

*Е.В. Лазарева, С.М. Жмодик, А.В. Толстов,
В.А. Пономарчук, А.В. Травин, Н.Н. Добрецов
Институт геологии и минералогии
им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия
lazareva@igm.nsc.ru*

Уникальное Nb-REE месторождение Томтор (Арктическая Сибирь)

*E.V. Lazareva, S.M. Zhmodik, A.V. Tolstov,
V.A. Ponomarchuk, A.V. Travin, N.N. Dobretsov
Sobolev Institute of Geology and
Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia*

Unique Nb-REE Tomtor deposit (Arctic Siberia)

Abstract. The paper discusses the factors and events that led to the formation of a unique Nb and REE deposit associated with the Tomtor complex of ultramafic rocks and carbonatites.

На севере Республики Саха (Якутия) находится уникальное месторождение, связанное с Томторским комплексом ультраосновных пород и карбонатитов, которое широко известно богатейшими Sc-REE-Y-Nb рудами. Среднее содержание Nb_2O_5 в рудах участка Буранный оценивается в 4.5 %, REE_2O_3 – 10 %, Y_2O_3 – 0.75 % и Sc_2O_3 – 0.06 %, что позволило признать руды природным концентратом стратегических металлов [Эпштейн и др., 1994; Добрецов, Похиленко, 2010; Толстов и др., 2011]. Богатства Томторского комплекса не ограничиваются тонкослоистыми Sc-REE-Y-Nb рудами, сосредоточенными в трех пластовых залежах (участки Буранный, Северный и Южный), которые определяются как «верхний рудный горизонт» (ВРГ) [Kravchenko, Pokrovsky, 1995]. Выделен также «нижний рудный горизонт» (НРГ), представленный мощной корой выветривания, некоторые горизонты которой обогащены рудными компонентами в той же степени, что и тонкослоистые руды ВРГ, но превосходят их по мощности в несколько раз. В последнее время обсуждается комплексный характер как тонкослоистых руд ВРГ, так и пород коры выветривания (НРГ), характеризующихся высокими содержаниями P, Fe, Mn, Ti, V и др. [Лапин и др., 2021; Толстов и др., 2023]. Совокупность полезных компонентов, сосредоточенных в Томторском месторождении позволяет оценивать объект как месторождение-гигант [Похиленко и др., 2023]. Какие же процессы привели к формированию столь уникального объекта?

Томторский массив является одним из крупнейших в мире, как по общей площади (250 км²), так и по площади карбонатитового ядра. В непосредственной близости от него находятся выявленные (Богдо, Промежуточный) и прогнозируемые по геофизическим данным массивы (Буолкалах, Чюэмпэ, Уэле), что позволило выделить Уджинскую щелочно-карбонатитовую провинцию [Эрлих, 1964], расположенную восточнее Анабарского щита в осевой части Уджинского поднятия. Положение массивов контролируется крупными региональными структурами: меридиональной рифтогенной – Уджинский авлакоген, субширотной, маркируемой Молодо-Попигайским вулканоплутоническим комплексом и крупной кольцевой структурой. Томторский массив прорывает известняки, доломиты и терригенные метаморфизованные породы NP_1 – NP_3 -возраста и перекрывается пермскими континентальными, юрскими морскими и четвертичными рыхлыми отложениями [Эрлих, 1964; Зайцев и др., 1992; Толстов, Тянь, 1999; Багдасаров, 2009; Владыкин и др., 2014]. Южнее массива Томтор располагается зона Чымар с редкоземельной минерализацией, предположительно гидротермального происхождения.

В строении массива Томтор выделяют внешнее кольцо, сложенное щелочными и нефелиновыми сиенитами и ультрамафитами – фойдолитами [Багдасаров, 1997; Толстов, Тянь, 1999; Тектоника..., 2001]. Центральное ядро выполнено породами карбонатитового комплекса, подразделяющимися на безрудные и рудные (до 1 % REE₂O₃). Между карбонатитами и щелочными породами располагается реакционная зона, представленная микроклин-слюдиисто-карбонатными (\pm апатит, пироксен) породами. На всех породах развита кора выветривания с наиболее мощным профилем (до 300 м) по рудным карбонатитам. Стратифицированные пластовые залежи богатых Nb-REE руд ВРГ находятся во впадинах на коре выветривания [Коноплев и др., 1995; Минерагения..., 2011].

