

Особенности микропримесного состава хромшпинелидов-включений в алмазах из кимберлитов Якутии

Выявлены особенности микропримесного состава хромшпинелидов-включений в 323 кристаллах алмаза из восьми кимберлитовых трубок двух алмазоносных районов Якутии методом микрозондового анализа. Приведены статистически обработанные данные по содержанию в них примеси Ni, Zn, V, Mn, Si. Показано, что хромшпинелиды в алмазах из кимберлитовых трубок разных регионов характеризуются различным содержанием микропримесных элементов. Выявленные различия в химическом составе хромшпинелидов-включений в алмазах, а также дефектно-примесном составе алмазов-матриц из разных, в том числе и близлежащих, кимберлитовых трубок Якутии свидетельствуют о наличии локальной неоднородности мантийного вещества в пределах одного кимберлитового поля. Эти данные подтверждают мнение большинства исследователей о гетерогенности состава мантийного вещества в разных регионах Якутской алмазоносной провинции.

Ключевые слова: мантия, хромшпинелид, алмаз, включение, микропримесные элементы, микрозондовый анализ, ИК-спектроскопия.

СЕРЕБРЯННИКОВ АЛЕКСЕЙ ОЛЕГОВИЧ, аспирант, инженер-исследователь, aos_97@ngs.ru

ЛОГВИНОВА АЛЛА МИХАЙЛОВНА, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, logv@igm.nsc.ru

СОБОЛЕВ НИКОЛАЙ ВЛАДИМИРОВИЧ, академик РАН

Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН), г. Новосибирск

Specific features of the microimpurity composition of chrome-spinel inclusions in diamonds from kimberlites of Sakha-Yakutia

A. O. SEREBRIANNIKOV, A. M. LOGVINOVA, N. V. SOBOLEV

V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (IGM SB RAS), Novosibirsk

Specific features of the microimpurity composition of chrome-spinel inclusions in 323 diamond crystals from eight kimberlite pipes of two diamond-bearing regions of Yakutia were revealed by microprobe analysis. Processed data on their content of the Ni, Zn, V, Mn, and Si impurities are presented. It is shown that chrome-spinels in diamonds from the kimberlite pipes of the different regions are characterized by different contents of the impurity elements. The revealed differences in the composition of chrome spinel inclusions in the diamonds, as well as in the defect-impurity composition of the hosting diamonds, from the different, including neighboring, kimberlite pipes of Yakutia, are evidence of a local heterogeneity in the mantle composition within a certain kimberlite field. These data confirm the opinion of most researchers on heterogeneity of the mantle composition in different regions of the Yakutian diamondiferous province.

Key words: mantle, chrome-spinel, diamond, inclusion, impurity elements, microprobe analysis, IR spectroscopy.

Введение. Хромшпинелид является одним из наиболее важных минералов-индикаторов кимберлитов [1, 11]. Однако в поисковых целях он используется ограниченно в связи с невысокими содержаниями в коренных источниках и по причине его полигенности. В кимберлитовых концентратах хромшпинелиды характеризуются широкими вариациями со-

става (в мас.%): Cr_2O_3 – 4–65, Al_2O_3 – 10–58, TiO_2 – 0,1–14 [1, 10]. Опубликовано много работ, касающихся состава главных элементов хромшпинелидов, включённых в алмаз. Это, в первую очередь, высокая хромистость ($Cr/Cr + Al > 80\%$), пониженное содержание титана ($TiO_2 \leq 0,7$ мас.%), сравнительно узкий интервал железистости и незначительная роль окисного железа

Fe^{3+} [19, 31]. Хромиты именно такого состава в повышенном количестве отмечаются в алмазоносных трубках [16, 17, 19, 27, 29, 31, 32]. На основе типоморфных особенностей, выявленных по содержанию главных элементов, хромшпинелидов в алмазах был разработан критерий алмазоносности кимберлитов, широко используемый для обнаружения алмазов в аллювиальных отложениях [1, 3, 4, 11, 15, 16, 22, 26]. В работе Н.В. Соболева [15] определена чёткая корреляция между содержащимися в кимберлитовых телах хромшпинелидами указанного состава с их алмазоносностью. Однако в россыпях одновременно с хромшпинелидами «алмазного типа», как правило, присутствуют аналогичные минералы из магматических пород другого генезиса. Например, высокохромистые хромшпинелиды с содержанием $Cr_2O_3 > 62$ мас.% установлены в ультрабазитах Полярного Урала (до 65,9 мас.%), Корякского нагорья (68,4 мас.%), Индии (66,3 мас.%), Новой Каледонии (68 мас.%) и др. [9]. В этом случае необходимо более детально изучать химический состав хромшпинелидов, генетически связанных с алмазом, и определить содержание элементов-примесей в их составе. Подобные исследования практически не проводились. В мировой литературе известно всего несколько публикаций, касающихся определения микропримесных элементов в хромитах из кимберлитов и лампроитов Австралии [28, 38]. Для хромшпинелидов из алмазов и кимберлитов Якутской алмазоносной провинции такие систематические исследования микропримесного состава не проводились.

В данной статье приводятся впервые полученные результаты по содержанию примесных элементов (Zn, V, Mn, Si, Ni) в хромшпинелидах, включённых в алмаз, из восьми кимберлитовых трубок двух территориально разобщённых алмазоносных районов Якутии – Далдыно-Алаakitского и Мало-Ботубинского, – а также из микроксенолитов нескольких кимберлитовых трубок этих же районов. Результаты таких исследований важны для выяснения генезиса глубинных пород.

Описание образцов. Из представительной коллекции алмазов восьми кимберлитовых трубок двух алмазоносных районов Якутии (Мало-Ботубинский: трубки Интернациональная, Мир, XXIII съезда КПСС; Далдыно-Алаakitский: трубки Удачная, Сытыканская, Комсомольская, Айхал, Юбилейная) (рис. 1) было отобрано 323 кристалла с видимыми включениями хромшпинелидов. Алмазы с включениями хромшпинелидов относятся к типичным кристаллам из кимберлитов Якутии и представлены в основном бесцветными и слабоокрашенными октаэдрами и резорбированными кристаллами переходной формы [13] (рис. 2).

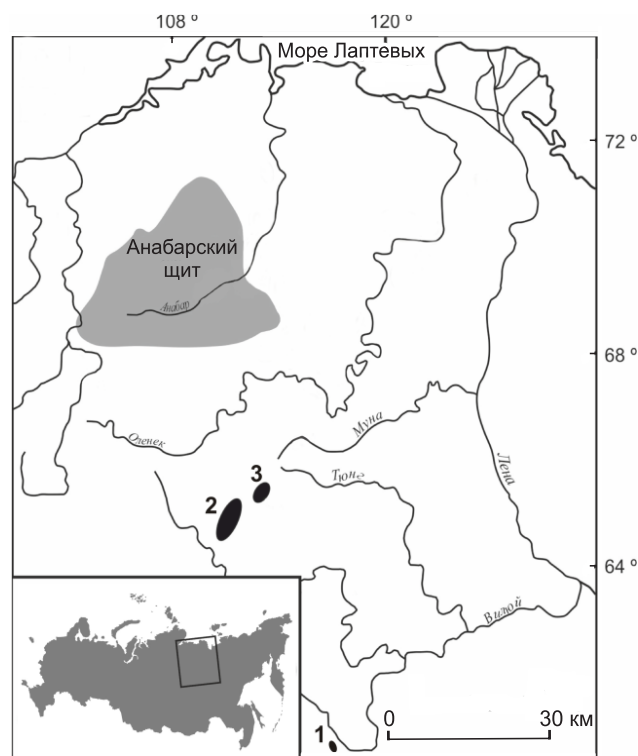


Рис. 1. Схема расположения Мало-Ботубинского (1) и Далдыно-Алаakitского (2, 3) алмазоносных районов Якутской алмазоносной провинции:

1 – Мирнинское кимберлитовое поле (трубки Мир, Интернациональная и XXIII съезда КПСС); 2 – Алаakit-Мархинское кимберлитовое поле (трубки Комсомольская, Юбилейная, Айхал, Сытыканская); 3 – Далдыноское кимберлитовое поле (тр. Удачная); на врезке – расположение региона исследований, по [18], с дополнениями

В нескольких случаях включения хромшпинелидов встречены в алмазах жёлтого и коричневого цветов. Коричневая окраска природных алмазов вызвана процессами пластической деформации и не связана с составом минералообразующей среды [35].

