

УДК 553 493.6.068.36

DOI:10.35597/2313-545X-2019-5-3-70-88

**УНИКАЛЬНЫЕ УЛЬТРАБОГАТЫЕ РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫЕ РУДЫ
МАССИВА ТОМТОР (ЯКУТИЯ) И ПРОБЛЕМА ИХ ГЕНЕЗИСА****А.В. Лапин¹, А.В. Толстов², И.М. Куликова¹**¹*Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов, ул. Вересаева 15,
г. Москва, 121357 Россия; lapin@imgre.ru*²*Научно-исследовательское геологическое предприятие АК «АЛРОСА»,
Чернышевское шоссе 16, г. Мирный, Республика Саха (Якутия), 678170 Россия***UNIQUE ULTRA-RICH RARE METAL ORES OF THE TOMTOR COMPLEX
AND PROBLEM OF THEIR GENESIS****A.V. Lapin¹, A.V. Tolstov², I.M. Kulikova¹**¹*Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements,
ul. Veresaeva 15, Moscow, 121357 Russia; lapin@imgre.ru*²*Research Geological Enterprise AK «ALROSA», Chernyshevskoe shosse 16,
Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), 678170 Russia*

На основе структурно-текстурных особенностей, состава и геологической позиции ультрабогатых комплексных редкометалльных руд Томторского месторождения (Якутия) проведен сравнительный анализ главных концепций их формирования: 1) восстановительного эпигенеза латеритных кор выветривания карбонатитов и 2) переотложения продуктов выветривания карбонатитов. Показано, что аномальные параметры Томторского месторождения объясняются более сложной историей формирования по сравнению с другими месторождениями кор выветривания карбонатитов, а именно, последовательным проявлением двух этапов гипергенеза – латеритного выветривания и восстановительного эпигенеза и суммированием их рудоконцентрирующих эффектов. Предложены прогнозно-поисковые критерии редкометалльных руд томторского типа, основанные на эпигенетической концепции их формирования.

Илл. 10. Табл. 1. Библ. 16.

Ключевые слова: месторождение Томтор, уникальные редкометалльные руды, генезис, пироксеноид, монацит, восстановительный эпигенез, делювиально-озерная россыпь.

Main genetic models of the formation of ultra-rich rare metal ores of the Tomtor deposit (Yakutia) are compared on the basis of their structural-textural features, mineral composition, and geologic setting: 1) reducing epigenesis of laterite weathering crusts of carbonatites and 2) redeposition of weathering products of carbonatites. It is shown that the unique features of the Tomtor deposit are explained by more complex (compared with other deposits of weathering crusts of carbonatites) evolution, which is expressed in two consecutive stages of supergenesis: laterite weathering and reducing epigenesis and their total ore-concentrating effects. The searching-forecast criteria for ores of the Tomtor type are suggested on the basis of epigenetic model of their formation.

Figures 10. Table 1. References 16.

Key words: Tomtor deposit, unique rare-metal ores, genesis, pyrochlore, monazite, reducing epigenesis, residual lacustrine placer

Введение

Томторское редкометалльное месторождение в Якутии является уникальным объектом с аномальными параметрами рудоносности. Это выражается в беспрецедентно высоких концентрациях главных рудных компонентов – Nb (в отдельных рудных блоках до 6–7 % Nb_2O_5), РЗЭ (>15–20 % REE_2O_3), Y (>1.0 % Y_2O_3) и Sc (до 0.1 % Sc_2O_3), а также в многообразии и необычном наборе попутных полезных элементов – P, Ti, V, Sr, Ba, Al, Ga, Th. Суммарное количество потенциально извлекаемых полезных компонентов составляет более 50 % от объема руды, которая, по существу, представляет собой природный концентрат. Не удивительно, что это месторождение не укладывается в рамки привычных представлений о рудогенезе. Отсюда появляются самые разнообразные, нередко весьма экзотические генетические концепции. К их числу можно отнести гипотезу вулканического туфогенного происхождения руд (Энтин и др. 1990; Владыкин, 1999) или представление о рудах, как продуктах гидротермальной деятельности (Кравченко и др. 1992; Kravchenko, Pokrovsky, 1995). Большая часть этих гипотез в процессе разведки и изучения месторождения не получила подтверждения и имеет только историческое значение. К категории не подтвержденных относится и наиболее распространенная сегодня и принятая в некоторых официальных документах интерпретация томторских руд как «делювиально-озерной россыпи» или «переотложенных кор выветривания карбонатитов» (Коноплев и др., 1992). Подобная интерпретация содержится в некоторых последних методических рекомендациях и классификациях промышленных и генетических типов редкометалльных месторождений (Требования..., 2016).

Результаты изучения Томторского месторождения и других месторождений редкометалльных кор выветривания карбонатитов (Лапин, Толстов, 1995, 2011) свидетельствуют о том, что подобная интерпретация далека от реальности, дает искаженное представление об условиях формирования уникальных руд томторского типа и не может служить основой для прогнозирования и поисков этого нового типа сверхбогатых руд. Наши исследования показали, что редкометалльные руды Томторского месторождения следует рассматривать как эпигенетически измененные латеритные коры выветривания 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 угленосными осадками (Лапин, 1995). Особый синэргический эффект последовательного проявления окислительного и восстановительного этапов гипергенеза достигается благодаря тому, что железо и марганец (как и редкие металлы, инертные на первом этапе и накапливающиеся до предельно высоких концентраций) на эпигенетическом этапе восстанавливаются, становятся подвижными и выносятся, обеспечивая повторное резкое концентрирование сохраняющих инертность редких металлов. В итоге, суммарная степень концентрирования редких металлов (Nb, La, Ca, Pr, Nb, V, Sc и др.) в рудах этого типа по отношению к исходным карбонатитам достигает 15–20-кратной величины.

В настоящее время существуют две главные конкурирующие концепции генезиса уникальных томторских руд. В основе одной лежит процесс механического переотложения материала кор выветривания карбонатитов, в основе другой – эволюция физико-химической обстановки со сменой этапов гипергенеза с окислительного на восстановительный и суммированием их рудоконцентрирующих эффектов, обусловленных дифференциальной подвижностью компонентов в зоне гипергенеза. Прогнозно-поисковые критерии, основанные на этих концепциях, существенно отличаются, при этом очевидно, что доминирование ошибочной концепции не способствует открытию новых месторождений томторского типа. Это определяет необходимость вернуться к данному вопросу и критически проанализировать важнейшие особенности томторских руд, позволяющие сделать выбор в пользу той или иной концепции.

Томторский массив, расположенный на севере Сибирской платформы (север Якутии, бассейн р. Уджа, правый приток р. Анабар – один из крупнейших в мире карбонатитовых комплексов: его диаметр составляет около 22 км (рис. 1). Массив имеет зональное строение: его краевая зона сложена щелочными и нефелиновыми сиенитами, занимающими большую часть площади массива. По направлению к центру сиениты сменяются ийолит-мельтейгитами, образующими серповидное тело, и далее – карбонатитами, которые составляют ядро массива диаметром около 6 км. Томторское месторождение приурочено к латеритным корам выветри-

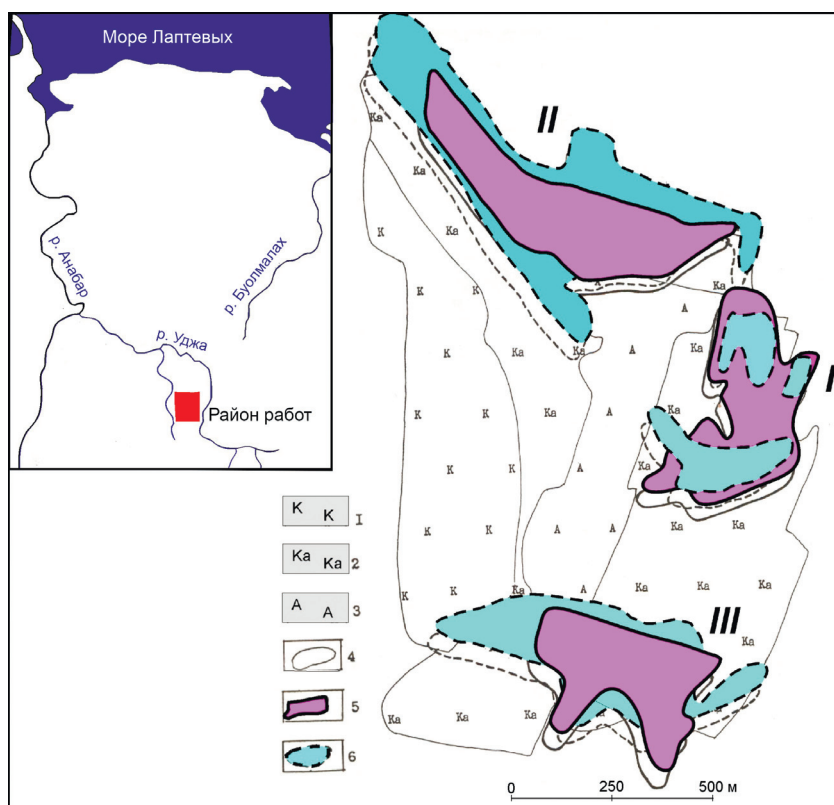


Рис. 1. Площадь распространения пермских угленосных отложений (синее) и эпигенетически измененных продуктов выветривания карбонатитов (красное).

I–III – участки: I – Буранный, II – Северный, III – Южный.

