2019 ZAPISKI RMO (PROCEEDINGS OF THE RUSSIAN MINERALOGICAL SOCIETY) Pt CXLVIII, N 3

DOI https://doi.org/10.30695/zrmo/2019.1483.01

#### © В. Б. ВАСИЛЕНКО, Н. Н. ЗИНЧУК, Л. Г. КУЗНЕЦОВА

# СОПРЯЖЕННОСТЬ ХИМИЧЕСКИХ СОСТАВОВ ПОРОД И АКЦЕССОРНЫХ МИНЕРАЛОВ В КИМБЕРЛИТАХ

Западно-Якутский научный центр АН Республики Саха (Якутия) 678170, Мирный, Чернышевское шоссе, 16; e-mail: 19139338270@gmail.com, nnzinchuk@rambler.ru

Сделан вывод о комагматичности пироповых гранатов, алмазов и породообразующих минералов кимберлитов. Для исследования использованы данные по алмазным месторождениям Якутии, в том числе по кимберлитовым трубкам Ботуобинская, Нюрбинская, Интернациональная, Мир, Айхал, Юбилейная, Сытыканская, Удачная-западная, Удачная-восточная и Заполярная. База данных химических составов пород содержит более 7000 анализов, из которых 1976 сопровождаются данными об алмазоносности пород и 1529 — нейтронно-активационными определениями хрома. База данных составов пиропового граната включает 1491 микрозондовый анализ, составы пикроильменита охарактеризованы 986 микрозондовыми анализами. Для обоснования достоверности сделанных заключений сопоставлены коэффициенты вариации содержаний породообразующих оксидов в породах кимберлитовой и других магматических формаций.

*Ключевые слова*: алмаз, пироповый гранат, пикроильменит, кимберлит, алмазоносность, петрохимия, комагматичность.

# V. B. VASILENKO, N. N. ZINCHUK, L. G. KUZNETSOVA. CONJUGATION OF CHEMICAL COMPOSITIONS OF ROCKS AND ACCESSORY MINERALS IN KIMBERLITES

West Yakut Science Center, AN Sakha Republic (Yakutia), Mirny, Russia

A general conclusion regarding the comagmaticity of pyrope, diamond and rock-forming minerals of kimberlites is made. The data on diamond deposits in Yakutia, including kimberlite pipes: Botuobinskaya, Nyurbinskaya, Internationalnaya, Mir, Aikhal, Yubileinaya, Sytykanskaya, Udachnaya-Western, Udachnaya-Eastern, and Zapolyarnaya, have been used in the study. The to-tal database of bulk rock compositions includes more than 7000 analyses, of which 1976 are accompanied by data on diamond contents in the kimberlites, and 1529 chemical rock compositions are accompanied by neutron activation analyses of chromium contents in the rocks. The pyrope compositions database contains 1491 microprobe analyses. The compositions of picroilmenites are characterized by 986 microprobe analyses. Literature data on the discrepancy between the ages of kimberlites and inclusions in diamonds are considered. To substantiate the validity of the obtained conclusions, variation coefficients of contents of rock-forming oxides in 25 volcano-plutonic formations and kimberlite rocks are compared.

Key words: diamond, pyrope garnet, picroilmenite, kimberlite, diamond-bearing, petrochemistry, comagnaticity.

#### введение

В петрологии кимберлитов имеет место противоречие — генезис алмаза многими учеными рассматривается в отрыве от генезиса самих кимберлитов. Основанием для возникновения такого противоречия служат Sm/Nd изотопные докембрийские возраста перидотитовых гранатов и Re-Os датировки сульфидных включений в алмазах из более молодых кимберлитов, указывающие на ксеногенный характер алмазов (Лапин и др., 2007). Так, в трубке Премьер Sm-Nd возраст кимберлитов составляет  $1.180 \pm 0.03$  млрд лет, возраст эклогитовых включений в алмазах —  $1.150 \pm 0.04$  млрд лет, а возраст включений гарцбургитовых гранатов в алмазах —  $3.2 \pm 0.04$  млрд лет (Richardson et al., 1993). В трубке Удачная Sm-Nd возраст включений гранатов в алмазах заключений гранатов в алмазах от  $3.1 \pm 0.3$  до  $3.5 \pm 0.3$  млрд лет (Pearson et al., 1999), тогда как K-Ar возраст кимберлитов системы трубок Удачная колеблется в пределах от 322 до 426 млн лет (Кривонос, 1997).

Согласно ксеногенной гипотезе, кимберлиты являются лишь транспортером алмазов. Образуются же алмазы в мантийных перидотитах и эклогитах, из которых они высвобождаются при образовании кимберлитовой магмы. Ксенолиты мантийных пород в кимберлитах содержат петрологическую информацию об условиях роста алмазов (Taylor et al., 2000). Прямых указаний на то, что представляют собой кимберлиты и как они образовались, эта гипотеза не дает.

Альтернативной точкой зрения выступает магматогенная гипотеза. Согласно этой гипотезе алмазы образовались совместно с породообразующими минералами кимберлитов при селективном плавлении мантийного субстрата, насыщенного водой, углекислотой, метаном и другими летучими компонентами.

Критериями проверки справедливости конкурирующих гипотез может выступать наличие (или отсутствие) взаимосвязи: а) между составами пироповых гранатов из кимберлитов и содержаниями породообразующих оксидов в породах; б) между концентрациями алмазов в кимберлитах, химическим составом кимберлитов и составом содержащихся в них гранатов.

Н. В. Соболев (1974) установил закономерное изменение состава пироповых гранатов в связи с изменением состава перидотитов. Поскольку магматическая природа перидотитов является общепризнанной, то и другие породы, в которых могут быть установлены статистические связи между составами пород и содержаниями находящихся в них акцессориев, также могут считаться магматическими. При отсутствии связей магматогенная гипотеза отвергается как маловероятная.

### ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения поставленных задач были использованы средние содержания породообразующих оксидов в кимберлитах и средние содержания оксидов в индикаторных минералах: магнезиальном гранате и пикроильмените из кимберлитовых трубок Накынского (Ботуобинская и Нюрбинская), Мирнинского (Интернациональная, Мир), Алакит-Мархинского (Айхал, Юбилейная, Сытыканская), Далдынского (Удачная-западная, Удачная-восточная) и Верхне-Мунского (Заполярная) кимберлитовых полей. Образцы для рентгеноспектральных анализов отбирались из керна 422 разведочных скважин. Интервал опробования составил 2 м. Общее количество образцов равно 7307 (аналитик Л. Д. Холодова, ИГМ СОРАН). Отобранные образцы характеризуют кимберлиты, слагающие трубки, до глубины 1250 метров.

