Природные ресурсы Арктики и Субарктики / Arctic and Subarctic Natural Resources. 2022;27(4):499-513

УДК 552.325(551.24) 550.384; 551.215 https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-499-513

Высокотитанистые долериты как новый критерий поисков кимберлитов

М. Д. Томшин, С. С. Гоголева

Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация ¹²⁷gogoleva ss@mail.ru

Аннотация

Проведенное обобщение данных по химическому составу долеритов Вилюйско-Мархинского дайкового пояса (Вилюйский палеорифт) позволило выделить среди них геохимически аномальные участки по содержанию титана. Установлено, что в долеритах даек, ассоциирующих с кимберлитовыми трубками, в два раза увеличивается количество TiO₂ и ряда высокозарядных и редкоземельных элементов (Th, Ta, Hf, Y, Nb, REE.). Оказалось, что подобное поведение элементов наблюдается и в долеритах даек, находящихся вблизи кимберлитов Куойкского поля (Молодинский дайковый пояс, Оленекский палеорифт). Делается вывод о парагенетической связи между увеличением содержания титана и редкоземельных элементов в долеритах и кимберлитами. Предполагается, что протокимберлиты опосредованно оказывали влияние на толеитовый расплав в момент его выплавления, что приводило к локальному обогашению толеитового расплава тугоплавкими компонентами. Слабо проявленные процессы геохимического выравнивания между высокотитанистыми и обычными базитами обеспечили локальность распространения первых. Внедрившиеся вслед за базитами кимберлиты располагались вблизи даек высокотитанистых долеритов, которые можно использовать как один из поисковых критериев на кимберлиты. Учитывая сказанное, в пределах Вилюйско-Мархинского дайкового пояса выделено два новых участка: Тенкеляхский и Кюлянкинский, перпективные на открытие в их пределах новых кимберлитов. Ключевые слова: Сибирская платформа, долериты, дайковый пояс высокотитанистые базиты, кимберлиты Финансирование. Работа выполнена в рамках плана НИР ИГАБМ СО РАН и проекта РНФ (региональный конкурс) № 22-27-20151.

Для цитирования: Томшин М.Д., Гоголева С.С. Высокотитанистые долериты как новый критерий поисков кимберлитов. Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2022;27(4):499–513. https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-499-513

High-titanium dolerites as a new criterion for the kimberlite prospecting

M. D. Tomshin, S. S. Gogoleva[⊠]

Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation ⊠gogoleva ss@mail.ru

Abstract

The generalization of data on the chemical composition of dolerites of the Vilyui-Markha dike swarm (Vilyui paleorift) made it possible to identify geochemically anomalous areas among them. We found that the amount of TiO_2 and a number of highly charged and rare earth elements (Th, Ta, Hf, Y, Nb, REE) practically doubled in the dolerites of dikes located near kimberlite pipes. Moreover, a similar behavior of elements was observed in the dolerites of dikes located near the kimberlites of the Kuoyk field (Molodo dike swarm, Olenek paleorift). Therefore, we conclude that there is a paragenetic relationship between the increase in the content of titanium and rare earth elements in dolerites and kimberlites. We assume that protokimberlites indirectly influenced the tholeiite melt at the time of its melting, which led to local enrichment of the tholeiite melt with refractory components. Weakly manifested processes of geochemical alignment between high-Ti and ordinary basites ensured the locality of the distribution of the former. The kimberlites that penetrated after the basites were located near the dikes of high-titanite dolerites. Thus, the high-Ti dolerites of the discovery of kimberlites here. We also assume that protokimberlites indirectly influenced the tholeiite melt at the time of its melting, which led to local enlocated within the Vilyui-Markha dike swarm: Tenkelyakh and Kyulyanke, with prospective for the discovery of kimberlites here. We also assume that protokimberlites indirectly influenced the tholeiite melt at the time of its melting, which led to local enrichment of the tholeiite melt in refractory components. Weakly manifested processes of geochemical alignment between high-Ti and ordinary mafic rocks ensured the local distribution of the former. The kimberlites indirectly influenced the tholeiite melt at the time of its melting, which led to local enrichment of the tholeiite melt in refractory components. Weakly manifested processes of geochemical alignment between high-Ti and ordinary mafic r

М. Д. Томшин, С. С. Гоголева • Высокотитанистые долериты как новый критерий поисков кимберлитов

truded after the basites were located near the dikes of high-Ti dolerites. Thus, high-Ti dolerites of dike belts can be used as one of the search criteria for kimberlites. Finaly two new sites have been identified within the Vilyui-Markhin dike belt: Tenkelyakhsky and Kyulyankinsky, both promising for the discovery of kimberlites here.

Keywords: Siberian platform, dolerites, dike swarm, high-Ti basites, kimberlites

Funding. This study was carried out within the framework of the State Assignment to the DPMGI SB RAS and the RNF project (regional competition) № 22-27-20151.

For citation: Gogoleva S.S., Tomshin M.D. High-titanium dolerites as a new criterion for the kimberlite prospecting. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(4):499–513. (In Russ.); https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-499-513

Введение

Вилюйско-Мархинский дайковый пояс (ВМДП) расположен на северо-западном крыле Вилюйского палеорифта и протянулся в северо-восточном направлении более чем на 700 км от верховьев р. Б. Ботуобия на юге в междуречье Тюнг–Муна (на северо-востоке) (рис. 1). Основными магматическими образованиями пояса являются дайки долеритов. Менее распространены силлы, хонолиты и эруптивные аппараты базитового состава. Кроме долеритов в пределах пояса установлены кимберлиты, формирующие три кимберлитовых поля: Мало-Ботуобинское, Накынское и Сюльдюкарское (см. рис. 1). Формирование пояса проходило одновременно со становлением Вилюйской палеорифтовой струк-





Fig. 1. The scheme of the structure of the Vilyui paleorift according to [3].

I - rift valley formed by terrigenous deposits up to 6 km thick; 2 - areas of the largest uplifts; <math>3 - dike belts; 4 - fronts of Phanero $zoic orogenic belts; <math>5 - kimberlite fields: a - open (I - Malo-Botuobin, II - Nakyn, III - Syuldyukar): <math>\delta$ - assumed (IV - Tenkelyakh V - Kulenke); δ - age, million years (red - kimberlites, black - basites).

