обычных латеритных кор выветривания карбонатитов, отмеченных ранее [Chebotarev et al., 2017].

Еще одним перспективным титановым объектом, формирование которого связано с особым режимом функционирования кор выветривания карбонатитов, служит бразильское месторождение Сеиш Лагос. Как уже отмечалось [Коноплев и др., 1995; Лапин и др., 2021], некоторые особенности рудоносности кор выветривания карбонатитов этого месторождения, такие как наличие аномально высоких, практически значимых концентраций железа и марганца в продуктах выветривания, а также необычная Ti-Nb специализация редкометалльного оруденения, обусловлены двумя обстоятельствами. Во-первых, в отличие от большинства месторождений, в которых выветриванию подвергались кальцитовые и анкерит-кальцитовые карбонатиты, в месторождении Сеиш Лагос субстратом служили сидеритовые карбонатиты, а, во-вторых, в этом месторождении необычайно широким развитием пользуются специфические поверхностные фации кор выветривания карбонатитов.

Как следует из приведенных ранее данных (см. Table 1), максимальные концентрации Ti наблюдаются в поверхностных фациях кор выветривания карбонатитов этого месторождения. В некоторых горизонтах поверхностных фаций средние содержания TiO₂ составляют 6.63 %. По сравнению с более глубокими структурными корами выветривания карбонатитов, в которых коэффициенты концентрации TiO₂ относительно исходных пород имеют значения, близкие к 5, характерные для латеритных кор выветривания карбонатитов, в поверхностных фациях кор эти значения возрастают до беспрецедентно высокого уровня, достигая величины 30—50 и более. Это обстоятельство, а также сходство характера распределения в поверхностных фациях титана и алюминия, который не является типичным элементом карбонатитов и их кор выветривания, и явно привносится из окружающих пород, свидетельствуют в пользу того, что Ti, как и Al (глинозем), может обладать значительной подвижностью в поверхностной зоне, реализуемой, скорее всего, в коллоидной форме гелятитана [Лапин и др., 2021]. При этом, если содержание Al₂O₃ заметно снижается при переходе к структурным корам, оставаясь сравнительно постоянным, то содержание титана в них продолжает плавно снижаться, что может указывать на более высокую не только латеральную, но и вертикальную подвижность Ti в коллоидных растворах зоны гипергенеза.

Высокая миграционная способность коллоидных частиц Ti и возможность его накопления вместе с Al₂O₃ известна и может быть проиллюстрирована также примером латеритных бокситов Чукотконского месторождения на Чадобецком поднятии, которые содержат 8.42 % TiO₂ и являются потенциальным источником Ti.

Главными минералами Ti в месторождении Сеиш Лагос служат Nb-рутил (Table 7, см. доп. материалы) и его колломорфная модификация Nb-брукит (Table 8, см. доп. материалы). Это объясняет тесную корреляцию между содержаниями Ti и Nb в продуктах выветривания (см. рис. 4).

Особенности поведения титана в корях выветривания карбонатитов месторождения Сеиш Лагос, которые заключаются не только в значительном обогащении титаном поверхностных фаций кор, за счет его латеральной миграции, но и в заметном привносе титана в подстилающие структурные коры выветривания, находят дополнительное подтверждение при анализе распределения отношения Ti/Nb в продуктах выветривания. График распределения величины отношения Ti/Nb в латеритном профиле (см. рис. 4) демонстрирует относительную стабильность этой величины в структурных корях с некоторым ее

понижением с глубиной и резким повышением в поверхностных фациях. Вероятной причиной этого является значительный дополнительный привнос титана из окружающих пород, который осуществляется в форме гелтитана, с более высоким отношением Ti/Nb по сравнению с таковым в структурных корях.

Таким образом, бразильское месторождение Сеиш Лагос наряду с Томторским может рассматриваться как перспективный источник Ti. Однако, в отличие от Томтора, его Ti-Nb рудная специализация определяется как особенностями состава карбонатитового субстрата, так и дополнительным привносом титана из окружающих пород при формировании поверхностных фаций кор выветривания.

