



## ГЕНЕЗИС И ВОЗРАСТ РУДНОЙ ТОЛЩИ ТОМТОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НИОБИЯ И РЕДКИХ ЗЕМЕЛЬ, СЕВЕРО-ВОСТОК СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

На северо-востоке Сибирской платформы (Республика Саха (Якутия)) расположена Уджинская провинция щелочных ультраосновных массивов с карбонатитами – заключительными фазами эволюции магматической системы, образующими его центральное карбонатитовое ядро и содержащими повышенные концентрации Fe, Al, P и комплекс редких и редкоземельных элементов. На массивах развита кора латеритного выветривания мощностью до 400 м. В коре выветривания карбонатитов содержания фосфатов, Nb, Y, Sc и TR существенно выше по сравнению с неизменёнными разностями пород. Максимальных значений они достигают в толще своеобразных осадочных отложений, сформировавшихся в результате осаждения продуктов денудации коры рудоносных карбонатитов в мелких озёрных впадинах и интенсивного хемогенного преобразования их в условиях жаркого влажного климата. Они представляют собой уникально богатые руды, по набору и содержанию полезных компонентов не имеющие аналогов в мировой практике. Эти породы являются иногда их природными концентратами со средними содержаниями, мас. %: Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 7,21, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,578, Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,045, TR<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 10,16. Слагающие рудоносную толщу породы имеют характерные признаки осадочного генезиса: хорошо выраженные слоистую текстуру и фаціальную зональность, присутствие углефицированного растительного детрита и бактериоморфных агрегатов. Это даёт основание рассматривать комплекс данных образований как самостоятельное стратиграфическое подразделение – томторскую толщу. Геологические данные позволяют полагать, что она образовалась в интервале 340–280 млн лет. Томторская толща может служить важным поисковым критерием при поисках редких и редкоземельных элементов.

*Ключевые слова:* карбонатиты, редкие и редкоземельные элементы, массив Томтор, кора выветривания, латериты, слоистость, фацции, пироксоло, крандаллит.

Во время геологической съёмки м-ба 1:200 000, проведённой в 1956–1959 гг. в северо-восточной части Сибирской платформы, вблизи восточной границы Анабарского щита, была открыта группа сближенных интрузивных массивов, объединённых в Уджинскую провинцию щелочных ультраосновных пород и карбонатитов, предположительно среднепалеозойского возраста (рис. 1). Одновременно было установлено, что некоторые разновидности слагающих их пород обладают повышенными концентрациями Fe, P, Al, а также редких и редкоземельных элементов [2, 3, 6, 10, 14, 15, 23–27, 30–32].

Чтобы выяснить, можно ли использовать массив как промышленный источник перечисленных элементов, был проведён комплекс поисково-разведочных работ. Эти исследования имели также целью получение данных, позволяющих составить более детальное и обоснованное представление о составе пород, сла-

### Толстов Александр Васильевич

доктор геолого-минералогических наук  
директор НИИГП АК «АЛРОСА» (ПАО) <sup>1,3</sup>  
tolstovav@alrosa.ru

### Черенков Владимир Георгиевич

ведущий геолог <sup>2</sup>  
v.cherenkov@mfvsegei.ru

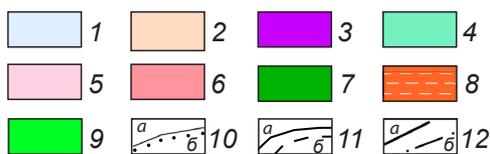
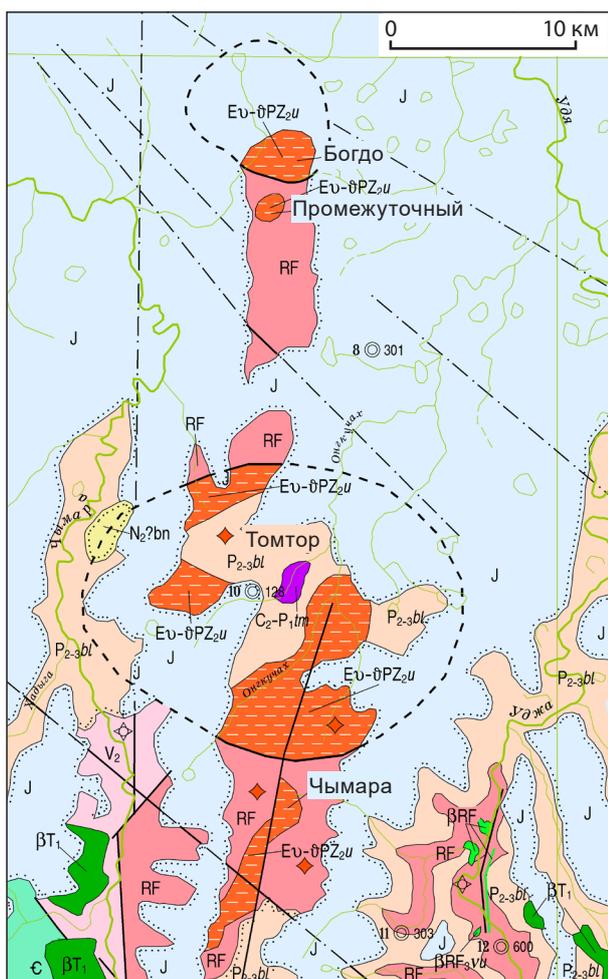
### Баранов Леонид Николаевич

научный сотрудник  
НИИГП АК «АЛРОСА» (ПАО) <sup>1,3</sup>  
baranovln@alrosa.ru

<sup>1</sup> Научно-исследовательское геологическое предприятие АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Мирный

<sup>2</sup> МФ ФГБУ ВСЕГЕИ, г. Москва

<sup>3</sup> ИГМ СО РАН, г. Новосибирск



**Рис. 1. СХЕМАТИЧЕСКАЯ КАРТА УДЖИНСКОЙ ПРОВИНЦИИ ЩЕЛОЧНЫХ УЛЬТРАОСНОВНЫХ МАССИВОВ:**

1 – морские терригенные отложения, J: алевролиты, песчаники, конгломераты, глины; 2 – отложения буолкалахской свиты, P<sub>2-3</sub>bl: песчаники, алевролиты, конгломераты, угли; 3 – отложения томторской толщи, C<sub>2</sub>-P<sub>1</sub>tm: аргиллиты, алевролиты, алевропелиты, пески, песчаники; 4 – известняки, доломиты, Є; 5 – доломиты, V<sub>2</sub>; 6 – доломиты, известняки, алевролиты, песчаники, глинистые сланцы; 7 – трапповая формация, βT<sub>1</sub>m: силлы, дайки долеритов, 8 – уджинский ийолит-карбонатитовый комплекс, многофазные массивы (Eu-θPZ<sub>2</sub>): оливиниты, ийолиты, щелочные и нефелиновые сиениты, фоскориты, карбонатиты, 9 – долериты верхнеуджинского комплекса, βRFvu; 10 – геологические границы (a – согласно, б – несогласного залегания); 11 – границы щелочных ультраосновных массивов на дневной поверхности (a), под покровом юрских образований (б); 12 – основные разрывные нарушения (a – установленные, б – предполагаемые)

гающих массивы, их взаимоотношения и последовательности формирования. Следует заметить, что все массивы крайне слабо обнажены, так как перекрыты практически сплошным чехлом терригенных морских и континентальных пермских и юрских и рыхлых четвертичных образований, и знания об их составе и внутренней структуре базируются только на результатах бурения, геофизических материалах и сопоставлениях с хорошо изученными районами близкого геологического строения, главным образом с массивами центрального типа Маймеча-Котуйской провинции [9]. В результате последующих поисково-разведочных работ выяснилось, что некоторые разновидности пород характеризуются достаточно высокими содержаниями полезных элементов (главные – Nb, Y, Sc, другие REE; попутные – Fe, Al, P), их максимальные содержания свойственны карбонатитам – продуктам заключительных фаз эволюции магматической системы (табл. 1). Большая часть карбонатитов сосредоточена в центральной

части массива – карбонатитовом ядре, за его пределами встречаются только отдельные мелкие тела [4, 26, 27]. Было также установлено, что на массивах почти повсеместно развита мощная кора выветривания латеритного типа, концентрации полезных компонентов в которой оказались иногда на порядок выше, чем в неизменённых коренных породах. Однако сложность освоения месторождения и транспортировки, а также сравнительно невысокий спрос, существовавший в то время на эти элементы, делали их добычу нерентабельной.