		CĎ	дние хим	ические с	OCTABЫ (N	iac. %) 0a	зитов Би.	пюиско-м	lархинско	го даико	30го пояса	_	-	Lable 1
		r	Average cl	hemical co	mposition	s (wt. %) 0	of the basi	tes of the V	Vilyui-Ma	rkha dyke	swarm			
Компонент	МИР-12	OE-130	OE-233	OБ-288	OB-251	38/43	OE-242	50/49-17	OE-501	OB-510	OE-528	OB-566	OB-569	OB-571
SiO_2	48,16	48,80	48,26	48,71	48,60	47,13	47,49	49,03	48,31	48,76	48,40	47,77	48,37	47,42
TiO ₂	2,32	3,20	2,32	2,81	2,33	3,55	3,78	2,93	2,62	2,94	3,06	3,62	3,16	3,37
Al ₂ O ₃	13,73	13,46	13,96	13,85	14,50	13,77	13,03	14,33	13,13	12,32	13,89	13,7	14,62	14,15
Fe ₂ O ₃	3,97	6,05	2,59	2,57	4,88	6,21	4,85	4,09	3,10	6,32	3,22	6,35	4,4	5,14
FeO	8,29	8,94	11,50	10,39	8,20	8,91	10,59	8,56	11,69	9,44	9,80	8,28	9,48	8,84
MnO	0,16	0, 19	0,20	0,23	0,16	0,20	0,12	0,17	0,18	0,15	0,22	0,18	0,18	0,21
MgO	6,88	5,01	5,88	5,97	5,65	6,03	5,57	5,64	6,46	5,58	6,25	4,36	4,61	5,45
CaO	9,95	8,95	10,00	10,16	9,59	8,63	9,02	9,37	10,21	9,23	9,21	9,49	9,12	9,05
Na ₂ O	2,69	2,09	2,21	2,46	2,49	2,06	2,09	2,73	2,24	2,66	2,61	2,39	2,16	2,39
K ₂ 0	0,86	1,27	1,04	0,98	1,32	1,67	1,49	1,62	76,0	1,15	1,33	1,22	1,15	1,26
P_2O_5	0,27	0,60	0,31	0,33	0,29	0,35	0,52	0,33	0,29	0,41	0,35	0,4	0,34	0,42
H_2O	2,63	1,32	1,21	1,07	0,73	1,23	1,73	1,35	1,59	1,34	2,10	1,36	1,56	1,44
Сумма	100,00	99,89	99,58	99,53	100,0	99,73	100,2	100,1	100,4	100,3	100,5	99,12	99,15	99,16
Mg#	50	38	43	46	44	43	40	45	44	40	47	36	38	42
u	1	8	5	6	22	6	10	4	23	9	27	5	5	12
					TOTOM TO									
лаборатории	физико-хи	и далее в . Мических	методов а	таолицах) инализа (И	. Unpedem FABM CO	сние поро, РАН); Mg	цоооразун ;#=Mg ²⁺ ×1	.00/(Mg ²⁺ +	ентов про -0,85×Fe ²⁺	(n - ko)	классичес чество ана	ким метод лизов.	ом мокров	і химии в
<i>Note</i> (here ology of Dian	and further nond and Pr	r in similar recious Me	r tables). N stals Institu	lajor oxides ite, Siberiai	s were anal 1 Branch, H	yzed by we Russian Ac	et chemica ademy of 3	l technique Sciences);	e at the Lab Mg#=Mg ²⁻	oratory of ⁺×100/(Mg	Physicoche ^{2++0.85×Fe}	emical Ana 2^{2+} ; <i>n</i> , the	lytical Met number of	hods (Ge- analyses.

M. D. Tomshin, S. S. Gogoleva • High-titanium dolerites as a new criterion for the kimberlite prospecting

Таблица 1

Arctic and Subarctic Natural Resources. 2022;27(4):499-513

туры [1–3] в верхнедевонское время и, согласно изотопным данным, полученным К–Аг-, ⁴⁰Аг/³⁹Аг-, Rb–Sr-, Sm/Nd-методами, укладывается в интервалы 368,5–376,3 млн лет [3–7]. Преобладают значения от 373,7 до 376,3 млн лет. Подробная характеристика долеритов пояса дана в [3–5]. В сложении интрузивов наиболее распространены призматически-офитовые габбро-долериты. По петрохимическим показателям (табл. 1) базиты пояса, как и в целом Вилюйского палеорифта, согласно [8], относятся к породам толеитовой серии (рис. 2, *a*). На диаграммах SiO₂ – Na₂O + K₂O (содержание SiO₂ = 47,34–49,20 мас. %, суммы щелочей Na₂O + K₂O = 3,07–4,92 мас. %, при отношении Na₂O/K₂O > 1) фигуративные точки частных анализов долеритов ВМДП почти поровну разделены на толеитовые и субщелочные разности пород [4]. Долериты характеризуются относительно высоким содержанием TiO₂ (2,48– 2,60 мас. %), K₂O (0,91–2,69 мас. %) и P₂O₅



Рис. 2. Классификационные и дискриминационные диаграммы для долеритов Вилюйского палеорифта. *a* – (Na₂O+K₂O)–FeO^{*}–MgO [8]; *б* — Zr – Ti – Y [9] (А – толеиты островных дуг, В – базальты срединно-океанических хребтов, С – известково-щелочные базальты, D – внутриплитные базальты); *в* – Zr/Y – Zr [10] (А – островодужные базальты, В – базальты срединноокеанических хребтов (MORB), С – внутриплитные базальты, D – островодужные базальты и MORB, Е – внутриплитные базальты и MORB).

Fig. 3. Classification and discrimination diagrams for dolerites of the Vilyui paleorift.

 $a - (Na_2O+K_2O)-FeO^*-MgO$ [8]; $\delta - Zr - Ti - Y$ [9] (A – tholeites of island arcs, B – basalts of mid-oceanic ridges, C – calc-alkaline basalts, D – within-plate basalts); $\epsilon - Zr/Y - Zr$ [10] (A – island–arc basalts, B – basalts of Mid–Oceanic ridges (MORB), C – within-plate basalts, D – island-arc basalts and MORB, E – within-plate and MORB). (0,29–0,41 мас. %), чем они уверенно отличаются от пермо-триасовых траппов [4, 9]. Поведение редких и рассеянных элементов рассмотрено в работе [3]. Здесь же в табл. 2 приведены значения представительных проб. Согласно дискриминационным диаграммам Дж. Пирса [10, 11], по соотношению Zr–Ti–Y и Zr/Y–Zr долериты Вилюйского рифта располагаются в поле внутриплитных базальтов (рис. 2, *б*, *в*).