ВАНАДИЙ

Если исключить участие V в качестве легирующей примеси в магнетите (в среднем 0.18 % V_2O_5) и магнетитовом концентрате Ковдорского бадделеит-апатит-магнетитового месторождения [Бородин и др., 1973], карбонатиты и их коры выветривания до недавнего времени не рассматривались в качестве потенциального источника ванадия. И только после открытия и разведки Томторского месторождения уникальных комплексных Nb-REE-Sc руд, содержащих более десятка полезных компонентов, ванадий привлек внимание как потенциальный попутный компонент этих руд. Ванадий проявляет отчетливую тенденцию к концентрированию в богатых томторских рудах, которые содержат в среднем около 1 % V_2O_5 . При этом примечательно, что, в отличие от окислительного этапа гипергенеза, когда ванадий следует за железом и накапливается в продуктах выветривания, в продуктах эпигенеза геохимические пути ванадия и железа расходятся. В то время как железо восстанавливается и выносятся из верхнего осветленного горизонта зоны эпигенеза, V сохраняет инертность и накапливается в остаточных продуктах эпигенеза, т. е. в богатых редкометалльных рудах [Лапин, Толстов, 1991; Толстов, 1994].

На характер распределения ванадия в богатых рудах и его корреляционные связи с другими компонентами оказывает влияние разнообразие его минеральных форм. Вхождение ванадия в состав ильменорутила (до 2 % V_2O_5 , см. Table 6) определяет возможность корреляции ванадия с титаном, ниобием и другими остаточными инертными компонентами. Появление же собственных новообразованных минералов V (ванадатов) приводит к нарушению этой корреляции и проявлению индивидуальных особенностей поведения ванадия, включая возникновение его корреляционных связей с Pb (рис. 5).

Учитывая сложность выделения минералов ванадия в самостоятельные фракции, изучение многих параметров и свойств этих минералов затруднено. Поэтому приведенное ниже краткое описание минералов имеет предварительный характер.

Ванадат свинца — один из главных собственных минералов ванадия в богатых рудах; встречается в виде сетчатых скелетных выделений, группирующихся вокруг корродированных реликтов галенита. Минерал содержит существенную примесь кремнезема (до 4.5 % SiO_2), Al_2O_3 , Ti (около 2.5 % Al_2O_3 , 2.38 % TiO_2) и Fe (4.51 % FeO) (Table 9, ан. 1, см. доп. материалы). По составу близок шерветиту $Pb_2V_2O_7$ — минералу, характерному для зоны окисления месторождений U, содержащих V и Pb. В богатых рудах Томтора ассоциирует с ярозитом и англезитом.

Соединение сложного состава, вероятно, представляет собой твердый раствор на основе доминирующего гетитового компонента с участием монтрозеита $(V,Fe)O(OH)$. При этом реализуется схема изовалентного изоморфизма $Fe^{3+} \rightarrow V^{3+}$, а также присутствует в составе гетита примесь гелтитана, который замещается по схеме гетеровалентного изоморфизма $2Ti^{4+} \rightarrow Fe^{3+} + Nb^{5+}$. В качестве второстепенной примеси предполагается присутствие небольшой доли галлуазита $Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$. Химический состав этого соединения приведен в Table 9, ан. 2—5. Оно встречается в виде тонкозернистых агрегатов с линейными размерами 200—300 мкм. Ассоциирует с баритом, галенитом, минералами группы крандалита, монацитом и другими минералами. Сканирование этих агрегатов в характеристических лучах V, Nb и Fe свидетельствует о равномерном распределении компонентов в пределах железистой фазы и об

отсутствии в ней самостоятельных фаз Nb и V. Включение не только Ti, но и V в целевую задачу разрабатываемой технологии обогащения уникальных томторских руд обеспечит более полное извлечение из них ценных компонентов и попутное получение ценных стратегических продуктов [Толстов, 1994; Толстов, Гунин, 2001; Рылов и др., 2017].

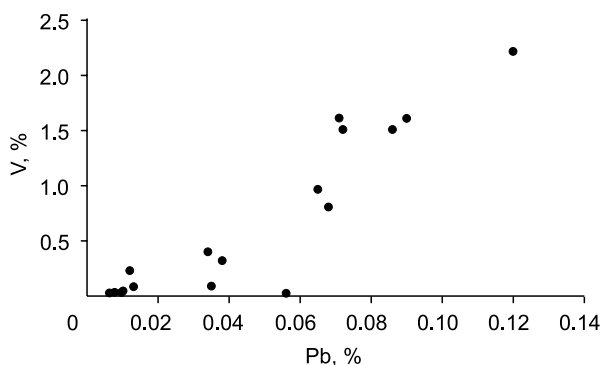


Рис. 5. График корреляции между содержаниями V и Pb по результатам опробования одной из буровых скважин месторождения Томтор.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Выполненные за последние десятилетия исследования позволяют значительно расширить сырьевые перспективы месторождений, связанных с корами выветривания карбонатов [Толстов и др., 2017а; Слепцов и др., 2019]. Эти изменения связаны с существенным прогрессом в изучении некоторых новых аспектов становления этой сложной рудной формации [Лапин и др., 2019; Округин и др., 2019].