Содержание хрома в породах определялось в 1529 образцах нейтронно-активационным методом. Содержания закисного и окисного железа в 1006 образцах (ИГМ СО РАН).

Коллекция химических составов магнезиальных гранатов (1491 микрозондовый анализ) и пикроильменита (986 анализов) из пород исследуемых трубок взята из базы данных В. А. Минина и И. В. Ащепкова.

Средние составы и коэффициенты вариации пород и минералов приведены в табл. 1. При этом часть кимберлитов (1976 образцов) охарактеризованы алмазоносностью (содержанием алмазов, карат/т).

Таблица 1

#### Средние химические составы кимберлитов, пиропового граната и пикроильменита (мас. %) из алмазных месторождений Восточной Сибири

#### Average bulk composition of kimberlites, pyrope garnet and picroilmenite (wt %) from diamond fields of East Siberia

					Кимберлит	говые поля				
Оксиды	Накы	нское	Мирні	инское	Алак	ит-Мархин	нское	Далдь	інское	Верхне- Мунское
Оксиды										
	Ботуо- бинская	Нюр- бинская	Интер- нацио- нальная	Мир	Айхал	Юби- лейная	Сыты- канская	Удачная- западная	Удачная- восточ- ная	Запо- лярная
				ŀ	Симберлиті	ы				
	n = 1001  n = 1023  n = 400  n = 725  n = 329  n = 1101  n = 542  n = 1013  n									<i>n</i> = 353
$SiO_2$	29.98	31.98	32.82	32.60	22.86	30.16	28.79	25.89	26.23	30.71
TiO <sub>2</sub>	0.42	0.56	0.47	1.41	0.43	0.99	1.78	0.86	1.18	1.30
$Al_2O_3$	3.83	5.15	3.00	2.50	2.44	2.05	1.88	2.33	2.16	2.15
$Cr_2O_3$	0.08	0.07	0.12	0.15	0.19	0.14	0.17	0.12	0.13	0.08
$Fe_2O_3$	5.37*	6.57*	2.83	4.74	2.48	4.32	6.06	3.92	3.05	6.28
FeO	H.o.	H.o.	2.82	3.72	1.52	2.49	2.04	2.34	2.42	1.31
MnO	0.12	0.14	0.10	0.12	0.10	0.15	0.11	0.10	0.12	0.14
MgO	23.55	20.64	27.17	27.73	23.29	27.82	27.70	25.12	27.51	32.87
CaO	14.06	12.14	8.39	5.51	17.47	10.62	10.89	15.51	13.33	8.75
Na <sub>2</sub> O	0.01	0.10	0.81	0.29	0.17	0.14	0.11	0.17	0.15	0.03
$K_2O$	1.22	1.45	0.89	0.70	0.87	0.35	0.22	0.64	0.59	0.31
$P_2O_5$	0.44	0.55	0.41	0.35	0.64	0.37	0.25	0.30	0.34	0.39
Ппп	21.13	20.65	20.22	17.93	26.34	20.55	19.39	23.10	21.08	17.99
			Кимберл	иты с уста	новленной	і́ алмазоно	сностью			
	<i>n</i> = 492	<i>n</i> = 373	<i>n</i> = 124	<i>n</i> = 180	<i>n</i> = 127	<i>n</i> = 206	<i>n</i> = 268	<i>n</i> = 71	<i>n</i> = 135	<i>n</i> = 353
$SiO_2$	29.41	30.96	32.45	31.02	23.96	28.32	29.21	26.87	26.35	H.o.
TiO <sub>2</sub>	0.41	0.44	0.47	1.44	0.45	0.99	1.82	0.89	1.25	H.o.
$Al_2O_3$	3.65	3.87	2.73	2.27	2.56	1.92	2.14	2.38	2.10	H.o.
$Cr_2O_3$	0.09	0.06	0.128	0.161	0.210	0.142	0.197	0.132	0.134	H.o.
$Fe_2O_3$	5.40*	5.74*	2.98	5.43	2.17	4.44	5.65	3.30	3.79	H.o.
FeO	H.o.	H.o.	2.74	3.13	2.03	2.50	2.38	3.02	3.18	H.o.