В процессе поисково-разведочных работ в центральной части наиболее крупного (площадь около 250 км<sup>2</sup>) массива провинции (Томтор), сложенной преимущественно рудными карбонатитами поздних магматических фаз, отдельные скважины вскрыли своеобразные отложения, залегающие на поверхности коры выветривания [13, 22, 23, 26, 27, 30]; генетическая идентификация их оказалась достаточно трудной и неоднозначной. Среди предложенных моделей их формирования фигурируют: изменённые щелочные карбонатит-ультрамафитовые фосфатные туфолавы [29]; гидротермальные образования [14, 22]; эпигенетически изменённые верхние горизонты коры выветривания [17]; озёрные и делювиальные хемогенно изменённые от-

### 1. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ГЛАВНЫХ ТИПОВ КАРБОНАТИТОВ, МАС. %

Компонент	Ранний кальцитовый карбонатит (92)	Редко-металльный кальцитовый карбонатит (122)	Анкеритовый карбонатит (15)
SiO <sub>2</sub>	8,66	5,89	14,49
TiO <sub>2</sub>	0,76	0,67	1,77
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,46	1,14	3,62
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,02	3,80	10,46
FeO	3,97	6,18	5,60
MnO	1,30	1,81	2,94
MgO	5,60	4,37	6,97
CaO	35,89	37,76	21,34
Na <sub>2</sub> O	0,16	0,12	0,15
K <sub>2</sub> O	1,38	0,89	1,17
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,41	3,42	2,24
CO <sub>2</sub>	31,51	31,61	19,19
SO <sub>3</sub>	-	1,52	4,84
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,056	0,27*	0,19
TR <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,55	0,80	1,27
Сумма	96,726	99,98	96,24

Примечание: В скобках дано число анализов.

ложения [12, 13]; породы, образованные в прибрежно-морских условиях в результате деятельности цианобактерий [11]; рудные фосфатно-карбонатные туфы [5, 6]. Но главной особенностью оказалось то, что содержания Nb и REE в отложениях существенно превышали концентрации не только в «свежих» разностях пород, но и в коре выветривания по ним. Это, а также изменившаяся конъюнктура рынка редких и редкоземельных элементов явились стимулом для постановки исследований следующих этапов, во время которых проводились оценка рудопроявлений и подсчёт запасов руд.

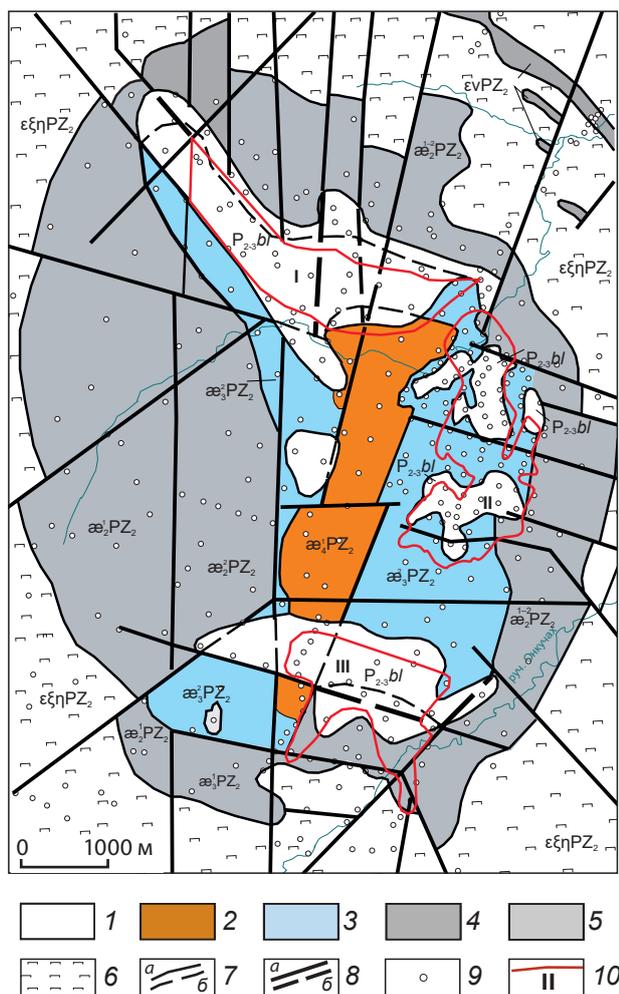
Предварительная разведка, во время которой было пробурено свыше 700 скважин, была проведена геологами Чернышевской экспедиции АК «АЛРОСА» в 1990–1997 гг. [19, 28]. Было установлено, что упомянутые выше отложения развиты на трёх участках в центральной части массива Томтор, где они выполняют мульдообразные впадины на неровной поверхности массива. Возникнове-

ние впадин объясняется неравномерной «усадкой» коры, обусловленной более высокой интенсивностью денудации и выноса подвижных щелочных и щёлочноземельных элементов – Ca, Mg, Na, K, P – в его карбонатитовом ядре, сложенном легко разрушающимися породами (рис. 2). Опробование показало, что эти отложения представляют собой уникально богатые руды, по набору и содержанию ценных компонентов не имеющие аналогов в мировой практике (табл. 2). Суммарная площадь участков, занимаемых этими образованиями, составляет ~ 30 км<sup>2</sup>. К настоящему времени в одной из впадин на участке Буранный компанией «Триаркмайнинг» был проведён комплекс работ по подсчёту запасов ниобий-редкоземельных руд и подготовке месторождения к эксплуатации [8, 28].

Все три впадины, выполненные толщей осадочных слаболитифицированных пород, имеют одинаковое строение. Субстрат – кора латеритного выветривания карбонатитов рудной группы, в которой в зависимости от характера воздействия процессов выветривания и состава пород выделяются три зоны: гидрослюдистая, апатитовая и гётитовая; суммарная мощность коры 400 м. В верхнем горизонте в зависимости от состава субстрата выделяется несколько линзообразно залегающих горизонтов: сидеритовый, гётитовый и франколитовый, также содержащие повышенные концентрации полезных компонентов, однако практического интереса они не представляют. На некоторых участках в породах коры развивается интенсивная гематитизация и прожилковое окварцевание. Впадины мелкие, мульдообразные, замкнутые, с пологими бортами и относительно ровными днищами, в плане имеют неправильные изрезанные очертания, которые иногда контролируются элементами разломной тектоники (рис. 3), [13, 23, 22, 26, 27, 30].

В разрезе осадочной толщи, выполняющей впадины, отчётливо выделяются два горизонта, сложенные различными литогенетическими ассоциациями пород.

