

УДК 552.325(551.24) 550.384+551.215

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ВЫСОКОТИТАНИСТЫХ ДОЛЕРИТОВ НА ТЕРРИТОРИИ КИМБЕРЛИТОВЫХ ПОЛЕЙ: ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫ И НОВЫЙ КРИТЕРИЙ ПОИСКА

М.Д. Томшин¹, Н.П. Похиленко², С.С. Гоголева¹, А.Л. Земнухов³

¹Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН,
677000, Якутск, просп. Ленина, 39, Россия

²Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

³АО «Алмазы Анабара», 677000, Якутск, ул. Кирова, 18, Россия

Проведенное обобщение данных по химическому составу долеритов Вилуйско-Мархинского дайкового пояса (Вилуйский палеорифт) позволило выделить среди них геохимически аномальные участки. Установлено, что в долеритах даек, расположенных в пределах кимберлитовых полей, увеличивается практически в два раза содержание TiO_2 и ряда высокозарядных и редкоземельных элементов (Th, Ta, Hf, Y, Nd) по сравнению с типичным содержанием этих элементов в долеритах дайковых поясов. Оказалось, что подобное поведение элементов наблюдается и в долеритах даек, находящихся вблизи кимберлитов Куойкского поля (Молодинский дайковый пояс, Оленекский палеорифт). Сделан вывод о наличии связи между увеличением содержания титана и редкоземельных элементов в долеритах и расположением последних в пределах блоков литосферы, содержащих кимберлитовые поля. Предполагается, что участки основания литосферной мантии, связанные с образованием протокимберлитов, оказывали влияние на состав толеитового расплава в процессах его генерации и движения к земной поверхности, что приводило к его локальному обогащению титаном и рядом других элементов. Слабопроявленные процессы геохимического выравнивания между высокотитанистыми и обычными базитами, формировавшимися за пределами вмещающих кимберлитовые поля блоков, обеспечили локальность распространения первых. Формирующиеся до или после внедрения базитов поля кимберлитов совпадают с размещением даек высокотитанистых долеритов. Таким образом, высокотитанистые долериты дайковых поясов можно использовать как один из поисковых критериев на кимберлиты. Учитывая сказанное, в пределах Вилуйско-Мархинского дайкового пояса выделено два новых перспективных на выявление кимберлитов участка: Тенкеляхский и Кюленкинский.

Долериты, дайковый пояс, высокотитанистые базиты, кимберлиты, Сибирская платформа

LOCALIZATION OF HIGH-TITANIUM DOLERITES IN KIMBERLITE FIELDS: POSSIBLE CAUSES AND A NEW CRITERION FOR KIMBERLITE SEARCH

M.D. Tomshin, N.P. Pokhilenko, S.S. Gogoleva, A.L. Zemnukhov

The generalized chemical composition data on the studied dolerites from the Vilyui–Markha dike swarm (Vilyui paleorift) allowed detecting geochemically anomalous areas among them. It has been found that percentage of TiO_2 and a number of heavy rare-earth elements (Th, Ta, Hf, Y, Nd) in the dolerites of dikes located within the kimberlite fields show almost twofold increase compared to the normal content for these elements in the Vilyui–Markha dolerites. Similar behavior of these elements is also observed in the dolerite dikes near the Kuoika kimberlite field (the Molodo dike swarm, Olenek paleorift). It is inferred that there is a connection between the increase in abundances of titanium and rare-earth elements in the dolerites and that the latter occur within the lithosphere blocks hosting kimberlite fields. The areas of lithospheric mantle roots linked with the formation of proto-kimberlites may have had bearing on the composition of tholeiite melt both in the processes of its generation and during its ascent to the Earth's surface, which led to its local enrichment in titanium and a number of other elements. While the processes of the alignment of the geochemical composition between the high-titanium basites and the rest of the melt beyond the contours of the lithospheric blocks with kimberlite fields were weakly pronounced, they were responsible for appearance of zones enriched in titanium. Kimberlite fields that formed before or after basite magmas intrusion overlap with placements of high-titanium dolerite dikes. Thus, high-titanium dolerites in dike swarms (belts) can be used as one of the criteria for kimberlite searches. In view of the above, two new potential zones (Tenkelyakh and Kyulenke areas) for kimberlite exploration have been identified within the Vilyui–Markha dike swarm.

Dolerites, dike swarm, high-titanium basites, kimberlites, Siberian Platform

ВВЕДЕНИЕ

Вилуйско-Мархинский дайковый пояс (далее ВМДП) расположен на северо-западном крыле Вилуйского палеорифта и протягивается в северо-восточном направлении более чем на 700 км от верховьев р. Большая Ботуобия на юге до междуречья Тюнга и Муны 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 находятся кимберлиты, формирующие три поля: Малоботуобинское, Накынское и Сюльдюкарское (см. рис. 1). Формирование пояса проходило одновременно со становлением Вилуйской палеорифтовой структуры [Левашов, 1975; Полянский и др., 2013; Polyansky et al., 2017; Томшин и др., 2018] в верхнедевонское время и, согласно изотопным данным, полученным K-Ar, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Rb-Sr, Sm/Nd методами, укладывается в интервале 368.5—376.3 млн лет [Олейников и др., 1973; Масайтис и др., 1975; Courtillot et al., 2010; Киселев и др., 2014; Томшин и др., 2018]. Преобладают значения от 373.7 до 376.3 млн лет. Подробная характеристика долеритов пояса дана в работах [Олейников и др., 1973; Масайтис и др., 1975; Томшин и др., 2018]. В сложении интрузивов наиболее распространены призматически-офитовые габбро-долериты. По петрохимическим показателям (табл. 1) базиты пояса, как и в целом Вилуйского палеорифта, согласно [Irvine, Baragar, 1971], относятся к породам толеитовой серии (рис. 2 а, б). На диаграммах $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})\text{—SiO}_2$ (содержание $\text{SiO}_2 = 47.34\text{—}49.20$ мас. %, суммы щелочей $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 3.07\text{—}4.92$ мас. % при отношении $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 1$) фигуративные точки частных анализов долеритов ВМДП почти поровну разделены на толеитовые и субщелочные разности пород [Олейников и др., 1973]. Долериты характеризуются относительно высоким содержанием TiO_2 (2.48—2.60 мас. %), K_2O (0.91—2.69 мас. %) и P_2O_5 (0.29—0.41 мас. %), чем они уверенно отличаются от пермско-триасовых траппов [Олейников и др., 1973; Олейников, 1979]. Поведение редких и рассеянных элементов в изученных долеритах рассмотрено в работе [Томшин и др., 2018]. В таблице 2 приведены данные по составам их представительных проб. Согласно дискриминационным диаграммам Дж. Пирса [Pearce, Cann, 1973;