Таблица	1	(продолжение)	1
---------	---	---------------	---

					Кимберлит	говые поля						
Оксиды	Накы	нское	Мирни	инское	Алак	сит-Мархи	нское	Далдь	інское	Верхне- Мунское		
Оксиды					Тру	бки						
	Ботуо- бинская	Нюр- бинская	Интер- нацио- нальная	Мир	Айхал	Юби- лейная	Сыты- канская	Удачная- западная	Удачная- восточ- ная	Запо- лярная		
MnO	0.12	0.13	0.10	0.12	0.12	0.14	0.13	0.10	0.12	H.o.		
MgO	23.87	23.49	27.57	27.87	25.65	27.72	28.68	27.32	28.30	H.o.		
CaO	14.40	13.09	8.40	8.21	15.14	11.95	9.67	13.07	13.31	H.o.		
Na <sub>2</sub> O	0.01	0.01	0.92	0.35	0.06	0.14	0.11	0.23	0.30	H.o.		
K <sub>2</sub> O	1.14	1.09	0.83	0.72	0.99	0.28	0.26	0.76	0.65	H.o.		
$P_2O_5$	0.45	0.47	0.42	0.35	0.68	0.39	0.29	0.35	0.35	H.o.		
Ппп	21.25	20.97	20.43	18.78	26.34	21.41	18.95	21.71	20.16	H.o.		
$A_{\kappa p/\tau}$	8.28	6.70	3.82	82 1.99 4.02 0.53 0.45 1.16		0.63	0.59					
	Пироповые гранаты											
	n = 376 $n = 187$ $n = 221$ $n = 29$			<i>n</i> = 29	<i>n</i> = 256	<i>n</i> = 230	<i>n</i> = 104	<i>n</i> = 1	<i>n</i> = 38	<i>n</i> = 49		
SiO <sub>2</sub>	41.19	41.47	41.39	41.46	41.37	41.51	41.42	41.94	41.45	42.33		
TiO <sub>2</sub>	0.23	0.24	0.19	0.14	0.43	0.50	0.49	0.28	0.32	0.46		
$Al_2O_3$	18.24	18.77	19.13	19.89	18.40	18.31	18.84	19.19	17.91	19.70		
$Cr_2O_3$	6.38	5.68	5.34	3.35	5.40	5.51	4.96	5.30	6.47	4.28		
FeO	7.72	4.87	8.25	8.05	7.88	8.23	7.81	7.68	7.88	7.38		
MnO	0.42	0.43	0.49	0.42	0.40	0.39	0.37	0.39	—	0.12		
MgO	19.63	19.87	19.11	20.62	20.06	20.18	20.61	21.02	19.80	20.64		
CaO	5.42	5.29	4.90	4.47	5.22	4.82	4.50	4.14	5.05	4.49		
$Na_2O$	0.05	0.06	0.07	0.04	0.06	0.07	0.07	0.06	0.09	0.06		
$K_2O$	H.o.	H.o.	0.01	_	0.03	0.01	0.02	H.o.	H.o.	0.01		
				Пи	кроильмен	нит						
	H.o.	H.o.	<i>n</i> = 45	<i>n</i> = 108	<i>n</i> = 274	<i>n</i> = 90	<i>n</i> = 175	<i>n</i> = 106	<i>n</i> = 126	<i>n</i> = 62		
TiO <sub>2</sub>	H.o.	H.o.	48.65	44.10	49.13	49.09	49.57	48.77	47.30	49.28		
$Al_2O_3$	H.o.	H.o.	0.63	0.63	0.56	0.33	0.43	H.o.	H.o.	0.48		
$Cr_2O_3$	H.o.	H.o.	0.48	0.68	0.84	2.61	1.77	1.18	0.93	2.32		
FeO	H.o.	H.o.	40.01	46.36	38.68	37.06	37.80	H.o.	H.o.	35.64		
MnO	H.o.	H.o.	0.27	0.20	0.26	0.32	0.29	H.o.	H.o.	0.30		
MgO	H.o.	H.o.	9.05	7.34	10.03	9.86	9.92	H.o.	H.o.	11.09		

Примечание. \* — FeO + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *п* — количество анализов. Н.о. — содержание компонента не определялось, прочерк — содержание компонента ниже порога обнаружения. А<sub>круг</sub> — содержание алмазов (карат/т).

# ДИАГРАММА СОБОЛЕВА

Распределение содержаний СаО и Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в магнезиальных гранатах из ксенолитов разных типов перидотитов в кимберлитах ранее изучалось Н. В. Соболевым (Соболев, 1974; Соболев и др., 1978). Диаграмма Соболева, построенная по данным табл. 1, отражает наличие сопряженности между составами пород и гранатов в отношении содержаний СаО (рис. 1). Мы предполагаем, что подобная сопряженность между составами минералов и вмещающих пород может служить критерием проверки гипотезы об их генетической связи.



Рис 1. Диаграмма составов магнезиальных гранатов (Соболев и др., 1978), построенная с использованием данных табл. 1.

1 — средние составы пироповых гранатов по кимберлитовым трубкам, 2 — средние составы гранатов алмазных месторождений. Цифры на диаграмме — парагенезисы пироповых гранатов: 1 — верлитовый, 2 — лерцолитовый, 3 — гарцбургит-дунитовый, 4 — потенциально алмазоносный.

Fig. 1. Diagram of composition of pyrope garnets (Sobolev et al., 1978) calculated with data from table 1.

# ТИПОХИМИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ КИМБЕРЛИТОВ

Колебания составов кимберлитов удобно описывать на основе петрохимической популяционной модели (Василенко и др., 1997, 2012; Vasilenko et al., 2002). Согласно этой модели, химические составы кимберлитов делятся на 7 дискретных групп или популяций (кимберлитов, возникших в сходных условиях), которые выделяются по содержанию TiO<sub>2</sub> (табл. 2). В кимберлитовых трубках кимберлиты одной популяции локализуются совместно и сопоставимы с магматическими фазами. Популяции с минимальным содержанием титана содержат максимальные концентрации K<sub>2</sub>O и наоборот. Алмазоносность кимберлитовых популяций обратно пропорциональна содержаниям в них титана (рис. 2). Популяции могут быть подразделены на совокупности второго порядка (разновидности) по величине отношения СаO/MgO. С ростом этого отношения алмазоносность разновидностей вначале увеличивается, а затем падает.

Таблица 2

1-й уровень. Выделение популяций. Типохимический признак ${\rm TiO}_2~({\rm mac}.\%)$													
Номера популяций	1	2	3	4	5	6	7						
Граничные содержания	<0.4	0.41—0.60	0.61—1.00	1.01—1.40	0 1.41—1.80	1.81—2.20	2.21—2.90						
2-й уровень. Выделение разновидностей. Типохимический признак CaO/MgO													
Группы разновидностей	Ким кар	берлитовые обонатиты (Крб)	Карбонати кимберл (Са-км	итовые питы иб)	Кимберлиты (Кмб)	Магн ким (N	езиальные иберлиты Ig-кмб)						
Граничные значения	>8	.2—1.76	1.75—	0.83	0.82—0.34		<0.33						

Схема популяционной классификации кимберлитов алмазных месторождений Якутии Populational classification of kimberlites from Yakutian diamond fields



Рис. 2. Зависимость алмазоносности A (карат/т) от содержания TiO<sub>2</sub> в кимберлитах. *a* — в популяциях кимберлитов (1—7 — номера популяций), *б* — в кимберлитовых трубках (Б — Ботуобинская, H — Нюрбинская, A — Айхал, У-3 — Удачная-западная, У-в — Удачная-восточная, Ю — Юбилейная).

Fig. 2. Dependence between the diamond content (A, carat/tonne) and TiO<sub>2</sub> content in kimberlite (a — in kimberlite populations,  $\delta$  — in kimberlite pipes).

В табл. 3 приведены средние составы кимберлитов алмазных месторождений Якутии, относящихся к разным популяциям. Поскольку не все химические анализы, использованные для составления этой таблицы, охарактеризованы значениями алмазоносности, отдельно рассчитаны средние составы кимберлитов с известной алмазоносностью (табл. 4).

