

## Типоморфизм алмазов из россыпей Присаянья в связи с проблемой их коренных источников

С применением метода ИК-Фурье спектроскопии впервые исследованы структурные примеси и дефекты в алмазах из россыпей Присаянья. Среди них преобладают индивиды (главная популяция) с пониженными общим содержанием азота и степенью его агрегации в кристаллах. В большинстве своём эти алмазы характеризуются послойным строением граней (октаэдры, ромбододекаэдры и переходные между ними формы) и сходны с алмазами из трубок Далдыно-Алакитского района Якутии. Высказывается предположение, что коренными источниками алмазов главной популяции из россыпей Присаянья были тела кимберлитов.

*Ключевые слова:* алмаз, кристалл, структурные примеси, азот, водород, внутреннее строение, ИК-спектроскопия, россыпи, кимберлиты, лампроиты.

ХАЧАТРЯН ГАЛИНА КАРЛЕНОВНА, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, khachatryan\_g\_k@mail.ru

АНАШКИНА НАТАЛЬЯ ЕВГЕНЬЕВНА, кандидат технических наук, научный сотрудник, anashkina@tsnigri.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный научно-исследовательский геолого-разведочный институт цветных и благородных металлов» (ФГБУ «ЦНИГРИ»), г. Москва

## Typomorphism of placer diamonds from the Near-Sayany Region in connection with the problem of their primary sources

G. K. KHACHATRYAN, N. E. ANASHKINA

Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals, Moscow

Structural impurities and defects in diamonds from placer deposits of the Near-Sayany Region were first investigated using the IR-Fourier spectroscopy technique. The diamonds are dominated by individuals (the main population) with relatively low both the total nitrogen contents and the degree of its aggregation in the crystals. For the most part, these diamonds are characterized by a laminated structure of the faces (octahedra, rhombododecahedra, and their transitional forms) and are similar to diamonds from pipes of the Daldyn-Alakit district in Yakutia. It is suggested that the primary sources of diamonds of the main population from the placers of the Near-Sayany Region were represented by kimberlite bodies.

*Key words:* diamond, crystal, structural impurities, nitrogen, hydrogen, internal structure, IR spectroscopy, placers, kimberlites, lamproites.

Алмазы в Присаянье впервые были обнаружены в середине прошлого столетия сотрудниками ЦНИГРИ в аллювии р. Уда. В дальнейшем на реках Туманшет-Бирюсинского междуречья и других (рис. 1) были найдены несколько сотен кристаллов массой от 10 до 1500 мг. Коренные источники алмазов из россыпей Присаянья до сих пор не установлены, причём существуют разные представления об их типе. С точки зрения К. Н. Егорова и его коллег [3], россыпи сформировались за счёт тел кимберлитов и лампроитов

разного состава, а В. П. Афанасьев с соавторами [1] в качестве источника россыпей рассматривает Ингашинские алмазоносные жильные тела флогопит-оливиновых лампроитов (см. рис. 1).

Об условиях образования и коренных источниках алмазов из россыпей Присаянья можно судить на основе типоморфных свойств этих кристаллов, которые в настоящее время мало изучены. Ранее были охарактеризованы главным образом внешние признаки кристаллов – гранулометрия, морфология, скульптуры поверхности, окраска

и др. [4]. Согласно этим данным, в россыпях кристаллы с послойным строением граней (октаэдр, ромбододекаэдр и переходные между ними формы) находятся примерно в равных соотноше-

ниях с додекаэдроидами при небольшом преобладании последних (соответственно 40,7:48,9%). В подчинённом количестве встречаются октаэдроида, а также кристаллы кубического габитуса