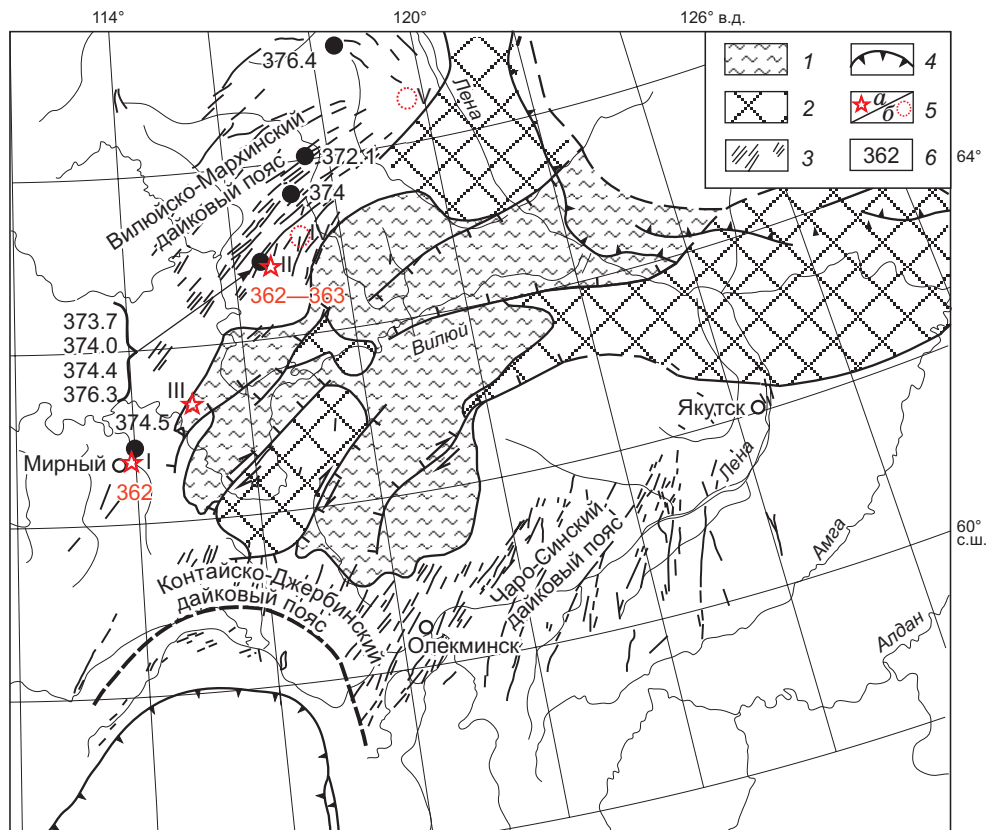


Рис. 1. Схема строения Вилуйского палеорифта, по [Томшин и др., 2018].

1 — рифтовые долины, выполненные терригенными отложениями мощностью до 6 км; 2 — участки наибольших поднятий; 3 — дайковые пояса; 4 — фронты фанерозойских орогенных поясов; 5 — кимберлитовые поля: а — открытые (I — Малоботуобинское, II — Накынское, III — Сюльдюкарское), б — предполагаемые (IV — Тенкеляхское, V — Кюленкинское); 6 — возраст, млн лет (красным — кимберлиты, черным — базиты).

Таблица 1. Средние химические составы (мас. %) базитов Вилуйско-Мархинского дайкового пояса

Компонент	Мир-12	ОБ-130	ОБ-233	ОБ-288	ОБ-251	38/43	ОБ-242	50/49-17	ОБ-501	ОБ-510	ОБ-528	ОБ-566	ОБ-569
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
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
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	13.70	14.62
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	4.40
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
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
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
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
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
K ₂ O	0.86	1.27	1.04	0.98	1.32	1.67	1.49	1.62	0.97	1.15	1.33	1.22	1.15
P ₂ O ₅	0.27	0.60	0.31	0.33	0.29	0.35	0.52	0.33	0.29	0.41	0.35	0.40	0.34
H ₂ O	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
Сумма	100	99.89	99.58	99.53	100	99.73	100.20	100.10	100.40	100.30	100.50	99.12	99.15
Mg#	50	38	43	46	44	43	40	45	44	40	47	36	38
n	1	8	5	9	22	9	10	4	23	6	27	5	5

Примечание. Здесь и далее в подобных таблицах: определение породообразующих элементов проводилось классическим методом «мокрой» химии в лаборатории физико-химических методов анализа (ИГАБМ СО РАН), $Mg\# = \frac{Mg^{2+}}{Mg^{2+} + Fe^{2+}} \times 100$, n — количество анализов.

Pearce, Norry, 1979], по соотношению $Zr-Ti/100-Y \times 3$ и $Zr/Y-Zr$ долериты Вилуйского рифта располагаются в поле внутриплитных базальтов (см. рис. 2 в, з).

ПЕТРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДАЕК ДОЛЕРИТОВ, РАСПОЛОЖЕННЫХ ВБЛИЗИ КИМБЕРЛИТОВ

Изучение долеритов даек, расположенных вблизи кимберлитов Накынского поля, показало в них резкое (двукратное) увеличение содержания титана [Земнухов и др., 2005] относительно его обычного содержания в долеритах пояса. С помощью более детального анализа химического состава этих пород установлено, что вместе с титаном увеличивается количество Th, Ta, Hf, Y, Nd. Это увеличение происходит постепенно. За пределами кимберлитового поля в интрузиве Цепочечный и в дайке на р. Марха (рис. 3) содержание TiO_2 равно 2.33 и 2.23 мас. %, соответствуя его нормальному содержанию для долеритов ВМДП (табл. 3). На окраине поля, примерно в 10 км от кимберлитов тр. Нюрбинская в интрузиве Линдакит, содержание TiO_2 незначительно возрастает — 2.83 мас. %. В дайках 38/43 и Усть-Ханьинская, расположенных в 3—4 км от той же трубки, оно уже составляет 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 обогащенных титаном долеритов в целом остаются прежними. Подчеркнем лишь определенное увеличение в них содержания титаномагнетита. Его доля может достигать 4—5 об. %, тогда как обычно в призматически-офитовых долеритах ВМДП она варьирует в пределах 2.5—3.5 об. %. Здесь доминирует титаномагнетит игольчатой и скелетной форм кристаллизации. В титаномагматите с приближением даек к кимберлитам параллельно с увеличением оксида титана в долеритах также увеличивается содержание TiO_2 : от 15.5 до 26.1 мас. % (табл. 4). В этом же направлении увеличивается доля оксида титана и в клинопироксенах: от 0.5—0.7 мас. % (количество оксида титана в клинопироксенах долеритов в целом для дайкового пояса) до 0.8—1.1 мас. % в долеритах даек на границе с кимберлитовым полем и до 1.6—2.1 мас. % в дайках вблизи кимберлитов. Для ильменита такая закономерность не установлена. Содержание TiO_2 в нем варьирует от 40.0 до 51.2 мас. %, согласуется с содержанием титана в дифференциатах. Так, например, в сложнопостроенной дайке, располагающейся в теле тр. Нюрбинская [Томшин и др., 2017], содержание TiO_2 в ильмените из монзонит-порфиров составляет 43 мас. %, а в ильмените габбро-долеритов достигает 49 мас. %. В околотрубочных долеритах появляются зерна сфена [Земнухов и др., 2005].