Значительную роль при этом сыграла возможность углубленного изучения поверхностных процессов на корях выветривания карбонатов, протекающих как на открытой поверхности зоны гипергенеза в условиях интенсивного обводнения и аэрации, так и в гипергенных комплексах, перекрытых более молодыми осадками, что нередко приводит к изменению физико-химической обстановки корообразования и последующему эпигенетическому преобразованию продуктов выветривания. В обоих случаях проявляются новые факторы рудоносности и рудоконцентрирующие механизмы, что позволяет расширить рудный потенциал месторождений кор выветривания карбонатов за счет новых компонентов, включая нетрадиционные для них элементы группы железа — Fe, Mn, Ti, V. В этом отношении наиболее показательны месторождения Томтор в Восточном Прианбарье и Сеиш Лагос в бассейне Амазонки в Бразилии.

Наибольший вклад в наращивание рудного потенциала месторождений КВК внесен новым типом месторождений — эпигенетически измененными корами, характерным примером которых служит Томторское месторождение [Толстов, Самсонов, 2014; Похиленко и др., 2014, 2016а, 2016б]. Исключительно высокая продуктивность месторождений этого типа обусловлена более сложным двухэтапным процессом их формирования с переходом от окислительного этапа латеритного выветривания к эпигенетическому восстановительному, который устанавливается после перекрытия кор более молодыми угленосными отложениями и суммированием рудоконцентрирующих эффектов двух этапов гипергенеза. Благодаря этому в месторождениях данного типа присутствуют не только традиционные рудные компоненты, такие как Nb и лантаноиды цериевой группы в аномально высоких концентрациях, но и некоторые элементы, которые обычно не имеют практического значения, включая Sc, Y и элементы иттриевой группы, а также Al и некоторые другие, достигающие промышленно значимых концентраций и входящие в группу попутных рудных компонентов [Толстов и др., 2017б]. В число попутных компонентов Nb-REE-Sc руд Томторского месторождения входят также и элементы группы железа Ti и V, а в подстилающих лимонитовых охрах отмечаются промышленные концентрации марганца, которые совместно с железом могут рассматриваться как промышленные железо-марганцевые (лимонит-псиломелан-гроутитовые) руды, имеющие огромные ресурсы (Table 10, 11, см. доп. материалы; рис. 6).

Другим перспективным источником нетрадиционных для рассматриваемой рудной формации элементов группы железа может стать сравнительно недавно выявленное бразильское месторождение Сеиш Лагос. Особенностью этого месторождения, которая отличает его от большинства месторождений КВК, является то, что выветриванию в нем подверглись относительно малораспространенные сидеритовые карбонаты. Это месторождение необычно уже своим редкометалльным орудением, главным носителем которого является не пироксид, а Nb-рутил и Nb-брукит.

Кроме титана, в месторождениях этого типа к нетрадиционным видам сырья относятся также Fe и Mn [Баранов и др., 2018; Баранов, Толстов, 2022]. Необычный состав субстрата, отличающийся высокой железистостью при низком содержании алюмосиликатных и фосфатных компонентов, определяют и предельно высокие концентрации Fe в продуктах выветривания и малые количества в них вредных примесей, прежде всего P и Si, что делает эти продукты пригодными для использования в качестве сырья для черной металлургии.

Месторождение Сеиш Лагос может служить наглядной иллюстрацией влияния состава и рудоносности субстрата на характер орудения кор выветривания. Еще один пример такого рода — месторождение Маунт-Вельд в Австралии (см. Table 9), в котором ниобиевые и редкоземельные руды в корях выветривания пространственно разобщены, что соответствует преобладанию в субстрате кальцитовых (ниобиевые руды) или анкеритовых (редкоземельные руды) карбонатов.

Месторождение Сеиш Лагос имеет и другие особенности, которые определили формирование в нем нетрадиционных для данной формации типов орудения. К таким особенностям относится необычайно большая мощность поверхностных фаций кор выветривания, которые формируются в условиях специфического режима аэрации и обводнения при участии процессов латеральной поверхностной миграции вещества. В этих условиях проявляются несвойственные обычным структурным корам выветривания механизмы концентрирования рудных компонентов. В частности, активная латеральная миграция в поверхностных коллоидных растворах гелититана способствует дополнительному концентрированию титана в поверхностных фациях коры.

