

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

УДК 552.3

<https://doi.org/10.25587/2587-8751-2025-1-5-16>

Научная оригинальная статья

ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА МИНЕРАЛОВ ГРУППЫ ШПИНЕЛИ ИЗ ПИКРИТОВ АНАБАР-УДЖИНСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ

А. Я. Биллер¹, М. Г. Ощепкова^{1}, О. Б. Олейников¹, Н. А. Опарин¹, А. П. Зарукин²*¹Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН,
г. Якутск, Российская Федерация²АО «Алмазы Анабара», г. Якутск, Российская Федерация

*oshchepkovamg28@mail.ru

Аннотация

На территории Восточного Прианабарья расположены многочисленные россыпные месторождения алмазов, однако, коренные источники до сих пор не установлены. В то же время в этом регионе широко распространены тела неалмазоносных кимберлитов и близких к ним по составу щелочно-ультраосновных пород пикрит-альпегитового состава, которые также содержат минералы-спутники алмаза. В работе представлено комплексное исследование хромшпинелидов, которые являются типичными минералами малых тел щелочно-ультраосновных пород Томторского поля.

Цель работы – определить типохимические особенности хромшпинелидов щелочно-ультраосновных тел района и оценить их потенциальную роль в формировании минеральных ореолов, связанных с алмазоносными россыпями.

Методами электронно-зондового анализа изучен химический состав хромшпинелидов. Установлено, что они характеризуются широким диапазоном содержаний Cr_2O_3 (23,6–57,4 мас. %), Al_2O_3 (1,5–33,5 мас. %) и MgO (8–18,2 мас. %). Выделена группа зёрен с аномально высокими содержаниями TiO_2 (3,0–7,6 мас. %). На классификационных диаграммах составы образуют тренд от хромита к плеонасту, что типично для пород, кристаллизовавшихся в менее глубинных, по сравнению с кимберлитами, условиях. Наличие зональных зёрен, в которых уменьшается содержание хрома от центра к краю, связано с пресыщением расплава Al_2O_3 и изменением условий среды кристаллизации. Установлено сходство состава исследованных хромитов с высоким содержанием TiO_2 с хромшпинелидами из алмазоносных карнийских туффов Булкурской антиклинали. Результаты указывают на то, что пикриты могут рассматриваться как один из коренных источников хромшпинелидов в россыпях и промежуточных коллекторах региона.

Ключевые слова: хромшпинелиды, пикриты, щелочно-ультраосновные породы, Томторское поле

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИГАБМ СО РАН, проект FUGG-2024-0007

Для цитирования: Биллер А. Я., Ощепкова М. Г., Олейников О. Б., Опарин Н. А., Зарукин А. П. Особенности состава минералов группы шпинели из пикритов Анабар-Уджинского междуречья. *Вестник СВФУ*. 2025;(4): 5-16. DOI: 10.25587/2587-8751-2025-1-5-16

FEATURES OF COMPOSITION IN SPINEL SUBGROUP MINERALS FROM PICRITES OF THE ANABAR-UJINSKY INTERFLUVE

Anastasia Ya. Biller¹, Mariya. G. Oshchepkova^{1*}, Oleg B. Oleinikov¹, Nikolay A. Oparin¹, Alexey P. Zarukin²

¹Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, Russian Federation

²JSC “Almazny Anabara”, Yakutsk, Russian Federation

*oshchepkovamg28@mail.ru

Abstract

There are numerous diamond placers on the Eastern Anabar region, but primary sources have not been identified yet. However, non-diamondiferous kimberlite and similar alkaline-ultramafic rocks of picrite-alneite composition, with diamond indicator minerals are widespread in the region. The paper presents a comprehensive study of spinel subgroup minerals, which are typical minerals of small bodies of alkaline-ultramafic rocks of the Tomtor field.

The main goal of the work was to determine the typochemical features of spinel subgroup minerals from alkaline-ultramafic bodies of the region and to evaluate their potential role in the formation of mineral halos associated with alluvial diamond.

It was found that chemical composition of spinel subgroup minerals are characterized by a wide range of Cr_2O_3 (23.6–57.4 wt. %), Al_2O_3 (1.5–33.5 wt. %) and MgO (8–18.2 wt. %) contents. A group of grains with abnormally high TiO_2 contents (3–7.6 wt. %) was identified. In the classification diagrams, the compositions form a trend from chromite to pleonast, typical for rocks crystallized in shallower level than kimberlites. The presence of zoned grains, in which Cr_2O_3 content decreases from the center to the edge, is associated with saturation of the melt with Al_2O_3 and crystallization conditions changing. The similarity of the composition of studied high- TiO_2 Cr-spinels with those from the diamond-bearing Carnian tuffites of the Bulkur anticline was established. The results indicate that picrite bodies can be considered as one of the sources of Cr-spinel in placers and intermediate reservoirs of the region.

Keywords: Cr-spinel, picrite, alkaline-ultramafic rocks, Tomtor field

Funding. The work was carried out within the State Assignment of the DPMGI SB RAS, project FUGG-2024-0007

For citation: Biller A.Ya., Oshchepkova M.G., Oleinikov O.B., Oparin N.A., Zarukin A.P. Features of composition in spinel subgroup minerals from picrites of the Anabar-Ujinsky interfluvium. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences*. 2025;(4): 5-16. DOI: 10.25587/2587-8751-2025-1-5-16

Введение

Минералы спутники алмаза россыпных месторождений и ореолов имеют важное значение при поиске их коренных источников. Наиболее информативным являются хромшпинелиды, по составу которых можно сделать выводы о формационной природе материала россыпей [1]. При этом необходимо учитывать, что хромшпинелиды присутствуют и в формирующих эксплозивные тела трубчатой формы пикритах, близких по составу и текстурно-структурным признакам к кимберлитам [2]. Химический состав данных минералов является чувствительным индикатором физико-химических условий формирования материнских магм [3, 4]. В связи с этим необходимо установить типохимические особенности индикаторных минералов для некимберлитовых эксплозивных тел, сложенных щелочно-ультраосновными породами.