1 – безрудные кальцитовые и доломит-кальцитовые карбонатиты; 2 – редкометалльные кальцитовые и доломит-кальцитовые карбонатиты; 3 – анкеритовые карбонатиты и анкерит-шамозитовые породы; 4 – геологические границы карбонатитов с развитыми по ним корам выветривания; 5 – контур эпигенетически измененных продуктов выветривания; 6 – контур пермских угленосных отложений. На врезке обзорная схема расположения месторождения Томтор (красный прямоугольник).

Fig. 1. Occurrence of Permian coal-bearing deposits (blue) and epigenetically altered weathering products of carbonatites (red).

I–III – areas: I – Buranny, II – Severny, III – Yuzhny.

1 – barren calcite and dolomite-calcite carbonatites; 2 – rare-metal calcite and dolomite-calcite carbonatites; 3 – ankerite carbonatites and ankerite-chamosite rocks; 4 – geological boundaries of carbonatites and their weathering crusts; 5 – contours of epigenetically altered products of weathering; 6 – contours of Permian coal-bearing sedimentary rocks. Inset map shows the location of the Tomtor deposit (red rectangle).

вания кальцитовых и анкеритовых карбонатитов. Ультрабогатые руды слагают сплошной горизонт на поверхности кор выветривания, который отделяет их от перекрывающих пермских континентальных отложений, содержащих мощные пласты бурых углей. Систематическая характеристика месторождения содержится в ряде публикаций (Толстов, 2006; Лапин, Толстов 1995, 2011), поэтому здесь мы коснемся лишь важнейших аспектов формирования богатых томторских руд, включая геологическую позицию руд, проблему зональности гипергенного профиля, особенности минерального и химического состава, текстуры и структуры руд.

Анализ конкурирующих концепций образования руд

Прежде всего, следует оценить предложенные генетические концепции с точки зрения их соответствия тем или иным локальным и региональным геологическим факторам. Здесь обнаруживается одно из главных противоречий концепции преотложенных кор выветривания. Действительно, исходя из этой концепции, руды томторского типа могут встречаться в любых месторождениях кор выветривания карбонатитов, поскольку практически все они имели выход на земную поверхность

и подвергались процессам миграции вещества и переотложения корового материала с тем или иным участием поверхностных водотоков и водоемов. Однако, несмотря на то, что продукты поверхностного преобразования кор выветривания карбонатитов хорошо изучены и наблюдаются во многих месторождениях, они не имеют ничего общего с рудами томторского типа, которые не встречаются в подобных условиях ни в одном из месторождений кор выветривания карбонатитов, сформированных на открытой поверхности Земли.

В условиях хорошей обводненности в заболоченных депрессиях и мелких водоемах на поверхности коры выветривания формируется горизонт плотных натечных, нередко, 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 также формируется так называемая «кираса» или «канга» – более плотный панцирь железняков. Вследствие избирательного обогащения поверхностных образований железом и марганцем горизонт железняков в обоих случаях значительно обеднен редкими металлами по сравнению с рыхлыми охрами, на которых он формируется. Иначе говоря, поверхностные процессы на корях выветривания карбонатитов сами по себе производят эффект, обратный наблюдаемому при формировании томторских руд.

Условия, предполагаемые концепции «переотложенных кор выветривания карбонатитов», которая рассматривает томторские руды как «делювиально-озерную россыпь», реализуются, например, в массиве Озерный в Сетте-Дабанской провинции. Развитые здесь озерные отложения на корях выветривания карбонатитов значительно обеднены Nb и Ta не только по сравнению с корями выветривания, но и с карбонатитами, на которых они залегают. Наконец, в таких уникальных по содержанию редких металлов месторождениях как Араша (Бразилия), Маунт Вельд (Австралия) и Мабун (Габон), коры выветривания карбонатитов перекрыты более молодыми делювиальными и озерными осадками, сформировавшимися, в значительной мере, за счет переотложения корового материала. Однако во всех случаях эти осадки гораздо беднее кор выветривания и не содержат оруденения, сколько-нибудь сопоставимого по своим параметрам и другим характеристикам с томторскими рудами.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что поверхностные процессы на корях выветривания карбонатитов сами по себе не обеспечивают достаточных механизмов концентрирования редких металлов и не создают условий для формирования уникальных по своим параметрам руд томторского типа. Напротив, они показывают, что эти процессы, как правило, оказывают обратный эффект и приводят к разубоживанию корового материала по редким металлам. Очевидно, что формирование руд томторского типа требует участия иного, гораздо более эффективного рудоконцентрирующего механизма. Подобный эффективный механизм хорошо известен – это механизм остаточного накопления инертных компонентов за счет выноса подвижных, который является универсальным и реализуется во всех месторождениях кор выветривания карбонатитов. Этот механизм особенно эффективен в месторождениях эпигенетически измененных кор выветривания карбонатитов, поскольку в них он реализуется дважды с суммированием рудоконцентрирующих эффектов двух этапов гипергенеза – окислительного и восстановительного.

Главный рудоконцентрирующий механизм на этапе латеритного выветривания карбонатитов – остаточное накопление инертных редких металлов (Nb, La, Ce и др.) вместе с легко гидролизующимся железом и марганцем, обусловленное растворением породообразующих минералов. Степень концентрирования инертных редких металлов ($K_{ин}$) в остаточных продуктах выветривания (латеритных охрах) по сравнению с исходными карбонатитами составляет 4–7.

На этапе восстановительного эпигенеза продуктов выветривания сильный рудоконцентрирующий эффект достигается благодаря тому, что железо и марганец (инертные на первом этапе и накапливающиеся до предельно высоких концентраций) восстанавливаются, становятся подвижными и выносятся, обеспечивая повторное концентрирование редких металлов и других инертных компонентов. Степень концентрирования редких металлов в остаточных продуктах эпигенеза по сравнению с латеритными охрами по разным буровым пересечениям рудного тела варьирует от 1.6 до 4.5. В итоге, суммарный коэффициент концентрации инертных редких металлов в остаточных продуктах эпигенеза латеритных охр по сравнению с исходными карбонатитами достигает экстремальных значений ($K_{ин} = 15–20$), что обеспечивает параметры рудоносности, свойственные уникальным томторским рудам.

Таким образом, общее сопоставление конкурирующих концепций формирования томторских руд показывает, что, несмотря на широкие возможности для оценки достоверности осадочно-россыпной концепции, эта концепция не выдерживает проверки и ее прогностический потенциал опровергается на примере многочисленных месторождений кор выветривания карбонатитов. Совершенно иную оценку получает концепция восстановительного эпигенеза кор выветривания карбонатитов, обусловленного массовым накоплением в перекрывающих коры осадках органического углерода и его углефикацией, что приводит к воздействию на коры восстановленных бескислородных вод, дренирующих угленосные отложения. В ее пользу говорит точное соответствие контуров распространения уникальных томторских руд и перекрывающих их пермских осадков, содержащих мощные пласты бурых углей (рис. 1).

Восстановительный эпигенез продуктов латеритного выветривания карбонатитов обеспечивает реальный механизм повторного эффективного концентрирования рудных компонентов и достижения параметров, свойственных томторским рудам. Подтверждение эпигенетической концепции и ее прогностического потенциала мы находим в Чуктуконском месторождении на Чадобецком поднятии (Красноярский край) – пока единственном месторождении, в котором встречены руды, сопоставимые по составу, условиям образования и содержания рудных компонентов с уникальными рудами Томтора (Ломаев, Сердюков, 2011). Чуктуконское месторождение – типичный представитель месторождений латеритных кор выветривания карбонатитов – характеризуется обычным для этого типа месторождений строением профиля выветривания и составом гипергенных продуктов. Большая часть профиля выветривания обычно до глубины 150–200 метров от поверхности представлена лимонитовыми охрами, содержащими Sr-, Ba- и Се-пироклор, монацит и минералы группы крандалита.

Нижние горизонты профиля выветривания (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 с глубиной.

Коры выветривания перекрываются более молодыми бокситоносными осадками, заполняющими эрозийные и усадочные депрессии, формирующимися за счет переотложения материала кор выветривания карбонатитов и вмещающих сланцев. Эти осадки, мощность которых достигает 50–70 м, представлены бокситовыми и каолиновыми глинами, а также плотными оолитовыми бокситами и бурыми железняками. В некоторых депрессиях в составе бокситоносных отложений встречаются пласты бурых углей, углистых и лигнитовых глин. Именно к этим депрессиям приурочены богатые руды, аналогичные по составу и содержаниям рудных компонентов рудам Томторского месторождения. В этих участках в верхней части охристой коры выветривания карбонатитов наблюдается горизонт эпигенетически измененных осветленных продуктов выветривания, обедненных Fe и Mn, но резко обогащенных Nb (до 4–6 % Nb_2O_5) и РЗЭ (до 15–20 % REE_2O_3). Мощность горизонта варьирует от 1–3 до 5–8 м. Ниже его располагается горизонт эпигенетической сидеритизации охристых продуктов выветривания. По минеральному и химическому составу породы осветленного и сидеритового горизонта аналогичны томторским.

Таким образом, общее сопоставление достоверности двух концепций генезиса богатых томторских руд свидетельствует в пользу эпигенетической. Сопоставим теперь эти концепции с точки зрения их соответствия более конкретным особенностям руд Томтора.