Таблица 3

# Средние составы популяций кимберлитов и кимберлит-пикритов алмазных месторождений Якутии (n = 7221)

	Номера популяций										
	1	2	3	4	5	6	7				
Оксиды	Количество анализов										
	<i>n</i> = 1550	<i>n</i> = 1185	<i>n</i> = 1863	<i>n</i> = 1377	<i>n</i> = 808	<i>n</i> = 315	<i>n</i> = 123				
SiO <sub>2</sub>	29.88	29.59	29.41	27.37	27.41	29.44	29.44				
TiO <sub>2</sub>	0.38	0.48	0.87	1.18	1.32	2.01	2.58				
$Al_2O_3$	3.56	3.51	2.72	2.04	2.12	1.96	1.98				
$Fe_2O_3^*$	5.40	6.10	6.81	7.39	7.82	8.81	9.41				
MnO	0.06	0.12	0.12	0.13	0.12	0.13	0.13				
MgO	23.96	24.54	25.61	28.28	27.58	30.47	31.52				
CaO	13.29	12.52	12.62	11.96	11.98	7.60	6.19				
Na <sub>2</sub> O	0.24	0.25	0.22	0.17	0.14	0.15	0.12				
$K_2O$	1.08	0.92	0.66	0.48	0.46	0.43	0.40				
$P_2O_5$	0.42	0.43	0.33	0.37	0.32	0.37	0.38				
Ппп	21.81	21.67	20.85	20.88	20.42	17.85	17.51				

Average composition of kimberlite and kimberlite-picrite populations from Yakutian diamond fields (n = 7221)

 $\Pi$ римечание.  $Fe_2O_3^* = FeO + Fe_2O_3$ .

# Средние составы и алмазоносность (А<sub>кр/т</sub>) популяций кимберлитов и кимберлит-пикритов алмазных месторождений Якутии

	Номера популяций										
	1 2		3	4	5	6	7				
Оксиды			Кол	ичество анали	30B						
	<i>n</i> = 576	<i>n</i> = 458	n = 287	<i>n</i> = 218	n = 227	<i>n</i> = 120	<i>n</i> = 54				
SiO <sub>2</sub>	29.39	29.48	29.75	28.44	29.09	29.50	28.87				
TiO <sub>2</sub>	0.38	0.49	0.79	1.22	1.58	2.00	2.47				
$Al_2O_3$	3.30	3.46	2.91	2.05	2.00	2.16	2.34				
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	5.01	5.82	6.73	7.49	8.48	8.71	9.08				
MnO	0.12	0.13	0.10	0.13	0.12	0.14	0.12				
MgO	25.79	25.43	25.46	27.77	29.49	29.52	29.68				
CaO	14.22	13.06	12.39	11.56	9.40	8.53	7.76				
$Na_2O$	0.14	0.10	0.17	0.24	0.23	0.17	0.12				
$K_2O$	1.03	0.98	0.73	0.54	0.45	0.44	0.39				
$P_2O_5$	0.39	0.53	0.45	0.38	0.34	0.35	0.46				
Ппп	22.50	22.50	21.22	22.31	22.05	22.47	23.61				
A <sub>kp/T</sub>	7.4	5.66	2.61	0.92	0.75	0.50	0.35				

Average composition and diamond content in kimberlite and kimberlite-picrite populations from Yakutian diamond fields

 $\Pi$ римечание.  $Fe_2O_3^* = FeO + Fe_2O_3$ .

Популяционная модель может использоваться для построения петрохимических моделей отдельных кимберлитовых тел, алмазоносных полей и перспективных полей в целом.

Петрохимические модели трубок. Примером петрохимической популяционной модели кимберлитовой трубки может служить модель трубки Юбилейная (табл. 5). Как видно из таблицы, в разных популяциях число анализов неодинаково: оно возрастает от 1-й к 3-й популяции и затем снова убывает. Представленные наибольшим количеством химических анализов популяции обозначаются как модальные. В трубке Юбилейная это 3-я и 4-я популяции.

Наименее титанистые и наиболее кальциевые популяции являются наиболее глубинными и представляют собой результаты начальных этапов селективного плавления перидотитов, содержащих фрагменты океанической коры. При подъеме зон магмообразования на менее глубинные уровни литосферы титанистость и магнезиальность возрастают. Формирование трубок завершается внедрением наиболее титанистых и магнезиальных популяций кимберлитов (Василенко и др., 1997).

Петрохимические модели кимберлитовых полей. По нашим данным (Василенко и др., 2006), кимберлитовые поля представляют собой области сосредоточения магматических тел конкретного магматического комплекса кимберлитовой формации. Популяционные петрохимические модели такого комплекса характеризуются аналогичными петрохимическими трендами, что и в отдельных трубках.

На примере петрохимической модели Мирнинского кимберлитового поля (табл. 6) видно, что все кимберлитовые тела этого поля могут быть выстроены

Таблица 5

Петрохимическая популяционная модель кимберлитов трубки Юбилейная Petrochemical population model of kimberlites of the Yubileinaya pipe