В работе приводятся результаты петрографического и петрохимического исследования пикритов трубчатых тел и определения типохимических особенностей хромшпинелидов, содержащихся в пикритах и перекрывающих их терригенных отложениях базального горизонта перми. Пикритовые тела были вскрыты буровыми работами при проведении АО «Алмазы Анабара» поисковых работ в Томторском поле щелочно-ультраосновных пород.

Геологическая позиция

Томторское поле малых тел щелочно-ультраосновных пород расположено в восточной части Анабарской антеклизы в пределах Уджинской провинции щелочных пород (рис. 1). По данным А.И. Зайцева и А.П. Смелова, на территории поля известно более 70 тел, в том числе трубчатой формы, размером до 10000 м² [5]. По петрографическому составу среди них были выделены кимберлиты, альнеиты, пикритовые порфириды, кимберлитовые, пикритовые и альнеитовые брекчии [2, 5]. Кроме того, в Томторском поле присутствуют базиты рифейского и пермско-триасового возрастов, а также осадочные и вулканогенно-осадочные образования рифея, венда, кембрия и терригенные породы перми и юры. Согласно результатам датирования, Rb-Sr и K-Ar методами, возраст щелочно-ультраосновных образований от 213 до 608 млн лет [2, 5]. По совокупности петрографических и формационных признаков тела Томторского поля отнесены к щелочно-ультраосновным образованиям, по составу и текстурно-структурным особенностям конвергентным кимберлитам.

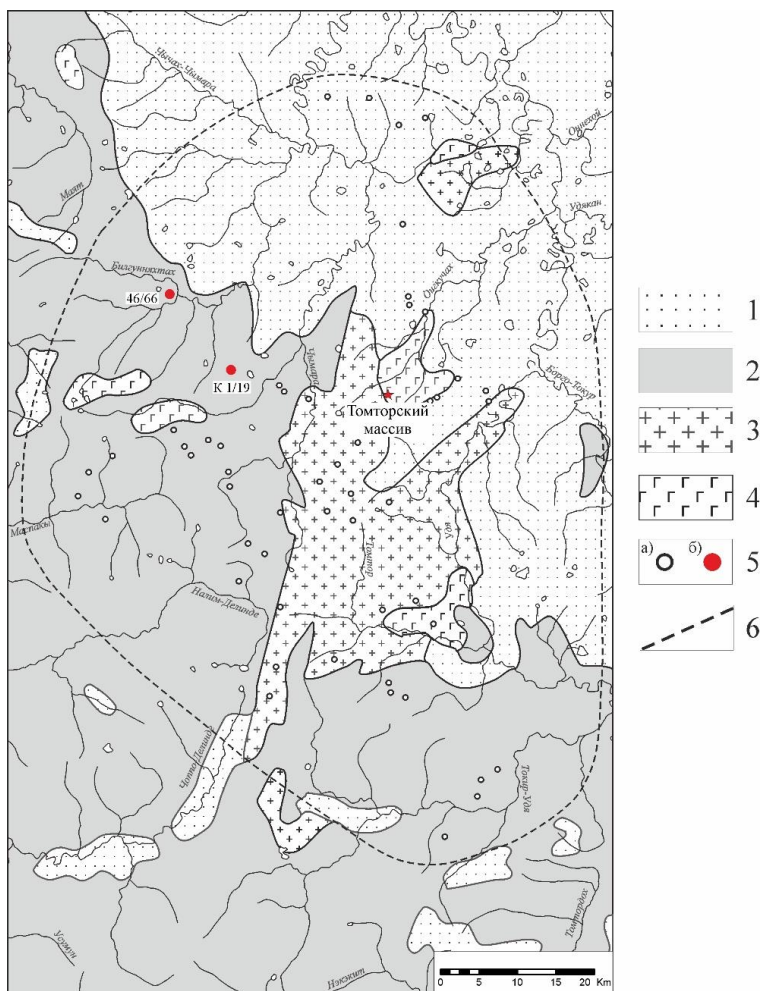


Рис. 1. Схема геологического строения Томторского поля щелочно-ультраосновных пород по [5] с изменениями. 1 – мезозой; 2 – палеозой; 3 – протерозой-архей; 4 – силлы базитов различного возраста; 5 – геофизические аномалии трубчатого типа (а), разбуренные аномалии 46/66 и К 1/19-1, рассматриваемые в настоящей работе (б); 6 – предполагаемые границы Томторского поля

Fig. 1. Geological scheme of the Tomtor field of alkaline-ultramafic rocks, according to [5] with changes. 1 – Mesozoic; 2 – Paleozoic; 3 – Proterozoic-Archean; 4 – sills of basites; 5 – pipe-typed geophysical anomalies (a), anomalies 46/66 and K 1/19 in this study (b); 6 – assumed boundaries of the Tomtor field

Материалы и методы исследования

Все аналитические работы проведены в Институте геологии алмаза и благородных металлов СО РАН.