Петрохимическая характеристика даек долеритов, расположенных вблизи кимберлитов

Изучение долеритов даек, расположенных вблизи кимберлитов Накынского поля, показало в них резкое (двукратное) увеличение содержания титана [14]. Более детальным анализом химического состава этих пород установлено, что вместе с титаном увеличивается количество Th, Ta, Hf, Y, Nd (HREE). Однако это увеличение происходит постепенно. За пределами кимберлитового поля в интрузиве Цепочечный и в дайке на р. Марха (рис. 3) содержание ТіО₂ равно 2,33 и 2,23 мас. %, соответствуя его нормальному содержанию для долеритов ВМДП (см. табл. 3). Внутри поля по его периферии примерно в 10 км от кимберлитов трубки Нюрбинская в интрузиве Линдакит доля TiO₂ – 2,83 мас. %. В дайках 38/43 и Усть-Ханьинская, расположенных в 3-4 км от той же трубки, -3,14 и 3,66 мас. %, а в дайках, находящихся в непосредственной близости от трубки (на расстоянии 500-700 м от нее), уже достигает 4,45-4,65 мас. %.

Петрографические и минералогические характеристики долеритов остаются прежними. Подчеркнем лишь незначительное количественное увеличение титаномагнетита. Его доля может достигать 4-5 об. %, тогда как обычно в призматически-офитовых долеритах ВМПД она близка 2,5-3,5 об. %. Доминирует здесь титатомагнетит игольчатой и скелетной форм кристаллизации. В околотрубочных долеритах появляются зерна сфена и призмы апатита [14]. Анализ химического состава долеритов, расположенных в контурах Мало-Ботуобинского и Сюльдюкарского кимберлитовых полей, показал тот же результат. В районе Мало-Ботуобинского поля за его пределами содержание TiO₂ в долеритах дайки, выполняющей разлом Восточный, - 2,32-3,06 мас. % (табл. 4, рис. 4). В дайке Центрального разлома за пределами контуров поля – 3,12 мас. %, а на ее южном окончании (примерно в 1 км от кимберлитов тр. Мир) – 3,26 мас. %. В этой же дайке, контактирующей с кимберлитовым телом, доля TiO_2 в долеритах колеблется от 3,88 мас. % до 4,17.

На Сюльдюкарской площади в долеритах даек, вскрытых скважинами 212.5, 218/184 и 218/189 (район р. Ыгыатта), доля ТіО₂ составляет от 2,01 до 2,36 мас. % – типичная для долеритов ВМДП (рис. 5, табл. 5). Южнее, в Эркютейской дайке (125Д) и в дайке, вскрытой скважиной М360, количество TiO₂ увеличивается до 3,65 и 3,49 мас. % соответственно; еще южнее, в долеритах, вскрытых скважиной 1/7, оно увеличивается до 4,43 мас. %. Юго-восточнее скв. 1/7 в 10 и 12 км от нее располагаются дайки 1/17 и Холомолохская, в которых содержание TiO₂ вновь уменьшается до рядовых значений (в первой – 2,70 и во второй – 2,31 мас. %). То есть первая и последняя группа даек находятся за пределами предполагаемого кимберлитового поля, вне зоны влияния кимберлитов. Западнее, в 12 км от дайки 1/7 в 2017 г. была открыта трубка Сюльдюкарская, в кимберлите которой был поднят ксенолит долерита с содержанием TiO₂ 6,03 мас. %.

Близкая картина в поведении выше названных элементов была отмечена и для долеритовых даек Молодинского пояса, располагающегося по южному борту Оленекского палеорифта [15]. В долеритах даек, находящихся вблизи кимберлитов Куойкского поля (рис. 7), содержание TiO₂ колеблется от 3,82 до 5,08 мас. %, а за пределами контуров поля опускается до рядовых значений – 2,25–2,47 мас. % (табл. 6).

Таким образом, видно закономерное изменение химического состава долеритов, прежде всего в поведении Ti, Th, Ta, Hf, Y, Nd в дайках, располагающихся на территориях кимберлитовых полей независимо от места положения дайковых поясов. Такое изменение возможно лишь на магматической стадии эволюции базальтового расплава. Возраст кимберлитов Накынского и Мало-Ботуобинского полей 363–364 млн лет [16]. Они возникли после становления даек ВМДП (368,5–374,4 млн лет [3, 7, 14] и не могли оказывать влияние на базиты, тем более в отсутствие прямого контакта между собой.

Обсуждение

А.И. Зайцевым по результатам изучения Rb– Sr изотопных систем кимберлитов Якутии на примере месторождений Мир, Таежное, Ботуобинское, Удачная, Айхал и др. высказывалось

Таблица 2

Содержание петрогенных (мас. %) и редких (г/т) элементов в представительных пробах базитов Вилюйского рифта