Анализ химического состава долеритов, расположенных в контурах Малоботуобинского и Сюльдюкарского кимберлитовых полей, дал аналогичные результаты. В районе Малоботуобинского кимберлитового поля, за его пределами содержание TiO_2 в долеритах дайки, выполняющей Восточный разлом, составляет 2.32—3.06 мас. % (табл. 5, рис. 4). В дайке Центрального разлома за пределами контуров

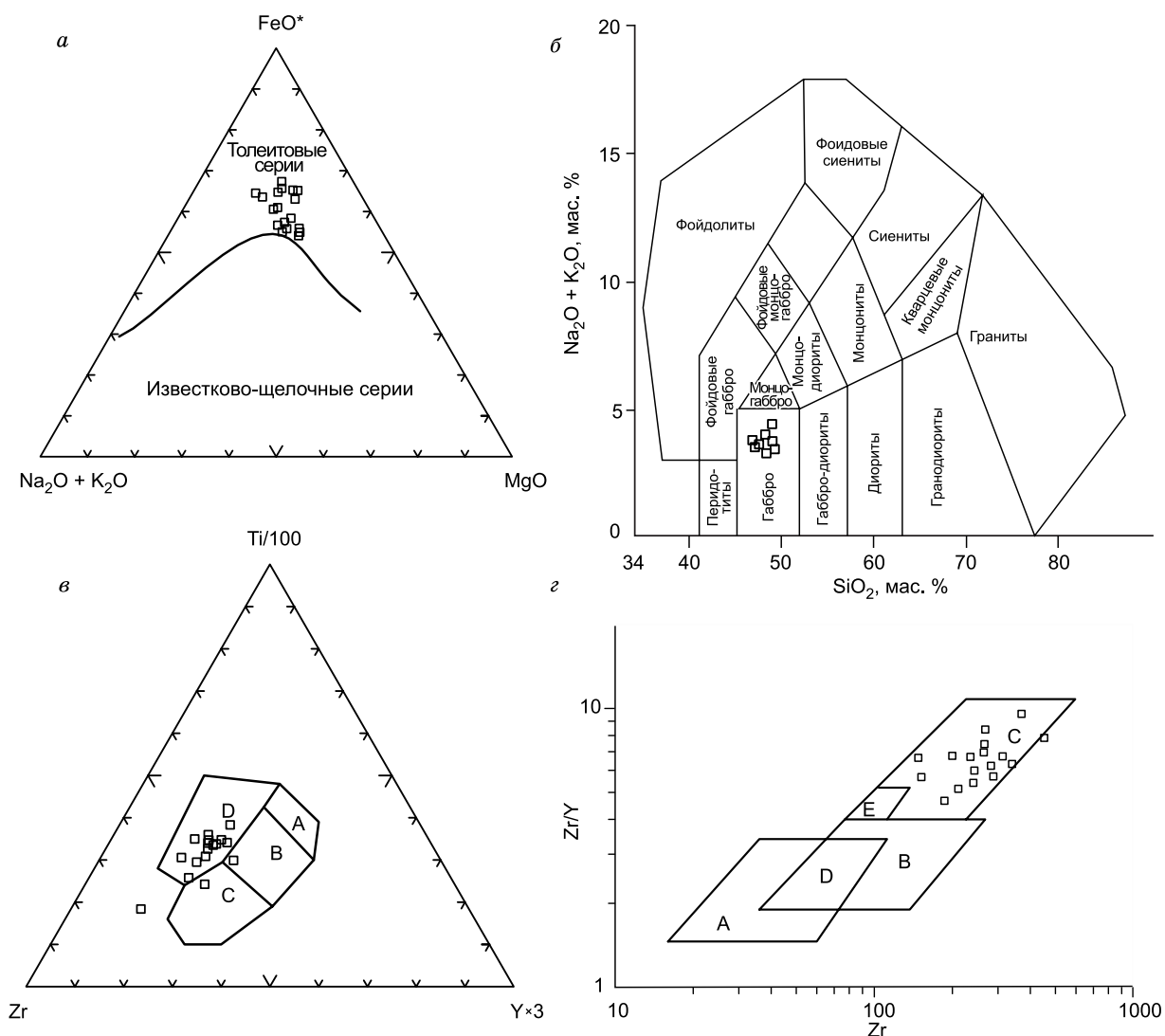


Рис. 2. Классификационные и дискриминационные диаграммы для долеритов Вилуйского палеорифта:

a — $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})\text{—FeO}^*\text{—MgO}$ [Pearce, Cann, 1973]; *б* — $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})\text{—SiO}_2$; *в* — $\text{Zr—Ti}/100\text{—Y} \times 3$ [Родионов и др., 1988]: А — толеиты островных дуг, В — базальты срединно-океанических хребтов, С — известково-щелочные базальты, D — внутриплитные базальты; *г* — Zr/Y—Zr [Pearce, Norry, 1979]: А — островодужные базальты, В — базальты срединно-океанических хребтов (MORB), С — внутриплитные базальты, D — островодужные базальты и MORB, E — внутриплитные базальты и MORB.