Химический состав хромшпинелидов определен на электронно-зондовом микроанализаторе “Camebax-micro” (Женвилье, Франция), аналитик Н.В. Христофорова. Анализ проводился при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе пучка 40 нА, диаметр пучка электронного зонда составлял 1 мкм, время съёмки 7 сек. Предел обнаружения анализируемых элементов для Na 0,07 мас. %, для Cr и Mn менее 0,03 мас. % и 0,01 мас. % для Ti и K. Для остальных элементов – <0,05 мас. %.

Микроскопическое изучение петрографических особенностей пород проводилось на поляризационном микроскопе Carl Zeiss Axioscop 40.

Химический состав пикритов определен методом силикатного анализа, включая атомно-эмиссионную спектрометрию, ионометрию с ион-селективным электродом, гравиметрию, титриметрию.

Изучение морфологии и зональности зерен производилось методами сканирующей электронной микроскопии в эпоксидных шашках, напыленных проводящим слоем углерода (до синего цвета). Исследования проводились на электронном сканирующем микроскопе Jeol (JSM-6480LV) с энергетическим спектрометром INCA-Energy 350 при напряжении на катоде 20 кВ и токе электронов 1 нА.

Изучен керновый материал, полученный при заверке бурением геофизических аномалий К 1/19 и 46/66. Из керна скважины аномалии К 1/19 отобраны образцы терригенных отложений базального горизонта перми (76,5–76,9 м) и пикритов (123,0–140,0 м). Образцы пикритов аномалии 46/66 получены из глубин 54,0 – 55,0 м и 65,0 – 66,0 м.

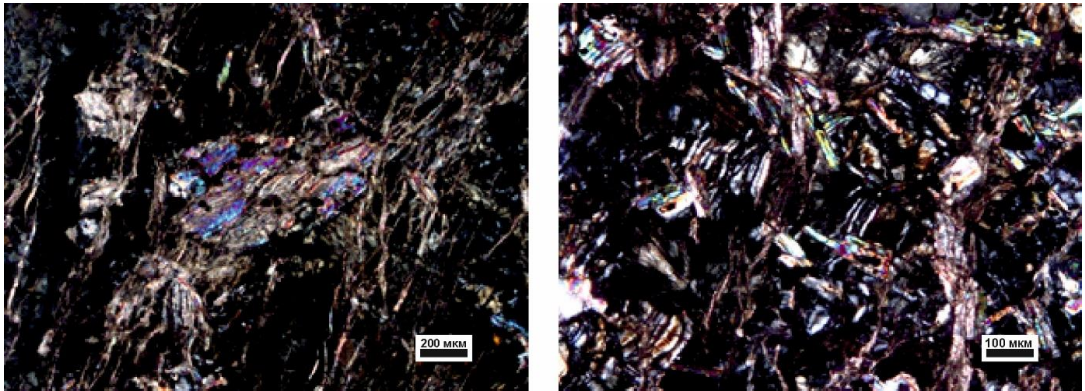
Петрография и петрохимия пикритов

Исследование посвящено изучению хромшпинелидов из слюдяных пикритов аномалий К 1/19-1 и 46/66 (рис. 1) и перекрывающих их терригенных отложений базального горизонта перми, вскрытых поисковыми скважинами. По данным бурения мощность перекрывающих пермских и юрских терригенных отложений не более 100 м.

Трубочное тело аномалии 46/66 сложено слюдяным пикритом, имеющим порфировую структуру. Порфиновые вкрапления размером от 0,1 до 1 см представлены псевдоморфозами серпентина и хлорита по оливину и слюде. Основная масса меняется с глубиной от смектит-карбонатной до серпентин-слюдистой. Структура мезостазиса гипидиоморфнозернистая, местами неравномернозернистая, пойкилитовая: крупные (до 2,5 мм) зерна слюды включают рудные минералы и псевдоморфозы серпентина по оливину (рис. 2). Встречаются редкие зерна хромита и футляровидные кристаллы анатаза. Местами присутствуют крупные выделения кальцита. Апатит фиксируется в виде зерен неправильной формы в карбонате.

Породы аномалии К 1/19 представлены в различной степени измененными слюдяными пикритами. Структура породы неравномернозернистая, мелкопорфировая. Порфиновые выделения изометричной формы, размером до 0,1–0,3 мм, представлены полными псевдоморфозами по оливину и частично замещенному флогопиту (рис. 3). Межзерновое пространство выполнено тонкозернистой слюдисто-хлоритовой, местами карбонатизированной основной массой. Скрытокристаллический мезостазис часто глинизирован. Местами крупные зерна флогопита содержат включения хромита, магнетита, перовскита, апатита и андрадита. Андрадит в основной массе обрастает чешуйки флогопита и выполняет межзерновое пространство. Апатит образует обособленные игольчатые кристаллы, пойкилитовые включения в слюде и крупные зерна (до 500 мкм) в интерстициях между таблицами флогопита. Карбонаты в незначительном количестве развиты на всех уровнях, представлены кальцитом и анкеритом, встречаются в виде скоплений в основной массе. Отмечаются редкие зерна минералов группы шпинели.

По петрохимическим характеристикам породы изученных аномалий относятся к пикритам, для них характерны средние содержания магния (11,39–17,86 мас. % MgO), невысокие содержания двух и трехвалентного Fe. Высокое содержание калия (до 2,41 мас. % K_2O) связано с количеством флогопита, являющегося основным минералом в этих породах.