Геологическая позиция томторских руд и проблема зональности гипергенного профиля

Горизонт богатых руд венчает зональный профиль продуктов гипергенного преобразования карбонатитов в виде сплошной субгоризонтальной плащеобразной залежи размером 2.6×1.4 км. Мощность горизонта варьирует от первых метров до 15–20 м, иногда до 40–50 м, его средняя мощность составляет 12–15 м. Ниже горизонта богатых руд, состоящих, в основном, из монацита, пироклора и минералов группы крандалита, всегда располагается горизонт сидеритовых пород, которые образуются в результате сидеритизации продуктов латеритного выветривания карбонатитов – лимонитовых охр или лимонит-франколитовых пород. Мощность горизонта сидеритовых пород достигает 40–50 м (обычно 20–30 м). Совокупность двух горизонтов богатых руд и сидеритовых пород обра-

зует зону восстановительного эпигенеза продуктов латеритного выветривания карбонатитов.

С точки зрения точной геологической позиции богатых руд и содержания самого термина концепция «переотложенных кор выветривания карбонатитов» выглядит неопределенно и декларативно. Куда и насколько переотложены коры и почему вообще «переотложены», если они всегда залегают только на корах выветривания карбонатитов, но никогда на иных породах. Кроме того, поверхностные процессы не приводят к концентрированию редких металлов, а, наоборот, сопровождаются их разубоживанием.

Совершенно иначе эти позиции оцениваются с позиции восстановительного эпигенеза кор выветривания карбонатитов, которая основывается на фиксированном положении горизонта богатых руд как по отношению к перекрывающим коры пермским угленосным осадкам, так и по отношению к подстилающим этот горизонт сидеритовым породам. Эти три элемента геологического разреза соединены причинно-следственной связью, что подтверждается примером Чуктуконского месторождения. С одной стороны, угленосные отложения, перекрывающие коры выветривания, играют определяющую роль в смене физико-химической обстановки с окислительной на восстановительную. С другой, именно ассоциация богатых руд и сидеритовых пород, которая полностью игнорируется концепцией «переотложенных» кор выветривания, составляет суть эпигенетических преобразований продуктов выветривания карбонатитов и механизма концентрирования рудных компонентов при их восстановительном эпигенезе. Эта ассоциация отражает характерную для восстановительного эпигенеза железистых охр зональность, обусловленную сменой по направлению сверху вниз процессов выноса Fe^{2+} и Mn^{2+} с остаточным концентрированием редких металлов, их осаждением в виде сидерита. Подобная зональность продуктов восстановительного эпигенеза кор выветривания хорошо известна. Например, в мезозойских бокситах Северо-Западного Тургая широко распространены восстановительные эпигенетические процессы, проявляющиеся в развитии сопряженных зон осветления и сидеритизации. Эти процессы вызваны воздействием грунтовых вод, которые приобретают восстановительные свойства из-за наличия в бокситах прослоев лигнитовых глин (Куземкина, 1962). Принципиально сходные эпигенетические процессы наблюдаются в богатых железных рудах КМА,

представленных продуктами латеритного выветривания железистых кварцитов (Булгакова, 1967).

Исходя из сказанного выше, принципиальное отличие между двумя генетическими концепциями в трактовке геологической позиции руд заключается в том, что в гипотезе «переотложенных кор» они образуются на открытой поверхности кор выветривания карбонатитов до их перекрытия пермскими осадками, в то время как в эпигенетической концепции эти руды формируются только после того, как коры перекрываются угленосными осадками и начинают подвергаться воздействию восстановительных бескислородных вод.

Именно это отличие играет ключевую роль в понимании природы сверхконцентраций редких металлов и формировании ультрабогатых томторских руд. Отсутствие сколько-нибудь серьезных аргументов в пользу их формирования на открытой поверхности кор выветривания карбонатитов и, напротив, наличие убедительных доказательств их формирования уже после перекрытия кор выветривания угленосными осадками заставляет совершенно по иному отнестись к оценке главных факторов формирования богатых руд и обратить особое внимание на зону контакта кор выветривания с пермскими осадками как на продуктивную рудоконтролирующую структуру. Условия функционирования этой зоны определяют важнейшие особенности состава и строения томторских руд и дают ключ к пониманию их генетической природы (рис. 2).

Сформировавшаяся в начале перми геологическая граница между кора́ми выветривания карбонатитов и перекрывающими их осадками разделяет породы, резко контрастные по составу. Продукты выветривания представляют собой марганцево-железистые охры, в которых содержание оксидов и гидроксидов Fe и Mn составляет более 50 мас. %. Перекрывающие их пермские осадки формируются за счет сноса материала с приподнятых краевых частей массива и имеют преимущественно алюмосиликатный состав (~42 мас. % SiO_2 , ~26 мас. % Al_2O_3), близкий к составу сиенитов.

Вследствие контрастности составов контактирующих сред растворы, дренирующие пермские осадки и насыщенные компонентами этих пород, активно транспортируют их в зону эпигенеза, оказывая существенное влияние на состав эпигенетических продуктов. Среди компонентов, поступающих в зону эпигенеза из перекрывающих осадочных пород, наибольшее значение имеют Al, Ba и

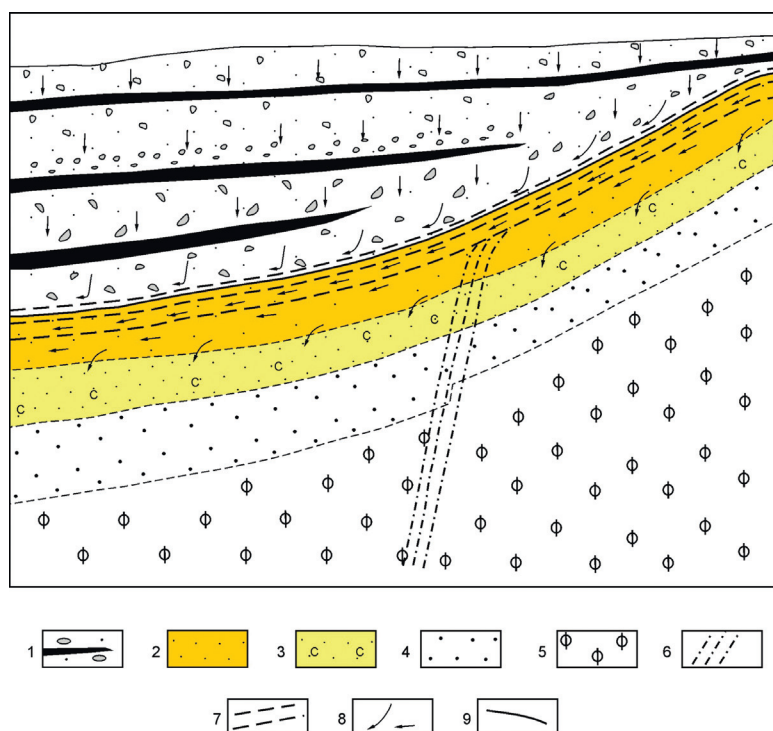


Рис. 2. Схема развития эпигенетических восстановительных процессов в зоне контакта кор выветривания карбонатитов с пермскими угленосными отложениями.

1 – пермские угленосные отложения; 2, 3 – зона восстановительного эпигенеза продуктов выветривания карбонатитов: 2 – горизонт богатых руд (осветленные продукты выветривания), 3 – сидеритовый горизонт (сидеритизированные продукты выветривания); 4, 5 – продукты латеритного выветривания карбонатитов: 4 – лимонитовые охры, 5 – лимонит-франколитовые породы; 6 – тектонические нарушения; 7 – зона рассланцевания и брекчирования; 8 – направления движения эпигенетических растворов; 9 – контакт коры выветривания карбонатитов с пермскими угленосными отложениями.

Fig 2. Evolution of epigenetic reducing processes at the contact of weathering crusts of carbonatites with Permian coal-bearing sedimentary rocks.

1 – Permian coal-bearing sedimentary rocks; 2, 3 – zone of reducing epigenesis of weathering products of carbonatites: 2 – high-grade ores (bleached weathering products), 3 – siderites (siderite weathering products); 4, 5 – products of laterite weathering of carbonatites; 4 – limonite ochres; 5 – limonite-francolite rocks; 6 – faults; 7 – zone of foliation and brecciation; 8 – movement directions of epigenetic fluids; 9 – contact of weathering crusts of carbonatites with Permian coal-bearing sedimentary rocks.

Ga, а во многих случаях также Si, Ti, V, Y, Zr и другие элементы.

Породы, разделяемые этой границей, отличаются по структуре. Продукты выветривания представляют собой тонкодисперсный материал, в котором количество частиц пелитовой размерности достигает 60–80 %. Пермские осадки, напротив, имеют грубообломочное строение и плохо сортированы, поэтому породы обладают различной проницаемостью по отношению к грунтовым водам. По сравнению с легко промываемыми пермскими осадками продукты выветривания, уплотненные нагрузкой вышележащих пород, могут рассматриваться как водоупорный горизонт, а зона контакта в этих условиях становится зоной интенсивной фильтрации грунтовых вод.

Граница, разделяющая продукты выветривания и перекрывающие их осадки, с началом формирования пермских углей становится мощным окислительно-восстановительным барьером. Продукты выветривания представляют собой предельно окисленную среду, состоящую из высших оксидов Fe и Mn и обладающую высоким окислительным потенциалом. В то же время, растворы, фильтрующиеся через пермские угленосные отложения, насыщаясь органическим веществом и теряя кислород, приобретают восстановительные свойства, резко контрастирующие с окислительной средой продуктов выветривания.

Литологическая контрастность алюмосиликатных осадочных пород, отличающихся низкими содержаниями оксидов Fe и Mn, и марганцево-желе-

зистых продуктов выветривания благоприятствует тому, чтобы эпигенетические растворы, фильтруясь через пермские осадки, сохраняли свой восстановительный потенциал, а окислительно-восстановительные реакции с максимальной интенсивностью проявились при достижении растворами верхних горизонтов коры выветривания.