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 кимберлитом, доля TiO_2 колеблется от 3.88 до 4.17 мас. %. На Сюльдюкарской площади в долеритах даек, вскрытых скважинами 212.5, 218/184 и 218/189 (район р. Ыгыатта), содержание TiO_2 определялось от 2.01 до 2.36 мас. % — типичное для долеритов ВМДП (рис. 5, табл. 6). Южнее, в Эркютейской дайке (125Д) и в дайке, вскрытой скв. МЗ60, количество TiO_2 увеличивается до 3.65 и 3.49 мас. % соответственно, еще южнее в долеритах, вскрытых скв. 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 TiO_2 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 кимберлитогенерирующей зоны литосферной мантии. Западнее, в 12 км от дайки 1/7, в 2017 г. была открыта тр. Сюльдюкарская, в кимберлите которой был найден ксенолит долерита с содержанием TiO_2 6.03 мас. %. Близкая картина в поведении вышеуказанных элементов была отмечена и для долеритов даек Молодинского дайкового пояса, располагающегося по южному борту Оленекского палеорифта [Томшин и др., 2010]. В долеритах даек, находящихся вблизи кимберлитового Куойкского поля (рис. 6), содержание TiO_2 колеблется от 3.82 до 5.08 мас. %, а за

Таблица 2.

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

Компонент	Мир 12-24	130/Д1	T-68-60	ОБ-233-1	ОБ-802-7	38/43-91	ОБ-566-1	ОБ-534-4
SiO ₂	47.56	48.59	49.20	48.13	47.39	48.23	47.96	48.84
TiO ₂	3.26	3.57	2.48	2.53	4.01	2.60	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	0.20	0.20	0.17	0.19	0.23	0.20	0.12	0.25
MgO	5.50	5.18	5.04	5.57	5.36	5.12	3.87	4.97
CaO	10.14	8.33	9.53	10.05	9.70	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	0.40	0.41	0.40	0.32
H ₂ O ⁺	1.19	1.80	0.76	0.79	0.78	2.61	1.29	1.66
Сумма	99.95	99.58	99.96	99.56	100.50	99.21	99.37	100.30
Ni	52.80	52	112	104	57	72	74	69
Co	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	26.50	36.10	23.50	29.40	19.50	25.40	23.20	28.80
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	0.90	0.75
Nb	38.70	38.70	24.90	26.70	33.20	37.00	19.00	19.60
Ta	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	6.70	6.73	5.44
Y	32	39	30	35	46	36	45	41
Pb	25.40	—	5.20	2.90	3.00	5.10	7.60	3.00
La	36.40	34	22.50	22.60	28.30	30.20	25.90	25.40
Ce	82.20	78.20	51.50	52.50	62.90	70.0	62.70	56.40
Pr	10.20	9.88	6.71	7.05	8.35	9.19	8.17	7.09
Nd	44.20	42.40	28.60	31.50	39.60	39.80	38.20	34.40
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
Tb	1.19	1.36	0.98	1.18	1.50	1.30	1.37	1.12
Dy	7.03	7.89	5.88	7.01	8.21	7.49	7.64	6.50
Ho	1.28	1.55	1.20	1.43	1.64	1.49	1.53	1.34
Er	3.59	4.10	3.10	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	3.60	2.82	3.47	3.74	3.20	4.04	3.59
Lu	0.38	0.52	0.41	0.49	0.53	0.45	0.51	0.49
ΣREE	210.60	205.00	139.00	148.40	182.50	187.70	175.50	158.90
(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

Примечание. Редкие элементы анализировались методом ICP-MS на приборе Elan 6100 DRC (ИМГРЭ, Д.З. Журавлев). Nb/Nb* = $0.3618 \times \text{Nb} / \sqrt{(\text{La} \cdot \text{Th})}$, Eu/Eu* = $\text{Eu}_n / (\text{Sm}_n \times \text{Gd}_n)^{0.5}$, *n* — значения нормированы по составу хондрита [Sun, McDonough, 1989].

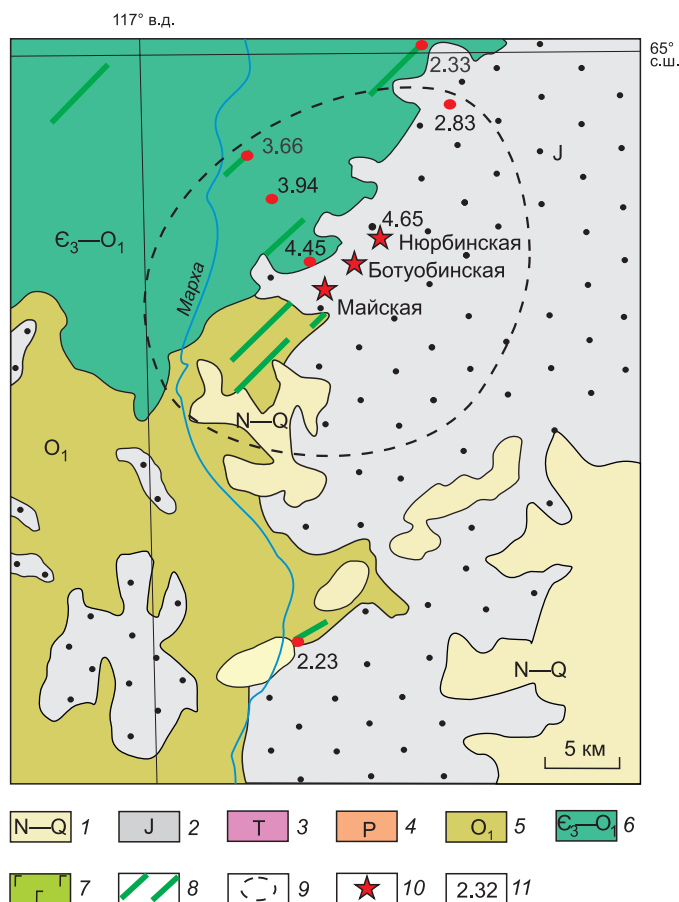


Рис. 3. Схематическая карта Накынского кимберлитового поля.

Здесь и далее: 1 — 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 — пермско-триасовые траппы; 8 — среднепалеозойские дайки долеритов; 9 — условные контуры кимберлитовых полей; 10 — кимберлитовые трубки; 11 — содержание TiO_2 в долеритах (мас. %).

пределами контуров поля опускается до рядовых значений — 2.25—2.47 мас. % (табл. 7).