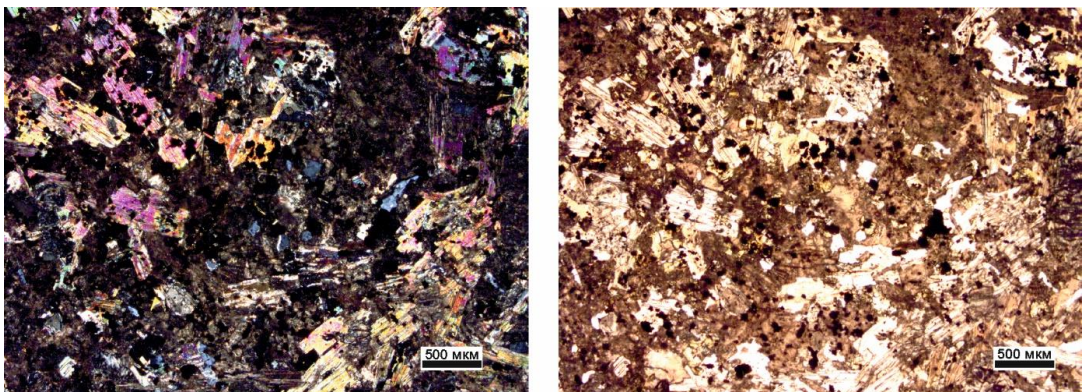


А

Б

Рис. 2. Аномалия 46/66, слюдяной пикрит: А – порфировые выделения слюды и псевдоморфозы вторичных минералов по оливину, Б – гипидиоморфнозернистая основная масса смектит-серпентинового состава, с измененными призматическими чешуйками флогопита. Фото шлифа с анализатором

Fig. 2. Anomaly 46/66, micaceous picrite: A – mica porphyritic aggregates and secondary minerals pseudomorphs after olivine; B – subhedral groundmass of smectite-serpentine composition, with altered prismatic phlogopite flakes. Photo of thin section in cross-polarized light



А

Б

Рис. 3. Аномалия К 1/19, слюдяной пикрит с частично замещенными чешуйками слюды и тонкозернистой слюдисто-хлоритовой основной массой. Фото шлифа: А – с анализатором, Б – без анализатора

Fig. 3. Anomaly K 1/19, micaceous picrite with partially replaced mica and fine-grained mica-chlorite groundmass. Photo in thin section: A – cross-polarized light, B – plane-polarized light

Особенности состава минералов группы шпинели

Макрокристаллы минералов группы шпинели представлены зернами преимущественно неправильной формы, с резорбированными краями размером до 0,5 мм. Редко присутствуют октаэдры. Большинство зёрен по химическому составу относится к магнезиохромитам по класси-

фикации [6]. В незначительном количестве присутствуют зерна хромита и шпинели. В редких зональных кристаллах от центра к краю наблюдается уменьшение содержания Cr_2O_3 , MgO и увеличение FeO , вплоть до магнетита (рис. 4). Иногда в таких зонах присутствуют включения силикатных минералов: оливина, флогопита и/или клинопироксена. На рисунке 4 представлено зональное зерно магнезиохромита, из пикрита аномалии К 1/19, где центральная серая область – магнезиохромит, краевая темно-серая зона шириной около 50 мкм – магнезиохромит с повышенным содержанием FeO 22,5 мас. % и низким Cr_2O_3 37,9 мас. %, по сравнению с центром – 20,4 мас. %, 51,1 мас. %, соответственно. Тонкая светлая оторочка, мощностью не более 5 мкм – магнетит.

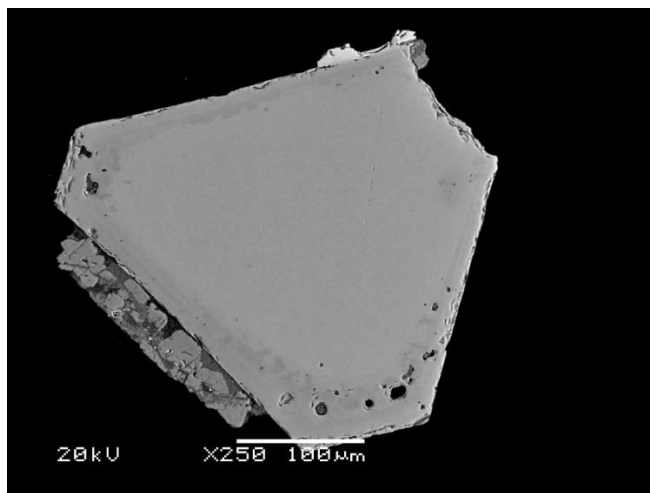


Рис. 4. Зональное зерно магнезиохромита с силикатными включениями из пикрита аномалии К 1/19. Изображение в обратно рассеянных электронах

Fig. 4. Zoned magnesiochromite grain with silicate inclusions from anomaly K 1/19 picrites. BSE image

Состав хромшпинелидов из пикритов изученных аномалий характеризуется следующими особенностями: Cr_2O_3 варьирует в широких пределах от 23,6 мас. % до 57,4 мас. %; Al_2O_3 – от 1,5 до 33,5 мас. %, демонстрируя обратную корреляцию с Cr_2O_3 . Минимальные содержания Al_2O_3 отмечаются в хромитах из пикритов аномалии К 1/19 и перекрывающих отложений перми. Содержания MgO находятся в интервале 8,00–18,2 мас. %. Большая часть зерен содержит TiO_2 в пределах 0,8–2 мас. %, однако, встречаются зёрна с содержанием TiO_2 3–7,6 мас. % (табл. 1, рис. 5).