Включения хромшпинелидов представляют собой зёрна со сложными контурами овальной и удлинённой формы, иногда довольно правильно образованные октаэдры смоляно-чёрного цвета с сильным металлическим блеском. Включения хромшпинелидов, как правило, встречаются группами, до 20 штук в одном кристалле-хозяине, иногда совместно с включениями оливина и граната (пироба) (см. рис. 2).

Для сравнения были проанализированы микроксенолиты в виде отдельных зёрен хромшпинелидов с включениями пироба, хромдиоксида и оливина из концентрата исследуемых кимберлитовых трубок.

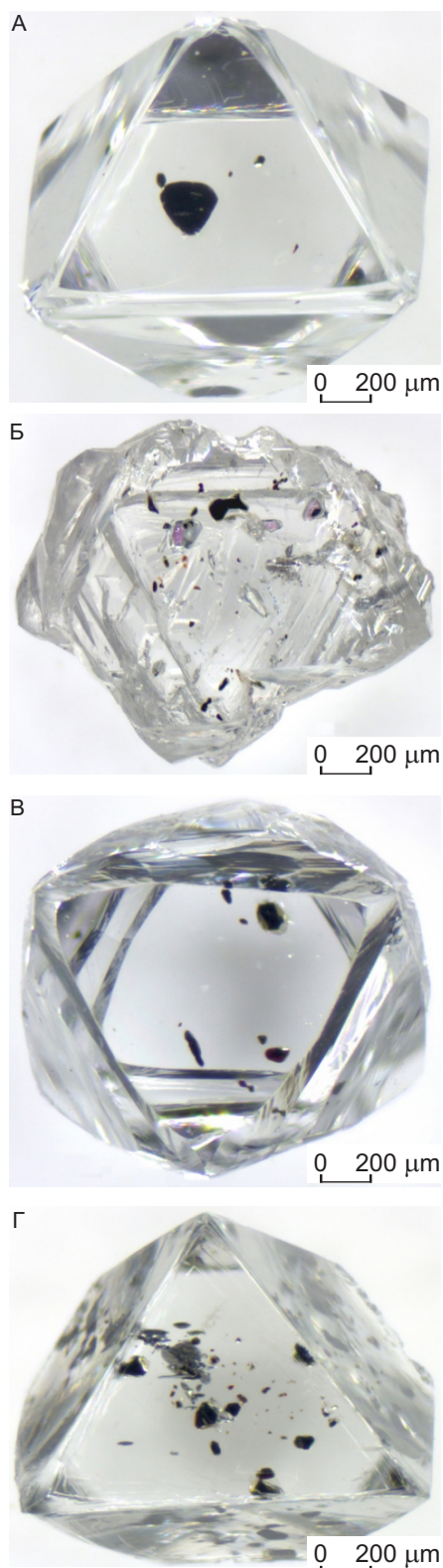


Рис. 2. Кристаллы алмаза октаэдрического габитуса, содержащие включения хромшпинелидов в ассоциации с пиропом и оливином:

трубки: А – Интернациональная, Б – Айхал, В – Юбилейная, Г – Мир

Методы исследования. В процессе данной работы было проведено комплексное исследование алмазов, содержащих включения хромшпинелидов, методами аналитической электронной микроскопии, инфракрасной спектроскопии (ИК) и катодolumинесценции (КЛ).

Для исследования внутреннего строения алмазов, а также характера распределения примесей в них были подготовлены плоскопараллельные пластинки толщиной 90–170 мкм, вырезанные преимущественно по плоскости (110). С целью изучения распределения примесей азота и водорода на ИК-Фурье спектрометре (FTIR) VERTEX 70 (фирма Bruker), оснащённом микроскопом HYPERION 2000, были измерены спектры ИК-поглощения. Спектры с апертурой 50 мкм регистрировались для алмазов в диапазоне 7500–750 см⁻¹ при разрешении 2 см⁻¹. Отдельные зоны роста исследованных алмазов, а также зоны с преимущественным расположением включений выявлены с помощью метода КЛ с использованием сканирующего электронного микроскопа LEO-1430 VP с энергодисперсионным рентгеновским спектрометром. Особое внимание было уделено распределению примеси азота и определению степени агрегации азота в зоне локализации включений хромшпинелидов.

Для исследования минеральных включений кристаллы алмаза-матрицы были шлифованы на специальном оборудовании с использованием шлифовального круга с порошковым алмаз-железным напылением до выведения включения в единую полировку с алмазом-матрицей. Обколотые кристаллы алмаза, в которых минеральные включения находились на сколе, подвергались дроблению в победитовой ступке с целью извлечения включений, которые затем монтировались в алюминиевые обоймы с использованием эпоксидной смолы для их фиксации, затем шлифовались и полировались до получения идеально гладкой поверхности. Химический состав минеральных включений определялся методом электронно-зондового микроанализа на приборах CAMECA Camebax-micro и JEOL JXA-8100. Пересчёт измеренных интенсивностей в содержании компонентов проведён методом ZAF-коррекции из программных обеспечений микроанализаторов. Особое внимание уделялось определению микропримесей, таких как ZnO, MnO, SiO₂ и V₂O₃. Для применяемой методики анализа предел примесей для одностороннего 1σ критерия (P ≈ 84%) составил (в мас.%): MnO – 0,03, ZnO – 0,05, TiO₂ – 0,02, SiO₂ – 0,02, NiO – 0,025, V₂O₃ – 0,03, MgO – 0,03. Аналитические работы выполнялись в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (Новосибирск, ИГМ СО РАН).

1. Дефектно-примесный состав алмазов, содержащих включения хромшпинелидов, из кимберлитовых трубок Якутии

Месторождение (трубки)	№ образца	Зона	A	B	N _{tot}	%B	
Айхал	АТС-13	Центр	452	272	724	38	
		Край	363	149	512	29	
	АТС-15	Центр	380	286	666	43	
		Край	388	303	691	44	
	АТС-27	Центр	0	0	0	0	
		Край	0	0	0	0	
	АТС-16	Центр	4	13	18	76	
		Край	14	7	21	32	
	АТС-17	Центр	380	86	465	18	
		Край	281	43	323	13	
	АТС-8	Центр	59	9	68	13	
		Край	50	9	58	15	
	Сытыканская	СТС-1	Центр	23	8	30	25
			Край	26	6	32	18
Комсомольская	КТС-11	Центр	20	14	34	42	
		Край	25	54	79	69	
	КТС-12	Центр	17	9	25	34	
		Край	7	9	15	57	
	КТС-16	Центр	106	72	177	40	
		Край	66	29	95	30	
Мир	МТС-14	Центр	106	14	120	12	
		Край	119	14	133	11	
	МТС-15	Центр	238	60	298	20	
		Край	284	51	335	15	
	МТС-17	Центр	624	152	775	20	
		Край	868	215	1082	20	
	МТС-18	Центр	54	3	57	5	
		Край	51	0	51	0	
	МТС-19	Центр	36	0	36	0	
		Край	30	0	30	0	
	МТС-20	Центр	76	51	127	40	
		Край	149	143	292	49	
	МТС-21	Центр	142	9	150	6	
		Край	1056	329	1385	24	
	МТС-24	Центр	281	37	318	12	
		Край	488	92	580	16	
	МТС-31	Центр	721	137	858	16	
		Край	842	154	996	16	
МТС-35	Центр	130	14	145	10		
	Край	130	14	145	10		
Юбилейная	YUBC-2	Центр	228	49	276	18	
		Край	297	40	337	12	
	YUBC-23	Центр	234	109	343	32	
		Край	276	149	424	35	
	YUBC-26	Центр	8	0	8	0	
		Край	0	0	0	0	