Таким образом, установлено закономерное изменение химического состава долеритов, прежде всего, в поведении титана, Th, Ta, Hf, Y, Nd в дайках, располагающихся на территориях кимберлитовых полей. Такое изменение возможно лишь на магматической стадии формирования и эволюции базальтового расплава. Возраст внедрения кимберлитов Накынского и Малоботуобинского полей составляет 363—364 млн лет [Агашев и др., 2004]. Они возникли после становления даек ВМДП (368.5—374.4 млн лет [Земнухов и др., 2005; Киселев и др., 2014; Томшин и др., 2018] и не могли оказывать влияние на базиты, тем более в отсутствие прямого контакта между собой.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

А.И. Зайцевым, по результатам изучения Rb-Sr изотопных систем кимберлитов Якутии, на примере месторождений Мир, Таежное, Ботуобинское, Удачная, Айхал и др. высказывалось предположение [Зайцев, Смелов, 2010], что изохроны возрастом 420 млн лет могут отвечать событиям, связанным

Таблица 3. Средний химический состав (мас. %) долеритов даек Накынского кимберлитового поля

Компонент	ОБ-247	Цепочечный	Линдакит	Усть-Ханьинский интрузив	38/43-30, 38/43-91	Дайки долеритов вблизи кимберлитовых 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_2O_3	13.35	14.16	12.45	13.18	13.12	13.91	12.69
Fe_2O_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_2O	2.72	2.31	2.18	2.11	2.46	2.87	1.96
K_2O	1.25	1.10	1.69	1.46	1.28	1.88	4.20
P_2O_5	0.11	0.28	0.62	0.49	0.38	0.50	0.71
H_2O^+	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

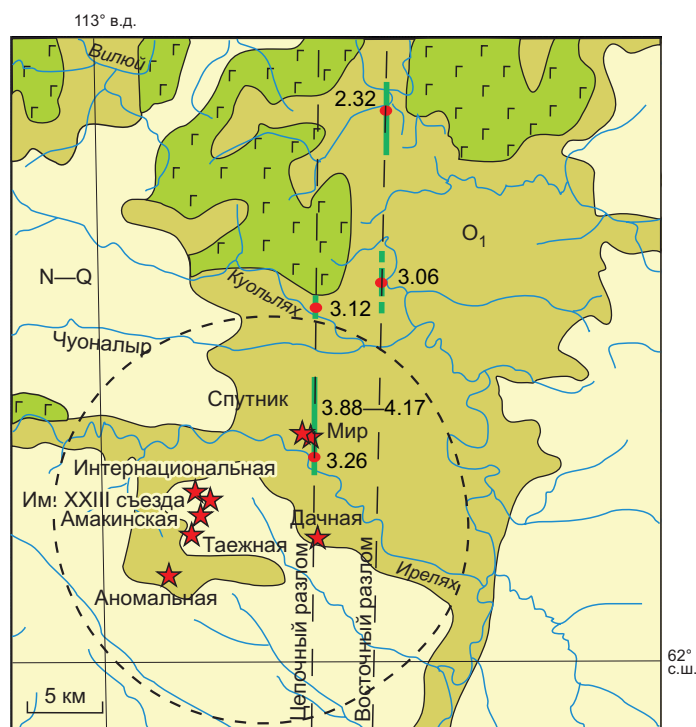


Рис. 4. Схематическая карта Малоботуобинского поля.

с зарождением протокимберлитов, тогда как становление собственно кимберлитов происходило позже — в позднем девоне—раннем карбоне. В работах [Agashev et al., 2013; Похиленко и др., 2015] продолжительность кимберлитобразования связывается с длительностью процесса карбонатитового метасоматоза деплетированных перидотитов основания литосферы, а также их вторичным обогащением базитовой составляющей при метасоматозе с участием расплавов сублитосферного происхождения [Pokhilenko et al., 1999; Pokhilenko, 2008; Howarth, 2014; Похиленко и др., 2015]. Учитывая сказанное, логично предположить, что процессы вторичного обогащения определенных зон литосферной мантии под кимберлитовыми полями, предваряющие кимберлитобразование, могли опосредованно оказывать влияние на состав формирующихся под Виллойским палеорифтом базитовых расплавов.

Таблица 4. Содержание TiO_2 (мас. %) в минералах долеритов района Накынского кимберлитового поля

Минерал	Дайка за пределами кимберлитового поля		Дайка по краям поля				Дайка вблизи кимберлитов	
	ОБ-247	Цепочечный	Линдакит	Усть-Ханьинский интрузив	38/43	Н-12р	21/136	50/34
Титаномагнетит	16.1—18.3	15.7—18.5	18.4—19.3	18.7—18.9	17.0—18.1	15.8—16.3	20.2—26.1	19.2—22.7
Клинопироксен	0.5—0.8	0.6—1.07	0.9—1.6	0.8—1.1	0.8—1.4	0.7—1.7	0.8—2.1	1.6—2.0
Ильменит	49.5—49.8	49.5—50.0	50.0—50.2	49.5—50.3	50.0—51.2	48.1—50.6	40.0—47.3	45.5—47.5
Долерит	2.3 (6)	2.0 (8)	2.8 (4)	3.7 (12)	3.6 (5)	3.8 (6)	4.6 (9)	4.4 (4)

Примечание. Цифры в скобках — количество усредненных анализов; анализы минералов выполнены в ИГАБМ СО РАН на приборе Camebax micro, аналитик С.К. Попова.

Таблица 5. Химический состав долеритов даек Малоботуобинского кимберлитового поля (мас. %)

Компонент	MR-12	М-3	Мир-12-6	Мир-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_2O_3	13.73	13.62	12.64	12.87	14.17
Fe_2O_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_2O	2.69	1.44	3.27	3.04	2.62
K_2O	0.86	2.51	1.58	1.86	1.07
P_2O_5	0.27	0.43	0.33	0.34	0.27
H_2O^+	0.41	0.70	1.76	1.19	0.45
П.п.п.	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

Примечание. MR-12 и М-3 — дайки Восточного разлома, Мир-12-4 и Мир-12-6 — дайки Центрального разлома; 8 — дайка, прорванная тр. Мир.

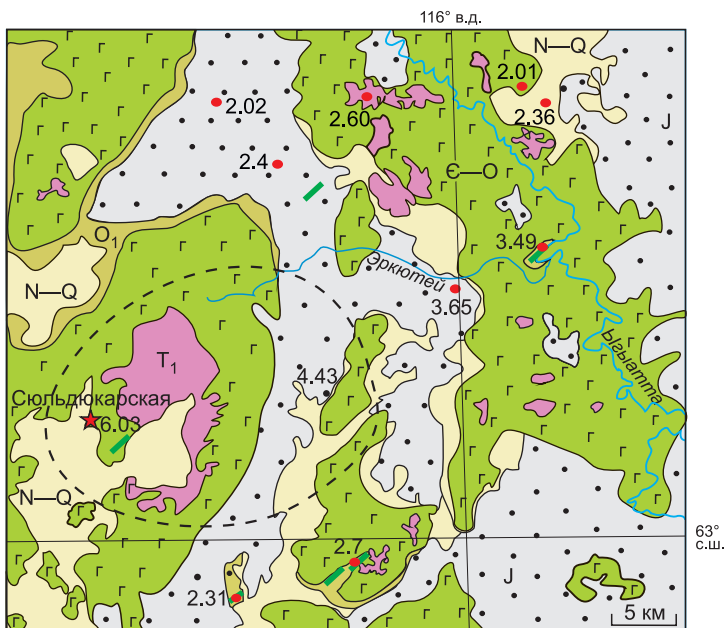


Рис. 5. Схематическая карта Сюльдюкарского кимберлитового поля.