*Нижний горизонт* толщи в большинстве случаев залегает на породах сидеритового горизонта коры выветривания по карбонатитам. Образовавшиеся в условиях жаркого влажного климата, слаборасчленённого рельефа с, видимо, богатой растительностью, слагающие его породы имеют состав, типичный для мелких замкнутых озёр с



**Рис. 2. СТРОЕНИЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ МАССИВА ТОМТОР И ПОЛОЖЕНИЕ УЧАСТКОВ РАЗВИТИЯ ТОМТОРСКОЙ ТОЛЩИ СО СНЯТЫМ ПОКРОВОВ ЮРСКИХ И ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ПОРОД, ПО А. В. ТОЛСТОВУ, 1998 г.:**

1 – буолкалахская свита,  $P_{2-3}bl$ : песчаники, алевролиты, конгломераты, пласты бурых углей; карбонатитовый комплекс заключительных фаз внедрения; 2 – редкометалльные карбонатиты и анкерит-шамозитовые породы,  $\text{æ}_4^1PZ_2$ , 3 – фосфор-редкометалльные карбонатиты и апатит-микроклин-слюдистые породы,  $\text{æ}_2^3PZ_2$ , 4 – безрудные кальцитовые и доломит-кальцитовые карбонатиты, кальцит-микроклин-слюдистые породы,  $\text{æ}_3^{1-2}PZ_2$ ; 5 – камафориты; силикатные породы ранних фаз внедрения; 6 – щелочные ультрамафиты альнётингуаитовой серии, щелочные и нефелиновые сиениты, фойдолиты,  $\text{εξη}PZ_2$ ; 7 – геологические границы (а – установленные, б – предполагаемые); 8 – разрывные нарушения (а – установленные, б – предполагаемые); 9 – буровые скважины; 10 – границы участков развития томторской толщи (I – Северный, II – Буранный, III – Южный)

малоактивным гидродинамическим режимом. В большинстве случаев для них характерны глинистые и мелкозернистые разновидности пород. Минеральный состав и структурные особенности осадков обусловлены составом пород коры выветривания в областях сноса. В зависимости от положения в пределах впадин в составе горизонта выделяется несколько фациальных зон, имеющих в общем концентрически-зональное распространение (см. рис. 3; рис. 4).

В центральных частях впадин горизонт сложен тонкослоистыми светло-серыми и зеленовато-серыми пелитоморфными породами – слаболитифицированными аргиллитами с мощностью слоев 0,1–10 мм, прослоями желтых алевролитов, горизонтально-волнисто-слоистыми, часто с нарушенной, «взмученной» и микроползневой текстурой, иногда массивными. Изредка встречаются клиновидные трещины усыхания, заполненные материалом перекрывающих осадков. Породы состоят в основном из агрегата хемогенных минералов группы крадаллита, цементирующего мельчайшие (~ 1 мкм) зёрна рутила, анатаза, пироклора, гематита, гётита, каолинита и других минералов [13, - 16, 28]. Зёрна рудных минералов претерпели очень незначительный перенос, а некоторые не испытали его вовсе, образовавшись *in situ* гидротермальным способом; большинство последних, в том числе минералы группы крадаллита, галлуазита и частично – монацита, были химически осаждены из термальных вод, возможно, с участием биоты. Значимым агентом генезиса этих пород могла быть активность микробов, что подтверждается бактериоморфными микро- и наноструктурами некоторых включений [11, 16] (рис. 5).

В области сочленения днищ котловин со склонами залегают жёлтые алевролиты со слоями тонкозернистых песков мощностью 0,1–5 см, чередующиеся с серыми пелитоморфными породами. В нижних частях склонов они сменяются тонкозернистыми песками, переслаивающимися с алевролитами, горизонтально-волнисто-слоистыми прослоями пелитоморфных пород. В верхних частях склонов их сменяют плохо сортированные мелко- и тонкозернистые жёлтые и серые пески с дресвой и тонкими прослоями алевролитов и пелитов, неслоистые или горизонтально-волнисто-слоистые. Отдельные слои обогащены зёрнами минералов высокой плотности: оксидами титана, пироклором, монацитом. Широко развиты пост-

## 2. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ (В МАС. %) ГИПЕРГЕННЫХ ПРОДУКТОВ ЛАТЕРИТНОГО ПРОФИЛЯ ВЫВЕТРИВАНИЯ КАРБОНАТИТОВ И ИХ ЭПИГЕНЕТИЧЕСКИ ИЗМЕНЁННЫХ РАЗНОСТЕЙ, ПО [18]

Компонент	Гипергенные продукты выветривания карбонатитов – лимонит-франколитовые породы (24)	Эпигенетически изменённые продукты выветривания				
		Осветлённые продукты выветривания или руды богатого горизонта (64)	Пирохлор-монацитовые руды (22)	Пирохлор-алюмо-фосфатные руды (42)	Лимонит-сидеритовые породы (14)	Сидерит-франколитовые породы
SiO <sub>2</sub>	7,44	8,70	5,88	9,42	3,92	8,82
TiO <sub>2</sub>	0,74	7,30	4,77	7,34	1,40	0,82
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,72	15,25	5,13	17,83	2,55	0,84
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24,99	9,01	11,54	8,36	30,63	20,40
FeO	3,49	5,90	10,54	4,72	19,72	3,53
MnO	2,72	0,61	1,48	0,38	4,30	2,96
MgO	0,66	0,25	0,26	0,24	0,80	0,75
CaO	27,45	3,04	3,49	2,92	5,36	27,34
Na <sub>2</sub> O	0,19	0,20	0,25	0,19	0,14	0,36
K <sub>2</sub> O	0,05	0,31	0,07	0,37	0,12	0,24
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	20,15	13,90	11,69	14,47	4,85	20,23
CO <sub>2</sub>	0,19	2,70	5,80	1,92	13,71	5,74
SO <sub>3</sub>	0,25	0,63	0,61	0,64	0,28	0,12
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,86	4,70	7,68	3,94	1,22	0,84
TR <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,80	10,72	17,64	9,08	-	-
Сумма	91,70	83,22	86,83	81,82	89,00	92,99

Примечание: В скобках дано число анализов.

седиментационные гётит, гидрогётит, импрегнирующие цемент и образующие плёночные выделения и псевдоморфозы по железосодержащим минералам.

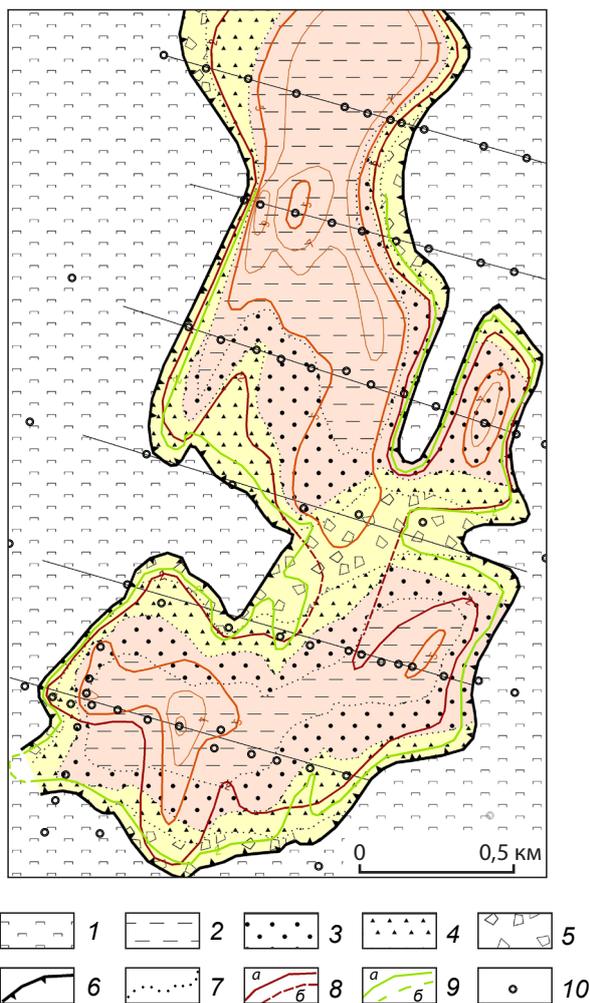
В краевой прибортовой части впадин залегают мелко-среднезернистые пески плохо сортированные неслоистые, реже – горизонтально-волнисто- или косослоистые, с дресвой и редкими крупными (до 30 см) угловато-окатанными валунами и угловатыми обломками выветрелых коренных пород. Цементом служит тонкодисперсный агрегат минералов группы крандаллита, обычно колломорфной текстуры, или агрегат каолинита с гидрослюдой.