Сред- нее			28.55	1.01	1.89	7.08	0.14	28.85	11.12	0.11	0.32	0.39	8.32	12.94											
			Мg-кмб (0.7)	30.71	1.94	1.65	7.51	0.18	31.67	6.90	0.12	0.38	0.55	5.42	12.30										
			Кмб (0.5)	27.88	1.97	2.12	6.91	0.16	24.18	15.46	0.09	0.56	0.53	10.53	9.58										
			Мд-кмб (8.9)	30.09	1.54	1.76	7.83	0.14	32.74	6.41	0.12	030	0.49	4.50	14.02										
	5		Кмб (2.5)	28.33	1.50	1.99	6.56	0.13	26.85	13.16	0.12	0.38	0.47	8.84	11.95										
			Са-кмб (0.9)	23.87	1.47	2.29	6.60	0.17	18.77	20.92	0.09	0.37	0.46	15.66	9.48										
			Мд-кмб (21.0)	29.44	1.21	1.61	7.81	0.14	33.18	6.56	0.11	0.28	0.43	4.85	14.49										
	4		Кмб (9.9)	28.03	1.18	1.78	6.73	0.15	27.33	13.20	0.09	0.33	0.43	9.39	11.17										
нций	ра популяции (ности популяций	опуляций	Са-кмб (2.9)	23.70	1.18	2.16	5.74	0.14	19.47	21.70	0.11	0.41	0.40	16.95	9.01										
попул		цности по	Мд-кмб (20.1)	30.90	0.82	1.73	7.44	0.14	32.76	6.77	0.09	0.28	0.31	5.12	13.15										
Номе		Разновид	Кмб (9.9)	27.82	0.85	1.82	6.70	0.14	26.84	13.69	0.09	0.30	0.33	9.88	11.45										
	6			Са-кмб (7.5)	24.19	0.84	2.21	5.76	0.14	19.06	21.52	0.11	0.44	0.34	17.23	8.11									
			Kp6 (1.5)	17.62	0.81	2.05	5.49	0.15	11.06	31.45	0.12	0.33	0.42	23.83	6.79										
			Мg-кмб (4.6)	33.24	0.54	2.32	7.28	0.14	32.33	6.33	0.13	0.31	0.31	4.78	12.38										
			Кмб (1.6)	28.23	0.55	2.14	6.76	0.14	26.61	13.42	0.15	0.36	0.36	9.74	11.45										
	7	5	4		-						-	-	Са-кмб (1.2)	22.50	0.50	3.04	5.00	0.13	18.79	22.50	0.12	0.52	0.26	17.75	8.10
			Kp6 (0.8)	18.08	0.52	2.38	5.19	0.15	11.55	31.17	0.15	0.28	0.31	24.31	5.60										
	-		Мg-кмб (3.3*)	31.80	0.24	2.71	7.60	0.13	33.11	6.34	0.14	0.41	0.40	4.74	12.47										
		Оксилы		$SiO_2$	$TiO_2$	$Al_2O_3$	$\Sigma Fe_2O_3$	MnO	MgO	CaO	$Na_2O$	$\rm K_2O$	$P_2O_5$	$CO_2$	Ппп										

Примечание. Общее число анализов — 888. \* — выраженная в процентах доля образцов разновидности.

# Распространенность модальных популяций пород (%) в кимберлитовых трубках Мирнинского поля

II	Число	Популяции										
пазвание трубки	анализов	1	2	3	4	5	6	7				
A-21	8	_		_				75				
Мир	725	—		—	30	40						
Таежная	12	—		_	36	24		—				
Амакинская	10			_		90		_				
Имени XXIII съезда	23		40	60								
КПСС												
Дачная	15	—	61	53	—			—				
Спутник	12		46	46				_				
Интернациональная	400	61	31		—	_	_					

#### Abundance of modal populations of rocks (%) in kimberlite pipes of the Mirny Field

в последовательность с постепенным возрастанием титанистости модальных популяций. Последовательность, приведенная в табл. 6, позволяет предположить, что первыми внедрились породы трубки Интернациональная, последними — жилы № А-21. При этом следует обратить внимание на положение трубки Мир: высокая титанистость пород этой трубки противоречит ее высокой алмазоносности (табл. 1). Это связано с тем, что кимберлиты трубки Мир на контакте с вмещающими породами прорываются высокомагнезиальными и высокотитанистыми пикрито-кимберлитами с незначительными содержаниями алмазов.

Петрохимические популяционные модели кимберлитовых провинций. В табл. 7 суммированы данные о популяциях кимберлитов Вилюйской субпровинции Якутской кимберлитовой провинции. Показанная в этой таблице последовательность кимберлитовых полей дает основание считать, что развитие кимберлитового магматизма шло последовательно с юго-востока на северо-запад провинции от наиболее глубинных (наиболее алмазоносных, щелочных, известковистых) кимберлитов к менее алмазоносным (более титанистым и более магнезиальным) кимберлитам, пикрито-кимберлитам и пикритам.

Таблица 7

Распространенность модальных популяций пород (%) в кимберлитовых полях Вилюйской субпровинции Якутской кимберлитовой провинции

Abundance of modal populations of rocks (%) in kimberlite fields
of the Vilyui Subprovince, Yakutian Kimberlite Province

Π	Популяции кимберлитов									
RIOIT	1	2	3	4	5	6	7			
Далдынское					47	48				
Алакит-Мархинское	_	_	_	55	41	_				
Мирнинское	_	44	33		_	_	_			
Накынское	50	50	_		_	_	_			

Примечание. База данных включает 6954 анализа кимберлита.

Как показано в работе В. Б. Василенко с соавторами (Василенко и др., 1997), в пределах отдельных трубок, кимберлитовых полей и южной части Якутской провинции отмечаются сходные петрологические тенденции: магматизм начинается от наиболее алмазоносных, менее титанистых и высококальциевых внедрений и эволюционирует в сторону малоалмазоносных, высокотитанистых и высокомагнезиальных расплавов. Налицо наличие единого механизма магмагенерации, эволюционировавшего в условиях снижения давления в магматических очагах.

Таким образом, изменения содержаний TiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O, CaO и алмазоносность являются главными факторами вариаций составов кимберлитов.

#### СОСТАВЫ ПИРОПОВОГО ГРАНАТА И ПИКРОИЛЬМЕНИТА

Сопряженность между алмазоносностью кимберлитов и составом содержащихся в них пироповых гранатов может быть продемонстрирована с помощью диаграммы  $Cr_2O_3$ —CaO. Как показано на рис. 3, здесь выделяются три последовательности фигуративных точек, характеризующихся увеличением содержаний обоих компонентов пироповых гранатов. В каждом случае, одновременно с ростом содержаний  $Cr_2O_3$  и CaO в гранатах, возрастает алмазоносность трубок и среднее содержание  $K_2O$  в кимберлитах. Наиболее кальциевая из этих последовательностей включает трубки с максимальной алмазоносностью, наименее кальциевая — с минимальной алмазоносностью.

Содержание CaO в пироповом гранате коррелирует с содержанием CaO в кимберлите. При этом выделяются две последовательности — для более кальциевого граната в наиболее алмазоносных кимберлитах и для менее кальциевого граната — в менее алмазоносных высокотитанистых кимберлитах (рис. 4).

По соотношению Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CaO в пироповом гранате и алмазоносности кимберлитовых трубок, низкотитанистые и алмазоносные трубки (Ботуобинская, Нюрбинская, Айхал, Интернациональная) резко отличаются от низкоалмазоносных высокотитанистых трубок (Удачная-восточная, Юбилейная, Сытыканская, Заполярная) (рис. 5).