В экспериментальной работе А.Я. Медведева и соавторов [1987] показано, что содержание титана в базальтовом расплаве возрастает с повышением давления до области устойчивости граната. Авторы работы [Le Zhang et al., 2019], проводя модельные исследования с базальтами Эмэйшань, 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 выплавления обычных толеитов, что обычно происходит при меньших давлениях.

Опираясь на вышеизложенное, можно предположить, что на момент образования астеносферной базальтовой линзы, связанной с формированием Вилуйского палеорифта, протолиты вторично обогащенных перидотитов, согласно [Pokhilenko et al., 1999; Pokhilenko, 2008, 2009; Howarth, 2014; Похиленко и др., 2015], в нижней части литосферной мантии под участками проявлений кимберлитового магматизма уже существовали. Всплывающий диапир протобазальтов, имевший сублитосферные температуры $> 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$, обеспечивал в зоне взаимодействия астеностера—литосфера частичное плавление вторично обогащенных перидотитов, включая максимально обогащенные перидотиты метакристового типа с очень высокими содержаниями титана [Родионов и др., 1988; Агашев и др., 2006; Pokhilenko, 2008], а также наиболее обогащенной части (ильменитсодержащих) деформированных лерцолитов [Pokhilenko et al., 1999; Pokhilenko, 2009; Агашев и др., 2010]. При образовании базальтов Вилуйского палеорифта, в момент прохождения ими зон вторично обогащенных перидотитов, в основании литосферы локально возникали условия для формирования высокотитанистого, обогащенного HREE базальтового расплава за счет контаминации продуктами частичного плавления таких перидотитов. Выравнивание геохимического состава между этими высокотитанистыми базальтовыми и базитовыми расплавами, пересекавшими в основании литосферы участки, сложенные обычными тугоплавкими истощенными перидотитами, находящимися за пределами зоны вторично обогащенных перидотитов, было незначительным. В дальнейшем базальтовый расплав, внедряясь в верхние горизонты земной коры, формировал дайки ВМДП, в том числе локально дайки высокотитанистых долеритов.

Кимберлитовые поля, располагающиеся на участке развития даек долеритов с высоким содержанием титана и HREE, по времени внедрения не связаны с формированием дайковых поясов: это совершенно разные по природе и масштабам процессы. Эти процессы в определенной мере объединяет наличие в основании литосферы локальной зоны вторично обогащенных перидотитов, что

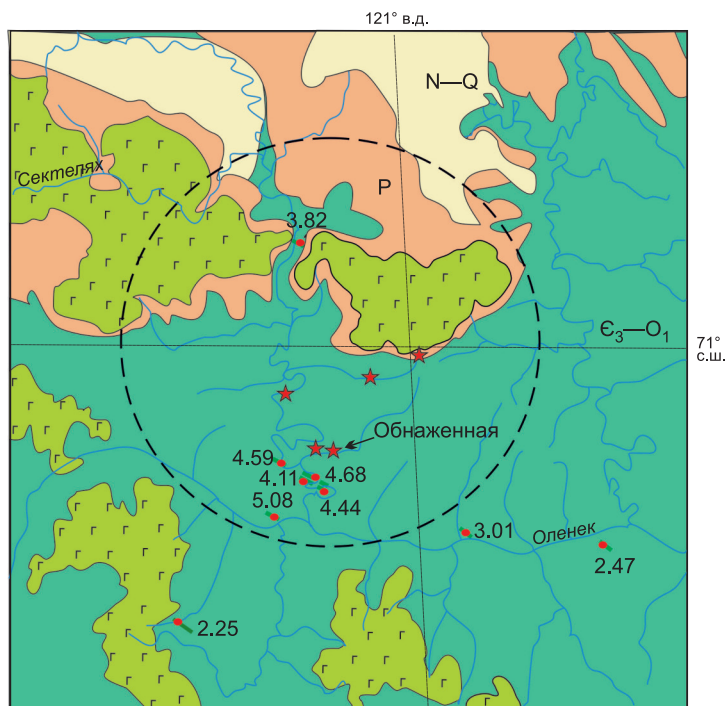
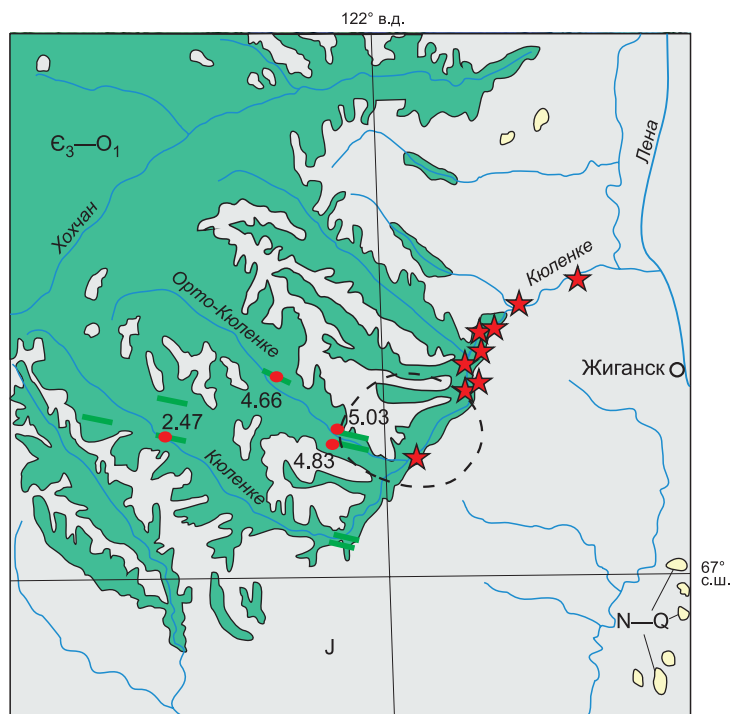


Рис. 6. Схематическая карта Куойкского кимберлитового поля.