В зоне контакта кор выветривания карбонатов с перекрывающими их пермскими угленосными отложениями важную роль играют реакции окисления органического углерода, поступающего с эпигенетическими растворами. Эти реакции, реализуемые в процессе взаимодействия растворов с предельно окисленными продуктами выветривания, относятся к экзотермическим и неизбежно вызывают повышение температуры системы, что благоприятствует интенсивным эпигенетическим преобразованиям продуктов выветривания. Согласно данным некоторых исследователей (Кравченко и др., 1992), температуры формирования редкометалльных руд Томтора варьируют в пределах 200–250 °С.

Геологическая граница, отделяющая коры выветривания от перекрывающих осадков, вследствие их литологической и структурной контрастности, является тектонически ослабленной зоной, которая неоднократно активизируется как при продолжающихся вплоть до юрского времени блоковых тектонических движениях, так и в результате уплотнения и усадки рыхлых продуктов выветривания под воздействием литостатической нагрузки. Поэтому эта граница служит зоной многократного расщепления и брекчирования пород, проявляющихся на стадии, предшествующей развитию эпигенетических процессов, синхронно с этими процессами и после их завершения. Расщепление и брекчирование пород зоны эпигенеза определяют их главные текстурные особенности – характерное линзовидно-полосчатое строение, наличие внутриминерализационных брекчий, тонких прослоев и линз разрушенных минералов, отличающихся повышенной хрупкостью (например, пирохлора), сложный рисунок полосчатости (струевидная, «пьяная», волнистая полосчатость). Благодаря сочетанию активной тектоники, нагрузке вышележащих пород и интенсивной инфильтрации растворов в зоне эпигенеза породы обычно подвергаются почти полной рекристаллизации и по механизму образования могут быть отнесены к тектонобластитам.

Таким образом, раннепермская граница между продуктами выветривания и пермскими обломочными отложениями длительное время функционировала как зона интенсивного тектонического дробления и расщепления, активной инфильтрации восстановленных грунтовых вод и мощный окислительно-восстановительный барьер. Главными окислительно-восстановительными реакциями и миграционными процессами являются восстановление Fe и Mn, вынос их из верхнего осветленного горизонта зоны эпигенеза и их осаждение в сопряженном сидеритовом горизонте, наряду с дополнительным образованием сидерита в этом горизонте за счет восстановления лимонита *in situ*.

Параллельно с этим происходит активное перераспределение корового вещества в верхнем горизонте зоны эпигенеза, где наблюдается наиболее интенсивная инфильтрация растворов. Не восстановленная часть лимонита перекристаллизовывается и перераспределяется с образованием тонких линз, прослоев и полосчатых обособлений сливного темно-бурого гетита вместе с новообразованными сульфатами и фосфатами Fe и соединениями Fe с V и Nb.

Фосфатные минералы – монацит и минералы группы крандаллита – также растворяются и перекристаллизовываются, при этом часть монацита замещается крандаллитом благодаря привносу дополнительных количеств глинозема. Конкуренция за фосфор между монацитом и минералами группы крандаллита приводит к локальному преобладанию монацита или алюмофосфатов, что позволяет выделять пирохлор-монацитовые, пирохлор-крандаллитовые и пирохлор-монацит-крандаллитовые разновидности руд.

Наличие в растворах избыточного количества глинозема и его постоянное поступление с растворами создают благоприятные условия для замещения алюмофосфатами и других минералов рассматриваемой зоны, а также для постепенного вытеснения ими минералов железа в процессе эпигенеза продуктов выветривания. Вместе с тем, ограниченное количество фосфора в зоне эпигенеза, который здесь лишь перераспределяется, приводит к тому, что развитие алюмофосфатов в эпигенетически измененных продуктах выветривания постепенно сменяется их каолинизацией.

Эволюция химического и минерального состава ультрабогатых руд

Концепция «переотложения» кор выветривания карбонатитов сводит анализ состава богатых руд к делению минералов на две категории – обломочные, реликтовые (пироксид, монацит и др.) и новообразованные (часть монацита, группа крандаллита и др.), при этом приводится весьма сомнительная апелляция к процессу химического осаждения новообразованных минералов из открытого озерного водоема. Сознвая недостаточность подобного подхода, авторы концепции допускают некоторое влияние эпигенетических преобразований на состав богатых руд. Однако признание эпигенеза даже не в равнозначной позиции не прибавляет убедительности концепции «переотложенных» кор выветривания, но делает ее эклектичной. Все генетические позиции минералов, постулируемые данной концепцией, вполне допускают и иную интерпретацию.

В отличие от этого химический и минеральный состав и структурно-текстурные особенности богатых руд в совокупности с их геологической позицией, в особенности с очевидным фактом геологической и генетической сопряженности богатых руд с подстилающими сидеритовыми породами, однозначно свидетельствуют в пользу концепции формирования руд в процессе восстановительного эпигенеза продуктов латеритного выветривания карбонатитов.

При анализе минерального и химического состава богатых руд обращает на себя внимание то, что обе концепции признают в качестве исходного материала продукты латеритного выветривания карбонатитов. Расхождения заключаются в способах и механизмах преобразования резко обогащенных окисным железом латеритных охр в относительно бедные железом, в значительной степени, закисным, но обогащенные редкими металлами (Nb, La, Ce, Y, Sc и др.) и некоторыми другими компонентами (Al, Ba, Ga и др.) руды.

Главная проблема концепции «переотложенных» кор выветривания заключается в отсутствии в ней механизма подобных преобразований. Среди поверхностных фаций, венчающих разрез латеритных кор выветривания карбонатитов, отсутствуют аналоги томторских руд. Более того, поверхностные образования на корях выветривания во всех известных случаях сопровождаются накоплением Fe и разубоживанием по редким металлам (Nb, РЗЭ и др.). Кроме того, концепция не предлагает

физических механизмов одновременного накопления глинозема и редких металлов, наблюдаемого в богатых томторских рудах. В отличие от этого, концепция восстановительного эпигенеза продуктов латеритного выветривания карбонатитов не только включает в себя реальные геохимические механизмы формирования состава и продуктивности богатых руд, но и предлагает адекватную методику анализа этого механизма. Особенности поведения компонентов при формировании горизонта богатых руд могут быть наглядно продемонстрированы с помощью миграционных рядов, в которых миграционная способность компонентов выражена через коэффициенты их концентрации, т.е. отношения содержаний компонентов в продуктах эпигенеза к их содержаниям в исходных продуктах выветривания. Миграционный ряд компонентов, рассчитанный по одному из опорных буровых пересечений участка Буранный Томторского месторождения для богатых руд осветленного горизонта, залегающих на латеритных охрах (скв. 6151), имеет вид: $Mn_{0.2} Fe_{0.4} Ca_{0.44} Mg_{0.52} Zn_{0.8} (CO_2)_{0.95} F_{1.4} Cl_{1.4} Rb_{1.4} Na_{1.48} Pr_{1.62} La_{1.66} P_{1.68} Ce_{1.69} Nd_{1.73} Nb_{1.68} Pb_{1.87} Zr_{1.96} Ti_{2.09} Sm_{2.1} Cr_{2.1} Th_{2.19} K_{2.38} Dy_{2.4} Si_{2.44} V_{2.6} Y_{2.61} Gd_{2.8} Sc_{2.86} Yb_{3.5} U_{3.6} Lu_{3.7} Sr_{3.93} (SO_3)_{5.1} Al_{11.0} Ba_{11.1}$.

На графике (рис. 3), построенном на основе этого миграционного ряда, выделены группы элементов, отличающиеся геохимическим поведением. К группе «подвижных» относятся компоненты, которые выносятся в процессе эпигенеза; к «инертным» – компоненты, которые испытывают остаточное накопление; компоненты «смешанной природы»

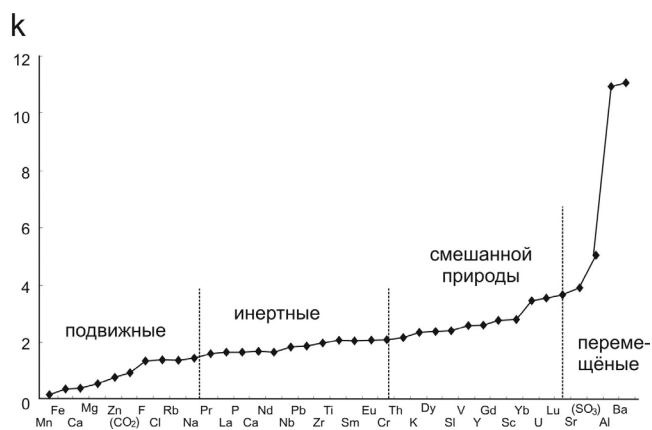


Рис. 3. Миграционный ряд компонентов для эпигенетической зоны осветления латеритных охр участка Буранный месторождения Томтор (по результатам опробования буровой скважины 6151).

Fig. 3. Migration range of components for epigenetic bleaching zone of laterite ochres in the Buranny area of the Tomtor deposit (according to sampling results of borehole 6151).