На дискриминационных диаграммах выделяется 2 группы хромшпинелидов: первая – наиболее многочисленная, имеет обратную зависимость между содержаниями Cr_2O_3 и Al_2O_3 (рис. 6а) и вторая группа с невысокими содержаниями Al_2O_3 и повышенным TiO_2 . Эта немногочисленная группа зерен на дискриминационной диаграмме $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})-\text{Cr}/(\text{Cr}+\text{Al})$ [1] лежит вне поля хромшпинелидов кимберлитов (рис. 6б).

Хромшпинелиды из пикритов и перекрывающих их пермских отложений демонстрируют близкий химический состав. Вероятно, что источником хромшпинелидов в терригенных пермских отложениях являлись пикритовые тела Томторского поля.

Таблица

Представительные анализы химического состава минералов группы шпиннели
из пикритов аномалий К 1/19 и 46/66 и базальных отложений перми

Table

Representative analyses of the chemical composition of spinel subgroup minerals from picrites
of anomalies K 1/19 and 46/66 and Permian basal surface

	К 1/19					46/66					Базальный горизонт		
	0,04	0,00	0,00	0,09	0,01	0,04	0,18	0,11	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00
SiO ₂	0,89	1,80	7,62	0,93	2,24	1,75	1,41	0,74	7,13	3,56	1,06	1,82	
Al ₂ O ₃	15,89	26,86	5,02	17,79	6,24	33,54	16,91	17,94	9,05	1,51	17,58	26,09	
Cr ₂ O ₃	48,40	32,27	27,81	46,81	57,42	23,58	45,60	47,16	28,81	49,81	45,19	31,72	
Fe ₂ O ₃	6,44	9,62	24,68	7,37	6,79	10,56	11,37	6,84	20,25	15,20	9,44	9,49	
FeO	13,28	14,99	26,72	11,67	15,05	14,74	8,85	11,43	25,32	21,69	10,93	16,28	
MnO	0,19	0,21	0,47	0,18	0,26	0,17	0,17	0,19	0,37	0,29	0,21	0,23	
MgO	14,13	14,89	8,01	15,71	13,08	15,62	18,24	15,69	9,10	8,90	16,18	13,69	
Сумма	98,61	99,66	97,86	99,84	100,42	98,94	101,60	99,41	98,02	99,43	99,67	98,38	
Si	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Ti	0,02	0,04	0,20	0,02	0,06	0,04	0,03	0,02	0,18	0,09	0,02	0,04	
Al	0,59	0,94	0,20	0,64	0,24	1,15	0,59	0,65	0,36	0,06	0,64	0,94	
Cr	1,21	0,76	0,76	1,14	1,48	0,54	1,08	1,15	0,77	1,36	1,10	0,76	
Fe ³⁺	0,15	0,22	0,64	0,17	0,17	0,23	0,26	0,16	0,51	0,39	0,22	0,22	
Fe	0,35	0,37	0,77	0,30	0,41	0,36	0,22	0,29	0,71	0,63	0,28	0,41	
Mn	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	
Mg	0,67	0,66	0,41	0,72	0,64	0,68	0,81	0,72	0,46	0,46	0,74	0,62	
Сумма	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	
f	34,52	36,09	65,18	29,43	39,24	34,62	21,41	29,01	60,96	57,76	27,48	40,02	
Cr#	67,14	44,63	78,80	63,84	86,06	32,05	64,40	63,81	68,11	95,68	63,29	44,92	

Примечание. $f = \text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})$; $\text{Cr}\# = \text{Cr}/(\text{Cr}+\text{Al})$.

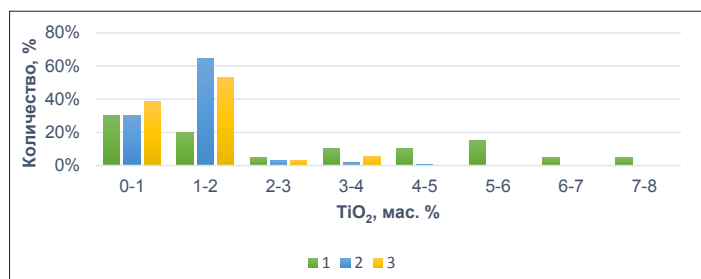


Рис. 5. Гистограмма распределения содержаний TiO_2 в минералах группы шпинели из: 1 – пикритов аномалии К 1/19 ($n = 20$); 2 – 46/66 ($n = 653$); 3 – перекрывающих терригенных отложений базального горизонта перми ($n = 94$), где n – количество зерен

Fig. 5. Histogram of TiO_2 content distribution in spinel subgroup minerals from: 1 – K 1/19 picrites ($n = 20$); 2 – 46/66 picrites ($n = 653$); 3 – overlying terrigenous deposits of Permian basal surface ($n = 94$), n – number of grains