Породы всех разновидностей во всех фациальных зонах обычно рыхлые, реже – слаболиффицированные. Псаммитовый и алевритовый обломочный материал и степень его окатанности также идентичны; обломки представлены угловатыми и угловато-окатанными зёрнами пирохлора,

магнетита, рутила, анатаза, ильменорутила, монацита, ксенотима, иногда кварца, апатита, франколита и других минералов.

Породы всех фациальных зон характеризуются постоянным присутствием органического углерода, связанного с углефицированными растительными остатками – углистым детритом низкой буроугольной стадии метаморфизма. Содержание  $C_{орг.}$  закономерно возрастает от 0,01–0,3 до 1–2 % на бортах впадин, иногда до 3 % в их центральных частях. В том же направлении снижается содержание SiO<sub>2</sub> – от 10–20 до 3–5 %, что отражает меньшую активность поступления терригенного материала, и повышается содержание  $Fe_{общ.}$  от 3–8 до 5–20 % вследствие увеличения доли хемогенной составляющей.

Мощность отложений нижнего горизонта изменяется в направлении от бортов впадин к их центральному частям от первых десятков сантиметров до 42 м.



**Рис. 3. ЛИТОЛОГИЧЕСКАЯ И ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ ТОМТОРСКОЙ ТОЛЩИ НА УЧАСТКЕ БУРАННЫЙ:**

1 – субстрат: кора выветривания по породам карбонатитового комплекса ( $\alpha\text{PZ}_2$ ). Осадочные породы на коре выветривания – томторская толща ( $\text{PZ}_2\text{tm}$ ); 2 – центральная зона котловин: аргиллиты слаболитифицированные пелитоморфные светло-серые тонкослоистые, с прослоями алевритов; 3 – область сочленения дна котловин со склонами: алевриты, тонкозернистые пески, прослои пелитоморфных пород, горизонтально-волнисто-слоистые; 4 – склоны котловин: пески плохо сортированные тонкозернистые, с дресвой и прослоями алевритов, неслоистые или горизонтально-волнисто-слоистые; 5 – прибортовые части впадин: пески мелко-среднезернистые неслоистые, горизонтально-, волнисто- или косослоистые, с дресвой и редкими крупными валунами выветрелых коренных пород; 6 – граница томторской толщи; 7 – границы фациальных зон; 8 – изопахиты отложений толщи, 10 м (*a* – установленные, *b* – предполагаемые); 9 – изоконцентраты содержаний  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , % (*a* – установленные, *b* – предполагаемые); 10 – буровые скважины

*Верхний горизонт* сложен алевролитами и мелкозернистыми красноцветными песчаниками, с выделениями гиббсита и бёмита; породы содержат линзы гравелитов и дресвяников, прослои углесодержащих сероцветных песчаников. Граница с нижним слоем неровная, с локальными врезами. Этот горизонт представляет собой толщу аллювиально-делювиальных пород, которая образовалась в условиях жаркого влажного климата. В последующую эпоху в условиях умеренно тёплого влажного климата в красноцветных породах сформировались характерные для таких остановок гиббсит, бёмит, вудхаузеит, а в сероцветных аллювиальных отложениях произошла интенсивная каолинизация обломочного материала. Мощность верхнего горизонта до 50 м.

Рассматриваемые отложения представляют собой комплекс образований, которому присущи все признаки и свойства осадочных пород: хорошо выраженная слоистая текстура от параллельной микрослоистой в центре впадин (скважина 5649) до косослоистой на границе со склонами; отчётливая гранулометрическая и литологическая фациальная зональность, характерная для мелких замкнутых водоёмов (см. рис. 3). Последняя позволила установить, что краевые части толщи представляют собой делювиальные образования, фациально замещающиеся озёрными в центральных частях впадин. Своеобразие минерального и химического составов этих отложений объясняется, с одной стороны, специфическим составом пород в области питания, с другой – жарким влажным климатом, существовавшим в этом районе в период их формирования. Всё это позволяет выделить образования в самостоятельный таксон – томторскую толщу.

Источником вещества для её формирования послужили образования мощной коры выветривания латеритного типа на рудных карбонатитах центральной части массива Томтор с очень незначительной примесью терригенного материала. Выветривание исходных пород массива привело к выносу из них значительной части легкоподвижных щелочных и щёлочноземельных элементов (Ca, Mg, K, Na), которые переходили в грунтовые воды, определяя щелочные условия среды. В то же время в поверхностной зоне происходило подкисление почвенных вод за счёт разложения растительных остатков, что создавало благоприятные условия для формирования

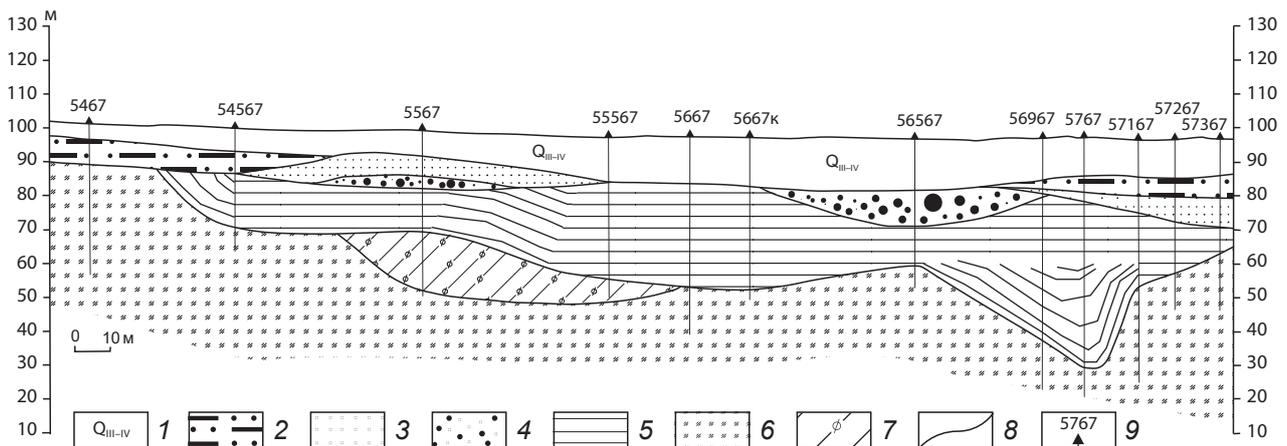


Рис. 4. ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ ТОМТОРСКОЙ ТОЛЩИ НА УЧАСТКЕ БУРАН'НЫЙ:

1 – делювиальные, озёрные и аллювиальные отложения,  $Q_{III-IV}$ ; 2 – морские алевролиты, песчаники, гравелиты, конгломераты плинсбахского яруса,  $J_1$ ; 3 – песчаники, гравелиты, конгломераты, алевролиты, прослои бурых углей буолкалахской свиты,  $P_{2-3}bl$ ; томторская толща: 4 – верхний горизонт ( $C_2-P_1tm_1$ ) – хемогенно-осадочные образования: аргиллиты, алевриты тонкослоистые, песчаники, в краевых частях с щебнем и валунами выветрелых карбонатитов и щёлочно-ультраосновных пород (пирохлор-монацит-крандаллитовые руды), 5 – нижний горизонт ( $C_2-P_1tm_2$ ) – алевролиты, песчаники мелкозернистые красноцветные, с выделениями гиббсита, бёмита. Субстрат томторской толщи – кора латеритного выветривания рудоносных карбонатитов ( $C_2-P_1$ ); 6 – сидеритовый горизонт, 7 – франколитовый горизонт – фосфатные образования; 8 – геологические (литологические) границы; 9 – буровые скважины

ятные условия для миграции P и элементов-гидролизатов (Y, Sc, лантаноидов и др.).

Разрушение латеритной коры и механический перенос её продуктов в озёрные котловины сопровождался интенсивной трансформацией их минерального состава под влиянием изменения кислотности среды; она продолжалась и в зоне конечной седиментации.