Месторождение (трубки)	№ образца	Зона	A	B	N _{tot}	%B
Удачная	UDC-1	Центр	102	6	108	5
		Край	96	6	101	6
	UDC-3	Центр	18	0	18	0
		Край	13	0	13	0
	UDC-7	Центр	10	0	10	0
		Край	8	0	8	0
	UDF-78	Центр	160	200	360	56
		Край	69	9	78	11
	UDS-13	Центр	152	189	341	55
		Край	125	137	263	52
	UDS-22	Центр	12	0	12	0
		Край	12	0	12	0
	UDS-33	Центр	30	0	30	0
		Край	30	0	30	0
	UDS-43	Центр	63	34	97	35
		Край	23	0	23	0
UDS-44	Центр	289	57	346	17	
	Край	173	29	202	14	
UDS-45	Центр	109	0	109	0	
	Край	111	0	111	0	
INC-104	Центр	531	80	611	13	
	Край	-	-	-	-	
INC-41	Центр	343	40	383	10	
	Край	190	17	207	8	
INC-13	Центр	7	169	175	96	
	Край	10	3	13	22	
INC-28	Центр	23	0	23	0	
	Край	17	0	17	0	
INC-70	Центр	35	2	36	5	
	Край	57	0	57	0	
Im-103	Центр	31	0	31	0	
	Край	30	0	30	0	
INS-137	Центр	561	129	690	19	
	Край	776	200	976	21	
INS-149	Центр	58	0	58	0	
	Край	61	0	61	0	
INS-154	Центр	129	14	143	10	
	Край	132	13	145	9	
INS-156	Центр	56	3	59	5	
	Край	53	14	67	21	
INS-161	Центр	53	0	53	0	
	Край	83	0	83	0	
INS-169	Центр	5	43	48	90	
	Край	8	7	15	46	
INS-172	Центр	271	57	328	17	
	Край	281	63	343	18	
INS-174	Центр	553	97	650	15	
	Край	597	120	717	17	
INS-68	Центр	17	0	17	0	
	Край	330	29	359	8	

Дефектно-примесный состав алмазов. Спектры ИК-поглощения были сняты в 50 кристаллах алмаза, содержащих включения хромшпинелидов, из пяти кимберлитовых трубок Якутии (трубки Мир, Интернациональная, Удачная, Комсомольская и Юбилейная). Получены количественные данные по общему содержанию азота в алмазах, количеству А и В1-дефектов, степени агрегации (процентное содержание В1-дефекта к общему содержанию азота). В изученных алмазах азот в основном находится в А и В1-форме. Соотношение между этими центрами может быть различно, однако резко преобладают кристаллы типа IaA (см. рис. 2). Приведённые в таблице 1 данные по содержанию в структуре алмаза примеси азота показывают широкие вариации состава в пределах одной кимберлитовой трубки.

Сравнение полученных результатов по алмазам с включениями из кимберлитов разных алмазоносных районов Якутии, а также на основе литературных данных выявило некоторые существенные разли-

чия [24]. Кристаллы из трубок Интернациональная (Мало-Ботуобинский алмазоносный район) и Юбилейная (Далдыно-Алаakitский алмазоносный район) отличаются по распределению азота и степени его агрегации. Большинство алмазов из трубки Интернациональная относится к IaA. Во всех исследованных в данной работе алмазах из трубки Юбилейная отмечено повышенное содержание азота только лишь в центральной зоне кристаллов, в то время как для алмазов из трубки Интернациональная зафиксировано равномерное распределение азота по всему кристаллу, варьирующее от 600 до 900 ppm. Для кристаллов алмаза из трубки Комсомольская, содержащих включения хромшпинелидов, характерно невысокое содержание азота, в среднем не превышающее 100 ppm. А алмазы из трубки Мир характеризуются гораздо большим диапазоном вариаций дефектно-примесного состава: общее содержание азота изменяется в пределах от 60 до 800 ppm, степень агрегации – от 5 до 40% (рис. 3). Это свидетельствует

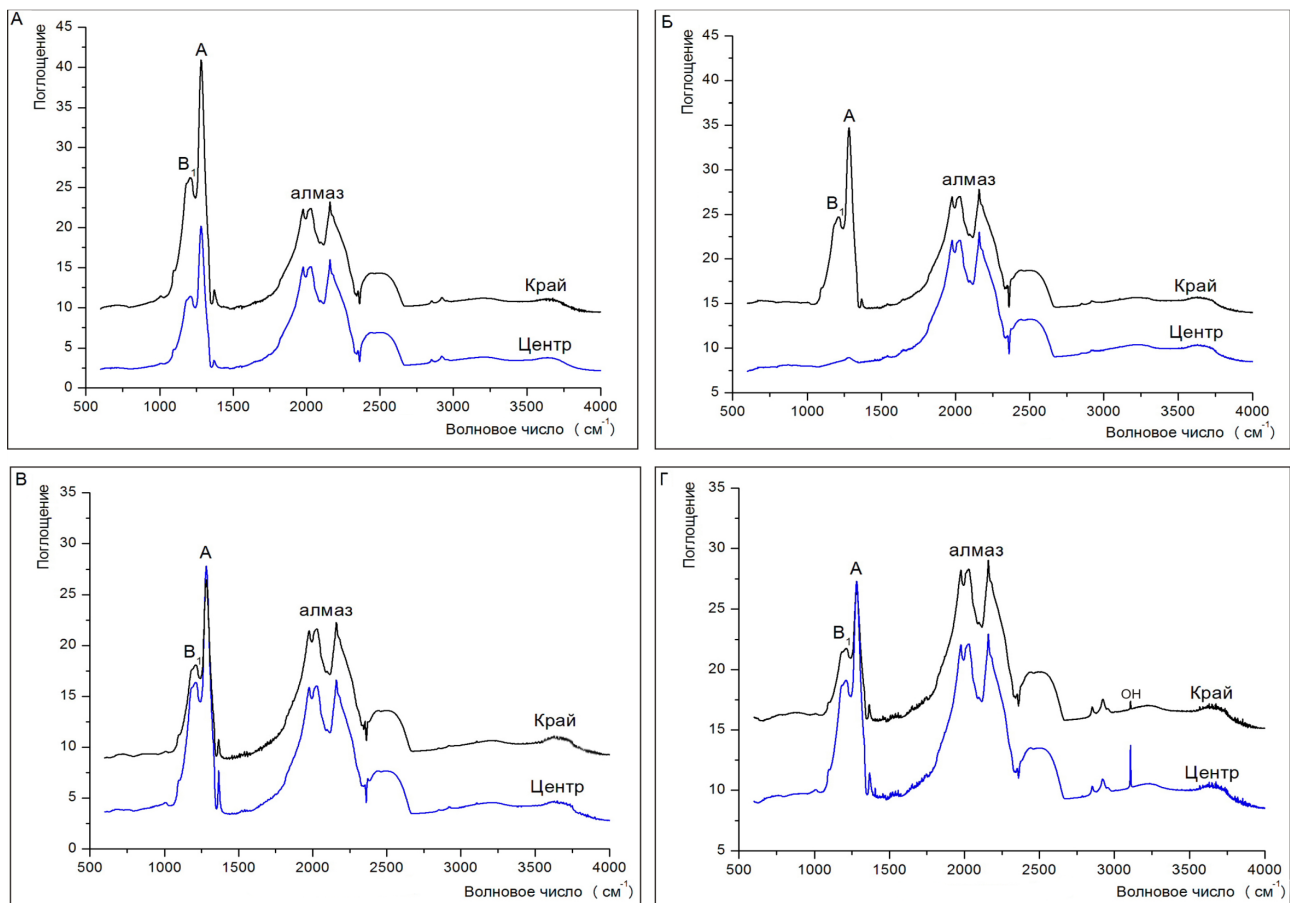


Рис. 3. Типичные спектры поглощения алмазов, содержащих включения хромшпинелидов, из кимберлитовых трубок Якутии: А – обр. Мтс-24 (тр. Мир); Б – обр. Инс-68 (тр. Интернациональная); В – обр. Атс-17 (тр. Айхал); Г – обр. Удс-44 (тр. Удачная)