На основании определения возраста пород массива Томтор, проведенного в 1990-х гг., выделено более 10 этапов в интервале от 810 до 240 млн лет. Предполагалось, что в интервалах 800–700 и 675–650 млн лет произошло становление щелочного плутона, а затем на протяжении длительного времени (670–240 млн лет) в пределах массива формировались субвулканические и вулканические структуры со множеством центров [Энтин и др., 1990]. Более детальные и современные методы выявили два основных временных интервала в истории возникновения массивов Уджинской провинции, связанных с крупными событиями в эволюции Сибирской платформы – 700 и 400 млн лет [Эрлих, Загрузина, 1981; Энтин и др., 1990; Зайцев и др., 1992; Владыкин и др., 2014; Добрецов и др., 2019, 2020; Skublov et al., 2020]. Считается, что в период около 700 \pm 30 млн лет вдоль края Сибирского континента сформировались рудоносные карбонатитовые и базит-ультрабазитовые магматические комплексы как производные мантийного суперплюма, расколовшего суперконтинент Родиния [Кузьмин, Ярмолюк, 2014]. Девонский период формирования массивов Томтор и Богдо связывается с воздействием Виллоиского плюма на восточный край Сибирского кратона [Добрецов и др., 2019]. Получены также свидетельства более молодых событий (323 млн лет) и, в том числе, согласующиеся с завершающей фазой тектоно-магматических событий, связанных с проявлением Сибирского плюма – 220 млн лет [Добрецов и др., 2020].

Уникальные характеристики руд вызывают большой интерес исследователей к рудоформирующим процессам и порождают большое количество гипотез [Лазарева и др., 2015]. Научная дискуссия, начатая в 1990-х гг., продолжается по сей день. Предполагалось, что руды являются 1) измененными щелочными карбонатит-ультрамафитовыми туфоловами [Энтин и др., 1990; Владыкин, 2009]; 2) гидротермальными образованиями [Покровский и др., 1990; Kravchenko, Pokrovsky, 1995]; 3) эпигенетически измененными верхними горизонтами коры выветривания [Минерагения..., 2011]; 4) озерными отложениями, сочетающими делювиальный и хемогенно-осадочный материал [Коноплев и др., 1992, 1995]; 5) результатом деятельности цианобактериальных сообществ, развивающихся в прибрежно-морских зонах литорали/сублиторали [Жмур и др., 1994]. Отличия точек зрения обусловлены сложностью процессов, накладывающийся друг на друга.

Минеральный состав тонкослоистых руд и особенности микроморфологии минералов уникальны [Лазарева и др., 2015]. Основная масса руды сложена зернами менее 20 мкм. Главными рудообразующими минералами являются минералы группы пироклора и рутил (представляющие терригенную часть вещества), минералы группы крандаллита, монацит-Се, черчит, гетит, минералы группы каолинита (хемогенно-осадочного генезиса). Минералы группы пироклора в рудах присутствуют, главным образом, в виде кристаллов, нацело замещенных Ва, Sr и Pb разновидностями, с сохранением исходной огранки, иногда в ассоциации с раковистыми осколками, что говорит об отсутствии транспортировки или незначительном перемещении в водной среде. Минералы группы крандаллита преимущественно наблюдаются в виде колломорфных выделений, иногда зональных кристаллов. По данным СЭМ и ТЭМ монацит в рудах распространен в виде наночастиц размером около 50 нм, которые плотным