Table 2

Компонент	МИР12-4	130/Д-1	T-68-60	ОБ-233-1	ОБ-802-7	38/43-91	ОБ-566-1	ОБ-534-4
SiO ₂	47,56	48,59	49,2	48,13	47,39	48,23	47,96	48,84
TiO ₂	3,26	3,57	2,48	2,53	4,01	2,6	3,51	3,11
Al ₂ O ₃	12,87	13,08	15,38	14,24	12,88	14,46	14,08	13,05
Fe ₂ O ₃	6,64	4,92	3,43	2,79	6,92	2,94	5,97	3,38
FeO	6,75	10,08	9,42	10,25	9,63	9,82	8,46	12,44
MnO	0,2	0,2	0,17	0,19	0,23	0,2	0,12	0,25
MgO	5,5	5,18	5,04	5,57	5,36	5,12	3,87	4,97
CaO	10,14	8,33	9,53	10,05	9,7	9,04	10,18	9,05
Na ₂ O	3,04	1,96	2,94	1,85	2,21	2,79	2,21	2,13
K ₂ O	1,86	1,37	1,32	2,69	0,91	0,99	1,15	1,15
P ₂ O ₅	0,34	0,41	0,29	0,31	0,4	0,41	0,4	0,32
H ₂ O+	1,19	1,8	0,76	0,79	0,78	2,61	1,29	1,66
Сумма	99,95	99,58	99,96	99,56	100,5	99,21	99,37	100,3
Ni	52,8	52	112	104	57	72	74	69
Со	39	44	44	40	52	39	48	48
Cr	97	89	88	100	76	44	74	54
V	307	375	321	375	434	234	306	346
Sc	26	34	31	34	37	28	35	37
Cs	0,28	—	—	-	0,39	—	0,38	0,58
Rb	26,5	36,1	23,5	29,4	19,5	25,4	23,2	28,8
Ba	312	307	259	272	202	295	305	304
Th	3,75	3,71	2,31	2,44	3,56	3,17	3,58	3,13
U	1,11	1,06	0,67	0,73	0,77	0,91	0,9	0,75
Nb	38,7	38,7	24,9	26,7	33,2	37,0	19,0	19,6
Та	2,87	2,48	1,64	1,77	2,85	2,41	1,47	1,65
Sr	530	401	369	864	354	503	344	394
Zr	268	370	200	235	313	266	282	243
Hf	6,40	7,77	4,75	5,76	7,25	6,7	6,73	5,44
Y	32	39	30	35	46	36	45	41
Pb	25,4	—	5,2	2,9	3,0	5,1	7,6	3,0
La	36,4	34	22,5	22,6	28,3	30,2	25,9	25,4
Ce	82,2	78,2	51,5	52,5	62,9	70,0	62,7	56,4
Pr	10,2	9,88	6,71	7,05	8,35	9,19	8,17	7,09
Nd	44,2	42,4	28,6	31,5	39,6	39,8	38,2	34,4
Sm	9,24	9,14	6,48	7,35	9,74	8,86	9,03	8,11
Eu	3,03	2,93	2,04	2,23	3,06	2,95	2,67	2,63
Cd	8,59	8,83	6,35	7,36	9,86	8,55	8,74	7,51

The content of petrogenic (wt.%) and rare (ppm) elements in representative basite samples from the Vilyui rift

M. D. Tomshin, S. S. Gogoleva • High-titanium dolerites as a new criterion for the kimberlite prospecting

Компонент	МИР12-4	130/Д-1	T-68-60	ОБ-233-1	ОБ-802-7	38/43-91	ОБ-566-1	ОБ-534-4
Tb	1,19	1,36	0,98	1,18	1,5	1,3	1,37	1,12
Dy	7,03	7,89	5,88	7,01	8,21	7,49	7,64	6,5
Но	1,28	1,55	1,2	1,43	1,64	1,49	1,53	1,34
Er	3,59	4,1	3,1	3,71	4,36	3,66	4,23	3,72
Tm	0,44	0,59	0,46	0,56	0,66	0,52	0,67	0,57
Yb	2,79	3,6	2,82	3,47	3,74	3,2	4,04	3,59
Lu	0,38	0,52	0,41	0,49	0,53	0,45	0,51	0,49
∑REE	210,6	205,0	139,0	148,4	182,5	187,7	175,5	158,9
(La/Yb)n	9,36	6,77	5,71	4,67	5,43	6,77	4,60	5,08
Eu/Eu*	1,04	1,00	0,97	0,93	0,95	1,04	0,92	1,03
Nb/Nb*	1,20	1,25	1,25	1,30	1,20	1,37	0,72	0,79

Окончание таблицы 2

Примечание. Редкие элементы анализировались методом (ICP-MS) на приборе Elan 6100 DRC (ИМГРЭ, Д.З. Журавлев), анализы 1–3,13–17 на приборе ЭЛЕМЕНТ-II (ЦКП ИЗК СО РАН, С.В.Пантелеева), анализ 12 из [12]. Nb/Nb* = 0,3618×Nb/√(La·Th), Eu/Eu* = Eun/(Smn×Gdn) 0,5, *n* – значения нормированы по составу хондрита [13].

Note. Trace elements were analyzed by ICP-MS with an Elan 6100 DRC (Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Element, D.Z. Zhuravlev), analyses 1–3,13–17 were performed with an ELEMENT-II (Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, S.V. Panteleeva), analysis 12 is from [12]. Nb/Nb* = $0.3618 \times Nb/\sqrt{(La \times Th)}$, Eu/Eu* = Eun/(Smn × Gdn)0.5; *n*, values normalized to chondrite composition [13].

Таблица 3

Средний химический состав долеритов даек Накынского кимберлитового поля (мас. %)

Table 3

Компонент	ОБ-247	Цепочечный	Линдакит	Усть-Ханьинский интрузив	38/43-30, 38/43-91	Дайки долер кимберлито	оитов вблизи вых трубок
SiO ₂	47,68	48,40	46,59	47,33	47,19	47,48	46,28
TiO ₂	2,23	2,33	2,83	3,66	3,14	4,65	4,45
Al ₂ O ₃	13,35	14,16	12,45	13,18	13,12	13,91	12,69
Fe ₂ O ₃	3,83	2,56	5,52	4,74	3,03	3,47	4,05
FeO	7,54	11,26	10,18	10,63	11,44	9,66	10,68
MnO	0,31	0,20	0,17	0,12	0,20	0,15	0,16
MgO	6,92	5,61	6,66	5,46	6,01	6,02	4,95
CaO	11,67	9,81	9,34	9,04	8,08	8,83	7,40
Na ₂ O	2,72	2,31	2,18	2,11	2,46	2,87	1,96
K ₂ O	1,25	1,10	1,69	1,46	1,28	1,88	4,20
P ₂ O ₅	0,11	0,28	0,62	0,49	0,38	0,50	0,71
H ₂ O+	1,94	1,36	0,93	1,72	3,16	1,96	1,24
CO ₂	_	0,13	_	0,12	0,33	_	0,41
S	0,04	_	0,10	0,04	-	0,12	0,04
F	0,07	—	0,22	0,06	_	0,08	0,24
Сумма	99,66	99,51	99,50	100,16	99,61	101,59	99,43
n	6	8	4	12	5	3	3

М. Д. Томшин, С. С. Гоголева • Высокотитанистые долериты как новый критерий поисков кимберлитов



Рис. 3. Схематическая карта Накынского кимберлитового поля.