Рис. 3. Диаграмма Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—CaO для пироповых гранатов из кимберлитов алмазных месторождений.

Пунктиром соединены три последовательности кимберлитовых трубок. Буквами на диаграмме обозначены фигуративные точки гранатов из кимберлитовых трубок (М — Мир, А — Айхал, Б — Ботуобинская, З — Заполярная, И — Интернациональная, Н — Нюрбинская, С — Сытыканская, Ю — Юбилейная, У-в — Удачная-восточная), числа показывают среднее содержание алмазов в трубках, числа в скобках — среднее содержание К<sub>2</sub>О в кимберлитах.

Fig. 3. Diagram Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—CaO for pyrope garnets in kimberlite from diamond deposits.



Рис. 4. Диаграмма в координатах среднее содержание CaO в кимберлите — среднее содержание CaO в пироповом гранате.

Условные обозначения см. на рис. 3.

Fig. 4. Diagram «average content CaO in kimberlite - average content CaO in pyrope garnet».



Рис. 5. Диаграмма в координатах отношение Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CaO в гранате — среднее содержание алмазов в трубках.

Условные обозначения см. на рис. 3.

Fig. 5. Diagram «Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CaO ratio in pyrope garnet — average content of diamond in kimberlite pipes».



Рис. 6. Диаграмма в координатах среднее содержание TiO<sub>2</sub> в кимберлите — среднее содержание TiO<sub>2</sub> в пироповом гранате.

Fig. 6. Diagram «average content TiO<sub>2</sub> in kimberlite — average content TiO<sub>2</sub> in pyrope garnet».



Рис. 7. Диаграмма в координатах среднее содержание TiO<sub>2</sub> в кимберлите — среднее содержание TiO<sub>2</sub> в пикроильмените.

Fig. 7. Diagram «average content TiO<sub>2</sub> in kimberlite — average content TiO<sub>2</sub> in picroilmenite».

Отмечается также сопряженность между содержаниями титана в породах и пироповом гранате (рис. 6): в наименее титанистых и наиболее алмазоносных кимберлитах гранат характеризуется меньшим содержанием титана по сравнению с более титанистыми и менее алмазоносными кимберлитами. Чем больше титана в кимберлитах алмазных месторождений, тем больше титана в содержащемся в них пиропе.

Аналогичная картина имеет место для соотношения содержание титана в кимберлите — содержание титана в пикроильмените (рис. 7). Более титанистые кимберлиты содержат более титанистый пикроильменит.

Проведенное сравнение средних составов кимберлитов в изученных трубках со средними составами содержащихся в них пиропа и пикроильменита показало, что:

— содержания CaO и Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в пироповом гранате коррелируют со средними содержаниями алмазов и K<sub>2</sub>O в кимберлитах;

— содержание CaO в гранате коррелирует с содержанием CaO в кимберлитах и их алмазоносностью;

 — по отношению Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CaO низкоалмазоносные кимберлиты отделяются от высокоалмазоносных пород;

— трубки, сложенные низкотитанистым кимберлитом (TiO<sub>2</sub> < 0.47 мас. %), содержат низкотитанистый гранат (TiO<sub>2</sub> < 0.45 мас. %), сложенные высокотитанистым кимберлитом (TiO<sub>2</sub> > 1.0 мас.%) — высокотитанистый гранат (TiO<sub>2</sub>  $\approx$  0.50 мас.%);

— для трубок Интернациональная, Айхал, Юбилейная, Сытыканская, Заполярная характерна линейная зависимость между содержаниями TiO<sub>2</sub> в кимберлите и пикроильмените.

Приведенные данные свидетельствуют о сопряженности составов пиропового граната и пикроильменита с составом кимберлитов. Это дает основание считать магматогенную гипотезу образования алмаза и кимберлита вполне вероятной.

### дискуссия

Приповерхностные фации кимберлитов содержат многочисленные остроугольные обломки вмещающих пород, возникшие при взрывных выделениях летучих компонентов. Каждое внедрение расплава участвует в разрушении вмещающих пород, но в тем меньшей степени, чем позже оно произошло. В общем случае количество ксенолитов вмещающих пород в кимберлитовых телах резко падает на глубинах первые десятки метров (Василенко и др., 2000). Это обстоятельство обсуждается в рамках гипотезы о влиянии ксенолитов вмещающих пород на химический состав и алмазоносность кимберлитов. Согласно ассимиляционной гипотезе, источником кальцита в кимберлитах могут выступать вмещающие карбонатные породы (Харькив и др., 1991). Проверка этой гипотезы петрохимическими методами на большом фактическом материале показывает, что она не подтверждается. Но физическое вза-имодействие ксенолитов предыдущих внедрений кимберлитов и ксенолитов вмещающих пород с последующими порциями расплавов может иметь место по механизму вязкостной дифференциации, что приводит к увеличению разброса содержаний кальция, магния и алмазоносности (Василенко и др., 2000а).

С целью количественной оценки величины этого разброса были вычислены коэффициенты вариации содержаний оксидов в породах кимберлитовой формации Якутии. В основу расчетов были положены 7537 рентгено-флюоресцентных силикатных анализов пород, слагающих 99 кимберлитовых тел Накынского, Мирнинского, Алакит-Мархинского, Далдынского и Верхне-Мунского кимберлитовых полей. Для сравнения были рассчитаны коэффициенты вариации содержаний оксидов в породах, слагающих 366 магматических массива, относящихся к 25 магматическим формациям. Всего было использовано 24 000 силикатных анализов (Орлов и др., 1991). В табл. 8 значения рассчитанных коэффициентов ранжированы по возрастанию их величин, что позволило установить отсутствие экстремально высоких значений обсуждаемых коэффициентов для пород кимберлитовой формации и близость рассчитанных коэффициентов для пород кимберлитовой и других магматических формаций.

Важно отметить, что разброс содержаний СаО в кимберлитах определялся эндогенными процессами, имевшими много общего с процессами формирования карбонатитов. Присутствие в кимберлитах значительных количеств магматического кальцита подталкивает к такой аналогии. Согласно петрохимической классификации (Классификация.., 1981), составы кимберлитов формируют особый вид в пределах семейства щелочных пикритов ультраосновных пород щелочного ряда. Упомянутая классификация характеризует вид кимберлита таким минеральным составом: оливин — более 25 %, кальцит — до 50 %, флогопит — до 20 % и барофильные акцессории. Нужно подчеркнуть, что для признания того, что исследуемый состав породы относится к виду кимберлита (даже при наличии петрохимического сходства), обязательно присутствие барофильных акцессориев и алмаза или петрохимической оценки потенциальной алмазоносности.