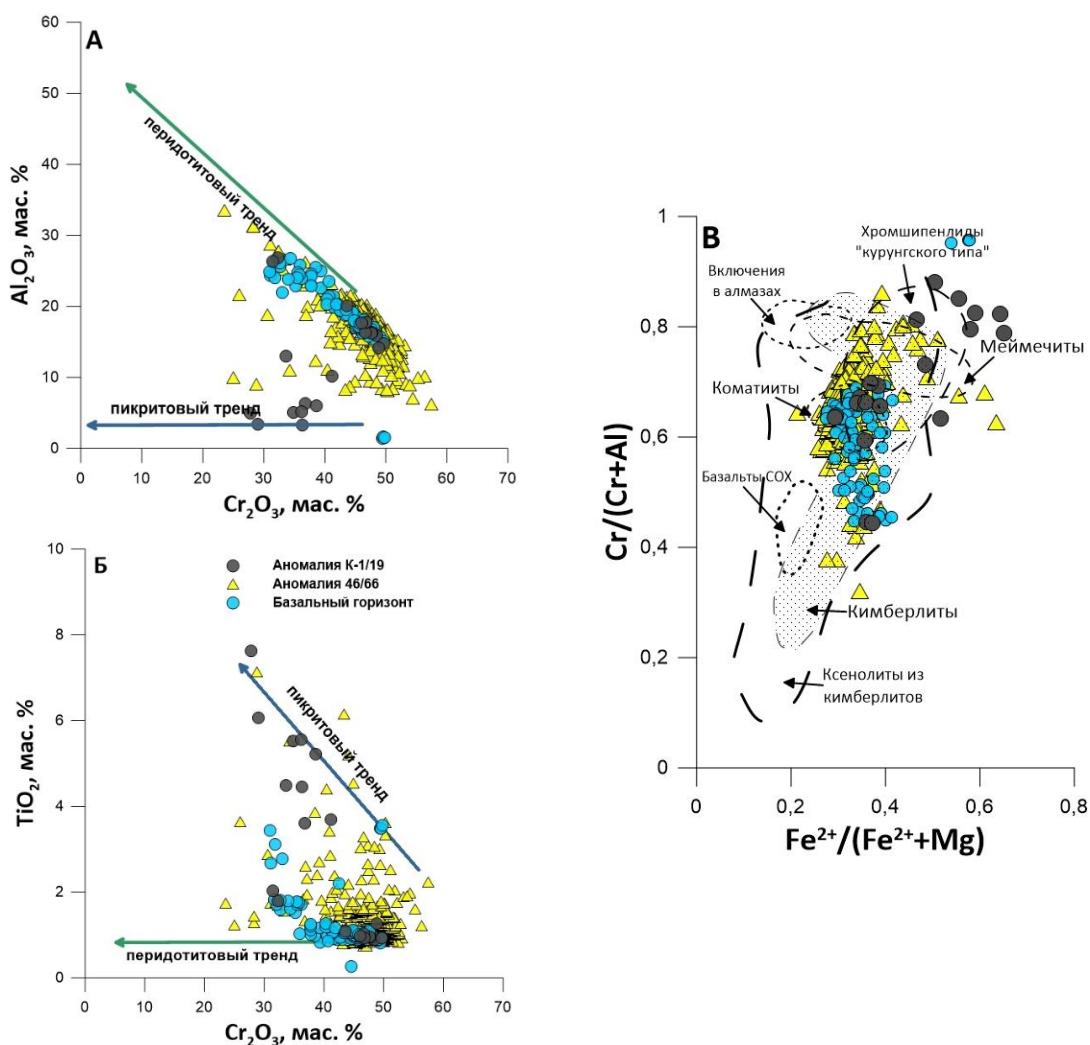


Рис. 6. Классификационные диаграммы составов минералов группы шпинели по: А [3], Б [4], В [1].

Условные обозначения приведены на рисунке Б

Fig. 6. Classification diagrams of spinel subgroup minerals compositions according to: А [3], Б [4], В [1].

Legend is shown on figure Б

На диаграмме Fe^{3+} -Al-Cr подавляющее большинство минералов ложатся в тренд 3, от хромита к плеонасту, что, согласно П.Л. Редеру и Д. Шульцу [7], указывает на быструю кристаллизацию в условиях пересыщения Al_2O_3 и уменьшения содержания Cr_2O_3 при относительно стабильных значениях железистости (рис. 7). Этот тренд близок хромитам из базальтов срединно-океанических хребтов. Группа высокотитанистых и низкоглиноземистых шпинелидов из аномалии К 1/19 (табл. 1) располагаются ближе к тренду 2 отдельно от основной массы зерен. Тренд 2 характерен хромитам с повышенным содержанием TiO_2 и высокой железистостью ($\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})$). Формирование таких минералов связывают с одновременной кристаллизацией богатых Mg и Al силикатных минералов, как оливин, флогопит в кимберлитах, или пироксен и плагиоклаз в базальтах. Зональность, установленная в исследуемых кристаллах, свидетельствует о быстроменяющихся условиях, включая изменение РТ-параметров, фугитивность кислорода и состав среды кристаллизации [7]. Отметим, что изученные шпинелиды не попадают (исключая единичные зерна) в тренд 1 от хромита к магнезиальной ульвошпинели, который характерен для алмазосных кимберлитов.

Сравнительный анализ выявил близость по составу хромитов из пикритов и карнийских алмазосных туффилов Булкурской антиклинали [8, 9], которая проявляется в умеренном содержании Cr_2O_3 (до ~50 мас. %) при повышенных концентрациях TiO_2 (3–8 мас. %). Данное соответствие позволяет рассматривать пикриты Томторского поля в качестве одного из вероятных коренных источников хромитов в алмазосных россыпях и промежуточных коллекторах.