В то же время коллоидная сепарация марганца в железо-марганцевых растворах поверхностных фаций приводит к образованию в них мощных горизонтов существенно марганцовистого состава, состоящих преимущественно из голландита, которые могут представлять практический интерес.

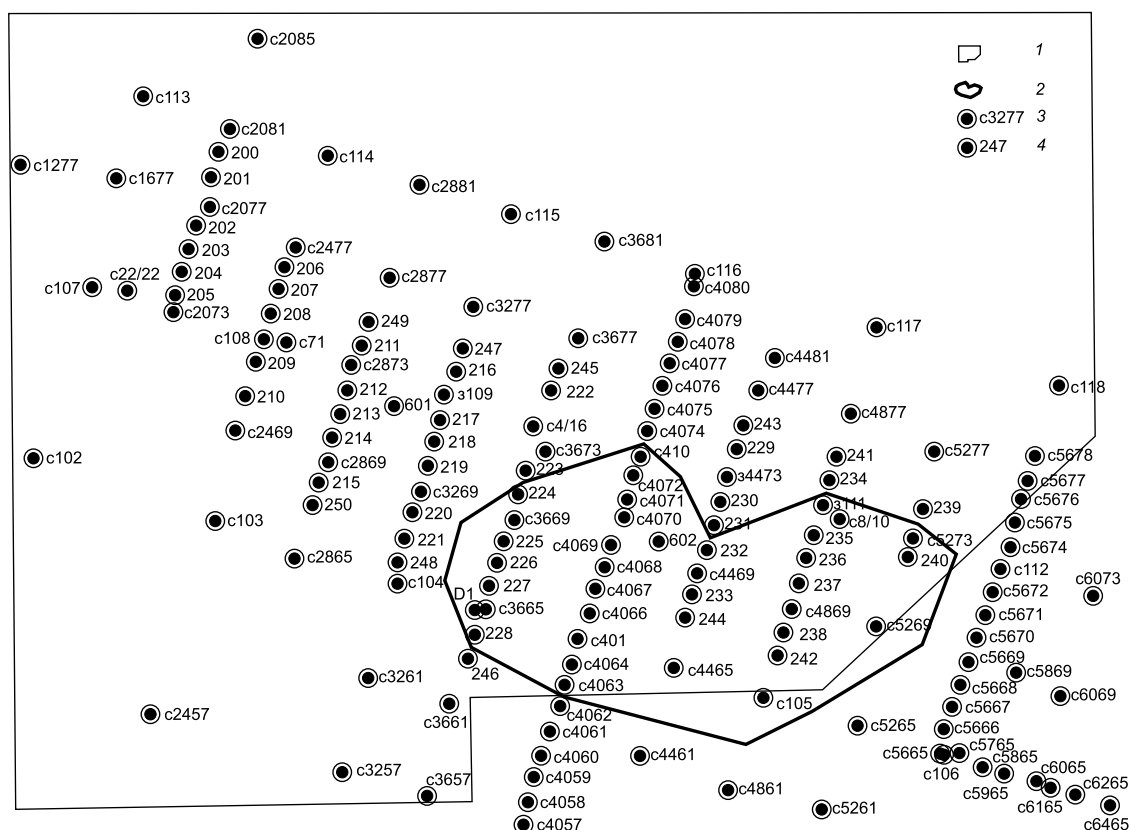


Рис. 6. Схема оконтуривания прогнозных ресурсов марганца на участке Северный Томторского рудного поля.

1 — граница лицензии участка Северный ЯКУ 04060 ТП, 2 — граница прогнозных ресурсов Mn, 3 — скважины 1985—1990 гг., 4 — скважины 2015—2016 гг.

Таким образом, в выявленных за последнее время месторождениях КВК с нетрадиционными новыми видами сырья, наряду с различиями в фациальных условиях выветривания и в свойственных этим условиям режимах подвижности компонентов, реализуются и новые факторы рудоносности и рудоконцентрирующие механизмы. Среди них: влияние состава карбонатитового субстрата, подвергавшегося выветриванию, последующие изменения физико-химической обстановки гипергенеза с окислительной на восстановительную, роль процессов латеральной миграции вещества в коллоидных растворах поверхностных фаций коры выветривания и влияние свойственных этим фациям процессов фракционирования марганцево-железистых коллоидных растворов.