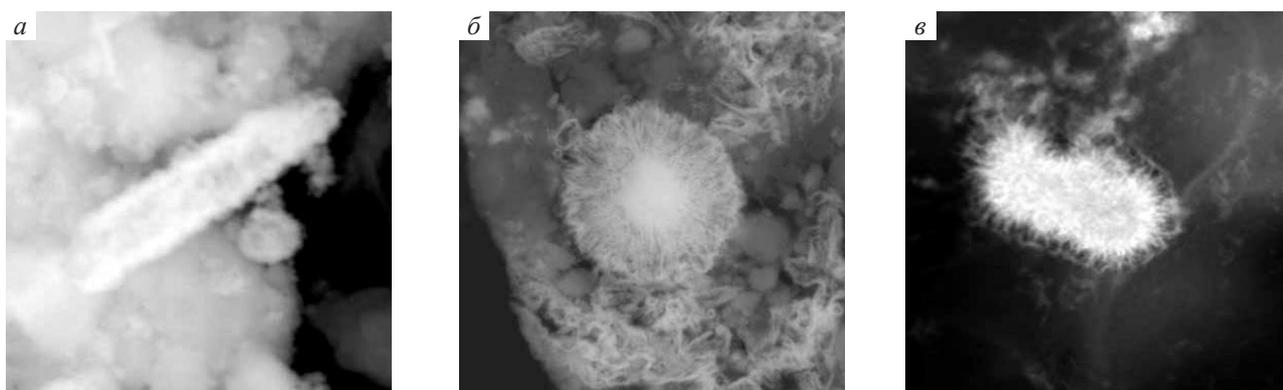
В итоге в центральных частях впадин сформировалась толща тонкослоистых осадков, сложенная в значительной мере агрегатом хемогенных минералов группы крандаллита (20–80 %), содержащим мельчайшие зёрна пирохлора (1–40 %), рутила, анатаза, ильменорутила (1–20 %), монацита (1–40 %), гётита (5–30 %), ксенотима (1–5 %), каолинита (1–15 %), кварца (1–5 %) и др. Фосфаты алюминия, слагающие иногда до 80 % объёма породы, представлены колломорфными выделениями, цементирующими обломочный материал. Терригенные обломочные минералы, вымытые из коры, слагают в различной степени окатанные зёрна размером от микрон до нескольких миллиметров [16, 28].

Трансформация химического и минерального составов толщи продолжилась и на пострудном этапе, когда пермские отложения кровли рудо-

носного комплекса подверглись воздействию кислородсодержащих вод, а также претерпели процессы корообразования в условиях умеренно тёплого влажного климата. В результате в красноцветных породах образовались гиббсит, бёмит, вудхаузеит, а в сероцветных аллювиальных отложениях обломочный материал был интенсивно каолинизирован.

В последующее время, когда рудоносная и красноцветная толщи были полностью перекрыты средне- и верхнепермскими континентальными, а затем юрскими морскими отложениями, доступ кислородсодержащих вод прекратился, и в них возникла восстановительная обстановка. В этих условиях при замедленном водообмене в несколько этапов сформировались зоны сидеритизации. На первом этапе образовался сидеритовый горизонт в коре выветривания карбонатитов – подошве осадочной толщи, на втором – горизонт под сероцветными угленосными пермскими отложениями и в заключительный этап – под морскими юрскими отложениями; это привело к изменению первичного облика пород и частично – их состава [20].

Рассматриваемые осадки, претерпевшие глубокое хемогенное преобразование, содержат чрез-



**Рис. 5. БАКТЕРИОМОРФНЫЕ ВЫДЕЛЕНИЯ МОНАЦИТА В АРГИЛЛИТАХ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ Nb И TR, СОПОСТАВЛЯЕМЫЕ С КЛЕТКАМИ (ТЕЛЬЦАМИ) *PSEUDOMONAS AERUGINOSA* (а, в); ТО ЖЕ, С КЛЕТКОЙ БАКТЕРИИ *SACCHAROMYCES CEREVISIAE* (б). УЧАСТОК БУРАННЫЙ, ЦЕНТРАЛЬНАЯ ЧАСТЬ ВПАДИНЫ, ПО [16]**

вычайно высокие концентрации редких и редкоземельных элементов и часто являются фактически природными концентратами их руд (см. табл. 2) [21, 28]. Главным минералом-концентратом Nb является обломочный пирохлор, занимающий до 40 % объема породы. Выявлена тенденция к увеличению его содержания от бортов впадин к центру и сверху вниз по разрезу: в своеобразном «базальном горизонте» мощностью до 1 м содержания  $Nb_2O_5$  достигают иногда 15 %. В то же время максимальные содержания Y, Sc и других редкоземельных элементов ассоциируют чаще с делювиальными отложениями или областью их перехода в озёрные фации, где они связаны преимущественно с новообразованным монацитом. Основным концентратом Y, Sc и тяжёлых редкоземельных элементов является цирконий-содержащий ксенотим, образующий выделения размером от сотых долей микрона до 2–3 мкм, развитые в цементе, микротрещинах обломочных минералов, либо его вкрапленность в хемогенных минералах группы крандаллита. Образование редкоземельной минерализации этого типа связывается с латеральной инфильтрацией грунтовых вод, обогащённых REE и P, из областей питания в нелитифицированные озёрные отложения и концентрацией элементов-гидролизатов на кислотно-щелочном геохимическом барьере [12, 16, 20, 26].

Таким образом, томторская толща представляет собой месторождение Nb и REE с рудами уникального, нового в мировой практике геолого-

промышленного типа – делювиально-озёрной ксенотим-монацит-пирохлоровой россыпи в хемогенно-осадочных алюмофосфатных отложениях, сформировавшейся при размыве коры выветривания карбонатитового комплекса и обогащённой на локальных участках в экзодиагенезе эпигенетическими концентрациями элементов-гидролизатов, отложившихся из грунтовых вод в области кислотного-щелочного геохимического барьера [28]. При подсчёте запасов месторождения по категории В средние содержания главных компонентов составили, мас. %:  $Nb_2O_5$  – 7,21,  $Y_2O_3$  – 0,578,  $Sc_2O_3$  – 0,045,  $TR_2O_3$  – 10,16 [25, 8].

Заметим, что месторождения томторского типа, образованные за счёт переотложения продуктов разрушения кор выветривания карбонатитов и их глубокой хемогенной переработки, достаточно редки, поскольку для их формирования необходимо сочетание целого ряда благоприятных факторов. Однако Томтор не уникален: за истекшее с момента его открытия время было выявлено ещё одно месторождение подобного типа с близкими характеристиками – Чуктуконское, расположенное на Чадобецком поднятии [18].

Проблема возраста томторской толщи до настоящего времени остаётся в значительной мере дискуссионной. Однозначно диагностируемые органические остатки в ней, кроме проблематичных бактериоморфных обломков и неидентифицируемого углефицированного растительного детрита, не обнаружены. Структуры аутигенных минералов, сингенетических рудам, показывают, что они

непригодны для датирования изотопными методами, поскольку претерпели многочисленные эпигенетические преобразования. Относительно уверенно может быть определён только верхний возрастной предел возможного интервала формирования толщи: поскольку она с незначительным размывом перекрывается угленосными отложениями средне-верхнепермского возраста, он может быть условно принят как раннепермский.

Датирование нижней возрастной границы томторской толщи проблематично из-за неопределённости как возраста и модели становления самого массива Томтор и его карбонатитового ядра, так и различных этапов его постмагматической истории. Обоснованию возраста массива посвящён ряд работ [7, 16, 29 и др.]; их результаты, часто достаточно противоречивые, сводятся к тому, что ультраосновные щелочные породы массива сформировались более 700 млн лет, а его карбонатитовое ядро – около 400 млн лет тому назад. Датирование щелочных сиенитов и «рудоносных туфов» (авторская интерпретация гипергенно-осадочных образований томторской толщи) U-Pb методом по циркону дало результаты соответственно  $689 \pm 5$  и  $394 \pm 7$  млн лет. Для карбонатитов первого этапа и рудоносных карбонатитов второго результаты датирования  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  методом по биотиту составили соответственно  $693\text{--}681 \pm 6$  и  $412\text{--}400 \pm 4$  млн лет [7]. Очевидно, что эти данные существенно разнятся как из-за различных методов анализа, так и точности самих анализов. Однако единый тренд химических составов всего комплекса пород массива определённо свидетельствует об общем едином и непрерывном ходе эволюции глубинного магматического очага, и 300 млн лет, разделяющие эти гипотетические начальный и конечный этапы столь длительного процесса, представляются аргументом, делающим эту схему малодостоверной.