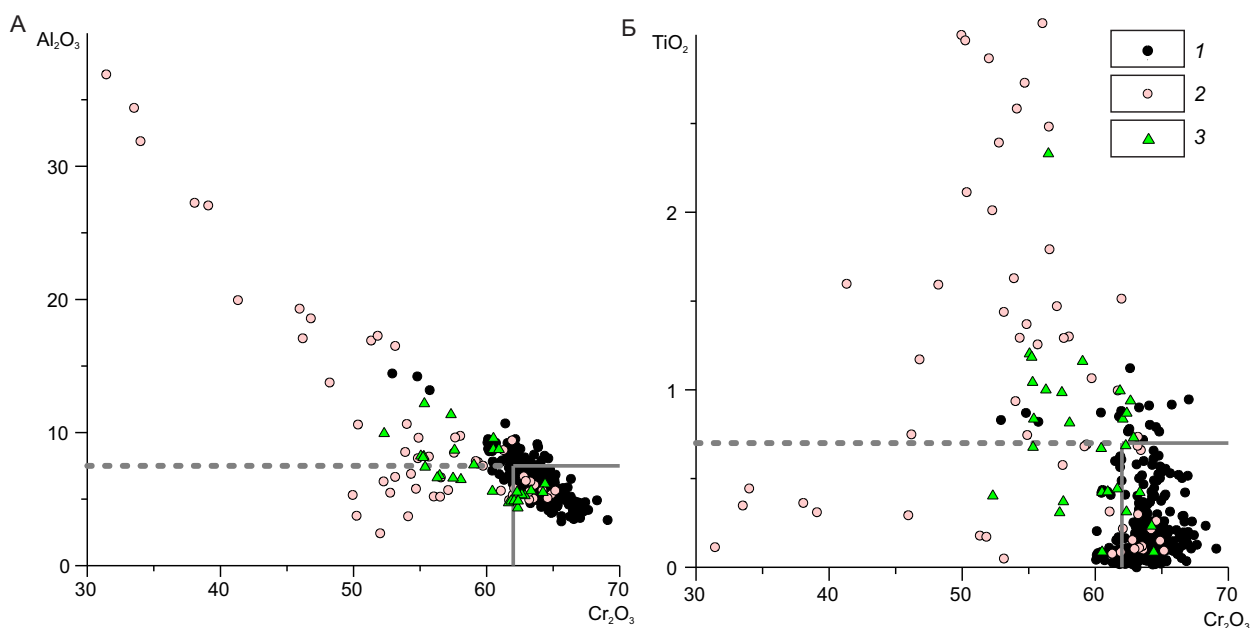


Рис. 4. Особенности распределения $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ (А) и $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ (Б) в изученных хромшпинелидах из кимберлитовых трубок Якутии:

1 – включения в алмазе; 2 – микроксенолиты: хромит + оливин; 3 – микроксенолиты: хромит + пироп и хромит + Сг-диопсид; линиями ограничено поле хромшпинелидов, ассоциирующих с алмазом [16]

о различиях в условиях их образования. Именно степень агрегации азота из А-формы в В1 в кристаллах алмаза свидетельствует о скорости процессов и условиях образования алмазов. Высокая степень агрегации азота свидетельствует о длительном периоде нахождения кристалла алмаза при высокой температуре [39].

Во всех изученных алмазах присутствуют линии 1405 и 3107 см^{-1} , связанные со структурными примесями водорода. Как правило, данные линии поглощения относятся к колебаниям С–Н, что доказывает вхождение водорода в структуру исследуемых алмазов.

Исследование алмазов, содержащих включения хромшпинелидов, методом катодолюминесценции показало, что практически все включения приурочены к одной ростовой зоне алмаза-матрицы. По литературным данным, такие включения имеют близкий химический состав в разных ростовых зонах в пределах алмаза-матрицы, отличие отмечается по содержанию Сг и Al. В содержании примесных элементов (V, Mn, Si, Zn, Ni) в пределах алмаза-матрицы вариаций не выявлено [12, 19].

Химический состав включений хромшпинелидов в алмазах. Минеральные включения в алмазах являются одним из наиболее достоверных источников

информации об условиях их образования, поскольку захватываются в процессе роста алмаза-матрицы из минералообразующей среды. Результаты исследований многочисленных включений в природных алмазах позволили выделить для них два основных типа парагенезиса: ультраосновной (У-тип) и эклогитовый (Э-тип) [15, 29]. Каждый тип характеризуется присутствием определённых минералов. Хромшпинелиды наряду с оливином пиропом и Сг-диопсидом относятся к У-типу, который резко преобладает в большинстве трубок Якутии [5]. В данной работе детально изучен химический состав включений хромшпинелидов из алмазов разных кимберлитовых трубок Якутии, включающий определение как главных (Cr_2O_3 , Al_2O_3 , MgO, FeO), так и микропримесных (ZnO, SiO_2 , V_2O_5 , MnO, NiO) элементов с целью выявления их особенностей.

На диаграммы Cr_2O_3 к Al_2O_3 и Cr_2O_3 к TiO_2 (рис. 4), отражающие особенности химического состава хромшпинелидов-включений в алмазах, помимо состава включений были также нанесены составы хромшпинелидов из микроксенолитов ультраосновных пород и концентратов из кимберлитовых трубок Якутии [17, 19]. Как уже было отмечено, включения хромшпинелидов характеризуются определёнными типоморфными особенностями по химическому составу,

2. Статистические данные по содержанию микропримесных элементов (мас.%) в составе включений хромшпинелидов в алмазе из кимберлитовых трубок Якутии

Месторождение (трубки)	MnO	ZnO	SiO ₂	NiO	V ₂ O ₃
Далдыно-Алакитский алмазоносный район					
Комсомольская	$\frac{0,17}{0,01}$	$\frac{0,07}{0,01}$	$\frac{0,10}{0,02}$	$\frac{0,10}{0,01}$	$\frac{0,24}{0,03}$
Сытыканская	$\frac{0,21}{0,01}$	$\frac{0,07}{0,01}$	$\frac{0,12}{0,01}$	$\frac{0,10}{0,00}$	$\frac{0,33}{0,01}$
Удачная	$\frac{0,20}{0,01}$	$\frac{0,07}{0,01}$	$\frac{0,11}{0,01}$	$\frac{0,08}{0,01}$	$\frac{0,28}{0,02}$
Айхал	$\frac{0,21}{0,01}$	$\frac{0,06}{0,01}$	$\frac{0,13}{0,02}$	$\frac{0,11}{0,01}$	$\frac{0,27}{0,03}$
Юбилейная	$\frac{0,19}{0,05}$	$\frac{0,07}{0,02}$	$\frac{0,11}{0,03}$	$\frac{0,08}{0,01}$	$\frac{0,27}{0,08}$
Мало-Ботуобинский алмазоносный район					
Мир	$\frac{0,22}{0,01}$	$\frac{0,08}{0,01}$	$\frac{0,08}{0,01}$	$\frac{0,09}{0,00}$	$\frac{0,33}{0,02}$
Интернациональная	$\frac{0,17}{0,02}$	$\frac{0,07}{0,01}$	$\frac{0,08}{0,01}$	$\frac{0,07}{0,01}$	$\frac{0,34}{0,02}$
XXIII съезда КПСС	$\frac{0,24}{0,02}$	$\frac{0,08}{0,02}$	$\frac{0,27}{0,03}$	$\frac{0,09}{0,01}$	$\frac{0,35}{0,07}$

Примечание. Над чертой указано среднее содержание элемента, под чертой – доверительный интервал ($x = 0,99$).

основные из которых выражаются в повышенном содержании Cr₂O₃ (> 62 мас.%) и пониженном содержании TiO₂, не превышающем 0,7 мас.% [16, 19, 32, 34].

Полученные нами результаты, приведённые на диаграмме (см. рис. 4), полностью соответствуют этим данным. Однако сопоставление содержания микропримесных элементов в изученных хромшпинелидах-включениях в алмазах из разных кимберлитовых трубок позволило выявить особенности состава минералообразующей среды в каждом конкретном случае. В пределах одной кимберлитовой трубки состав включений хромшпинелидов из алмазов может существенно варьировать (табл. 1). Например, в трубках Сытыканская и Комсомольская несколько включений характеризовались повышенным содержанием FeO (до 18 мас.%), а содержание V₂O₃ достигало 0,35 мас.%. Однако с помощью статистического анализа, проведённого с помощью ПО Microsoft Excel [20], были выявлены значимые различия в содержании микропримесных элементов в их составе в пределах каждого конкретного месторождения (табл. 2).

Результаты определения состава включений хромшпинелидов из серии алмазов представлены в таблице 2 и на рис. 5.

Предварительные результаты определения химического состава включений хромшпинелидов в алмазах из шести кимберлитовых трубок Якутии выявили некоторые их особенности по содержанию примесных элементов. Как показано на приведённых ниже гистограммах (см. рис. 5), хромшпинелиды из алмазов трубки Комсомольская характеризуются пониженным содержанием Si, V, Mn. В то время как в аналогичных включениях в алмазах из трубки Айхал наряду с пониженным содержанием ванадия отмечается повышенное содержание Ti (аналогично алмазам из трубок Мир и XXIII съезда КПСС). Необходимо отметить, что хромшпинелиды в алмазах практически из всех кимберлитовых трубок Мало-Ботуобинского района характеризуются существенно пониженным содержанием кремнезёма (трубки Мир, Интернациональная и XXIII съезда КПСС). Также выявлены некоторые вариации содержания магния в хромшпинелидах из алмазов изученных трубок. Например, существенное повышение состава отмечено в тр. Сытыканская, пониженная магниальность характерна для хромшпинелидов из тр. XXIII съезда КПСС.