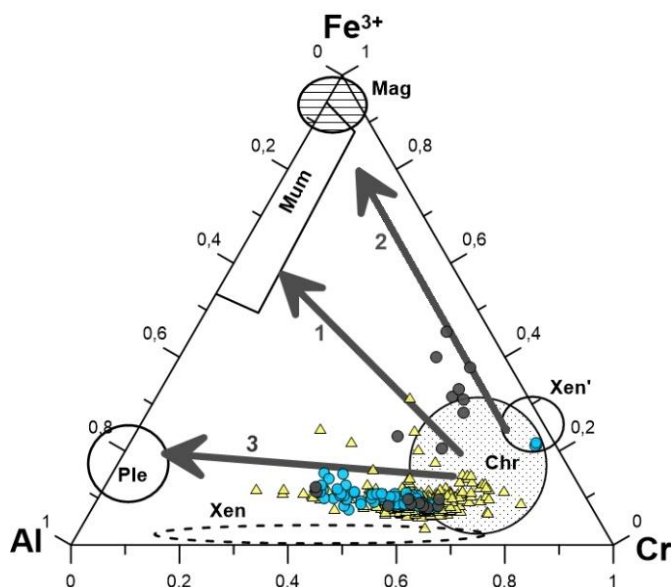


Рис. 7. Положение фигуративных точек составов минералов группы шпинели из пикритов и отложений базального горизонта перми на диаграмме Fe^{3+} -Al-Cr. Выделенные поля: Chr – хромит, Mag – магнетит, Mum – магнезио-ульвошпинель-магнетит, Ple – плеонаст, Xen – шпинелидов из ксенолитов перидотитов, Xen' – шпинелидов из метасоматизированных ксенолитов перидотитов. Тренды: 1 – кимберлитовый, 2 – Fe-Ti, 3 – Cr-Al по [7]. Условные обозначения приведены на рисунке 6Б

Fig. 7. Position of spinel subgroup minerals compositions from picrites and Permian basal surface on Fe^{3+} -Al-Cr diagram. The fields: Chr – chromite, Mag – magnetite, Mum – magnesio- ulvöspinel-magnetite, Ple – pleonaste, Xen – spinel from peridotite xenoliths, Xen' – spinel from metasomatized peridotite xenoliths. Trends: kimberlite (1); Fe-Ti (2); Cr-Al (3) [7]. Legend is shown on figure 6B

Заключение

В исследованных образцах пикритов Томторского поля содержание Cr_2O_3 в минералах группы шпинели варьирует в диапазоне 23,5–57,4 мас. %, а хромистость $\text{Cr}\# = \text{Cr}/(\text{Cr}+\text{Al})$ не превышает 0,7, при этом в большинстве зерен $<0,6$. Такие характеристики типичны для минералов менее глубинных мантийных обстановок, по сравнению с хромшпинелидами алмазоносных ассоциаций, обладающих исключительно высокими содержаниями Cr_2O_3 (обычно >62 мас. %) [3, 10, 11].

Низкое содержание TiO_2 ($<0,5$ – $0,7$ мас. %) является одним из маркеров хромшпинелидов алмазного парагенезиса [3, 11]. В изученных хромитах отмечается более широкое распределение TiO_2 с формированием отдельной группы зерен с аномально высокими содержаниями (3–7,6 мас. %), что может свидетельствовать о значительной роли метасоматоза при их образовании.

Значительное разнообразие составов минералов группы шпинели в исследуемых породах свидетельствует о сложной истории их формирования. Группа хромитов с высокими содержаниями Cr_2O_3 и MgO указывает на формирование из наиболее глубинных мантийных источников, а увеличение содержания Al_2O_3 свидетельствует о следующей более поздней генерации, которая связана с эволюцией расплава, обеспечившей рост концентрации Al_2O_3 и истощении Cr_2O_3 .

Схожесть составов части зерен хромшпинелидов из пикритовых тел и карнийских туффицитов позволяет рассматривать пикриты как вероятный коренной источник для части терригенного материала в верхнетриасовых осадочных коллекторах региона.

Литература

1. Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н., Похилenko Н.П. *Морфология и морфогенез индикаторных минералов кимберлитов*. Новосибирск: Филиал «Гео» Издательства СО РАН, Издательский дом «Манускрипт»; 2001:276.
2. Лапин А.В., Толстов А.В., Лисицын Д.В. *Кимберлиты и конвергентные породы*. Москва: ИМГРЭ; 2004:226.
3. Соболев Н.В., Похилenko Н.П., Лаврентьев Ю.Г., Усова Л.В. Особенности состава хромшпинелидов из алмазов и кимберлитов Якутии. *Геология и геофизика*. 1975;11:7-24.
4. Kamenetsky V.S., Crawford A.J., Meffre S. Factors controlling chemistry of magmatic spinel: an empirical study of associated olivine, Cr-spinel and melt inclusions from primitive rocks. *Journal of Petrology*. 2001;42:655-671.
5. Зайцев А.И., Смелов А.П. *Изотопная геохронология пород кимберлитовой формации Якутской провинции*. Якутск: Офсет; 2010:107.
6. Bosi F., Biagioni C., Pasero M. Nomenclature and classification of the spinel supergroup. *European Journal of Mineralogy*. 2019; 31(1):183-192.
7. Roeder P.L., Schulze D.J. Crystallization of groundmass spinel in kimberlite. *Journal of Petrology*. 2008; 49(8):1473-1495. DOI: 10.1093/petrology/egn034
8. Николенко Е.И., Логвинова А.М., Изох А.Э., и др. Ассоциация хромшпинелидов из верхнетриасовых гравелитов северо-востока Сибирской платформы. *Геология и геофизика*. 2018;59(10):1680-1700. DOI: 10.1016/j.rgg.2018.09.011
9. Биллер А.Я., Угайева С.С., Олейников О.Б. Хромшпинелиды алмазоносных туффицитов Булкурской антиклинали (северо-восток Сибирской платформы). *Наука и образование*. 2017;4(88):44-49.
10. Barnes S.J., Roeder P.L. The range of spinel compositions in terrestrial mafic and ultramafic rocks. *Journal of Petrology*. 2001;42 (12):2279-2302.
11. Griffin W.L., Ryan C.G., Gurney J.J., Sobolev N.V., Win T.T. Chromite macrocrysts in kimberlites and lamproites; geochemistry and origin. *Proceedings of the Fifth International Kimberlite Conference: Extended Abstracts*, 1991:142–144.