Сложная структура рассматриваемой рудной формации, множественность факторов рудоносности и разнообразие рудоконцентрирующих механизмов позволяют рассматривать коры выветривания карбонатитов как уникальную поликомпонентную рудную формацию [Добрецов, Похиленко, 2010; Похиленко и др., 2014, 2016а, 2016б; Толстов, Самсонов, 2014; Толстов и др., 2014а). Общий потенциал ее необычайно широк и может быть существенно расширен за счет включения, помимо традиционных Nb, La и Ce, легких и тяжелых лантаноидов Y, Sc, таких элементов, как Ti, V, Fe, Mn, P, Sr, Ba, Ga и Al [Толстов и др., 2014]. Это подтверждает перечень наиболее известных разрабатываемых и перспективных месторождений КВК, приведенный в Table 12 (см. доп. материалы), в которой указаны параметры их оруденения и некоторые факторы рудоносности.

Работа по обобщению и анализу материалов выполнена в рамках государственного задания ИГАБМ СО РАН, финансирование полевых и лабораторно-аналитических работ, интерпретация результатов, полученных по массиву Томтор, выполнено за счет гранта РНФ № 23-63-10017.

ЛИТЕРАТУРА

Баранов Л.Н., Толстов А.В., Округин А.В., Слепцов А.П. Новое в минералогии и геохимии апатит-магнетитовых руд массива Томтор, северо-восток Сибирской платформы // Руды и металлы, 2018, № 2, с. 42—54.

Баранов Л.Н., Толстов А.В. Роль фоскоритов в минерализации Томторского рудного поля // Природные ресурсы Арктики и Субарктики, 2022, т. 27, № 2, с. 195—206.

Бородин Л.С., Лапин А.В., Харченко А.Г. Редкометалльные камафориты. М., Наука, 1973, 176 с.

Добрецов Н.Л., Похиленко Н.П. Минеральные ресурсы Российской Арктики и проблемы их освоения в современных условиях // Геология и геофизика, 2010, т. 51 (1), с. 126—141.

Игнатов П.А., Еременко Р.У., Толстов А.В., Овчинников И.М. Перспективы выявления месторождений скандия в Якутской алмазоносной провинции // Горный журнал, 2022, № 7, с. 17—21.

Коноплев А.Д., Толстов А.В., Васильев А.Т., Нечелюстов Г.Н., Кузьмин В.И., Складнева В.М., Дубинчук В.Т., Коноплева Е.В., Сидоренко Г.А. Особенности локализации редкометалльного оруденения на месторождении Томтор // Редкометалльно-урановое рудообразование в осадочных породах. М., 1995, с. 223—241.

Кравченко С.М., Беляков А.Ю., Кубышев А.И., Толстов А.В. Скандиево-редкоземельно-итриево-ниобиевые руды — новый тип редкометалльного сырья // Геология рудных месторождений, 1990, т. 32, № 1, с. 105—109.

Лазарева Е.В., Жмодик С.М., Добрецов Н.Л., Толстов А.В., Щербов Б.Л., Карманов Н.С., Герасимов Е.Ю., Брянская А.В. Главные рудообразующие минералы аномально богатых руд месторождения Томтор (Арктическая Сибирь) // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (6), с. 1080—1115.

Лапин А.В. Типы месторождений в корях выветривания карбонатитов // Геология рудных 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, № 7, с. 933—949.

Лапин А.В., Толстов А.В. Окислительный и восстановительный этапы формирования зоны гипергенеза карбонатитов и их рудоносность // Геология рудных месторождений, 1991, т. 33, № 4, с. 81—91.

Лапин А.В., Толстов А.В. Месторождения кор выветривания карбонатитов. М., Наука, 1995, 208 с.

Лапин А.В., Толстов А.В. Минерализация кор выветривания карбонатитов. М., 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.

Лапин А.В., Куликова И.М., Набелкин О.А. Поверхностные образования на корях выветривания карбонатитов (к проблеме генезиса уникальных редкометалльных руд месторождения Томтор) // Литология и полезные ископаемые, 2021, № 3, с. 1—21.

Округин А.В., Толстов А.В. Петрогеохимическая характеристика сиенит-щелочно-ультраосновного силикатного комплекса пород Томторского массива (северо-восток Сибирской платформы) // Отечественная геология, 2017, № 5, с. 56—66.