Обсуждение и выводы. Хромшпинелиды являются постоянными минералами широкой серии ультраосновных пород, представленных дунитами,

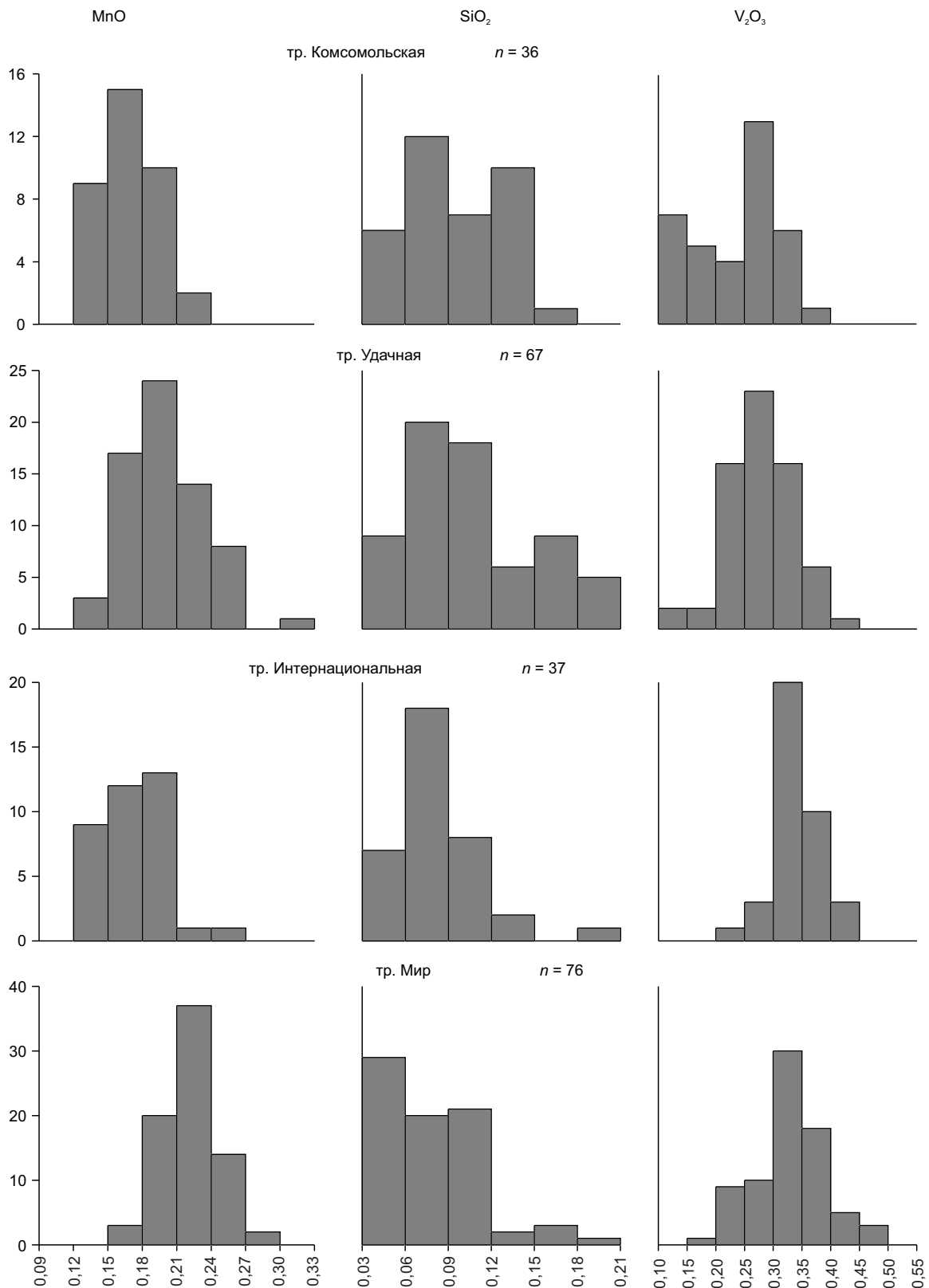


Рис. 5. Гистограммы содержания MnO, V₂O₃, SiO₂ (мас.%) в хромшпинелидах из алмазов кимберлитовых трубок Якутии:

Далдыно-Алакитский алмазоносный район: тр. Комсомольская (n = 36), тр. Удачная (n = 67); Мало-Ботуобинский алмазоносный район: тр. Мир (n = 76), тр. Интернациональная (n = 37)

гарцбургитами, лерцолитами в различных геологических обстановках и относящихся к различным фациям глубинности [17, 21, 23]. Особое разнообразие состава хромшпинелидов характерно для кимберлитов, где они представлены макро- и микрокристаллами в основной массе [34]. В ореолах рассеяния алмазов кроме кимберлитов источниками хромшпинелидов могут быть пикриты, альпинотипные ультрабазиты, щелочные базальтоиды, меймечиты, лампрофиры и другие породы [22].

Хромшпинелиды имеют важное значение для прогнозирования алмазоносных кимберлитов, так как некоторые из них кристаллизуются в поле термодинамической стабильности алмаза, что используется в качестве критерия алмазоносности кимберлитов [2, 3, 4, 11, 15, 16, 22, 26]. В кимберлитовых концентратах хромшпинелиды характеризуются широкими вариациями состава (в мас.%): Cr_2O_3 – 4–65, Al_2O_3 – 10–58, TiO_2 – 0,1–14 [1, 10]. Однако составы включений хромшпинелидов из алмазной матрицы фиксируются только в узкой области, по содержанию $Cr_2O_3 > 62$ мас.% и $Al_2O_3 < 7,5$ мас.%. Также они характеризуются низким содержанием титана ($< 0,7$ мас.%) и Fe_2O_3 . Хромиты именно такого состава в повышенном количестве отмечаются в алмазоносных трубках [16, 17, 28, 29, 31, 32, 36]. Однако высокохромистые хромшпинелиды такого со-

става установлены и в других типах пород. Таким образом, необходимы дополнительные критерии определения хромшпинелидов, непосредственно связанных с алмазом.

В представленной работе основной акцент был сделан на включения хромшпинелидов в алмазе, поскольку они являются важными индикаторными минералами на алмаз в ореолах его рассеяния. Алмазы из разных кимберлитовых трубок имеют свои специфические черты. Это свидетельствует о том, что условия образования и состав минералообразующей среды несколько отличались. Так, например, для трубки Комсомольская (Алакит-Мархинское кимберлитовое поле) характерно повышенное содержание алмазов октаэдрического габитуса (около 95%), для которых выявлены специфические черты в дефектно-примесном составе, а именно: высокие концентрации азота в А-форме и плэйтелетс при невысоком содержании $N_{tot} = 242 \pm 103$ ppm [7, 25]. А в тр. Айхал, расположенной всего в 15 км от тр. Комсомольская, картина совершенно иная. Для этой трубки характерны резорбированные алмазы переходного (от октаэдрического к ромбододекаэдрическому) габитуса, дефектный состав которых отличается низким содержанием плэйтелетс при $N_{tot} = 133 \pm 44$ ppm и значительным количеством водородных центров [24, 25].