I – неоген-четвертичные отложения; 2 – отложения юры; 3 – туфогенно-осадочные образования триаса; 4 – терригенные образования перми; 5 – карбонатные породы ордовика; 6 – нерасчлененные карбонатные породы кембрия и нижнего ордовика; 7 – пермо-триасовые траппы; 8 – среднепалеозойские дайки долеритов; 9 – условные контуры кимберлитовых полей; 10 – кимберлитовые трубки; 11 – содержание TiO₂ в долеритах.

Fig. 3. Schematic map of the Nakyn kimberlite field.

I – Neogene-Quaternary deposits; 2 – Jurassic deposits; 3 – Tuff-sedimentary formations of the Triassic; 4 – terrigenous formations of Permian; 5 – Ordovician carbonate rocks; 6 – undifferentiated carbonate rocks of the Cambrian and Lower Ordovician; 7 – Permo-Triassic traps; 8 – Middle Paleozoic dolerite dikes; 9 – conditional contours of kimberlite fields; 10 – kimberlite pipes; 11 – TiO₂ content in dolerites.

предположение [17], что изохроны с возрастом 420 млн лет могут отвечать событиям, связанным с зарождением протокимберлитов, тогда как становление собственно кимберлитов происходило позже в позднем девоне–раннем карбоне. В [18, 19] продолжительность кимберлитообразования связывается с длительностью карбонатитового метасоматоза деплетированных перидотитов основания литосферы и их вторичным обогащением. Учитывая сказанное, логично предположить, что кимберлитообразование могло опосредованно оказывать влияние на формирующиеся под Вилюйским палеорифтом базиты. Экспериментальными работами А.Я. Медведева [20] показано, что содержание титана в базальтовом расплаве возрастает с резким повышением давления.

Le Zhang с коллегами, проводя модельные исследование с базальтами Emeishain, показали, что базальтовые магмы с более высокими содержаниями титана и HREE могут появляться в результате частичного плавления мантийного источника типа PM в поле устойчивости граната при более высоких давлениях, чем в случае выплавлений обычных толеитов [21].

В связи со сказанным предполагается следующее. На момент образования астеносферной базальтовой линзы, связанной с формированием Вилюйского палеорифта, протолит вторично обогащенных перидотитов, согласно [19], уже существовал. Над всплывающим диапиром протокимберлитов (см. рис. 6) формировалась зона повышенных давлений и температур, локальному воздействию которых был подвергнут выплавляющийся базальтовый расплав. Последнее способствовало поступлению в расплав более тугоплавкого компонента. Поэтому при образовании базальтов Вилюйского палеорифта возникали (локально) условия (более высокие температура и давление) для формирования высокотитанистого, обогащенного HREE толеитового расплава. Выравнивание геохимического состава между высокотитанистыми базитами и остальным расплавом было незначительным. В дальнейшем оба расплава, внедряясь в верхние горизонты земной коры, формировали дайки ВМДП, в том числе и локально, дайки высокотитанистых долеритов. Впоследствии уже по подготовленным базитами каналам поступали кимберлиты, располагаясь в поле даек долеритов с высоким содержанием титана и HREE. Таким образом, высокотитанистые долериты дайковых поясов можно использовать как один из поисковых критериев на кимберлиты.

В этой связи было просмотрено более 300 имеющихся в нашем распоряжении химических анализов долеритов ВМДП (от северного до южного его окончания). В результате в пределах ВМДП было выявлено еще два перспективных на открытие кимберлитов участка (табл. 7): один – Тенкеляхский, расположен в 20–30 км се-

Таблица 4

Химический состав долеритов даек Мало-Ботуобинского кимберлитового поля (мас. %)

Table 4

Компонент	MR-12	M-3	Mir-12-6	Mir-12-4	8
SiO ₂	48,16	48,14	46,86	47,56	46,39
TiO ₂	2,32	3,06	3,12	3,26	3,88
Al ₂ O ₃	13,73	13,62	12,64	12,87	14,17
Fe ₂ O ₃	3,97	1,77	7,15	6,64	3,98
FeO	8,29	11,45	7,07	6,75	9,50
MnO	0,16	0,2	0,21	0,20	0,22
MgO	6,88	6,97	5,52	5,1	5,24
CaO	9,95	8,85	9,63	10,14	9,43
Na ₂ O	2,69	1,44	3,27	3,04	2,62
K ₂ O	0,86	2,51	1,58	1,86	1,07
P ₂ O ₅	0,27	0,43	0,33	0,34	0,27
H_2O^+	0,41	0,70	1,76	1,19	0,45
ррр	2,09	0,06	_	0,74	2,33
CO ₂	0,23	—	—	0	0,22
Сумма	100,00	99,69	99,54	99,66	99,76

Chemical composition of dolerite dikes of the Malo-Botuobin kimberlite field (wt. %)

Примечание. MR-2 и M-3 – дайки разлома «Восточный», Мир-12-4 и Мир-12-6 дайки разлома «Центральный»; 8 – дайка, вблизи тр. Мир.

Note. MR-2 and M-3 are dikes of the «Vostochny» fault, Mir-12-4 and Mir-12-6 dikes of the «Central» fault; 8 – dike, near the Mir pipe.

вернее Накынского кимберлитового поля, а второй – Кюлянкинский, на севере ВМДП в устьевой части р. Орто-Кюлянке (рис. 8) в 100 км западнее с. Жиганск. Если для кимберлитов Тенкеляхской площади их алмазоносность на сегодня не определена, то в районе р. Орто-Кюлянке кимберлиты должны быть алмазоносными, поскольку в русловых отложениях р. Кюленке ниже устья р. Орто-Кюленке по данным геологов Амакинской экспедиции, известны алмазы.

В это связи представляют практический интерес долериты Чаро-Синского дайкового пояса (см. рис. 1), поскольку среди них нами выявлены участки с дайками долеритов, в которых содержание окиси титана достигает 4,0–4,5 мас. % при обычных для долеритов пояса значениях, равных 2,3–2,5 мас. %. Таким образом, предлагаемый нами метод можно уверенно использовать как один из поисковых критериев на кимберлиты.

Основные выводы

1. Установлено, что в пределах Вилюйско-Мархинского дайкового пояса присутствуют



Рис. 4. Схематическая карта Мало-Ботуобинского кимберлитового поля. Усл. обозн. см. рис. 3.

Fig. 4. Schematic map of the Malo-Botuobin kimberlite field. Symbols: See Fig. 3.