Здесь уместно вспомнить проблему классификации карбонатитов, при выделении которых разные авторы называют разные граничные содержания магматического карбоната. Если важнейшим признаком этих пород считать наличие магматического карбоната, кимберлит является наиболее глубинной разновидностью карбонатита. Петрологическая близость кимберлитов и карбонатитов позволила Ю. А. Кузнецову (1989) рассматривать кимберлиты совместно с породами формации центральных интрузий щелочных и ультраосновных пород с карбонатитами.

Выполненные расчеты по сопоставлению химических составов кимберлитов и составов акцессорных минералов показали наличие линейных связей

#### Коэффициенты вариации (V) содержаний породообразующих оксидов в породах магматических формаций

Ti	$O_2$	Fe <sub>2</sub>	$_{2}O_{3}$	M	gO	Ca	ıO	K	2O	P <sub>2</sub>	O <sub>5</sub>	П	пп
Номер фор- мации	V	Номер фор- мации	V	Номер фор- мации	V	Номер фор- мации	V	Номер фор- мации	V	Номер фор- мации	V	Номер фор- мации	V
3	16.2	21	6.3	1	11.6	1	11.8	10	4.7	3	25.8	13	12.8
4	16.8	14	7.2	21	13.1	2	12.4	15	8.2	15	29.1	10	16.2
23	17.7	22	7.2	10	16.1	3	20.7	11	10.4	4	30.1	19	17.5
10	18.1	1	8.6	14	16.7	4	21.5	4	10.8	17	40.5	21	23.2
1	18.5	3	10.4	24	17.1	5	22.5	3	19.1	13	41.2	5	23.3
8	22.8	2	11.1	22	18.2	6	24	19	19.3	8	41.4	8	23.4
7	25.7	19	11.4	5	18.6	7	24.9	13	22.5	1	43.1	17	24.5
14	26	23	14.4	17	18.9	8	25.9	20	29.8	20	44.6	22	26.1
13	26.5	16	15.6	3	27.4	9	26.9	12	31.5	7	45.9	14	26.8
19	28.9	4	16.7	15	27.5	10	28.7	7	36.8	21	50.3	1	30.7
11	32.2	9	17.4	7	30.4	11	29.7	8	44.4	22	52.5	23	31.1
2	33.8	7	18.8	4	31.1	12	29.9	1	44.6	25	58.1	7	34
12	33.8	10	19.1	13	33.8	13	33.4	2	45	2	62.4	12	38.3
17	35.5	12	19.4	11	36	14	34.5	23	47.9	10	64.4	18	42
20	41.6	13	19.8	2	37.6	15	38.7	6	50.7	19	65.7	2	44.8
15	41.7	24	20.6	12	38.7	16	40.1	22	51.7	24	69.4	24	48
22	42.9	8	21.8	8	41.3	17	40.6	5	53.2	11	71.7	11	49.8
21	46.7	20	22.1	19	41.6	18	41.7	18	53.8	6	86.8	3	55.5
6	59.3	17	23	9	46.4	19	50.1	17	55.9	18	88.8	20	56.5
9	59.9	18	25.5	6	47.3	20	50.6	21	57.7	5	91.8	4	59
25	70	25	28.2	25	50	21	51.9	25	64.4	23	95.4	15	60.8
5	82.1	26	28.5	16	55.8	22	52.8	9	67.5	12	108.4	26	68.4
16	82.4	6	30.5	26	55.9	23	54.4	14	80.5	16	231.2	25	70.9
26	87.3	11	38.8	23	56.4	24	59.1	26	87.5	14	242.7	9	73.1
24	91.3	15	39	20	57	25	67.6	24	91.6	9	487.5	6	75.2
18	104.4	5	49.8	18	63.9	26	70.8	16	116	26	78.6	16	123.1

# Coefficients of variation (V) of rock-forming oxide contents in rocks of magmatic formations

Примечание. Формации: 1 — сиенит-габбровая, 2 — базальт-долеритовая, 3 — диорит-гранодиоритовая, 4 — лейкогранитовая, 5 — габбро-анортозитовая, анортозитовая, 6 — щелочных габброидов и нефелиновых сиенитов, 7 — гранитовая, 8 — тоналит-плагиогранит-гранодиоритовая, 9 — гранит-пироксен-норитовая, 10 — рапакави-гранитовая, 11 — аляскитовая, 12 — щелочных габброидов и псевдолейцит-нефелиновых сиенитов, 13 — нефелиновых, псевдолейцитовых и щелочных сиенитов, 14 — габбро-верлитовая, 15 — щелочно-гранитовая, 16 — дунит-пироксенитовая, 17 — кимберлитовая, 18 — щелочно-ультрамафитовая, 19 — нефелиновых и щелочных сиенитова, 22 — пироксенитовая, 19 — нефелиновых и щелочных сиенитовая, 22 — пироксенитовая, 23 — гранит-пироксенитовая, 24 — дунит-перидотитовая, 25 — лампроитовая, 26 — щелочных трахитов и нефелиновых щелочных сиенитов. Полужирным шелочных коэффициенты вариации для кимберлитовой формации.

между ними, что позволяет принять гипотезу о принадлежности всех минералов (и породообразующих, и акцессорных) к единому магматическому парагенезису. Этот вывод согласуется с установленным нами ранее генетическим родством мантийных ксенолитов и вмещающих их кимберлитов (Василенко и др., 2001). Василенко В. Б., Зинчук Н. Н., Кузнецова Л. Г. Петрохимические модели алмазных месторождений Якутии. Новосибирск: Наука, **1997**. 574 с.

Василенко В. Б., Зинчук Н. Н., Кузнецова Л. Г. Автолитовые кимберлиты как продукт вязкостной дифференциации кимберлитовых расплавов в диатремах // Петрология. 2000. Т. 8. № 5. С. 586—595.

Василенко В. Б., Зинчук Н. Н., Кузнецова Л. Г. О сопряженности составов глубинных включений и петрохимических разновидностей кимберлитов в диатремах Якутии // Петрология. 2001. Т. 9. № 2. С. 209—220.