ды», наряду с остаточным накоплением, частично привносятся эпигенетическими растворами; и наконец, к «перемещенным» компонентам относятся те, для которых наиболее выражена тенденция привноса в зону эпигенеза. К подвижным элементам относятся, прежде всего, Fe и Mn, а также Ca, Mg, Zn, F, Cl, Rb и Na. Группа инертных компонентов, накапливающихся в продуктах эпигенеза, включает легкие РЗЭ, Nb, Pb и P. К компонентам «смешанной природы», остаточное накопление которых может усиливаться благодаря дополнительному привносу эпигенетическими растворами, относятся Zr, Ti, V, Y, Si, тяжелые РЗЭ, Sc, Th, U, K и Sr. Наконец, группа «перемещенных» компонентов включает S, Ga, Al и Ba.

Вариации химического состава руд находят отражение в их минеральных типах. Среди балансовых руд выделяются два главных минеральных типа: 1) наиболее богатые редкими металлами монацит-пироксеновые (анализ 5 в таблице) и 2) относительно бедные крандаллит-монацит-пироксеновые (анализ 6 в таблице). В этом же ряду находятся забалансовые каолинит-крандаллит-пироксеновые руды (анализ 7 в таблице). Этот ряд образует один из главных трендов эволюции состава томторских руд.

Второй тренд обусловлен прогрессирующим снижением содержания Fe в рудах и относительным ростом доли закисного Fe по сравнению с окисным. Оба тренда имеют генетическую природу и играют ключевую роль при оценке конкурирующих концепций. Снижение концентрации Fe при относительном росте доли его закисной формы, не служит убедительным аргументом в пользу процесса восстановительного эпигенеза продуктов выветривания, который всегда сопровождается выносом восстановленных подвижных форм Fe. Одновременно вынос Fe обеспечивает эффективный механизм концентрирования инертных редких металлов (Nb, La, Ca, Y, Sc и др.) в продуктах эпигенеза.

Эволюция минерального состава руд, обусловленная сменой минералов в ряду монацит – минералы группы крандаллита – каолинит, также не находит объяснения с позиций концепции переотложения кор выветривания, получает обоснование в концепции восстановительного эпигенеза продуктов выветривания, предполагающей активный обмен веществом с перекрывающими коры алюмосиликатными осадочными породами.

Еще одной особенностью богатых томторских руд, является корреляция между составом руд и характером субстрата, на котором они залегают. Наличие такой корреляции свидетельствует о заимствовании главных рудных компонентов из субстрата, который дополнительно обогащается благодаря выносу подвижных в условиях эпигенеза компонентов. Именно этим объясняется снижение средних содержаний редких металлов (Nb, РЗЭ, Y, Sc) в рудах Северного и Южного фланговых участков в 2–3 раза по сравнению с участком Буранный, где сосредоточены наиболее богатые руды. На участке Буранный оруденение представлено наиболее продуктивными эпигенетически измененными латеритными охрами, в то время как на фланговых участках горизонт латеритных охр эродирован, и эпигенетическим изменениям подвергаются относительно бедные редкими металлами лимонит-франколитовые породы. В первичном субстрате на фланговых участках, наряду с редкометалльными доломит-кальцитовыми карбонатами, в значительно больших количествах, чем на Буранном, присутствовали анкеритовые карбонаты и связанные с ними анкерит-шамозитовые метасоматиты. В первичном оруденении анкеритовых карбонатитов и их метасоматитов РЗЭ обычно преобладают над Nb, поэтому коры выветривания этих пород и продукты их эпигенеза также существенно обогащены РЗЭ, но беднее Nb по сравнению с рудами участка Буранный.

Особенности структуры и текстуры богатых руд

Среди структурных характеристик богатых руд, проливающих свет на их генезис, наиболее показательны особенности структуры главных рудных минералов – пироксена и монацита. Пироксен в рудах представлен 1) зональными кристаллами, в ядрах которых находятся первичный Na-Ca-пироксен, а во внешних зонах – гипергенный Sr-, Ba- или Pb-пироксен (рис. 4), либо 2) фазово-неоднородными зернами со сложным внутренним строением, которые сохраняют форму первичных кристаллов и содержат их отдельные реликтовые участки, заключенные во вторичном Sr-, Ba- и Pb-пироксене (рис. 5).

В богатых рудах выделяются два главных морфологических типа пироксена: 1) идиоморфные кубоктаэдрические кристаллы, сохраняющие исходную форму, свойственную минералу в карбона-

Таблица

Средний химический состав (мас. %) гипергенных продуктов латеритного профиля выветривания карбонатитов и их эпигенетически измененных разновидностей

Table

Average chemical composition (wt. %) of supergene products of laterite profile of weathering crusts of carbonatites and their epigenetically altered varieties

Компоненты	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n	32	24	12	64	22	42	1	14	1
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	20.4
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	13.9	11.6	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
REE 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, 2 – лимонит-франколитовые породы, 3 – лимонит-кварцевые породы; 4–8 – эпигенетически измененные продукты выветривания: 4 – осветленные охристые продукты выветривания или руды богатого горизонта, 5 – пироклор-монацитовые руды, 6 – пироклор-алюмофосфатные руды, 7 – каолинит-крандалитовые руды, 8 – лимонит-сидеритовые породы; 9 – сидерит-франколитовые породы. n – количество анализов.

Note. 1–3 – supergene products of laterite profile of weathering crusts of carbonatites: 1 – limonite ochres, 2 – limonite-francolite ores, 3 – limonite-quartz rocks; 4–8 – epigenetically altered weathering products: 4 – bleached ochreous weathering products or ores of high-grade horizon, 5 – pyrochlore-monazite ores, 6 – pyrochlore-alumophosphate ores, 7 – kaolinite-crandallite ores, 8 – limonite-siderite ores; 9 – siderite-francolite ores. n – number of analyses.

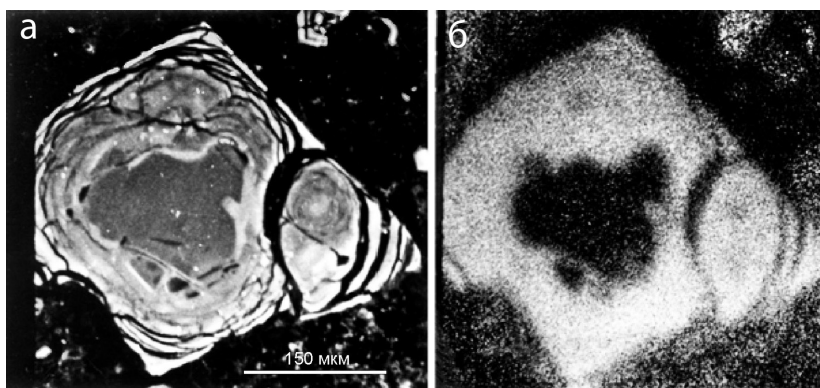


Рис. 4. Зональное зерно с реликтовым ядром первичного пироклора без примесей и внешней зоной вторичного стронциопироклора:

а – BSE фото; б – фото в характеристическом рентгеновском излучении Sr.

Fig. 4. Zonal grain with a relic core of trace element-free primary pyrochlore and an outer zone of secondary strontio-pyrochlore:

а – BSE image; б – image in characteristic X-ray radiation of Sr.

титах и 2) угловатые обломочные зерна. В последнем случае обломки пироклора группируются около исходного зерна, оставаясь практически на ме-

сте его разрушения (рис. 6а), либо более или менее равномерно рассеяны в рудах, будучи разрушенными и смещенными в процессе усадки продуктов

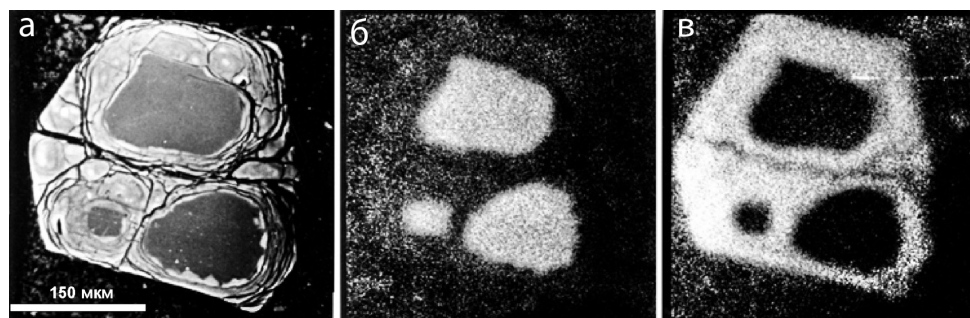


Рис. 5. Зерно вторичного барийсодержащего стронциопирохлора с реликтами первичного пирохлора без примесей.

a – BSE фото; б, в – фото в характеристическом рентгеновском излучении Ca (б) и Sr (в).

Fig. 5. Secondary pyrochlore grain with relic trace element-free primary pyrochlore:

a – BSE image; б, в – image in characteristic X-ray radiation of Ca (б) and Sr (в).

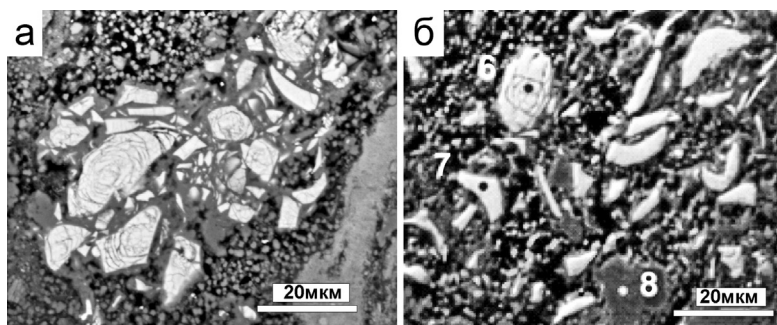


Рис. 6. Разрушенные зерна пирохлора в богатых рудах:

a – без существенного перемещения фрагментов (фото Л.А. Паутова); б – относительно равномерно распределенные обломки зерна пирохлора в богатой руде (6, 7 – пирохлор, 8 – минерал группы кандаллита). BSE фото.