References

1. Afanasyev V.P., Zinchuk N.N., Pokhilenko N.P. *Morphology and morphogenesis of indicator minerals of kimberlites*. Novosibirsk: Geo Branch of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Manuscript Publishing House; 2001:276 (in Russian).
2. Lapin A.V., Tolstov A.V., Lisitsyn D.V. *Kimberlites and convergent rocks*. Moscow: IMGRE; 2004:226 (in Russian).
3. Sobolev N.V., Pokhilenko N.P., Lavrentiev Yu.G., Usova L.V. Features of the composition of chrome spinels from diamonds and kimberlites of Yakutia. *Geology and geophysics*. 1975;11:7–24 (in Russian).
4. Kamenetsky V.S., Crawford A.J., Meffre S. Factors controlling chemistry of magmatic spinel: an empirical study of associated olivine, Cr-spinel and melt inclusions from primitive rocks. *Journal of Petrology*. 2001;42:655–671.
5. Zaitsev A.I., Smelov A.P. *Isotopic geochronology of kimberlite formation rocks of the Yakut province*. Yakutsk: Ofset; 2010:107 (in Russian).
6. Bosi F., Biagioni C., Pasero M. Nomenclature and classification of the spinel supergroup. *European Journal of Mineralogy*. 2019;31(1):183–192.
7. Roeder P.L., Schulze D.J. Crystallization of groundmass spinel in kimberlite. *Journal of Petrology*. 2008;49(8):1473–1495. DOI: 10.1093/petrology/egn034
8. Nikolenko E.I., Logvinova A.M., Izokh A.E., et al. Cr-spinel assemblage from the Upper Triassic gabbros of the northeastern Siberian Platform. *Russian Geology and Geophysics*. 2018;59(10):1680–1700 (in Russian). DOI: 10.1016/j.rgg.2018.09.011
9. Biller A.Ya., Ugapieva S.S., Oleynikov O.B. Chromium spinels of diamond-bearing tuffites of the Bulkur anticline (northeast of the Siberian platform). *Science and Education*. 2017;4(88):44–49 (in Russian).
10. Barnes S.J., Roeder P.L. The range of spinel compositions in terrestrial mafic and ultramafic rocks. *Journal of Petrology*. 2001;42(12):2279–2302.
11. Griffin W.L., Ryan C.G., Gurney J.J., Sobolev N.V., Win T.T. Chromite macrocrysts in kimberlites and lamproites; geochemistry and origin. *Proceedings of the Fifth International Kimberlite Conference: Extended Abstracts*, 1991:142–144.

Сведения об авторах

БИЛЛЕР Анастасия Яковлевна – вед. инженер Института геологии алмазов и благородных металлов СО РАН, Scopus ID: 56416244600, ORCID 0000-0002-1628-2984 SPIN-код: 5756-2232

ОШЕПКОВА Мария Геннадиевна – м.н.с. Института геологии алмазов и благородных металлов СО РАН, Scopus ID: 58627916500, ORCID 0000-0002-2777-0449, SPIN-код: 2649-5300
e-mail: oshchepkovamg28@mail.ru

ОЛЕЙНИКОВ Олег Борисович – к.г.-м.н., в.н.с., Института геологии алмазов и благородных металлов СО РАН, ORCID 0000-0003-1010-7592

ОПАРИН Николай Александрович – м.н.с. Института геологии алмазов и благородных металлов СО РАН, Scopus ID: 57035370200, ORCID 0000-0002-3019-1245, SPIN-код: 9572-9398

ЗАРУКИН Алексей Павлович – нач. отряда, АО «Алмазы Анабара»

About the authors

Anastasia Ya. BILLER – Lead Engineer, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, Russian Federation, Scopus ID: 56416244600, ORCID 0000-0002-1628-2984 SPIN-code: 5756-2232

Mariya G. OSHCHPKOVA – Junior Researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, Russian Federation, Scopus ID: 58627916500, ORCID 0000-0002-2777-0449, SPIN-code: 2649-5300
e-mail: oshchepkovamg28@mail.ru

Oleg B. OLEJNIKOV – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Lead Researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, Russian Federation, ORCID 0000-0003-1010-7592

Nikolay A. OPARIN – Junior Researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, Russian Federation, Scopus ID: 57035370200, ORCID 0000-0002-3019-1245, SPIN-код: 9572-9398

Alexey P. ZARUKIN – head of a party, JSC “Almazy Anabara”, Yakutsk, Russian Federation

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Корреспондент имеет право и полномочия выступать от имени всех авторов по этому исследованию.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest. The corresponding author has the right and authority to speak on behalf of all authors in this study

Вклад авторов

Биллер А.Я. – концепция исследования, проведение исследований, обработка материала, литературный обзор, выводы

Ощепкова М.Г. – проведение исследований, обработка материала, графическое оформление

Олейников О.Б. – концепция исследования, выводы

Опарин Н.А. – сбор данных, статистическая обработка

Зарукин А.П. – сбор данных

Authors contribution

Anastasia Ya. Biller – research concept, research implementation, data processing, literature review, conclusions

Mariya G. Oshchepkova – research implementation, data processing, graphic design

Oleg B. Oleinikov – research concept, conclusions

Nikolay A. Oparin – data collection, statistical analysis

Alexey P. Zarukin – data collection

Поступила в редакцию / Submitted 21.11.2025

Поступила после рецензирования / Revised 15.12.2025

Принята к публикации / Accepted 24.12.2025