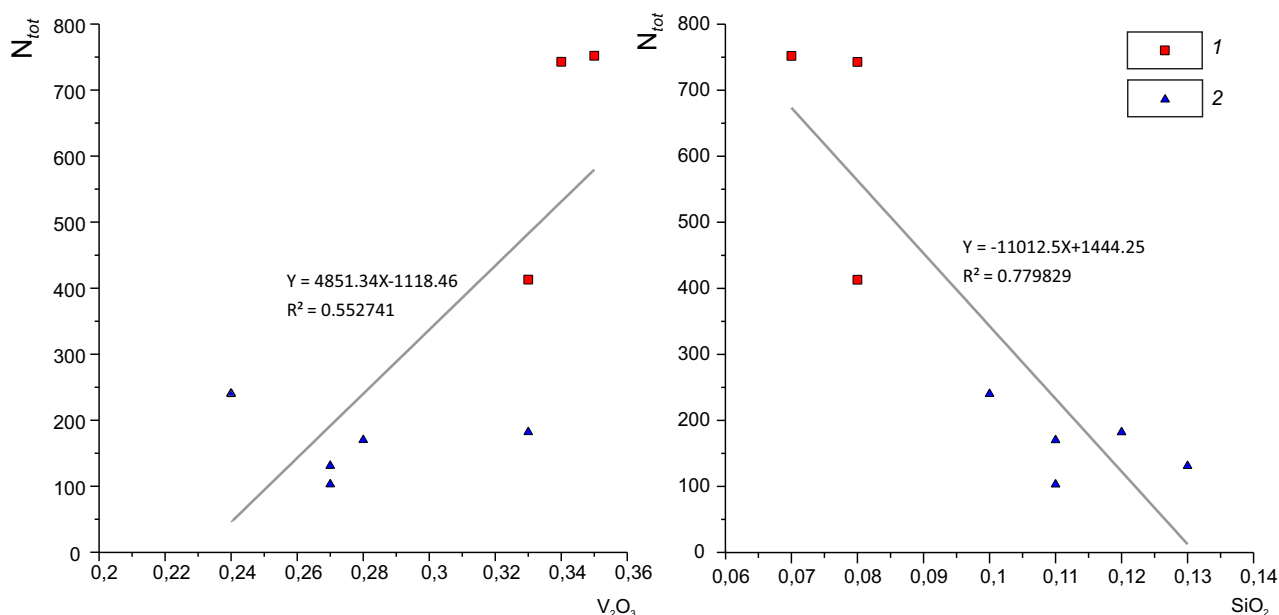


Рис. 6. Зависимость содержания V_2O_3 и SiO_2 в хромшпинелидах-включениях в алмазах из Мало-Ботуобинского (1) и Далдыно-Алакитского (2) алмазоносных районов Якутии от содержания примеси азота в алмазах. По данным Г. К. Хачатрян [24]

В трубках Интернациональная, XXIII съезда КПСС и Мир, относящихся к Мало-Ботуобинскому району, отмечено повышенное содержание рудных минералов в виде включений в алмазах [8]. По данным Г.К. Хачатрян, алмазы данных трубок отличаются повышенным содержанием азота $N_{\text{tot}} = 743 \pm 114$ ppm, $N_{\text{tot}} = 752 \pm 118$ ppm, $N_{\text{tot}} = 413 \pm 75$ ppm соответственно [24].

Анализ данных исследования, приведённого в работе, позволил выявить корреляционные закономерности между концентрациями элементов-примесей во включениях хромшпинелидов из алмазов кимберлитовых трубок Мало-Ботуобинского и Далдыно-Алакитского районов Якутии и содержанием структурных дефектов в алмазах из тех же самых трубок [24]. Как видно из рисунка 6, содержание ванадия в хромшпинелидах включений возрастает с ростом его общего содержания (N_{tot}). Примесь кремния в хромшпинелидах включений обнаруживает противоположную тенденция по отношению к распределению азота в алмазах (рис. 6).

Основными факторами, отвечающими за состав хромшпинелидов, являются состав родоначального расплава и термодинамические параметры его кристаллизации. Анализ химического состава хромшпинелидов из алмазов кимберлитов Якутии показал, что все они относятся, в первую очередь, к магнезиохромитам с переменным количеством изоморфных микропримесей цинка, ванадия, титана, марганца. Такой состав примесей в хромшпинелидах, включённых в алмазах из разных кимберлитовых трубок, расположенных в двух территориально разделённых алмазоносных районах, указывает на особенности минералообразующего расплава, из которого эти хромшпинелиды кристаллизовались, и в более ши-

роком варианте отражает состав мантийного вещества под каждым конкретным кимберлитовым телом.

Особую роль играют парагенетические ассоциации минеральных включений – преимущественно клинопироксена, оливина и пироба, – находящихся в одном алмазе-матрице [36, 37]. В данной работе одновременно с магнезиохромитом были зафиксированы оливин и пироб в одном алмазе из кимберлитовых трубок Юбилейная и Мир, по которым можно оценить *P-T* параметры. Однако эпизодичность таких находок на данном этапе работы не позволяет сделать какие-либо выводы и требует накопления в дальнейшем дополнительного материала.

Полученные нами предварительные результаты показали, что хромшпинелиды в алмазах из кимберлитовых трубок разных регионов характеризуются различным содержанием элементов-примесей в своём составе. Так, например, в алмазах из трубки Комсомольская присутствуют включения хромшпинелидов с более низким содержанием ванадия и марганца, а для хромшпинелидов из алмазов трубок Мало-Ботуобинского района (трубки Мир, Интернациональная и XXIII съезда КПСС) характерны очень низкая примесь кремнезёма и повышенное содержание ванадия. Выявленные в данной работе различия в составе хромшпинелидов-включений в алмазах свидетельствует о наличии локальной неоднородности мантийного вещества в пределах одного кимберлитового поля. Эти данные подтверждают мнение большинства исследователей о гетерогенности состава мантийного вещества в разных районах Якутской алмазоносной провинции.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 20–05–00293) и по государственному заданию ИГМ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Похиленко Н. П. Морфология и морфогенез индикаторных минералов кимберлитов. – Новосибирск : Издательский дом Манускрипт, 2001. – 276 с.
2. Афанасьев В. П., Похиленко Н. П., Логвинова А. М., Зинчук Н. Н., Ефимова Э. С., Сафьянников В. И., Красавчиков В. О., Подгорных Н. М., Пругов В. П. Особенности морфологии и состава некоторых хромшпинелидов алмазоносных площадей в связи с проблемой «ложных» индикаторов кимберлитов // Геология и геофизика. – 2000. – Т. 41 (12). – С. 1729–1741.
3. Богатиков О. А., Гаранин В. К., Кононова В. А., Кудрявцева Г. П., Васильева Е. Р., Вержак В. В., Веричев Е. М., Парсаданян К. С., Посухова Т. В. [и др.] Архангельская алмазоносная провинция (геология, петрография, геохимия и минералогия). – М. : Изд-во МГУ, 1999. – 524 с.
4. Боткунов А. И., Гаранин В. К., Крот А. Н., Кудрявцева Г. П. Роль включений в минералах спутниках алмаза в познании генезиса глубинных пород // Проблема кимберлитового магматизма. – Новосибирск, 1989. – С. 111–119.
5. Ефимова Э. С., Соболев Н. В. Распространенность кристаллических включений в алмазах Якутии // Доклады Академии наук СССР. – 1977. – Т. 227 (6). – С. 1475–1478.
6. Ефимова Э. С., Соболев Н. В., Поспелова Л. Н. Включения сульфидов в алмазах и особенности их парагенезиса // Записки ВМО. – 1983. – Т. 112. – С. 300–310.