Fig. 6. Clasts of pyrochlore grains in high-grade ores:

a – in situ clasts (photo by L.A. Pautov); b – relatively uniform clasts of pyrochlore grain in high-grade ore (6, 7 – pyrochlore, 8 – the candallite group mineral). BSE image.

выветривания и последующего эпигенеза (рис. 6б). Характерно также присутствие мелкозернистых линзовидных агрегатов обломочных зерен пирохлора, которые приурочены к плоскостям рассланцевания руды. Сторонники концепции «переотложенных» кор выветривания рассматривают линзовидные агрегаты обломочных зерен пирохлора как свидетельство осадочного россыпного происхождения богатых руд. Однако, как следует из рис. 7, в пределах микрообъемов руды крупные не разрушенные зерна пирохлора сочетаются с гранулированными зернами, которые в плоскостях рассланцевания и скольжения превращаются в линзовидные мелкозернистые агрегаты обломочных зерен. Таким образом, очевидно, что мелкозернистые линзовидные агрегаты обломочных зерен пирохлора представляют собой результат дробления крупных кристаллов и растаскивания их обломков по плоскостям рассланцевания.

Важно, что у пирохлора полностью отсутствуют признаки переотложения или переноса (окатан-

ность зерен, их сортировка по размеру и т.д.). Напротив, морфологические особенности пирохлора указывают на его нахождение in situ и последующее выветривание и эпигенез с сохранением морфологии идиоморфных кристаллов либо их раздробленных обломков, претерпевших фрагментацию вместе с вмещающей породой. Этот вывод тем более очевиден, что пирохлор, испытавший гипергенные преобразования, обладает крайне малой механической прочностью и не способен к транспортировке.

Другим важнейшим минеральным компонентом ультрабогатых томторских руд является монацит. В рамках концепции «переотложенных кор выветривания» часть монацита рассматривается как реликтовая, другая часть – как новообразованная в процессе переотложения корового материала и формирования делювиально-озерной россыпи. Существенным недостатком подобной интерпретации является отсутствие доказательств формирования монацита в условиях открытого поверхностного водоема.

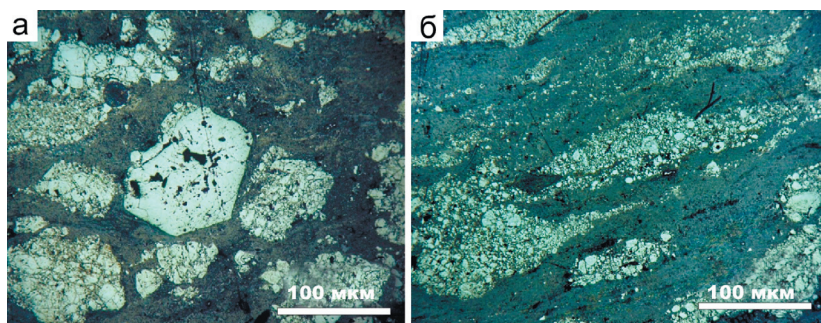


Рис. 7. Грануляция, дробление и разлинзование крупных кристаллов пирохлора в связи с расланцеванием богатых руд.

а – начальная стадия: грануляция кристаллов пирохлора; б – расланцевание богатых руд и разлинзование гранулированных кристаллов пирохлора. Полированный шлиф.

Fig. 7. Granulation, fragmentation and formation of lenticular aggregates of pyrochlore crystals along with foliation of high-grade ores.

а – initial stage: granulation of pyrochlore crystals; б – foliation of high-grade ores and formation of lenticular aggregates of pyrochlore crystals. Polished section.

Концепция восстановительного эпигенеза продуктов выветривания карбонатитов также рассматривает значительную часть монацита как унаследованную от кор выветривания карбонатитов. При этом особенности состава и структуры монацита указывают на то, что в процессе эпигенеза монацит неоднократно испытывает перекристаллизацию, которая сопровождает тектоническую активизацию зоны эпигенеза и поступление новых порций эпигенетических растворов. Можно выделить несколько генераций монацита, состав которого эволюционирует в сторону постепенного обогащения Th (до 4.5 % ThO_2), Y (до 3.65 % Y_2O_3) и Sc (до 0.29 % Sc_2O_3), а также снижением величины отношения $\text{Ln}_{\text{Ce}}/\text{Ln}_Y$.

С одним из наиболее поздних, проявленных локально эпизодов внутрикристаллизационного

тектонического расслаивания связано появление в рудах ксенотима и Zr-ксенотима.

В качестве доминирующих процессов для монацита в богатых рудах можно выделить перекристаллизацию, которая сопровождалась кластеризацией вещества, и прогрессирующее замещение минералами группы крандаллита. Это объясняет преобладание в богатых рудах полосчатых и линзовидно-полосчатых текстур с чередованием полос и линз, образованных тонкозернистыми агрегатами монацита и гоацит-флоренсита, причем последние постепенно вытесняют монацит из руды. Особое положение на фоне этой полосчатости занимают обтекаемые ею реликтовые кристаллы пирохлора, сохраняющие морфологические особенности первичного минерала карбонатитов (рис. 8).

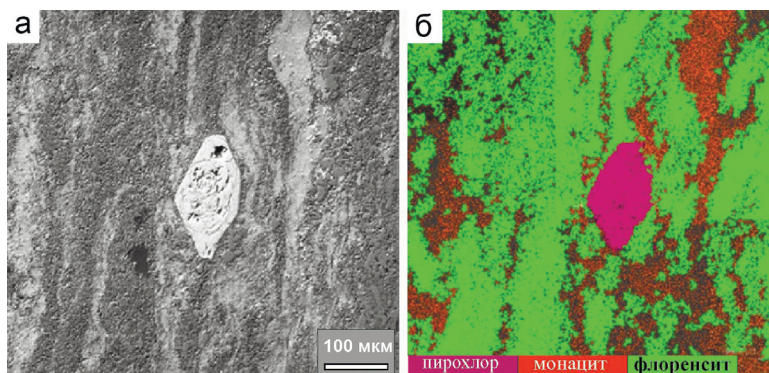


Рис. 8. Полосчатая текстура богатых руд с чередованием тонких струевидных полос монацита и флоренсита и вкрапленностью пирохлора:

а – BSE фото; б – фото в характеристическом рентгеновском излучении Ce и Al.

Fig. 8. Banded structure of high-grade ores with alternation of thin jet-like bands of monazite and florencite and dissemination of pyrochlore:

а – BSE image; б – image in characteristic X-ray radiation of Ce and Al.

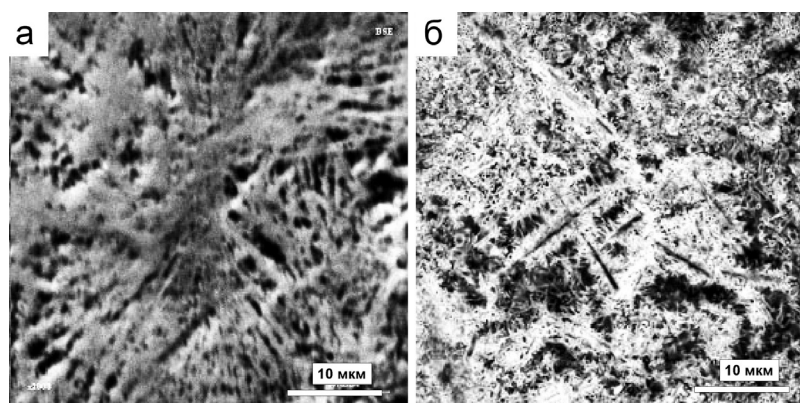


Рис. 9. Структура монацитового агрегата в богатых рудах:

а – решетка сросшихся длиннопризматических индивидов монацита; б – то же с трубчатым строением зерен монацита и мелкими шиповидными наростами на поверхности (Лазарева и др., 2015).

BSE фото.

Fig. 9. Texture of monazite aggregate in high-grade ores:

а – lattice of long-prismatic monazite crystals; b – the same with tubular structure of monazite and small spine-like aggregates on the surface (Lazareva et al., 2015).

BSE image.

Для оценки достоверности конкурирующих концепций существенное значение имеет структура монацитового и гоацит-флоренситового агрегатов. Эти агрегаты имеют сходную структуру, однако у монацита она более четкая. Выделения монацита, которые при сравнительно небольших увеличениях (400–100× и менее) обычно имеют вид сплошных массивных агрегатов, при больших увеличениях (600× и более) обнаруживают сложное внутреннее строение. Они состоят из сросшихся беспорядочно ориентированных длиннопризматических индивидов размером по длинной оси 10–20 мкм, а в поперечнике – десятые доли микрометра. Сросшиеся индивиды образуют ажурный пористый решетчатый (рис. 9а). Иногда длиннопризматические микрокристаллы монацита приобретают субпараллельную ориентировку или образуют сферолитовые агрегаты.

Е.В. Лазарева с соавторами (2015) в качестве свидетельства важной роли микроорганизмов в формировании богатых руд Томтора рассматривает морфологическое сходство агрегатов монацита и галлуазита с бактериоморфными нано- и микроструктурами (рис. 9б). Нельзя отрицать реальную возможность участия микроорганизмов в поверхностном и субповерхностном минералообразовании. Однако едва ли они могли играть существенную роль в концентрировании рудных компонентов и формировании ультрабогатых Nb-PЗЭ-Sc руд. Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что главную роль в этом играли восстановительные ре-

акции и связанные с ними миграционные процессы в верхнем горизонте кор выветривания карбонатов под влиянием растворов, дренирующих перекрывающие коры угленосные отложения.