При этом остаётся несомненным, что субстратом томторской толщи является кора выветривания по карбонатитам, возраст которой определяет в общем виде нижний возрастной рубеж толщи. Первые попытки датирования коры K-Ar методом [29] дали следующие результаты: по адуляру, сингенетичному с франколитом, – 392 млн лет, по «изменённой слюде» – 340 млн лет, по франколиту – 324 млн лет. Формирование коры началось после завершения магматического этапа станов-

ления массива и вывода его на дневную палеоповерхность (видимо, в конце девонского периода). Судя по уменьшению возраста минералов с понижением температуры закрытия, на первых этапах корообразование сопровождалось гидротермальными процессами, а затем сменилось эпигенетическим изменением пород коры. Упомянутые выше датировки [7] определяют, скорее всего, возраст заключительных этапов становления массива. Как указывалось ранее, латеритный тип коры и её весьма высокая мощность (по разным оценкам, 300–400 м) дают основание связывать её возникновение с эпохой наиболее жаркого и влажного климата в истории фанерозоя, приходящейся в данном регионе на конец девонского и каменноугольного периоды [1].

Таким образом, имеющиеся данные позволяют считать, что отложения томторской толщи образовались в промежутке от середины каменноугольного периода до нижней эпохи пермского, что соответствует интервалу 340–280 млн лет.

Выделение этой весьма своеобразной толщи в самостоятельное стратиграфическое подразделение обусловлено двумя обстоятельствами. Первое – на весьма обширной территории площадью в несколько тысяч км<sup>2</sup>, охватывающей Восточное и Западное Прианабарье, бассейн среднего и верхнего течения р. Оленёк вплоть до истоков р. Вилюй, неизвестны отложения, отвечающие интервалу времени около 180 млн лет – от конца кембрийского до середины пермского периода, и изучение рассмотренных выше образований предоставляет единственную возможность в какой-то мере охарактеризовать один из периодов этого интервала и составить хотя бы некоторое представление о геологических процессах и условиях, существовавших в пределах площади в это время.

Второе соображение связано с прикладным значением этой толщи, представляющей собой фактически рудное тело с уникальными содержаниями редких и редкоземельных элементов. При проведении поисковых работ на эти металлы в пределах массивов щелочного ультраосновного состава и в их окружении это обстоятельство может иметь значение важного поискового критерия.

*Работа выполнена при частичной поддержке гранта РНФ 18-17-00120 (исследования карбонатитов).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Похиленко Н. П. Поисковая минералогия алмаза. – Новосибирск : Академическое изд-во «Гео», 2010. – 650 с.
2. Багдасаров Ю. А. Геохимические особенности карбонатитов и сопровождающих их силикатных пород щелочно-карбонатитового массива Томтор (Вост. Прианабарье, Якутия) // Геохимия. – 1997. – № 1. – С. 10–20.
3. 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.
4. 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.
5. Владыкин Н. В. Петрология калиево-щелочных лампроит-карбонатитовых комплексов, их генезис и рудоносность // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50 (12). – С. 1443–1455.
6. Владыкин Н. В., Торбеева Т. С. Лампроиты Томторского массива (Восточное Прианабарье) // Геология и геофизика. – 2005. – Т. 46, № 10. – С. 1038–1049.
7. Владыкин Н. В., Котов А. Б., Борисенко А. С., Ярмолюк В. В., Похиленко Н. П., Сальникова Е. Б., Травин А. В., Яковлева С. З. Возрастные рубежи формирования щелочно-ультраосновного массива Томтор: результаты геохронологических U-Pb- и <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar-исследований // Доклады Академии наук. – 2014. – Т. 454, № 2. – С. 195–199.
8. Государственный баланс запасов полезных ископаемых РФ на 01.01.2016. Редкоземельные элементы. 2016.
9. Егоров Л. С. Ийолит-карбонатитовый плутонизм (на примере маймеча-котуйского комплекса Полярной Сибири). – Л. [СПб.] : Недра, 1991. – 260 с.
10. Егоров Л. С., Сурина Н. П., Поршнев Г. И. Уджинский рудно-магматический комплекс ультраосновных щелочных пород и карбонатитов // Рудно-магматические комплексы северо-запада Сибирской платформы и Таймыра. – Л. [СПб.] : Недра, 1985. – С. 138–154.
11. 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.
12. Коноплёв А. Д., Кузьмин В. И., Эпштейн Е. М., Вейс Б. Т., Кубышев А. И., Нечелюстов Г. Н., Ожогина Е. Г., Толстов А. В. Геолого-минералогические особенности делювиально-озёрной россыпи на коре выветривания редкометалльных карбонатитов // Минералогия и геохимия россыпей. – М. : Наука, 1992. – С. 111–124.
13. Коноплёв А. Д., Толстов А. В., Васильев А. Т., Нечелюстов Г. Н., Кузьмин В. И., Скляднева В. М., Дубинчук В. Т., Коноплёва Е. В., Сидоренко Г. А. Особенности локализации редкометалльного оруденения на месторождении Томтор // Редкометалльно-урановое рудообразование в осадочных породах : сборник научных трудов. – М., 1995. – С. 223–241.
14. Кравченко С. М., Беляков А. Ю., Покровский Б. Г. Геохимия и генезис Томторского массива (север Сибирской платформы) // Доклады Академии наук СССР. – 1992. – Т. 322, № 5. – С. 966–972.
15. Кравченко С. М., Беляков А. Ю., Кубышев А. И., Толстов А. В. Скандиево-редкоземельно-иттриево-ниобиевые руды – новый тип редкометалльного сырья // Геология рудных месторождений. – 1990. – Т. 32, № 1. – С. 105–109.
16. 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 месторождений Томтор // Геология и геофизика. – 2015. – Т. 56, № 6. – С. 1080–1115.
17. Лапин А. В., Толстов А. В. Месторождения кор выветривания карбонатитов. – М. : Наука, 1993. – 208 с.
18. Лапин А. В., Толстов А. В. Минерагения кор выветривания карбонатитов : методическое руководство. – М. : ГЕОКАРТ ; ГЕОС, 2011. – 307 с.
19. Лапин А. В., Толстов А. В. Новые уникальные месторождения редких металлов в корях выветривания карбонатитов // Разведка и охрана недр. – 1993. – № 3. – С. 7–11.
20. 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.
21. Лапин А. В., Толстов А. В., Куликова И. М. Особенности распределения лантаноидов, иттрия, скандия и тория в уникальных комплексных редкометалльных рудах месторождения Томтор // Геохимия. – 2016. – № 12. – С. 1104–1121.
22. Покровский Б. Г., Беляков А. Ю., Кравченко С. М., Грязнова Ю. А. Происхождение рудной толщи и карбонатитов массива Томтор по изотопным данным // Геохимия. – 1990. – № 6. – С. 1320–1329.
23. Поршнев Г. И., Степанов Л. Л. Геологическое строение и фосфатность массива Томтор // Щелочной магматизм и апатитность севера Сибири. – Л. [СПб.] : НИИГА, 1980. – С. 84–100.
24. Поршнев Г. И., Степанов Л. Л. Геология и минерагения Уджинской провинции (С-3 ЯАССР) // Советская геология. – 1981. – № 12. – С. 103–106.
25. Толстов А. В. Главные рудные формации севера Сибирской платформы. – М. : ИМГРЭ, 2006. – 212 с.