М. Д. Томшин, С. С. Гоголева • Высокотитанистые долериты как новый критерий поисков кимберлитов

Таблица 5

Средний химический состав долеритов даек в районе Сюльдюкарского кимберлитового поля, мас. %

Table 5

Average chemical composition of dolerite dikes in the area of the Syuldyukar kimberlite field, wt. %

Компонент	218/189	218/184	212,5	125/D-5	M360	1/7	1/17	16/22
SiO ₂	47,32	48,55	46,74	48,62	47,19	46,57	48,48	48,77
TiO ₂	2,36	2,01	2,02	3,49	3,65	4,43	2,70	6,03
Al ₂ O ₃	14,31	14,49	14,73	13,29	14,11	14,72	14,42	18,18
Fe ₂ O ₃	6,07	1,96	6,75	5,51	6,01	3,62	3,71	5,47
FeO	8,49	13,99	5,22	9,45	7,48	8,84	10,21	5,97
MnO	0,04	0,08	0,16	0,19	0,16	0,14	0,18	0,06
MgO	6,03	6,54	8,89	5,07	6,97	6,69	6,04	4,48
CaO	7,96	7,83	8,08	9,03	8,62	7,62	7,39	0,77
Na ₂ O	2,04	2,29	2,17	2,07	2,36	2,25	1,98	0,56
K ₂ O	1,67	1,11	1,53	1,27	1,06	2,46	3,37	3,22
P ₂ O ₅	0,32	0,23	0,24	0,65	0,37		-	0,59
H_2O^+	1,83	1,41	1,47	1,39	0,67	-	-	4,19
CO ₂	0,83	0,97	1,33	0,00	1,61	0,00	0,00	1,92
S _{общ}	0,09	0,28	0,25	0,06	0,13	-	-	0,11
F	0	0	0	0,08	0	-	-	0
Total	99,36	101,74	99,58	100,17	100,39	97,34	98,48	100,32
Mg#	28	50	63	38	24	48	44	42
n	2	2	2	7	1	6	6	1

Таблица б

Средний химический состав долеритов Куойкского поля, мас. %

Table 6

Компонент	175	193	54	43	45	46	56	68	69	Молодинское
	175	175	54	-15	-15	-10	50	00	07	поле
SiO ₂	46,81	48,39	47,75	49,62	48,24	48,21	50,16	48,14	48,51	48,61
TiO ₂	3,82	5,08	4,59	4,11	4,44	4,68	2,25	30,1	2,47	2,51
Al ₂ O ₃	12,85	12,46	12,11	11,34	10,78	11,48	14,83	13,54	13,52	13,29
Fe ₂ O ₃	6,53	5,88	4,44	6,62	5,51	4,30	3,80	5,05	4,40	5,10
FeO	9,75	9,82	11,84	10,02	11,64	12,44	9,42	10,25	9,94	8,63
MnO	0,18	0,18	0,19	0,13	0,18	0,18	0,18	0,22	0,21	0,16
MgO	5,68	4,65	4,70	4,30	4,55	5,02	5,17	5,21	5,59	5,50
CaO	9,77	8,61	8,64	7,88	7,71	7,39	9,45	9,39	10,24	9,30
Na ₂ O	2,11	2,39	2,21	2,55	2,19	2,38	2,34	2,48	2,45	2,62
K ₂ O	0,68	1,11	1,14	1,20	2,38	1,33	0,92	1,11	1,01	1,50
P ₂ O ₅	0,32	0,73	0,88	0,95	0,66	0,66	0,29	2,33	0,29	0,44
H ₂ O	1,56	0,65	1,75	1,18	1,34	1,43	1,36	2,08	1,85	1,90
Ррр	0,07	0,10	_	0,18	0,10	0,11	—	_	_	0,56
Сумма	100,15	100,06	100,24	100,15	99,76	99,61	100,17	100,66	100,48	100,12
N	3	1	9	3	2	2	5	5	3	35

Average chemical composition of dolerites of the Kuoik field, wt. %



M. D. Tomshin, S. S. Gogoleva • *High-titanium dolerites as a new criterion for the kimberlite prospecting*

Рис. 5. Схематическая карта Сюльдюкарского кимберлитового поля. Усл. обозн. см. рис. 3. Fig. 5. Schematic map of the Syuldukar kimberlite field. Symbols: See Fig. 3.



Рис. 6. Схема «большого мантийного клина» и плавления стагнирующего или простого слэба (*a*); модель образования и подъема карбонатитового диапира, включающая несколько этапов (б) (рисунок взят из работы [19]).

Fig. 6. The scheme of the «large mantle wedge» and melting of a stagnant or simple slab (*a*); a model of the formation and rise of a carbonatite diapir, including several stages (δ) (the figure is taken from [19]).



М. Д. Томшин, С. С. Гоголева • Высокотитанистые долериты как новый критерий поисков кимберлитов

Рис. 7. Схематическая карта Куойкского кимберлитового поля. Усл. обозн. см. рис. 3. Fig. 7. Schematic map of the Kuoyk kimberlite field. Symbols: See Fig. 3.





участки с аномально высокими содержаниями в базитах титана и ряда высокозарядных и редкоземельных элементов. Эти участки приурочены к кимберлитам.

2. Предполагается, что протокимберлиты, опосредованно воздействуя на выплавляющиеся базальты, способствуют переходу в расплав тугоплавкого реститового компонента и обогащению базальтов титаном и HREE.

3. Локальность данного процесса обусловлено незначительными (~1 км) размерами всплывающего протокимберлитового диапира и слабо проявленными процессами геохимического выравнивания между обычными и высокотитанистыми базитовыми расплавами.

4. Возможно использование полученного критерия высокотитанистости долеритов дайковых поясов как одного из поисковых критериев на кимберлиты.