Что касается трубчатых форм, то, как показывает опыт изучения месторождений кор выветривания карбонатов, трубчатые формы минералов микроскопической размерности распространены и среди абиогенных образований. Тубулярность свойственна практически всем новообразованным гипергенным минералам кор выветривания карбонатов и их эпигенетически измененных разновидностей и, по-видимому, указывает на участие коллоидных растворов в образовании этих минералов (Лапин, Куликова, 2017).

Резюмируя, отметим, что структура монацитового агрегата, также как и текстурный рисунок богатых руд соответствуют концепции их эпигенетического генезиса и противоречат гипотезе перетолженных кор выветривания карбонатов.

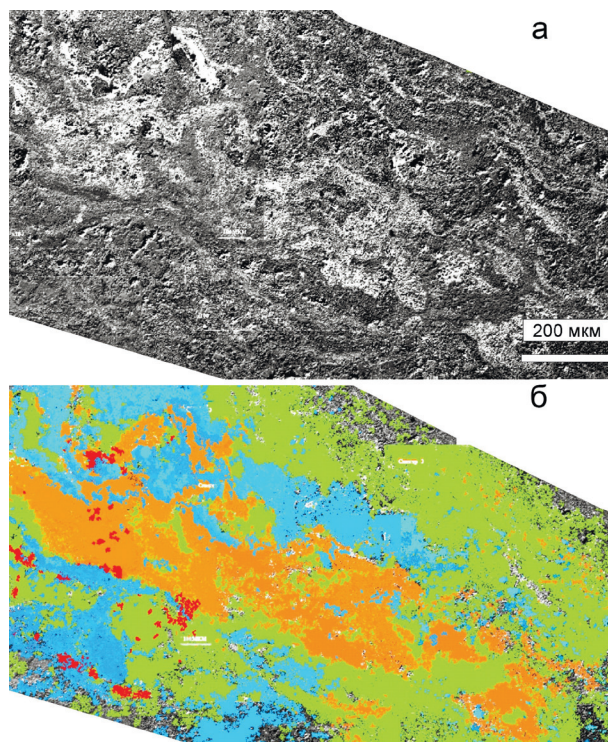
Наиболее показательна с точки зрения обоснования и выбора генетической концепции структурно-текстурная позиция ксенотима в богатых рудах. Ксенотим развит в рудах локально и приурочен к поздним эпизодам их тектонического рассланцевания. Несмотря на то, что ксенотим относится к завершающим этапам формирования богатых руд, он во многом может служить моделью их генезиса. Структурно-текстурная позиция ксенотима в богатых рудах иллюстрируется на рис. 10, демонстрирующим структурно-вещественную неодно-

Рис. 10. Ксенотим в зонах рассланцевания богатых руд:

а – изображение BSE; б – растровое изображение в характеристическом рентгеновском излучении Y (линия $L\alpha$), Ti (линия $K\alpha$), Al (линия $K\alpha$), Fe (линия $K\alpha$); ■ – Zr-ксенотим, ■ – гояцит-флоренсит, ■ – ильменорутил, ■ – гетит.

Fig. 10. Xenotime in foliation zones of high-grade ores:

а – BSE image; б – image in characteristic X-ray radiation of Y ($L\alpha$ line), Ti ($K\alpha$ line), Al ($K\alpha$ line), Fe ($K\alpha$ line); ■ – Zr-xenotime, ■ – goyazite-florencite, ■ – ilmenorutile, ■ – goethite.



родность руды, а именно, наличие зоны рассланцевания и минерализации, которая проявляется тонкими прожилковыми инъекциями более тяжелой (на рис. 10а, более светлой) фазы. Изображение этого же участка руды в характеристическом рентгеновском излучении Y, Al, Ti и Fe показывает, что тяжелой фазой в зоне рассланцевания является ксенотим с переменными количествами Zr (показан оранжевым цветом). Из рис. 10 следует также, что Y минерализация сопровождается перекристаллизацией и развитием вокруг ксенотима симметричных зон алюмофосфатов (гояцита, показан зеленым цветом), а также минералами Ti (ильменорутил, показан голубым цветом).

При больших увеличениях ($600\times$ и более) видно, что ксенотим, который при меньших увеличениях выглядит, как сплошной агрегат, в действительности образует выделения, морфологически сходные с выделениями монацита. Они представлены более или менее тесно сросшимися длиннопризматическими трубчатыми кристаллами, которые либо образуют ажурную вязь, либо срастаются друг с другом в более плотные агрегаты.

Особенности распределения ксенотима в богатых рудах подтверждают наличие протяженного во времени процесса эпигенетического преобразования продуктов латеритного выветривания карбонатов. Восстановительный эпигенез включает ряд

частично перекрывающиеся во времени преобразований продуктов выветривания:

1) восстановление и вынос Fe и Mn, сопровождающиеся остаточным накоплением пирохлора и монацита;

2) перекристаллизация монацита и частичное замещение его алюмофосфатами за счет прогрессирующего привноса глинозема;

3) образование Y минерализации с дополнительным развитием алюмофосфатов. Относительно позднее развитие Y минерализации, вероятно, обусловлено большей устойчивостью комплексных соединений Y в растворах. Эта стадия проявляется в привносе не только Y, но и Th , Sc , U и Zr – элементов, которые находят благоприятные позиции в структуре ксенотима;

4) каолинизация, переход к которой означает, что количество привнесенного растворами глинозема превышает необходимое для полного связывания фосфора в алюмофосфатами. Таким образом, структурно-текстурные особенности Y минерализации, которая составляет один из эпизодов длительного процесса формирования богатых руд, соответствует генетической интерпретации этих руд как продуктов восстановительного эпигенеза кор выветривания карбонатитов под воздействием восстановленных бескислородных вод, дренирующих перекрывающие пермские угленосные отложения.

В то же время, такие особенности, как наличие симметричной зональности вокруг ксенотима, убедительно опровергает концепцию «переотложенных кор выветривания».

Выводы

Проведенный сравнительный анализ главных концепций формирования богатых руд Томторского месторождения однозначно свидетельствует о несостоятельности представлений об их формировании в результате переотложения продуктов выветривания карбонатитов и дает убедительные доказательства их генезиса в процессе восстановительного эпигенеза латеритных кор выветривания карбонатитов.

Концепция «переотложенных кор выветривания карбонатитов» опровергается многочисленными примерами месторождений, в которых коры выветривания, сформированные на открытой поверхности, подвергались процессам поверхностного преобразования. Поверхностные процессы на корях выветривания имеют иную геохимическую направленность и не обеспечивают эффективного концентрирования рудных компонентов и достижения параметров, свойственных томторским рудам. В пользу концепции эпигенетического образования богатых томторских руд свидетельствуют следующие факты.

1. Четкая пространственная корреляция богатых руд как с подстилающими продуктами латеритного выветривания карбонатитов, так и с перекрывающими углесносными отложениями перми свидетельствует о формировании богатых руд после перекрытия кор выветривания породами, богатыми органическим углеродом, и о непосредственном участии этих пород в формировании богатых руд. Продукты выветривания карбонатитов, подстилающие богатые руды, являются предварительно обогащенным субстратом для формирования богатых руд, в то время как перерывающие их осадки, содержащие мощные пласты угля, служат главным фактором, инициирующим процесс восстановительного эпигенеза продуктов выветривания, который сопровождается дополнительным концентрированием рудных компонентов, приводящим к возникновению суперконцентраций редких металлов.

2. Зональное строение месторождения, проявляющееся в закономерной смене по вертикали сверху вниз осветленных продуктов выветривания, связанных с восстановлением и выносом Fe и Mn, сидеритами соответствует известной зональности

продуктов восстановительного эпигенеза в различных эндогенных железорудных формациях.

3. Структурно-текстурные особенности богатых руд и, прежде всего, эволюция их минерального и химического состава говорят о длительном, прерывистом, многостадийном процессе их формирования и влиянии на этот процесс перекрывающих пород.

4. Прямая зависимость состава и полезной нагрузки богатых руд от характера субстрата, на котором они залегают, свидетельствует о наследовании главных рудных компонентов из субстрата, обогащение которыми происходит благодаря выносу подвижных при восстановительном эпигенезе компонентов.

5. Наличие симметричной зональности в строении минерализованных зон, которые соответствуют различным эпизодам формирования богатых руд, указывает на наложенный характер процесса минералообразования и его связь с неоднократным тектоническим расщеплением и перекристаллизацией руд, которые по способу образования могут быть отнесены к тектонобластитам.

Развитие суперконцентраций редких металлов и формирование руд с уникальными параметрами обусловлено суммированием рудоконцентрирующих эффектов двух последовательных этапов гипергенеза – окислительного и восстановительного, когда влияние одного синэргически усиливает действие другого. Аддитивность благоприятных факторов – вероятно, одно из необходимых условий формирования уникальных месторождений.

Пример Томторского месторождения иллюстрирует закономерную цикличность гипергенных процессов, которая заключается в смене процесса выветривания, характеризующегося окислительной обстановкой, усадкой и эрозией территории, ее заболачиванием, накоплением органического углерода и его углефикацией, и наконец, переходом к процессу восстановительного эпигенеза гипергенных продуктов. В этих условиях зона контакта марганцово-железистых кор выветривания с перекрывающими богатыми органическим углеродом породами становится перспективной продуктивной зоной концентрирования не только редких металлов, но и ряда других ценных компонентов (Ti, V, Al, Ga, Sr, Ba и др.).