7. *Зинчук Н. Н., Коптиль В. И.* Особенности алмазов из кимберлитовых тел Сибирской платформы // Геология алмазов – настоящее и будущее. – Воронеж : ВГУ, 2005. – С. 1000–1020.
8. *Зинчук Н. Н., Коптиль В. И.* Типоморфизм алмазов Сибирской платформы. – М. : Недра-Бизнесцентр, 2003. – 603 с.
9. *Илупин И. П.* Высокохромистые хромиты из кимберлитов и ультрабазитов – сходства и различия // Руды и металлы. – 2002. – № 4. – С. 54–58.
10. *Илупин И. П., Каминский Ф. В., Францессон Е. В.* Геохимия кимберлитов. – М. : Недра, 1978. – 352 с.
11. *Лазько Е. Е.* Минералы-спутники алмаза и генезис кимберлитовых пород. – М. : Недра, 1979. – 192 с.
12. *Логвинова А. М., Серебрянников А. О., Соболев Н. В.* Вариации химического состава и редкие парагенезисы множественных включений магнезиохромита в алмазах Якутии // Доклады РАН. – 2021. – Т. 501 (1). – С. 26–33.
13. *Орлов Ю. Л.* Минералогия алмаза. – М. : Наука, 1973. – 264 с.
14. *Ровша В. С., Илупин И. П.* Хромшпинели в кимберлитах Якутии // Геология и геофизика. – 1970. – № 2. – С. 47–56.
15. *Соболев Н. В.* Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. – Новосибирск : Наука, 1974. – 263 с.
16. *Соболев Н. В.* О минералогических критериях алмазоносности // Геология и геофизика. – 1971. – № 3. – С. 70–80.
17. *Соболев Н. В., Логвинова А. М.* Включения пиропы в хромшпинелидах из кимберлитов и лампроитов и их значение для оценки парагенезиса и глубинности формирования // Доклады Академии наук. – 2004. – Т. 398 (6). – С. 786–791.
18. *Соболев Н. В., Логвинова А. М., Николенко Е. И., Лобанов С. С.* Минералогические критерии алмазоносности верхнетриасовых россыпей северо-восточной окраины Сибирской платформы // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54, № 8. – С. 1162–1178.
19. *Соболев Н. В., Похиленко Н. П., Лаврентьев Ю. Г., Усова Л. В.* Особенности состава хромшпинелидов из алмазов и кимберлитов Якутии // Геология и геофизика. – 1975. – Т. 16 (11). – С. 7–24.
20. *Фадеева Л. Н.* Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие / Л. Н. Фадеева, А. В. Лебедев; под ред. Л. Н. Фадеевой. – М. : Рид Групп, 2011. – 496 с.
21. *Францессон Е. В.* Петрология кимберлитов // М. : Недра, 1968. – 199 с.
22. *Харькив А. Д., Зинчук Н. Н., Крючков А. И.* Геолого-генетические основы шлихоминералогического метода поисков алмазных месторождений. – М. : Недра, 1995. – 348 с.
23. *Харькив А. Д., Зинчук Н. Н., Крючков А. И.* Коренные месторождения алмазов мира. – М. : Недра, 1998. – 556 с.
24. *Хачатрян Г. К.* Азот и водород в кристаллах алмаза в аспекте геолого-генетических и прогнозно-поисковых проблем алмазных месторождений // Отечественная геология. – 2013. – № 2. – С. 29–42.
25. *Хачатрян Г. К.* Азотные и водородные центры в алмазе, их генетическая информативность и значение для решения прогнозно-поисковых задач // Руды и металлы. – 2009. – № 4. – С. 73–80.
26. *Хмельков А. М.* Некоторые особенности химизма минералов-спутников алмаза и использование их при сравнении и идентификации отдельных объектов // Проблемы алмазной геологии и некоторые пути их решения. – Воронеж: ВГУ, 2001. – С. 434–437.
27. *Boyd S. R., Mathey D. P., Pillinger C. T., Milledge H. J., Mendelsohn M., Seal M.* Multiple growth events during diamond genesis: an integrated study of carbon and nitrogen isotopes and nitrogen aggregation state in coated stones // Earth and Planetary Science Letters. – 1987. – V. 86. – P. 341–353.
28. *Griffin W. L., Ryan C. G., Gurney J. J., Sobolev N. V.* Chromite macrocrysts in kimberlites and lamproites: geochemistry and origin // Extended Abstracts of Fifth International Kimberlite Conference, Brazil. – 1994. – V. 2. – P. 366–377.
29. *Gurney J. J., Harris J. W., Rickard R. S.* Silicate and oxide inclusions in diamonds from the Finsch kimberlite pipe // Extended Abstracts of Fifth International Kimberlite Conference, Brazil. – 1977. – V. 2. – P. 123–125.
30. *Harris J. W.* Diamond geology // The properties of natural and synthetic diamond. – London : Academic Press, 1992, P. 345–393.
31. *Meyer H. O. A.* Inclusions in diamonds // Mantle xenoliths / Nixon P. H. (ed). – Chichester : J. Willey and Sons, 1987. – P. 501–522.
32. *Meyer H. O. A., Boyd F. R.* Composition and origin of crystalline inclusions in natural diamonds // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1972. – V. 36 (11). – P. 1255–1273.
33. *Meyer H. O. A., McCallum M. E.* Mineral inclusions in diamonds from the Sloan kimberlites, Colorado // Journal of Geology. – 1986. – V. 94. – P. 600–612.
34. *Mitchell R. H.* Kimberlites: Mineralogy, geochemistry and petrology. – N.Y., London : Plenum Press, 1986. – 442 p.
35. *Smith E. M., Helmstaedt H. H., Flemming R. L.* Survival of the brown color in diamonds during storage in the subcontinental lithospheric mantle // The Canadian Mineralogist. – 2010. – V. 48 – P. 571–582.
36. *Sobolev N. V., Kaminsky F. V., Griffin W. L., Yefimova E. S., Win T. T., Ryan C. G., Botkunov A. I.* Mineral inclusions in diamonds from the Sputnik kimberlite pipe, Yakutia // Lithosphere. – 1997. – V. 39. – P. 135–157.
37. *Sobolev N. V., Lavrent'ev Yu. G., Pokhilenko N. P., Usova L. V.* Chrome-rich garnets of Yakutia and their parageneses // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 1973. – V. 40 (1). – P. 39–52.
38. *Stachel T., Harris J. W.* The origin of cratonic diamonds – constraints from mineral inclusions // Ore Geology Reviews. – 2008. – V. 34. – P. 5–32.
39. *Taylor W. R., Jaques A. L., Ridd M.* Nitrogen-defect aggregation characteristics of some Australasian diamonds: Time-temperature constraints on the source regions of pipe and alluvial diamonds // American Mineralogist. – 1990. – V. 75. – P. 1290–1310.