\sim	
а	
Ц	
И	
Б	
<u>ں</u>	
3	

Средний химический состав долеритов в районе рек Тенкелях и Орто-Кюленке, мас.%

OF 803 OF 804		48,53 48,79	2,89 2,47	13,84 14,08	5,28 4,06	8,18 8,85	0,17 0,21	6,45 6,71	9,91 9,73	2,18 2,12	1,18 1,3	0,35 0,28	1,04 1,4	0,27 0,13				100,27 100,09	n = 7 $n = 9$
то-Кюленке	OB-801	48,15	4,88	14,64	3,70	9,13	0,18	6,02	5,95	2,6	2,13	0,56	2,05	0,31			I	100,30	<i>n</i> = 5
Op	OE-812	47,59	5,03	14,40	5,13	7,52	0,14	5,27	7,95	2,03	1,54	0,50	1,50	2,03	I	I	I	100,63	n = 6
	OE-810	48,00	4,66	13,83	5,50	8,10	0,18	5,58	5,52	3,06	2,21	0,54	2,04	0,69	I	I	I	100,01	u = 7
	OB-224	47,93	2,27	13,59	2,82	12,01	0,19	6,75	10,57	1,85	0,63	0,41	0,41	I	0,00	0,00	0,03	100,24	n = 3
	110/35	46,25	4,74	14,53	5,23	7,70	0,13	5,73	9,45	2,29	1,45	0,55	1,25	0,13	0,00	0,05	0,06	99,54	n = 2
	134/37	49,5	2,94	14,56	4,46	8,14	0,17	5,09	8,33	2,51	1,76	0,49	1,20	0,24	0,00	0,08	0,05	99,52	n = 3
слях	118/71	48,25	2,48	13,53	3,83	10,75	0,20	6,28	10,28	2,01	0,52	0,28	1,13	0,00	0,00	0,03	0,03	9,66	n = 1
Тенк	124/45	48,65	2,72	14,48	3,52	10,69	0,18	4,91	10,13	1,98	1,05	0,28	0,81	0,09	0,00	0,05	0,04	99,58	n = 3
	126/79	48,39	2,71	14,5	5,11	9,60	0,19	4,39	9,68	2,04	0,82	0,28	1,08	0,24	0,37	0,07	0,03	99,5	n = 5
	134/42	47,7	3,08	13,77	3,91	8,72	0,17	5,48	9,01	1,40	4,21	0,36	0,95	0,50	0,00	0,12	0,04	99,42	n = 2
	114.5/82	49,62	2,78	14,11	4,26	7,71	0,17	5,95	9,71	1,87	1,04	0,25	1,09	0,54	0,36	0,07	0,03	99,56	n = 3
Vontrouton	INUMITORICHI	SiO ₂	TiO ₂	AI ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K_2O	p_2o_5	H ₂ O+	ddd	CO ₂	S	F	Сумма	

M. D. Tomshin, S. S. Gogoleva • High-titanium dolerites as a new criterion for the kimberlite prospecting

М. Д. Томшин, С. С. Гоголева • Высокотитанистые долериты как новый критерий поисков кимберлитов

Список литературы/ References

1. Левашов К.К. Среднепалеозойская рифтовая система востока Сибирской платформы. Советская геология. 1975;10:49–58.

[Levashov K.K. Srednepaleozoyskaya riftovaya sistema vostoka Sibirskoy platformy. *Sovetskaya geologiya*. 1975;10:49–58. (In Russ.)]

2. Полянский О.П., Прокопьев А.В., Бабичев А.В., Коробейников С.Н., Ревердатто В.В. Рифтогенная природа формирования Вилюйского бассейна (Восточная Сибирь) на основе реконструкций осадконакопления и механико-математических моделей. *Геология и геофизика*. 2013;54(2):163–183.

[Polyanskiy O.P., Prokopev A.V., Babichev A.V., Korobeynikov S.N., Reverdatto V.V. The rift origin of the Vilyui basin (East Siberia), from reconstructions of sedimentation and mechanical mathematical modeling. *Geologiya i geofizika*. 2013;54(2):163–183. (In Russ.)]

3. Томшин М.Д., Копылова А.Г., Константинов К.М., Гоголева С.С. Базиты Вилюйского палеорифта. Геохимия и последовательность становления. *Геология и геофизика*. 2018;59(10):1503–1518.

[Tomshin M.D., Kopylova A.G., Konstantinov K.M., Gogoleva S.S. Basites of the Vilyui paleorift: geochemistry and sequence of intrusive events. *Geologiya i geofizika*. 2018;59(10):1503–1518. (In Russ.)]

4. Олейников Б.В., Саввинов В.Т., Погудина М.А. Основные типы трапповых интрузивов среднепалеозойской и верхнепалеозойской-нижнемезозойской трапповых формаций зоны сочленения Тунгусской и Вилюйской синеклиз. *Геология и геохимия базитов* восточной части Сибирской платформы. М.: Наука; 1973:4–75.

[Oleynikov B.V., Savvinov V.T., Pogudina M.A. Osnovnye tipy trappovykh intruzivov srednepaleozoyskoy i verkhnepaleozoyskoy-nizhnemezozoyskoy trappovykh formatsiy zony sochleneniya Tungusskoy i Vilyuyskoy sinekliz. *Geologiya i geokhimiya bazitov vostochnoy chasti Sibirskoy platformy*. Moskva: Nauka; 1973:4–75. (In Russ.)]

5. Масайтис В.Л., Михайлов М.В., Селивановская Т.В. Вулканизм и тектоника Патомско-Вилюйского авлакогена. М.: Наука; 1975. 174 с.

[Masaytis V.L., Mikhaylov M.V., Selivanovskaya T.V. Vulkanizm i tektonika Patomsko-Vilyuyskogo avlakogena. Moskva: Nauka; 1975. 174 p. (In Russ.)]

6. Courtillot V., Kravchinsky V.A., Quidelleur X., Renne P.R., Gladkochub D.P. Preliminary dating of the Viluy traps (Eastern Siberia): eruption at the time of Late Devonian extinction events. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2010; 300:239–245.

7. Киселев А.И., Ярмолюк В.В., Иванов А.В., Егоров К.Н. Пространственно-временные отношения среднепалеозойских базитов и алмазоносных кимберлитов на северо-западном плече Вилюйского рифта (Сибирский кратон). *Геология и геофизика*. 2014; 55(2):185–196. [Kiselev A.I., Yarmolyuk V.V., Ivanov A.V., Yegorov K.N. Middle paleozoic basaltic and kimberlitic magmatism in the northwestern shoulder of the Vilyui rift, Siberia: relations in space and time. *Geologiya i geofizika*. 2014;55(2):185–196. (In Russ.)]