Важным итогом является вывод о необходимости радикального изменения прогнозно-поисковых критериев руд томторского типа. Недостаточность критериев, вытекающих из концепции «переотло-

женных» кор выветривания, очевидна. Большинство месторождений кор выветривания карбонатитов были экспонированы на земной поверхности и подвергались воздействию поверхностных факторов. Однако ни в одном из них не обнаружены руды томторского типа. Более того, поверхностные фации кор выветривания, которые по составу и структурно-текстурным признакам не имеют ничего общего с томторскими рудами, практически всегда беднее редкими металлами, чем лежащие ниже продукты выветривания.

Согласно концепции, которая объясняет формирование уникальных томторских руд процессами восстановительного эпигенеза латеритных кор выветривания карбонатитов, условия, благоприятствующие развитию этих руд, предполагают наличие геологической ситуации, главной особенностью которой является перекрытие кор выветривания карбонатитов богатыми органическим углеродом осадочными породами. Хотя статистика случаев, в которых реализуются такие условия мала и ограничивается отдельными локальными участками Чуктуконского месторождения, они подтверждают высокую надежность прогнозно-поисковых критериев уникальных томторских руд, вытекающих из эпигенетической концепции их формирования. Действительно, на Чуктуконском месторождении, где морфология кор выветривания карбонатитов осложняется большим количеством усадочных депрессий, заполненных бокситоносными осадками, богатые руды томторского типа появляются только в тех немногих депрессиях, в которых перекрывающие бокситоносные осадки содержат пласты углей, углистых и лигнитовых глин.

Исходя из этого, очевидна необходимость перехода от гипотезы «переотложенных» кор выветривания к концепции, которая отводит главенствующую роль в формировании сверхбогатых редкометалльных руд Томтора восстановительным эпигенетическим преобразованиям продуктов латеритного выветривания карбонатитов.

В последнее время предпринимаются попытки развенчания некоторых «мифов Томтора», в частности, подвергается сомнению уникальность ультрабогатых редкометалльных руд этого месторождения (Быховский и др., 2018). Причина подобных попыток очевидна. Она заключается в стремлении, сохраняя приверженность концепции кор выветривания, поставить Томторское месторождение в один ряд с обычными месторождениями кор выветривания карбонатитов, сформировавшимися на

открытой поверхности земли. Однако, прежде всего, необходимо отказаться от главного мифа Томтора об образовании ультрабогатых редкометалльных руд этого массива в результате переотложения кор выветривания карбонатитов. Только с признанием восстановительного эпигенеза кор выветривания в качестве ведущего фактора формирования этих ультрабогатых руд появится возможность эффективного прогнозирования и обнаружения новых аналогичных объектов. Пока же Томторское месторождение остается уникальным как по уровню содержания Nb в рудах, так и по беспрецедентному комплексу сопутствующих ниобию редкометалльных и других рудных компонентов ($P3Э_{Ce}$, $P3Э_{Y}$, Sc, V, Ti, P, Al, Sr, Ba и др.).

Литература

- Булгакова А.П.** (1967) Наложенная гипергенная минерализация в богатых железных рудах Лебединского месторождения, КМА. В кн.: Коры выветривания. Вып. 8. М., Наука, 50–66.
- Быховский Л.З., Котельников Е.И., Пикалова В.С.** (2018) Мифы и реалии Томтора. *Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Роль и место мелко- и среднемасштабных геохимических работ в составе экологического изучения недр»*. М., ИМГРЭ, 135–138.
- Владыкин Н.В.** (1999) Карбонатитовые и К-щелочные породы – новый источник полезных ископаемых. *Тезисы конференции «Карбонатиты Кольского полуострова»*. Санкт-Петербург, 45.
- Коноплев А.Д., Кузьмин В.И., Эпштейн Е.М. и др.** (1992) Геолого-минералогические особенности делювиально-озерной россыпи на коре выветривания редкометалльных карбонатитов. В сб.: *Минералогия и геохимия россыпей*. М., Наука, 111–123.
- Кравченко С.М., Беляков А.Ю., Покровский Б.Г.** (1992) Геохимия и генезис массива Томтор (север Сибирской платформы). *Геохимия*, 8, 1094–1110.
- Куземкина Е.М.** (1962) О некоторых вторичных процессах в мезозойских бокситах Северо-Западного Тургай. В кн.: Коры выветривания. Вып. 4. М., АН СССР, 195–209.
- Лазарева Е.В., Жмодик С.М., Добрецов Н.Л., Толстов А.В., Щербов Б.Л., Карманов Н.С., Герасимов Е.Ю., Брянская А.В.** (2015) Главные рудообразующие минералы аномально богатых руд месторождения Томтор (арктическая Сибирь). *Геология и геофизика*, 6, 1080–1115.
- Лапин А.В.** (1995) Геологическая позиция и генезис богатых комплексных редкометалльных рудоместорождения Томтор. *Геология рудных месторождений*, 1, 22–39.

- Лапин А.В., Куликова И.М.** (2017) Коллоидное минералообразование в корях выветривания карбонатитов. В сб.: Новые данные по минералогии и геохимии редкометалльных месторождений. Москва, ИМГРЭ, 52–86.
- Лапин А.В., Толстов А.В.** (1995) Месторождения кор выветривания карбонатитов. М., Наука, 208 с.
- Лапин А.В., Толстов А.В.** (2011) Минерогения кор выветривания карбонатитов. М., ГЕОКАРТ: ГЕОС, 308 с.
- Ломаев В.Г., Сердюков С.С.** (2011) Чуктуконское месторождение ниобий-редкоземельных руд – приоритетный объект для модернизации редкометалльной промышленности России. *Журнал СВУ. Техника и технологии*, 4(2), 132–154.
- Толстов А.В.** (2006) Главные рудные формации Севера Сибирской платформы. Москва, ИМГРЭ, 213 с.
- Требования к качеству минерального сырья, содержащего редкие и редкоземельные металлы, иттрий и лантаноиды (2016) Методика № 120, Москва.
- Энтин А.Р., Зайцев А.И., Ненасhev Н.И., Василенко В.Б.** (1990) О последовательности геологических событий, связанных с внедрением Томторского массива ультраосновных щелочных пород и карбонатитов (Северо-Западная Якутия). *Геология и геофизика*, 12, 42–50.
- Kravchenko S.M., Pokrovsky B.G.** (1995) The Tomtor alkaline ultrabasic massif and related REE-Nb deposits, northern Siberia. *Economic Geology*, 90(3), 676–689.
- Kravchenko S.M., Belyakov A.Yu., Pokrovskiy B.G.** (1992) [Geochemistry and genesis of the Tomtor pluton (north of Siberian Platform)]. *Geokhimiya [Geochemistry]*, 8, 1094–1110. (in Russian).
- Kravchenko S.M., Pokrovsky B.G.** (1995) The Tomtor alkaline ultrabasic massif and related REE-Nb deposits, northern Siberia. *Economic Geology*, 90(3), 676–689.
- Kuzemkina E.M.** (1962) [Some secondary processes in Mesozoic boxites of Northwest Turgai]. *Cori vyvetrivaniya [Weathering crusts]*. Is. 4. Moscow, Nauka, 195–209. (in Russian).
- Lazareva E.V., Zhmodik C.M., Dobretsov N.L., Tolstov A.V., Shcherbov B.L., Karmanov N.S., Gerasimov E.Yu., Bryanskaya A.V.** (2015) [Main minerals of abnormally high-grade ores of the Tomtor deposit (Arctic Siberia)]. *Russian Geology and Geophysics*, 6, 844–873.
- Lapin A.V.** (1995) [Geological setting and genesis of high-grade complex rare-metal ores of the Tomtor deposit]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy [Geology of Ore Deposits]*, 1, 22–39. (in Russian).
- Lapin A.V., Kulikova I.M.** (2017) [Colloidal mineral formation in weathering crusts of carbonatites]. *Novye dannye v mineralogii i geokhimi redkometallnykh mestorozhdeniy [New Data on Mineralogy and Geochemistry of Rare-Metal Deposits]*. Moscow, IMGRE, 52–86 (in Russian).
- Lapin A.V., Tolstov A.V.** (1995) [Deposits of weathering crusts of carbonatites]. Moscow, Nauka. 208 p. (in Russian).
- Lapin A.V., Tolstov A.V.** (2011) [Minerageny of weathering crusts of carbonatites]. Moscow, GEOART: GEOS, 308 p. (in Russian).
- Lomaev V.G., Serdyukov S.S.** (2011) [Chuktukon Nb–REE deposit: a priority object for modernization of rare metal industry of Russia]. *Zhurnal SFU. Tekhnika i tekhnologii [Journal of SibFU. Engineering and Technologies]*, 4(2), 132–154 (in Russian).
- [Requirements for quality of mineral resources containing rare and rare-earth metals, yttrium and lanthanoids] (2016) Methods no. 120, Moscow. (in Russian).
- Tolstov A.V.** (2006) [Main ore complexes of the north Siberian Platform]. Moscow, IMGRE, 213 p. (in Russian).
- Vladykin N.V.** (1999) [Carbonatite and K-alkaline rocks – a new source of mineral resources]. *Tezisi konferentsii «Karbonatity Kolskogo poluoostrova» [Abstracts of Conference «Carbonatites of the Kola Peninsula»]*. St. Petersburg, 45. (in Russian).

Статья поступила в редакцию 20 августа 2019 г.