26. Толстов А. В. Особенности минералогии и геохимии апатит-магнетитовых руд массива Томтор (северо-западная Якутия) // Геология и геофизика. – 1994. – № 9. – С. 91–100.
27. Толстов А. В., Тянь О. А. Геология и рудоносность массива Томтор. – Якутск : ЯНЦ СО РАН, 1999. – 164 с.
28. Толстов А. В., Коноплёв 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.
29. 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. – Т. 31, № 12. – С. 42–51.
30. Эпштейн Е. М., Данильченко Н. А., Постников С. А. Геология Томторского уникального месторождения редких элементов (север Сибирской платформы) // Геология рудных месторождений. – 1994. – Т. 36, № 2. – С. 83–110.
31. Эрлих Э. Н. Новая провинция щелочных пород на севере Сибирской платформы // Записки Всесоюзного Минералогического общества. – 1964. – Ч. 93, вып. 6. – С. 682–693.
32. Kravchenko S. M., Pokrovsky B. G. The Tomtor alkaline ultrabasic massif and related REE-Nb deposits, northern Siberia // Economic Geology. – 1995. – V. 90, № 3. – P. 676–689.

## REFERENCES

1. Afanas'ev V. P., Zinchuk N. N., Pokhilenko N. P. Poiskovaya mineralogiya almaza [Prospecting mineralogy of diamond], Novosibirsk, Akademicheskoe izd-vo "Geo" Publ., 2010, 650 p.
2. Bagdasarov Yu. A. Geokhimicheskie osobennosti karbonatitov i soprovozhdayushchikh ikh silikatnykh porod shchelochno-karbonatitovogo massiva Tomtor (Vost. Priabar'e, Yakutiya) [Geochemical features of carbonatites and their accompanying silicate rocks of the alkaline-carbonatite massif Tomtor (Eastern Priabar'e, Yakutia)], *Geokhimiya [Geochemistry International]*, 1997, No 1, pp. 10–20. (In Russ.).
3. Bagdasarov Yu. A. Petrogeokhimicheskie kriterii lamproitovogo semeistva magmaticheskikh porod i osobennosti formirovaniya massiva Tomtor (Severo-Zapadnaya Yakutiya) [Petrogeochemical criteria of the lamproite family of igneous rocks and the formation features of the Tomtor massif (North-West Yakutia)], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 2009, V. 50 (10), pp. 1178–1185. (In Russ.).
4. Baranov L. N., Tolstov A. V., Okrugin A. V., Sleptsov A. P. Novoe v mineralogii i geokhimii apatit-magnetitovykh rud massiva Tomtor (Severo-vostok Sibirskoi platformy) [New in mineralogy and geochemistry of apatite-magnetite ores of the Tomtor massif (northeast of the Siberian platform)], *Rudy i metally [Ores and Metals]*, 2018, No 2, pp. 42–54. (In Russ.).
5. Vladykin N. V. Petrologiya kalievo-shchelochnykh lamproit-karbonatitovykh kompleksov, ikh genesis i rudoznost' [Petrology of potassium-alkaline lamproite-carbonatite complexes, their genesis and ore content], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 2009, V. 50 (12), pp. 1443–1455. (In Russ.).
6. Vladykin N. V., Torbeeva T. S. Lamproity Tomtorskogo massiva (Vostochnoe Priabar'e) [Lamproites of the Tomtor massif (Eastern Priabar'e)], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 2005, V. 46, No 10, pp. 1038–1049. (In Russ.).
7. Vladykin N. V., Kotov A. B., Borisenko A. S., Yarmolyuk V. V., Pokhilenko N. P., Sal'nikova E. B., Travin A. V., Yakovleva S. Z. Vozrastnye rubezhi formirovaniya shchelochno-ul'traosnovnogo massiva Tomtor: rezul'taty geokhronologicheskikh U-Pb- i <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar-issledovaniy [Age lines of formation of the alkaline-ultramafic massif Tomtor: results of geochronological U-Pb- and <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar-studies], *Doklady Akademii nauk [Reports of the Academy of Sciences]*, 2014, V. 454, No 2, pp. 195–199. (In Russ.).
8. Gosudarstvennyi balans zapasov RF. Redkie i redkozemel'nye elementy. 2016.
9. Egorov L. S. Iiolit-karbonatitovyi plutonizm (na primere maimecha-kotuiskogo kompleksa Polyarnoi Sibiri) [Ijolite-carbonatite plutonism (on the example of the Maimecha-Kotuy complex of Polar Siberia)], Leningrad, Nedra Publ., 1991, 260 p.
10. Egorov L. S., Surina N. P., Porshnev G. I. Udzhinskii rudno-magmaticheskii kompleks ul'traosnovnykh shchelochnykh porod i karbonatitov [Udzhin ore-magmatic complex of ultrabasic alkaline rocks and carbonatites], *Rudno-magmaticheskie komplekсы severo-zapada Sibirskoi platformy i Taimyra [Ore-magmatic complexes of the north-west of the Siberian platform and Taimyr]*, Leningrad, Nedra Publ., 1985, pp. 138–154.
11. Zhmur S. I., Kravchenko S. M., Rozanov A. Yu., Zhegallo E. A. O genezise redkozemel'no-niobievyykh rud Tomtora (sever Sibirskoi platformy) [About the genesis of the rare-earth-niobium ores of Tomtor (north of the