**Рис. 7. Геологическая карта террито-
рии р. Кюленке.**



определяет получение повышенных со-
держаний титана и HREE в проходящих
через эту зону базальтовых расплавов.
Прямосвязанные с этой зоной процессы
формирования кимберлитов могут весьма
существенно отличаться по возрасту от
времени формирования дайковых поясов.
Так, например, возраст формирования
кимберлитов Куойкского поля относится
к верхней юре, в то время как возраст
даек Молодинского поля — верхний де-
вон [Томшин и др., 2010], следовательно,
разница в возрастах сравниваемых собы-
тий превышает 200 млн лет. Тем не менее
в пределах молодого Куойкского поля
(рис. 6) дайки долеритов имеют суще-
ственно более высокие содержания TiO_2
(3.82—5.08 мас. %), в то время как за пре-
делами поля рядовые значения — 2.25—
2.47 мас. %). Этот факт свидетельствует о

том, что зона вторично обогащенных перидотитов под Куойкским полем существовала уже во время
формирования долеритов Молодинского дайкового пояса. Таким образом, высокотитанистые долериты
дайковых поясов можно использовать как один из поисковых критериев на кимберлиты.

В этой связи нами был проведен сравнительный анализ химического состава долеритов ВМДП в
целом. Была изучена выборка из около 300 анализов, имеющихся в нашем распоряжении, по долеритам
даек вдоль всего пояса (от северного до южного окончания). В результате в пределах ВМДП было вы-
явлено еще два перспективных на открытие кимберлитов участка (табл. 8): первый — Тенкеляхский,
расположен в 20—30 км севернее известного Накынского кимберлитового поля; второй — Кюленкин-

Таблица 6.

**Средний химический состав долеритов даек в районе
Сюльдюкарского кимберлитового поля (мас. %)**

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_2O_3	14.31	14.49	14.73	13.29	14.11	14.72	14.42	18.18
Fe_2O_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_2O	2.04	2.29	2.17	2.07	2.36	2.25	1.98	0.56
K_2O	1.67	1.11	1.53	1.27	1.06	2.46	3.37	3.22
P_2O_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
$\text{S}_{\text{общ}}$	0.09	0.28	0.25	0.06	0.13	—	—	0.11
F	0	0	0	0.08	0	—	—	0
Сумма	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 7. Средний химический состав долеритов Куойкского поля (мас. %)

Компо- нент	Номер обнажения									
	175	193	54	43	45	46	56	68	69	Молодин- ское 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	30.10	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
П.п.п.	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
<i>n</i>	3	1	9	3	2	2	5	5	3	35

Таблица 8. Средний химический состав долеритов в районе рек Тенкелях и Орто-Кюленке (мас. %)

Ком- понент	Тенкелях								Орто-Кюленке				
	114.5/82	134/42	126/79	124/45	118/71	134/37	110/35	ОВ-224	ОВ-810	ОВ-812	ОВ-801	ОВ-803	ОВ-804
SiO ₂	49.62	47.70	48.39	48.65	48.25	49.50	46.25	47.93	48.00	47.59	48.15	48.53	48.79
TiO ₂	2.78	3.08	2.71	2.72	2.48	2.94	4.74	2.27	4.66	5.03	4.88	2.89	2.47
Al ₂ O ₃	14.11	13.77	14.50	14.48	13.53	14.56	14.53	13.59	13.83	14.40	14.64	13.84	14.08
Fe ₂ O ₃	4.26	3.91	5.11	3.52	3.83	4.46	5.23	2.82	5.50	5.13	3.70	5.28	4.06
FeO	7.71	8.72	9.60	10.69	10.75	8.14	7.7	12.01	8.10	7.52	9.13	8.18	8.85
MnO	0.17	0.17	0.19	0.18	0.2	0.17	0.13	0.19	0.18	0.14	0.18	0.17	0.21
MgO	5.95	5.48	4.39	4.91	6.28	5.09	5.73	6.75	5.58	5.27	6.02	6.45	6.71
CaO	9.71	9.01	9.68	10.13	10.28	8.33	9.45	10.57	5.52	7.95	5.95	9.91	9.73
Na ₂ O	1.87	1.40	2.04	1.98	2.01	2.51	2.29	1.85	3.06	2.03	2.60	2.18	2.12
K ₂ O	1.04	4.21	0.82	1.05	0.52	1.76	1.45	0.63	2.21	1.54	2.13	1.18	1.30
P ₂ O ₅	0.25	0.36	0.28	0.28	0.28	0.49	0.55	0.41	0.54	0.50	0.56	0.35	0.28
H ₂ O ⁺	1.09	0.95	1.08	0.81	1.13	1.20	1.25	0.41	2.04	1.50	2.05	1.04	1.40
П.п.п.	0.54	0.50	0.24	0.09	0	0.24	0.13	—	0.69	2.03	0.31	0.27	0.13
CO ₂	0.36	0	0.37	0	0	0	0	0	—	—	—	—	—
S	0.07	0.12	0.07	0.05	0.03	0.08	0.05	0	—	—	—	—	—
F	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.05	0.06	0.03	—	—	—	—	—
Сумма	99.56	99.42	99.50	99.58	99.60	99.52	99.54	100.24	100	100.63	100.30	100.30	100.10
<i>n</i>	3	2	5	3	1	3	2	3	7	6	5	7	9

ский, на севере ВМДП в устьевой части р. Орто-Кюленке (рис. 7) в 100 км западнее п. Жиганск. Если для прогнозируемых кимберлитов Тенкеляхской площади определение перспектив их алмазности пока не представляется возможным, то прогнозируемые кимберлиты района р. Орто-Кюленке должны быть алмазными, поскольку в русловых отложениях р. Кюленке, ниже устья р. Орто-Кюленке, являются алмазы (данные геологов Амакинской экспедиции).

Представляет практический интерес также территория Чаро-Синского дайкового пояса (см. рис. 1), поскольку в ее пределах нами выявлены участки с дайками долеритов, в которых содержание оксида титана достигает 4.0—4.5 мас. % при обычных для долеритов этого пояса значениях, равных 2.3—2.5 мас. %. Это указывает на перспективность проведения дополнительных прогнозно-поисковых геологических работ на перечисленных выше объектах.

Таким образом, предлагаемый нами метод можно уверенно использовать как один из поисковых критериев на кимберлиты.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что в пределах Вилуйско-Мархинского дайкового пояса появляются участки с аномально высокими содержаниями в базитах титана и ряда высокозарядных и редкоземельных элементов. Эти участки приурочены к территориям размещения кимберлитовых полей.