слоем покрывают внешнюю часть галлуазитовых трубок длиной 800 нм и создают агрегаты, подобные биоморфным, что предполагает кристаллизацию из коллоида. В рудах присутствуют органические, иногда углифицированные, остатки растительного и бактериального происхождения в тесной ассоциации с аутигенными минералами. Данные наблюдения позволили выдвинуть гипотезу о том, что отложение руд происходило в экзогенных условиях в обстановке термального водоема, при значительной роли бентосных бактериальных сообществ или развивающихся на выходе термальных вод цианобактериальных сообществ [Лазарева и др., 2015]. Предложенная гипотеза основана на новых и проведенных ранее исследованиях и определяет рудоформирующий процесс как совокупность гидротермального процесса, хемогенного и терригенного осадконакопления при значительной роли биогенного фактора. Участие микроорганизмов в рудоформирующих процессах не ограничивается только тонкокристаллистыми рудами. Как показывают изотопные исследования, микроорганизмы-метанотрофы были одними из основных агентов в процессах формирования карбонатов в обогащенных Mn горизонтах коры выветривания [Пономарчук и др., 2020].

Совокупность данных указывает не только на полихронность, но и на полигенность формирования Томторского месторождения. Суммируя вышесказанное, можно выделить следующие события и процессы, приведшие к формированию уникального комплексного месторождения-гиганта: 1) наличие ослабленной зоны в земной коре в точке пересечения региональных структур, 2) три крупных события плюмового магматизма, 3) процессы формирования коры выветривания, 4) гидротермальные (возможно, сопутствующие вулканогенным) процессы и 5) микробная деятельность.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 23-63-10017.

Литература

- Багдасаров Ю.А.* Геохимические особенности карбонатитов и сопровождающих их силикатных пород щелочно-карбонатитового массива Томтор (Восточная Якутия) // *Геохимия*. 1997. № 9. С. 62–68.
- Багдасаров Ю.А.* Петрогеохимические критерии лампроитового семейства магматических пород и особенности формирования массива Томтор (Северо-Западная Якутия) // *Геология и геофизика*. 2009. Т. 50. № 10. С. 1178–1185.
- Владыкин Н.В.* Петрология калиево-щелочных лампроит-карбонатитовых комплексов, их генезис и рудоносность // *Геология и геофизика*. 2009. Т. 50. № 12. С. 1443–1455.
- Владыкин Н.В., Котов А.Б., Борисенко А.С. и др.* Возрастные рубежи формирования щелочно-ультраосновного массива Томтор: результаты геохронологических U-Pb- и ⁴⁰Ar-³⁹Ar-исследований // *Доклады Академии наук*. 2014. Т. 454. № 2. С. 195–199.
- Добрецов Н.Л., Жмодик С.М., Лазарева Е.В. и др.* U/Pb возраст сфенов, петрохимические, минералогические и геохимические особенности щелочных пород массива Богдо (Арктическая Сибирь) // *Доклады Академии наук*. 2019. Т. 489. № 3. С. 61–65.
- Добрецов Н.Л., Лазарева Е.В., Жмодик С.М. и др.* Ультракалиевая порода Томторского комплекса ультраосновных щелочных пород и карбонатитов (Арктическая Сибирь) // *Доклады Академии наук*. 2020. Т. 495. № 2. С. 23–27.
- 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.
- Жмур С.И., Кравченко С.М., Розанов А.Ю., Жегалло Е.А.* О генезисе редкоземельно-ниобиевых руд Томтора (север Сибирской платформы) // *Доклады Академии наук*. 1994. Т. 336. № 3. С. 372–375.
- Зайцев А.И., Энтин А.Р., Ненашев Н.И. и др.* Геохронология и изотопная геология Якутии. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1992. 248 с.
- Коноплев А.Д., Кузьмин В.И., Эшштейн Е.М.* Геолого-минералогические особенности делювиально-озерной россыпи на коре выветривания редкометалльных карбонатитов // *Минералогия и геохимия россыпей*. М.: Наука, 1992. С. 111–124.

Коноплев А.Д., Толстов А.В., Васильев А.Т. и др. Особенности локализации редкометалльного оруднения на месторождении Томтор // Редкометалльно-урановое рудообразование в осадочных породах. М: Наука, 1995. С. 223–241.

Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В. Мантийные плюмы Северо-Восточной Азии и их роль в формировании эндогенных месторождений // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 2. С. 153–184.

Лазарева Е.В., Жмодик С.М., Добрецов Н.Л. и др. Главные рудообразующие минералы аномально богатых руд месторождения Томтор (Арктическая Сибирь) // Геология и Геофизика. 2015. Т. 56. № 6. С. 1080–1115.

Латин А.В., Куликова И.М., Набелкин О.А. Поверхностные образования на корях выветривания карбонатитов (к проблеме генезиса уникальных редкометалльных руд месторождения Томтор, Россия) // Литология и полезные ископаемые. 2021. № 4. С. 364–384.

Минералогия кор выветривания карбонатитов. Методическое руководство / Ред. Н.В. Межеловский. М.: ГЕОКАРТ, GEOS, 2011. 308 с.

Покровский Б.Г., Беляков А.Ю., Кравченко С.М., Грязнова Ю.А. Происхождение карбонатитов и рудной толщи массива Томтор (Северо-западная Якутия) по изотопным данным // Геохимия. 1990. № 9. С. 1320–1329.

Пономарчук В.А., Добрецов Н.Л., Лазарева Е.В. и др. Свидетельства микробиапно-индуцированной минерализации в породах Томторского карбонатитового комплекса (Арктическая Сибирь) // Доклады Академии наук. 2020. Т. 490. № 2. С. 33–38.

Похиленко Н.П., Афанасьев В.П., Толстов А.В. и др. Перспективы развития и проблемы освоения сырьевой базы дефицитных стратегических видов твердых полезных ископаемых Сибири // Геология рудных месторождений. 2023. Т. 65. № 5. С. 476–492.

Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / Под ред. Л.М. Парфенова, М.М. Кузьмина. М.: Наука, 2001. 571 с.

Толстов А.В., Похиленко Н.П., Слепцов А.П. Перспективы Томторского рудного поля на месторождения марганца // Щелочной и кимберлитовый магматизм Земли и связанные с ним месторождения стратегических металлов и алмазов. Москва: ГЕОХИ РАН, 2023. С. 406–410.

Толстов А.В., Коноплев А.Д., Кузьмин В.И. Особенности формирования уникального редкометалльного месторождения Томтор и оценка перспектив его освоения // Разведка и охрана недр. 2011. № 6. С. 20–26.

Толстов А.В., Тянь О.А. Геология и рудоносность массива Томтор. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1999. 164 с.

Энтин А.Р., Зайцев А.И., Ненашев Н.И. и др. О последовательности геологических событий, связанных с внедрением Томторского массива ультраосновных щелочных пород и карбонатитов (Северо-Западная Якутия) // Геология и геофизика. 1990. Т. 12. С. 42–50.

Эштейн Е.М., Данильченко Н.А., Постников С.А. Геология Томторского уникального редкометалльного месторождения // Геология рудных месторождений. 1994. Т. 36. № 2. С. 83–110.

Эрлих Э.Н. Новая провинция щелочных пород на севере Сибирской платформы // ЗВМИ. 1964. Ч. ХСIII. Вып. 6. С. 682–693.

Эрлих Э.Н., Загзурина И.А. Геологические аспекты геохронологии северо-восточной части Сибирской платформы // Известия АН СССР. Серия геологическая. 1981. № 9. С. 5–13.

Kravchenko S.M., Pokrovsky B.G. The Tomtor alkaline ultrabasic massif and related REE-Nb deposits, northern Siberia // Economic Geology. 1995. Vol. 90. № 3. P. 676–689.

Skublov S.G., Tolstov A.V., Baranov L.N. et al. First data on the geochemistry and U-Pb age of zircons from the kamaphorites of the Tomtor alkaline-ultrabasic massif, Arctic Yakutia // Geochemistry. 2020. Vol. 80. № 3. Article. 125505.