- Siberian platform)], *Doklady Akademii nauk [Reports of the Academy of Sciences]*, 1994, V. 336, No 3, pp. 372–375. (In Russ.).
12. Konoplev A. D., Kuz'min V. I., Epshtein E. M., Veis B. T., Kubyshev A. I., Nechelyustov G. N., Ozhogina E. G., Tolstov A. V. Geologo-mineralogicheskie osobennosti deluvial'no-ozernoi rossypi na kore vyvetrivaniya redkometall'nykh karbonatitov [Geological and mineralogical features of the deluvial-lacustrine placer on the weathering crust of rare-metal carbonatites], *Mineralogiya i geokhimiya rosspei [Mineralogy and geochemistry of placers]*, Moscow, Nedra Publ., 1992, pp. 111–124.
  13. Konoplev A. D., Tolstov A. V., Vasil'ev A. T., Nechelyustov G. N., Kuz'min V. I., Sklyadneva V. M., Dubinchuk V. T., Konopleva E. V., Sidorenko G. A. Osobennosti lokalizatsii redkometall'nogo orudneniya na mestorozhdenii Tomtor [Features of localization of rare metal mineralization at the Tomtor deposit], *Redkometall'no-uranovoe rudoobrazovanie v osadochnykh porodakh: sbornik nauchnykh trudov [Rare metal-uranium ore formation in sedimentary rocks: collection of scientific papers]*, Moscow, 1995, pp. 223–241. (In Russ.).
  14. Kravchenko S. M., Belyakov A. Yu., Pokrovskii B. G. Geokhimiya i genezis Tomtorskogo massiva (sever Sibirskoi platformy) [Geochemistry and genesis of the Tomtor massif (north of the Siberian platform)], *Doklady Akademii nauk SSSR [Reports of the Academy of Sciences the USSR]*, 1992, V. 322, No 5, pp. 966–972. (In Russ.).
  15. Kravchenko S. M., Belyakov A. Yu., Kubyshev A. I., Tolstov A. V. Skandievo-redkozemel'no-ittrievo-niobievye rudy – novyi tip redkometall'nogo syr'ya [Scandium-rare-earth-yttrium-niobium ores – a new type of rare-metal raw materials], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii [Geology of Ore Deposits]*, 1990, V. 32, No 1, pp. 105–109. (In Russ.).
  16. Lazareva E. V., Zhmodik S. M., Dobretsov N. L., Tolstov A. V., Shcherbov B. L., Karmanov N. S., Gerasimov E. Yu., Bryanskaya A. V. Glavnye rudoobrazuyushchie mineraly anomal'no bogatykh rud mestorozhdenii Tomtor [The main ore-forming minerals of the anomalously rich ores of the Tomtor deposits], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 2015, V. 56, No 6, pp. 1080–1115. (In Russ.).
  17. Lapin A. V., Tolstov A. V. Mestorozhdeniya kor vyvetrivaniya karbonatitov [Deposits of carbonatite weathering crust], Moscow, Nauka Publ., 1993, 208 p.
  18. Lapin A. V., Tolstov A. V. Minerageniya kor vyvetrivaniya karbonatitov: metodicheskoe rukovodstvo [Minerageny of carbonatite weathering crust], Moscow, GEOKART Publ., GEOS Publ., 2011, 307 p.
  19. Lapin A. V., Tolstov A. V. Novye unikal'nye mestorozhdeniya redkikh metallov v korakh vyvetrivaniya karbonatitov [New unique deposits of rare metals in the weathering crusts of carbonatites], *Razvedka i okhrana nedr [Prospect and protection of mineral resources]*, 1993, No 3, pp. 7–11. (In Russ.).
  20. Lapin A. V., Tolstov A. V. Okislitel'nyi i vosstanovitel'nyi etapy formirovaniya zony gipergeneza karbonatitov i ikh rudonosnost' [Oxidative and reduction stages of the formation of the carbonatite hypergenesis zone and their ore content], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii [Geology of Ore Deposits]*, 1991, V. 33, No 4, pp. 81–91. (In Russ.).
  21. Lapin A. V., Tolstov A. V., Kulikova I. M. Osobennosti raspredeleniya lantanoidov, ittriya, skandiya i toriya v unikal'nykh kompleksnykh redkometall'nykh rudakh mestorozhdeniya Tomtor [Peculiarities of distribution of lanthanides, yttrium, scandium and thorium in unique complex rare-metal ores of the Tomtor deposit], *Geokhimiya [Geochemistry International]*, 2016, No 12, pp. 1104–1121. (In Russ.).
  22. Pokrovskii B. G., Belyakov A. Yu., Kravchenko S. M., Gryaznova Yu. A. Proiskhozhdenie rudnoi tolshchi i karbonatitov massiva Tomtor po izotopnym dannym [The origin of the ore strata and carbonatites of the Tomtor massif according to isotope data], *Geokhimiya [Geochemistry International]*, 1990, No 6, pp. 1320–1329. (In Russ.).
  23. Porshnev G. I., Stepanov L. L. Geologicheskoe stroenie i fosfatonosnost' massiva Tomtor [Geological structure and phosphate content of the Tomtor massif], *Shchelochnoi magmatizm i apatitnosnost' severa Sibiri [Alkaline magmatism and apatite content of the north of Siberia]*, Leningrad, NIIGA Publ., 1980, pp. 84–100.
  24. Porshnev G. I., Stepanov L. L. Geologiya i minerageniya Udzhinskoi provintsii (S-Z YaASSR) [Geology and Minerageny of the Udzhin Province (NW YaASSR)], *Sovetskaya geologiya [Soviet geology]*, 1981, No 12, pp. 103–106. (In Russ.).
  25. Tolstov A. V. Glavnye rudnye formatsii severa Sibirskoi platformy [Main ore formations in the north of the Siberian platform], Moscow, IMGRE Publ., 2006, 212 p.
  26. Tolstov A. V. Osobennosti mineralogii i geokhimii apatit-magnetitovykh rud massiva Tomtor (severo-zapadnaya Yakutiya) [Features of mineralogy and geochemistry of apatite-magnetite ores of the Tomtor massif (northwestern Yakutia)], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 1994, No 9, pp. 91–100. (In Russ.).
  27. Tolstov A. V., Tyan O. A. Geologiya i rudonosnost' massiva Tomtor [Geology and ore content of the Tomtor massif], Yakutsk, YaNTs SO RAN Publ., 1999, 164 p.
  28. Tolstov A. V., Konoplev A. D., Kuz'min V. I. Osobennosti formirovaniya unikal'nogo redkometall'nogo me-

- storozhdeniya Tomtor i otsenka perspektiv ego osvoineniya [Features of the formation of the unique rare metal deposit Tomtor and assessment of the prospects for its development], *Razvedka i okhrana nedr [Prospect and protection of mineral resources]*, 2011, No 6, pp. 20–26. (In Russ.).
29. Entin A. R., Zaitsev A. I., Nenashev N. I., Vasilenko V. B., Orlov A. I., Tyan O. A., Ol'khovik Yu. A., Ol'shtynskii S. I., Tolstov A. V. O posledovatel'nosti geologicheskikh sobytii, svyazannykh s vnedreniem Tomtorskogo massiva ul'traosnovnykh shchelochnykh porod i karbonatitov (Severo-Zapadnaya Yakutiya) [On the sequence of geological events associated with the intrusion of the Tomtor massif of ultrabasic alkaline rocks and carbonatites (Northwestern Yakutia)], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, 1990, V. 31, No 12, pp. 42–51. (In Russ.).
30. Epshtein E. M., Danil'chenko N. A., Postnikov S. A. Geologiya Tomtorskogo unikal'nogo mestorozhdeniya redkikh elementov (sever Sibirskoi platformy) [Geology of the Tomtor unique deposit of rare elements (north of the Siberian platform)], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii [Geology of Ore Deposits]*, 1994, V. 36, No 2, pp. 83–110. (In Russ.).
31. Erlikh E. N. Novaya provintsiya shchelochnykh porod na severe Sibirskoi platformy [New province of alkaline rocks in the north of the Siberian platform], *Zapiski Vsesoyuznogo Mineralogicheskogo obshchestva [Notes of the All-Union Mineralogical Society]*, 1964, V. 93, I. 6, pp. 682–693. (In Russ.).
32. Kravchenko S. M., Pokrovsky B. G. The Tomtor alkaline ultrabasic massif and related REE-Nb deposits, northern Siberia, *Economic Geology*, 1995, V. 90, No 3, pp. 676–689.

## GENESIS AND AGE OF THE TOMTOR Nb AND RARE-EARTH DEPOSIT ORE SEQUENCE, NORTHEASTERN SIBERIAN PLATFORM

A. V. Tolstov (PhD, director of JSC ALROSA <sup>1,3</sup>)

V. G. Cherenkov (chief geologist <sup>2</sup>)

L. N. Baranov (researcher, JSC ALROSA <sup>1,3</sup>)

<sup>1</sup> Research Geological Enterprise JSC ALROSA (PJSC), Mirny

<sup>2</sup> FSBI VSEGEI, Moscow branch

<sup>3</sup> Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk

*The northeastern Siberian platform (Republic of Sakha, Yakutia) hosts the Udzhinskaya province of alkaline ultrabasic massifs with carbonatites as final phases of magmatic system evolution; they form its central carbonatite core and are characterized by elevated Fe, Al and P concentrations. They also contain a complex of rare and rare-earth elements. Crust of laterite weathering of up to 400 m thick is present within the massifs. Phosphate, Nb, Y, Sc and TR content in crust of carbonatite weathering is much higher compared to unaltered rock differences. Their maximum values are in the sequence of specific sedimentary deposits formed as denudation products of ore-bearing carbonatite crust precipitated in minor lake depressions and due to their intensive chemogenic transformation in hot humid climate. They are unique high-grade ores, with no world analogs in terms of mineral potential. Sometimes, these rocks are their natural concentrates averaging (in weight %) 7,21 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 0,578 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0,045 Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and 10,16 TR<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. The rocks composing the ore-bearing sequence show distinct evidence of sedimentary genesis: well-pronounced layered texture and facial zoning, presence of carbonized vegetable detrite and bacteriomorphic aggregates. Therefore, it is reasonable to regard a set of these formations as an independent stratigraphic unit, Tomtor sequence. Geological data suggest that it formed 340-280 Ma. Tomtor sequence can be an important prospecting criteria in prospecting for rare and rare-earth elements.*

*Keywords: carbonatites, rare and rare-earth elements, Tomtor massif, crust of weathering, laterites, layering, facies, pyrochlore, crandallite.*