2. Предполагается, что выплавляющиеся базальты были контаминированы продуктами частичного плавления вторично обогащенных перидотитов основания литосферы, располагающихся в блоках литосферы, связанных с формированием кимберлитовых полей, что способствовало обогащению базальтов титаном и HREE.

3. Локализация данного процесса обусловлена размерами зоны вторично обогащенных перидотитов в основании литосферы, что, в свою очередь, связано с размерами кимберлитовых полей и слабопроявленными процессами геохимического выравнивания между обычными и высокотитанистыми базитовыми расплавами при движении их к земной поверхности.

4. Сделан вывод о возможном использовании высокотитанистых долеритов дайковых поясов как одного из поисковых критериев на кимберлиты.

Работа выполнена в рамках планов НИР государственных заданий ИГАБМ СО РАН и ИГМ СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

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 // ДАН, 2004, т. 399, № 1, с. 95—99.

Агашев А.М., Похиленко Н.П., Мальковец В.Г., Соболев Н.В. Sm-Nd изотопная система в megacrystalline граната из кимберлитовой трубки Удачная (Якутия) и проблема петрогенезиса кимберлитов // ДАН, 2006, т. 407, № 6, с. 806—809.

Агашев А.М., Похиленко Н.П., Черепанова Ю.В., Головин А.В. Геохимическая эволюция пород основания литосферной мантии по результатам изучения ксенолитов деформированных перидотитов из кимберлитов трубки Удачная // ДАН, 2010, т. 432, № 4, с. 510—513.

Зайцев А.И., Смелов А.П. Изотопная геохронология пород кимберлитовой формации Якутской провинции. Якутск, Офсет, 2010, 108 с.

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, с. 482—494.

Киселев А.И., Ярмолюк В.В., Иванов А.В., Егоров К.Н. Пространственно-временные отношения среднепалеозойских базитов и алмазоносных кимберлитов на северо-западном плече Вилуйского рифта (Сибирский кратон) // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (2), с. 185—196.

Левашов К.К. Среднепалеозойская рифтовая система востока Сибирской платформы // Советская геология, 1975, № 10, с. 49—58.

Масайтис В.Л., Михайлов М.В., Селивановская Т.В. Вулканизм и тектоника Патомско-Вилуйского авлакогена. М., Наука, 1975, 174 с.

Медведев А.Я., Альмухамедов А.И., Парадина Л.Ф. Растворимость титана в базальтовом расплаве (по экспериментальным данным) // Докл. АН СССР, 1987, т. 293, № 5, с. 1218—1220.

Олейников Б.В. Геохимия и рудогенез платформенных базитов. Новосибирск, Наука, 1979, 264 с.

Олейников Б.В., Саввинов В.Т., Погудина М.А. Основные типы трапповых интрузивов среднепалеозойской и верхнепалеозойской-нижнемезозойской трапповых формаций зоны сочленения Тунгусской и Вилуйской синеклиз // Геология и геохимия базитов восточной части Сибирской платформы. М., Наука, 1973, с. 4—75.

Полянский О.П., Прокопьев А.В., Бабичев А.В., Коробейников С.Н., Ревердатто В.В. Рифтогенная природа формирования Вилуйского бассейна (Восточная Сибирь) на основе реконструкций осадконакопления и механико-математических моделей // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (2), с. 163—183.

Похиленко Н.П., Агашев А.М., Литасов К.Д., Похиленко Л.Н. Взаимоотношения карбонатитового метасоматоза деплетированных перидотитов литосферной мантии с алмазообразованием и карбонатит-кимберлитовым магматизмом // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (1—2), с. 361—383, doi: 10.15372/GiG20150120.

Родионов А.С., Амшинский А.Н., Похиленко Н.П. Ильменит-пироповые верлиты — новый тип парагенезиса в ксенолитах из кимберлита // Геология и геофизика, 1988 (7), с. 53—57.

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), с. 24—30.

Томшин М.Д., Похиленко Н.П., Тарских Е.В. Морфология кимберлитовой трубки Нюрбинская и ее взаимодействие с долеритовой дайкой // ДАН, 2017, т. 477, № 5, с. 600—605.

Томшин М.Д., Копылова А.Г., Константинов К.М., Гоголева С.С. Базиты Вилуйского палеорифта. Геохимия и последовательность становления // Геология и геофизика, 2018, т. 59 (10), с. 1503—1518.

Agashev A.M., Ionov D.A., Pokhilenko N.P., Golovin A.V., Cherepanova Yu., 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, v. 160—161, p. 201—215.

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, v. 300, p. 239—245.

Howarth G.H., Barry P.H., Pernet-Fisher J.F., Baziotis I.P., Pokhilenko N.P., Pokhilenko L.N., Bodnar R.J., Taylor L.A., Agashev A.M. Superplume metasomatism: Evidence from Siberian mantle xenoliths // *Lithos*, 2014, v. 184—187, p. 209—224.

Irvine T.N., Baragar W.R.A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks // *Can. J. Earth Sci.*, 1971, v. 8, p. 523—548.

Le Zhang, Zhong-Yuan Ren, Handler M.R., Ya-Dong Wu, Lei Zhang, Sheng-Ping Qian, 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, v. 344—345, p. 122—133.

Pearce J.A., Cann J.R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1973, v. 19, p. 290—300.

Pearce J.A., Norry M.J. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks // *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1979, v. 69, p. 33—47.

Pokhilenko N.P. Permo-Triassic superplume and its influence to the Siberian lithospheric mantle // Deep-seated magmatism, its sources and plumes. Proc. 8th Int. Workshop. Vladivostok, 2008, p. 41—52.

Pokhilenko N.P. Polymict breccia xenoliths: Evidence for the complex character of kimberlite formation // *Lithos*, 2009, v. 112, p. 934—941.

Pokhilenko N.P., Sobolev N.V., Kuligin S.S., Shimizu N. Peculiarities of distribution of pyroxenite paragenesis garnets in Yakutian kimberlites and some aspects of the evolution of the Siberian craton lithospheric mantle // Proc. 7th Int. Kimberlite Conf. Cape Town, South Africa, 1999, v. 2, p. 689—698.

Polyansky O.P., Prokopiev A.V., Koroleva O.V., Tomshin M.D., Reverdatto V.V., Selyatitsky A.Yu., Travin A.V., Vasiliev D.A. Temporal correlation between dyke swarms and crustal extension in the middle Palaeozoic Vilyui rift basin, Siberian platform // *Lithos*, 2017, v. 282—283, p. 45—64.

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