8. Irvine T.N., Baragar W.R.A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canad. J. Earth Sci.* 1971;8:523–548.

9. Олейников Б.В. *Геохимия и рудогенез платформенных базитов*. Новосибирск; 1979. 264 с.

[Oleynikov B.V. *Geokhimiya i rudogenez platformennykh bazitov*. Novosibirsk; 1979. 264 p. (In Russ.)]

10. Pearce J.A., Cann J.R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1973;19:290–300.

11. Pearce J.A., Norry M.J. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks. *Contrib. Mineral. Petrol.* 1979;69:33–47.

12. Polyansky O.P., Prokopiev A.V., Koroleva O.V., Tomshin M.D., Reverdatto V.V., Selyatitsky A.Yu., Travin A.V., Vasiliev D.A. Time correlation between the formation of dike swarms and crustal extension stages in the Middle Paleozoic Vilyui rift basin (Siberian platform). *Lithos*. 2017;282-283:45–64. https://doi.org/10.1016/ j.lithos.2017.02.020

13. Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes / Eds. A.D. Saunders, M.J. Norry. *Magmatism in ocean basins. Geol. Soc. London Spec. Publ.* 1989;42:313–345.

14. Земнухов А.Л., Зайцев А.И., Копылова А.Г., Томшин М.Д., Яныгин Ю.Т. Базитовый магматизм Усть-Ханьинского междуречья (Якутия). Геология алмазов – Настоящее и будущее. Воронеж; 2005: 482–494.

[Zemnukhov A.L., Zaytsev A.I., Kopylova A.G., Tomshin M.D., Yanygin Yu.T. Bazitovyy magmatizm Ust-Khaninskogo mezhdurechya (Yakutiya). *Geologiya almazov – Nastoyashchee i budushchee*. Voronezh; 2005: 482–494. (In Russ.)]

15. Томшин М.Д., Киселев А.И., Копылова А.Г. Молодинский дайковый пояс среднепалеозойских долеритов на северо-востоке Сибирской платформы. *Вестник Ир. ГТУ*. 2010;2(42):24–30.

[Tomshin M.D., Kiselev A.I., Kopylova A.G. Molodinskiy daykovyy poyas srednepaleozoyskikh doleritov na severo-vostoke Sibirskoy platform. *Vestnik Ir. GTU*. 2010;2(42):24–30. (In Russ.)]

16. Агашев А.М., Похиленко Н.П., Толстов А.В., Поляничко В.В., Мальковец В.Г., Соболев Н.В. Новые данные о возрасте кимберлитов Якутской алмазоносной провинции. Докл. РАН. 2004;399(1): 95–99.

[Agashev A.M., Pokhilenko N.P., Tolstov A.V., Polyanichko V.V., Malkovets V.G., Sobolev N.V. Novye danny o vozraste kimberlitov Yakutskoy almazonosnoy provintsii. *Dokl. RAN*. 2004;399(1):95–99. (In Russ.)]

17. Зайцев А.И., Смелов А.П. Изотопная геохронология пород кимберлитовой формации Якутской провинции. Якутск: Офсет; 2010. 108 с. M. D. Tomshin, S. S. Gogoleva • High-titanium dolerites as a new criterion for the kimberlite prospecting

[Zaytsev A.I., Smelov A.P. *Izotopnaya geokhronologiya porod kimberlitovoy formatsii Yakutskoy provintsii.* Yakutsk; Ofset; 2010. 108 p. (In Russ.)]

18. Agashev A.M., Ionov D.A., Pokhilenko N.P., Golovin A.V., Cherepanova Y., Sharygin I.S. Metasomatism in lithospheric mantle roots: Constraints from whole-rock and mineral chemical composition of deformed peridotite xenoliths from kimberlite pipe Udachnaya. *Lithos.* 2013;160-161:201–215. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.11.014

19. Похиленко Н.П., Агашев А.М., Литасов К.Д., Похиленко Л.Н. Взаимоотношения карбонатитового метасоматоза деплетированных перидотитов литосферной мантии с алмазообразованием и карбонатиткимберлитовым магматизмом. *Геология и геофизика*. 2015; 56(1-2):361–383.

[Pokhilenko N.P., Agashev A.M., Litasov K.D., Pokhilenko L.N. Carbonatite metasomatism of peridotite lithospheric mantle: implications for diamond formation and carbonatite-kimberlite magmatism. *Geologiya i geofizika*. 2015;56(1-2):361–383 (In Russ.)]

20. Медведев А.Я., Альмухамедов А.И., Парадина Л.Ф. Растворимость титана в базальтовом расплаве (по экспериментальным данным). Докл. РАН. 1987; 293(5):1218–1220.

[Medvedev A.Ya., Almukhamedov A.I., Paradina L.F. Rastvorimost titana v bazaltovom rasplave (po eksperimentalnym dannym). *Dokl. RAN.* 1987; 293(5):1218–1220. (In Russ.)]

21. Le Zhang, Zhong-Yuan Rena, Handlerd M.R., Ya-Dong Wu, Lei Zhang, Sheng-Ping Qiana, Xiao-Ping Xia, Qing Yang, Yi-Gang Xu. The origins of high-Ti and low-Ti magmas in large igneous provinces, insights from melt inclusion trace elements and Sr-Pb isotopes in the Emeishan large Igneous Province. *Lithos.* 2019;344-345: 122–133. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.06.014

Об авторах

ТОМШИН Михаил Дмитриевич, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией, https://orcid.org/0000-0001-5865-7521, e-mail: tmd@diamond.ysn.ru ГОГОЛЕВА Саргылана Семеновна, ведущий инженер, https://orcid.org/0000-0002-1043-3710, e-mail: gogoleva ss@mail.ru

Аффилиация

Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677980, г. Якутск, пр. Ленина, 39, Российская Федерация

About the authors

TOMSHIN, Mihail Dmitrievich, Cand. Sci (Geology and Mineralogy), Leading Researcher, Head of the Laboratory, https://orcid.org/0000-0001-5865-7521, e-mail: tmd@diamond.ysn.ru

GOGOLEVA, Sargylana Semenovna, Leading Engineer of the Laboratory, https://orcid.org/0000-0002-1043-3710, e-mail: gogoleva_ss@mail.ru

Affiliation

Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 39 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russian Federation

Поступила в редакцию / Submitted 17.09.2022 Поступила после рецензирования / Revised 31.10.2022 Принята к публикации / Accepted 10.11.2022