Округин А.В., Толстов А.В., Слепцов А.П., Баранов Л.Н. Петрохимические особенности ассоциации ультраосновных-щелочных пород и карбонатитов Томторского массива и интерпретация возможных трендов их эволюции // Природные ресурсы Арктики и Субарктики, 2019, т. 24, № 4, с. 7—24.

Похиленко Н.П., Крюков В.А., Толстов А.В., Самсонов Н.Ю. Томтор как приоритетный инвестиционный проект обеспечения России собственным источником редкоземельных элементов // ЭКО, 2014, № 2 (476), с. 22—35.

Похиленко Н.П., Крюков В.А., Толстов А.В., Самсонов Н.Ю. Создание сильной редкоземельной промышленности: без госкорпораций не осилить // ЭКО, 2016а, № 8 (506), с. 25—36.

Похиленко Н.П., Толстов А.В., Афанасьев В.П., Самсонов Н.Ю. Новые механизмы государственного управления минерально-сырьевой базой стратегических полезных ископаемых Арктической зоны Сибири и Дальнего Востока // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление, 2016б, № 5, с. 60—63.

Рылов Д.А., Слепцов А.П., Толстов А.В. Перспективы Томторского рудного поля на новые виды полезных ископаемых // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России, 2017, с. 423—427.

Слепцов А.П., Толстов А.В., Томашев А.В., Самсонов Н.Ю., Баранов Л.Н. Новое в методике подсчета запасов многокомпонентных руд (на примере Томторского рудного поля) // Разведка и охрана недр, 2019, № 6, с. 38—46.

Слукин А.Д. Коры выветривания и бокситы Чадобецкого поднятия М., Наука, 1973, 126 с.

Толстов А.В. Особенности минералогии и геохимии апатит-магнетитовых руд массива Томтор (Северо-Западная Якутия) // Геология и геофизика, 1994, т. 35 (9), с. 91—100.

Толстов А.В. Главные рудные формации севера Сибирской платформы. М., ИМГРЭ, 2006, 212 с.

Толстов А.В., Гунин А.П. Комплексная оценка Томторского месторождения // Вестник Воронеж. ун-та. Серия: Геология, 2001, № 11, с. 144—160.

Толстов А.В., Самсонов Н.Ю. Томтор: геология, технологии, экономика // ЭКО, 2014, № 2 (476), с. 36—44.

Толстов А.В., Похиленко Н.П., Лапин А.В., Крюков В.А., Самсонов Н.Ю. Инвестиционная привлекательность Томторского месторождения и перспективы ее повышения // Разведка и охрана недр, 2014, № 9, с. 25—30.

Толстов А.В., Лапин А.В., Баранов Л.Н. Новые данные о составе редкоземельных элементов в рудах участка Буранный Томторского рудного поля // Актуальные вопросы получения и применения РЗМ и РМ-2017. Сборник материалов международной научно-практической конференции. М., 2017а, с. 76—82.

Толстов А.В., Похиленко Н.П., Самсонов Н.Ю. Новые возможности получения редкоземельных элементов из единого арктического сырьевого источника // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия, 2017б, т. 10, № 1, с. 125—138.

Энтин А.Р., Зайцев А.И., Ненашев Н.И., Василенко В.Б., Орлов А.И., Тянь О.А., Ольховик Ю.А., Ольштынский С.И., Толстов А.В. О последовательности геологических событий, связанных с внедрением Томторского массива ультраосновных щелочных пород и карбонатитов (Северо-Западная Якутия) // Геология и геофизика, 1990 (12), с. 42—51.

Chebotarev D.A., Doroshkevich A.G., Klemd R., Karmanov N.S. Evolution of Nb-mineralization in Chuktukon carbonatite massif, Chadobets upland (Krasnoyarsk Territory, Russia) // Period. Mineral., 2017, v. 86, p. 99—118.

Giovannini A.L. Contribuição à geologia e geoquímica do carbonatito e da jazida (Nb, ETR) de Seis Lagos (Amazonas). Porto Alegre, 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., Ruperti E., Morbidelli L. Carbonatite complexes from Brazil: A review // J. South Am. Earth Sci., 1990, v. 3 (1), p. 51—63.

Issler R.S. The Seis Lagos carbonatite complex // Proc. First Int. Symp. on Carbonatites. Poços de Caldas, MG, Brazil, 1976, p. 233—240.