REFERENCES

1. *Afanas'yev V. P., Zinchuk N. N., Pokhilenko N. P.* Morfologiya i morfogenez indikatornykh mineralov kimberlitov [Morphology and morphogenesis of kimberlite indicator minerals]. Novosibirsk, Manuskript publ., 2001, 276 p. (In Russ.)
2. *Afanas'yev V. P., Pokhilenko N. P., Logvinova A. M., Zinchuk N. N., Yefimova E. S., Saf'yannikov V. I., Krasavchikov V. O., Podgornykh N. M., Prugov V. P.* Osobennosti morfologii i sostava nekotorykh khromshpinelidov almazonosnykh ploshchadey v svyazi s problemoy "lozhnykh" indikatorov kimberlitov [Features of the morphology and composition of some chrome-spinels of diamond-bearing areas in connection with the problem of "false" indicators of kimberlites]. *Geologiya i geofizika*, 2000, V. 41 (12), pp. 1729–1741. (In Russ.)
3. *Bogatikov O. A., Garanin V. K., Kononova V. A., Kudryavtseva G. P., Vasil'yeva Ye. R., Verzhak V. V., Verichev Ye. M., Parsadanyan K. S., Posukhova T. V.* [et al.] Arkhangel'skaya almazonosnaya provintsia (geologiya, petrografiya, geokhimiya i mineralogiya) [Arkhangel'sk diamondiferous province (geology, petrography, geochemistry and mineralogy)], Moscow, MGU publ., 1999, 524 p. (In Russ.)
4. *Botkunov A. I., Garanin V. K., Krot A. N., Kudryavtseva G. P.* Rol' vklucheniya v mineralakh sputnikakh almaza v poznanii genezisa glubinykh porod [The role of inclusions in minerals satellites of diamond in the knowledge of the genesis of deep rocks]. *Problema kimberlitovogo magmatizma*, Novosibirsk, 1989, pp. 111–119. (In Russ.)
5. *Yefimova E. S., Sobolev N. V.* Rasprostranennost' kristallicheskiy vklucheniya v almazakh Yakutii [The prevalence of crystalline inclusions in diamonds of Yakutia]. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1977, V. 227 (6), pp. 1475–1478. (In Russ.)
6. *Yefimova E. S., Sobolev N. V., Pospelova L. N.* Vklucheniya sul'fidov v almazakh i osobennosti ikh paragenезisa [Sulfide inclusions in diamonds and features of their paragenesis]. *Zapiski VMO*, 1983, V. 112, pp. 300–310. (In Russ.)
7. *Zinchuk N. N., Koptil' V. I.* Osobennosti almazov iz kimberlitovykh tel Sibirskoy platformy [Peculiarities of diamonds from kimberlite bodies of the Siberian Platform]. *Geologiya almazov – nastoyashcheye i budushcheye*, Voronezh, VGU publ., 2005, pp. 1000–1020. (In Russ.)
8. *Zinchuk N. N., Koptil' V. I.* Tipomorfizm almazov Sibirskoy platformy [Typomorphism of diamonds of the Siberian platform]. Moscow, Nedra-Biznestsentr publ., 2003, 603 p. (In Russ.)
9. *Ilupin I. P.* Vysokokhromistyye khromity iz kimberlitov i ul'trabazitov – skhodstva i razlichiya [High-chromium chromites from kimberlites and ultramafic rocks – similarities and differences]. *Rudy i metally* [Ores and metals], 2002, No. 4, pp. 54–58. (In Russ.)
10. *Ilupin I. P., Kaminskiy F. V., Frantsesson Ye. V.* Geochemiya kimberlitov [Geochemistry of kimberlites], Moscow, Nedra publ., 1978, 352 p. (In Russ.)
11. *Laz'ko Ye. Ye.* Mineraly-sputniki almaza i genezis kimberlitovykh porod [Minerals-satellites of diamond and the genesis of kimberlite rocks]. Moscow, Nedra publ., 1979, 192 p. (In Russ.)
12. *Logvinova A. M., Serebryannikov A. O., Sobolev N. V.* Variatsii khimicheskogo sostava i redkiye paragenезisy mnozhestvennykh vklucheniya magneziokhromita v almazakh Yakutii [Variations in chemical composition and rare parageneses of multiple inclusions of magnesiochromite in diamonds of Yakutia]. *Doklady RAN*, 2021, V. 501 (1), pp. 26–33. (In Russ.)
13. *Orlov Yu. L.* Mineralogiya almaza [Mineralogy of diamond], Moscow, Nauka publ., 1973, 264 p. (In Russ.)
14. *Rovsha V. S., Ilupin I. P.* Khromshpineli v kimberlitakh Yakutii [Chrome spinels in kimberlites of Yakutia]. *Geologiya i geofizika*, 1970, No. 2, pp. 47–56. (In Russ.)
15. *Sobolev N. V.* Glubinnyye vklucheniya v kimberlitakh i problema sostava verkhney mantii [Deep inclusions in kimberlites and the problem of the composition of the uPer mantle]. Novosibirsk, Nauka publ., 1974, 263 p. (In Russ.)
16. *Sobolev N. V.* O mineralogicheskikh kriteriyakh almazonosnosti [On the mineralogical criteria of diamond content]. *Geologiya i geofizika*, 1971, No. 3, pp. 70–80. (In Russ.)
17. *Sobolev N. V., Logvinova A. M.* Vklucheniya piropa v khromshpinelidakh iz kimberlitov i lamproitov i ikh znacheniye dlya otsenki paragenезisa i glubinnosti formirovaniya [Pyrope inclusions in chrome spinels from kimberlites and lamproites and their significance for assessing the paragenesis and depth of formation]. *Doklady Akademii nauk*, 2004, V. 398 (6), pp. 786–791. (In Russ.)
18. *Sobolev N. V., Logvinova A. M., Nikolenko Ye. I., Lobanov S. S.* Mineralogicheskiye kriterii almazonosnosti verkhnetriasovykh rossypey severo-vostochnoy okrainy Sibirskoy platformy [Mineralogical criteria for the diamond content of UPer Triassic placers in the northeastern margin of the Siberian Platform]. *Geologiya i geofizika*, 2013, V. 54, No. 8, pp. 1162–1178. (In Russ.)
19. *Sobolev N. V., Pokhilenko N. P., Lavrent'yev Yu. G., Usova L. V.* Osobennosti sostava khromshpinelidov iz almazov i kimberlitov Yakutii [Features of the composition of chrome-spinels from diamonds and kimberlites of Yakutia]. *Geologiya i geofizika*, 1975, V. 16 (11), pp. 7–24. (In Russ.)
20. *Fadeyeva L. N.* Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika: uchebnoye posobiye [Probability theory and mathematical statistics: textbook]. Moscow, Rid GruP publ., 2011, 496 p. (In Russ.)
21. *Frantsesson Ye. V.* Petrologiya kimberlitov [Petrology of kimberlites]. Moscow, Nedra publ., 1968, 199 p. (In Russ.)
22. *Khar'kiv A. D., Zinchuk N. N., Kryuchkov A. I.* Geologogeneticheskiye osnovy shlichomineralogicheskogo metoda poiskov almaznykh mestorozhdeniy [Geological and genetic foundations of the schlichomineralogical method of prospecting for diamond deposits]. Moscow, Nedra publ., 1995, 348 p. (In Russ.)
23. *Khar'kiv A. D., Zinchuk N. N., Kryuchkov A. I.* Korennyye mestorozhdeniya almazov mira [Primary diamond

- deposits of the world]. Moscow, Nedra publ., 1998, 556 p. (In Russ.)
24. *Khachatryan G. K.* Azot i vodorod v kristallakh almaza v aspekte geologo-geneticheskikh i prognozno-poiskovykh problem almaznykh mestorozhdeniy [Nitrogen and hydrogen in diamond crystals in the aspect of geological, genetic and forecasting problems of diamond deposits]. *Otechestvennaya geologiya* [Domestic Geology], 2013, No. 2, pp. 29–42. (In Russ.)
 25. *Khachatryan G. K.* Azotnyye i vodorodnyye tsentry v almaze, ikh geneticheskaya informativnost' i znachenie dlya resheniya prognozno-poiskovykh zadach [Nitrogen and hydrogen centers in diamond, their genetic information content and significance for solving predictive and search problems]. *Rudy i metally* [Ores and metals], 2009, No. 4, pp. 73–80. (In Russ.)
 26. *Khmel'kov A. M.* Nekotoryye osobennosti khimizma mineralov-sputnikov almaza i ispol'zovaniye ikh pri sravnenii i identifikatsii ot del'nykh ob'yektov [Some features of the chemistry of diamond satellite minerals and their use in comparing and identifying individual objects]. *Problemy almaznoy geologii i nekotoryye puti ikh resheniya*, Voronezh, VGU publ., 2001, pp. 434–437. (In Russ.)
 27. *Boyd S. R., Mathey D. P., Pillinger C. T., Milledge H. J., Mendelsohn M., Seal M.* Multiple growth events during diamond genesis: an integrated study of carbon and nitrogen isotopes and nitrogen aggregation state in coated stones, *Earth and Planetary Science Letters*, 1987, V. 86, pp. 341–353.
 28. *Griffin W. L., Ryan C. G., Gurney J. J., Sobolev N. V.* Chromite macrocrysts in kimberlites and lamproites: geochemistry and origin, *Extended Abstracts of Fifth International Kimberlite Conference, Brazil, 1994*, V. 2, pp. 366–377.
 29. *Gurney J. J., Harris J. W., Rickard R. S.* Silicate and oxide inclusions in diamonds from the Finsch kimberlite pipe, *Extended Abstracts of Fifth International Kimberlite Conference, Brazil, 1994*, V. 2, pp. 123–125.
 30. *Harris J. W.* *Diamond geology, The properties of natural and synthetic diamond*, London, Academic Press, 1992, pp. 345–393.
 31. *Meyer H. O. A.* Inclusions in diamonds, *Mantle xenoliths*, Nixon P. H. (ed), Chichester, J. Wiley and Sons, 1987, pp. 501–522.
 32. *Meyer H. O. A., Boyd F. R.* Composition and origin of crystalline inclusions in natural diamonds, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1972, V. 36 (11), pp. 1255–1273.
 33. *Meyer H. O. A., McCallum M. E.* Mineral inclusions in diamonds from the Sloan kimberlites, Colorado, *Journal of Geology*, 1986, V. 94, pp. 600–612.
 34. *Mitchell R. H.* *Kimberlites: Mineralogy, geochemistry and petrology*, N.Y., London, Plenum Press, 1986, 442 p.
 35. *Smith E. M., Helmstaedt H. H., Flemming R. L.* Survival of the brown color in diamonds during storage in the subcontinental lithospheric mantle, *The Canadian Mineralogist*, 2010, V. 48 – pp. 571–582.
 36. *Sobolev N. V., Kaminsky F. V., Griffin W. L., Yefimova E. S., Win T. T., Ryan C. G., Botkunov A. I.* Mineral inclusions in diamonds from the Sputnik kimberlite pipe, Yakutia, *Lithosphere*, 1997, V. 39, pp. 135–157.
 37. *Sobolev N. V., Lavrent'ev Yu. G., Pokhilenko N. P., Usova L. V.* Chrome-rich garnets of Yakutia and their parageneses, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1973, V. 40 (1), pp. 39–52.
 38. *Stachel T., Harris J. W.* The origin of cratonic diamonds – constraints from mineral inclusions, *Ore Geology Reviews*, 2008, V. 34, pp. 5–32.
 39. *Taylor W. R., Jaques A. L., Ridd M.* Nitrogen-defect aggregation characteristics of some Australasian diamonds: Time-temperature constraints on the source regions of pipe and alluvial diamonds, *American Mineralogist*, 1990, V. 75, pp. 1290–1310.

Статья поступила в редакцию 15.08.22; одобрена после рецензирования 18.10.22; принята к публикации 08.11.22.
The article was submitted 15.08.22; approved after reviewing 18.10.22; accepted for publication 08.11.22.