Василенко В. Б., Зинчук Н. Н., Кузнецова Л. Г., Минин В. А., Холодова Л. Д. Средние составы кимберлитовых тел Вилюйской субпровинции Якутии как основа для формационной идентификации кимберлитов // Вестник ВГУ. **2006**. № 2. С. 126—140.

Василенко В. Б., Кузнецова Л. Г., Толстов А. В., Минин В. А. Оценка потенциальной алмазоносности неизмененных кимберлитов на основе популяционных моделей их составов // Геохимия. **2012**. № 12. С. 1—20.

Классификация и номенклатура магматических горных пород. Справочное пособие. Богатиков О. А., Гоньшакова В. И., Ефремова С. В. М.: Недра, **1981**. 160 с.

Кривонос В. Ф. Относительный и абсолютный возраст кимберлитов // Отечественная геология. **1997**. № 1. С. 41—51.

Кузнецов Ю. А. Главные типы магматических формаций. Новосибирск: Наука, **1989**. 392 с. Лапин А. В., Толстов А. В., Антонов А. В. Изотопный состав Sr- и Nd-кимберлитов и кон-

вергентных с ними пород Сибирской платформы // Доклады РАН. **2007**. Т. 414. № 1. С. 78—82. *Орлов Д. М., Липнер Г. Н., Орлова М. П., Смелова Л. В*. Петрохимия магматических форма-

ций. Справочное пособие. Л.: Недра, 1991. 229 с.

Соболев Н. В. Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. Новосибирск: Наука. 1974. 263 с.

Соболев Н. В., Похиленко Н. П., Лаврентьев Ю. Г., Усова Л. В. Роль хрома в гранатах // Проблемы петрологии земной коры и верхней мантии. Новосибирск: Наука, **1978.** С. 145—168.

Харькив А. Д., Зуенко В. В., Зинчук Н. Н., Крючков А. И., Уханов В. А., Богатых М. М. Петрохимия кимберлитов. М.: Недра, **1991**. 304 с.

#### References

Kharkiv A. D., Zuenko V. V., Zinchuk N. N., Kruchkov A. I., Ukhanov V. A., Bogatyckh M. M. Kimberlite petrochemistry. Moscow: Nedra, **1991**. 304 p. (*in Russian*).

*Classification* and nomenclature of rocks. A reference book. Bogatikov O. A., Gonshakova V. I., Efremova S. V. Moscow: Nedra, **1981**. 160 p. (*in Russian*).

Krivonos V. F. Relative and absolute ages of kimberlites. Native Geology. 1997. N. 1. P. 41-51 (in Russian).

Kuznetsov Yu. A. The main types of magmatic formations. Novosibirsk: Nauka, **1989**. 392 p. (*in Russian*).

Lapin A. V., Tolstov A. V., Antonov A. V. Sr and Nd isotopic compositions of kimberlites and associated rocks of the Siberian Craton. Doklady Earth Sci. 2007. Vol. 414. N 1. P. 557–560.

Orlov D. M., Lipner G. N., Orlova M. P., Smelova L. V. Petrochemistry of igneous associations. A reference book. Nedra: Leningrad, **1991**. 229 p. (*in Russian*).

*Pearson D. G., Shirey S. B., Bulanova G. P., Carlson R. W., Milledge H. J.* Re-Os isotope measurements of single sulfide inclusions in a Siberian diamond and its nitrogen aggregation systematics. *Geochim. Cosmochim.* Acta. **1999**. Vol. 63. N 5. P. 703–711.

*Richardson S. H., Harris J. W., Gurney J. J.* Three generations of diamonds from old continental mantle. *Nature*. **1993**. Vol. 365. N. 6452. P. 256–258.

Richardson S. H., Harris J. W. Antiquity of peridotitic diamonds from the Siberia craton. Earth Planet. Sci. Lett. 1997. N 151. P. 271-277.

Sobolev N. V. Deep-seated inclusions in kimberlites and the problem of the composition of the upper mantle. *Amer. Geophys. Union*, **1977**. 259 p.

Sobolev N. V., Pokhilenko N. P., Lavrentiev Yu. G., Usova L. V. Significance of chromium in garnets from kimberlites. In: Problems of the petrology of the Earth's crust and the upper mantle. Novosibirsk: Nauka, **1978**. P. 145—168 (*in Russian*).

Taylor L. A., Keller R. A., Snyder G. A., Wang W., Carlson W. D., Hauri E. H., MacCandless T., Kim K.-R., Sobolev N. V., Bezborodov S. M. Diamonds and their mineral inclusions, and what they tell us: a detailed "pull-apart" of a diamondiferous eclogite. Int. Geol. Rev. 2000. V. 1. N 41. P. 959-983.

Vasilenko V. B., Zinchuk N. N., Kuznetsova L. G. Petrochemical models of diamond fields in Yakutia. Novosibirsk: Nauka, **1997**. 574 p. (*in Russian*).

*Vasilenko V. B., Zinchuk N. N., Kuznetsova L. G.* Autolithic kimberlites as products of the viscous differentiation of kimberlite melts in diatremes. *Petrology.* **2000**. N 8. P. 495—504 (*in Russian*).

*Vasilenko V. B., Zinchuk N. N., Kuznetsova L. G.* On the correlation between the compositions of mantle inclusions and petrochemical varieties of kimberlites in Yakutian diatremes. *Petrology.* **2001**. Vol. 9, P. 179–189 (*in Russian*).

Vasilenko V. B., Zinchuk N. N., Krasavchikov V. O., Kuznetsova L. G., Khlestov V. V., Volkova N. I. Diamond potential estimation based on kimberlite major element chemistry. J. Geochem. Explorat. 2002. Vol. 76. P. 93—112.

Vasilenko V. B., Zinchuk N. N., Kuznetsova L. G., Minin V. A., Kholodova L. D. Average compositions of kimberlite bodies in the Vilyui subprovince, Yakutia as a base for identification of kimberlite rock associations. *Proc. Voronezh State Univers.* **2006**. N 2. P. 126–140 (*in Russian*).

*Vasilenko V. B., Kuznetsova L. G., Tolstov A. V., Minin V. A.* Evaluating the diamondiferous potential of unaltered kimberlites by the population models of their composition. *Geochem. Int.* **2012**. Vol. 50. P. 988—1006.

Поступила в редакцию 18 октября 2018 г.