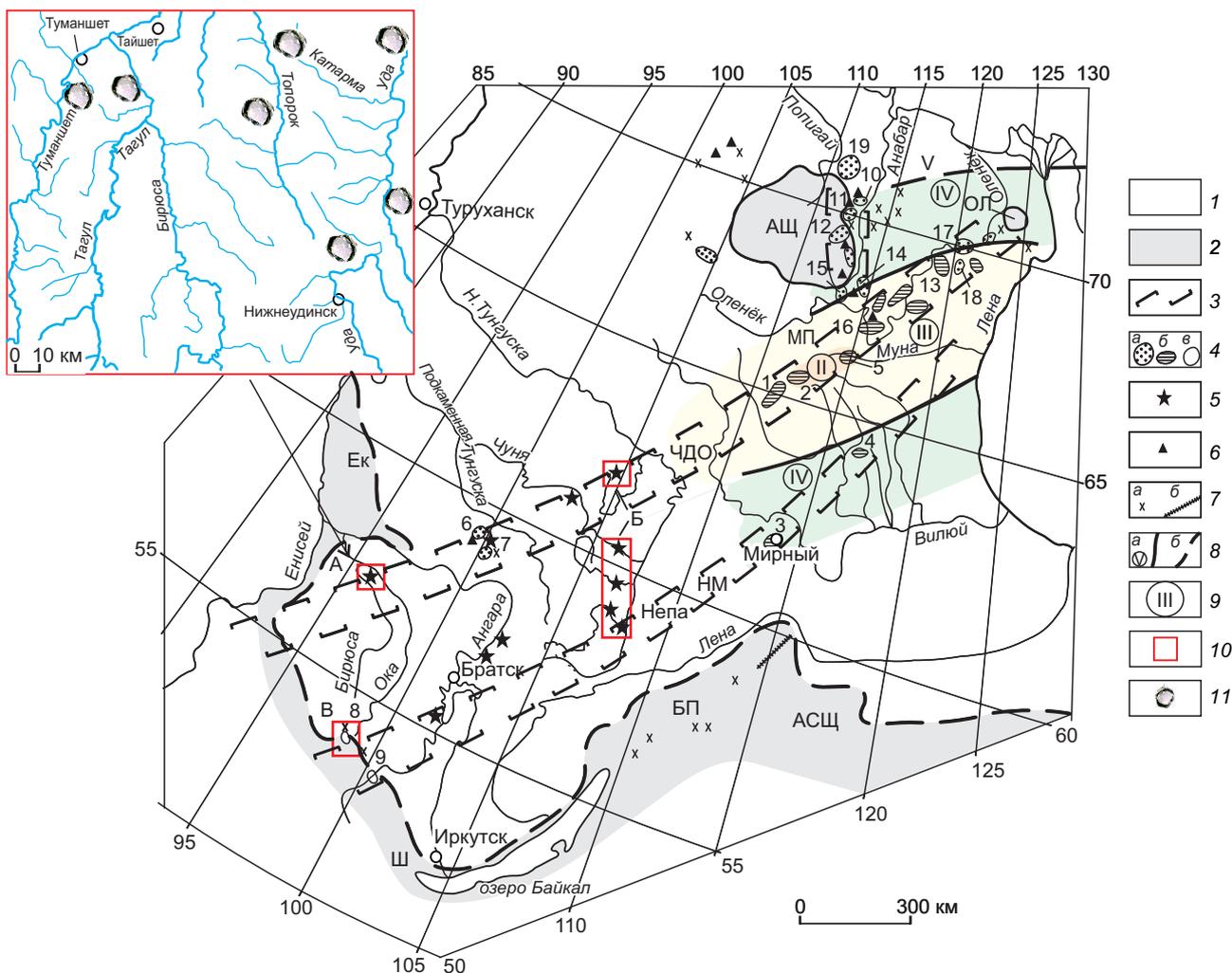


Рис. 1. Алмазоносные объекты Иркутской области на территории Сибирской платформы и Прибайкалья:

1 – чехол Сибирской платформы; 2 – щиты и их фрагменты (AR-PR): АЩ – Анабарский, ОЛ – Оленёкский, АСЩ – Алдано-Становой, БП – Байкало-Патомский, Ш – Шарыжалгайский, Ек – фрагмент Енисейского края; 3 – контуры линейментов, определяющих минерагенические зоны: ЧДО – Чадобецко-Далдыно-Оленёкского, НМ – Накынско-Мирнинского; 4 – контуры алмазоносных районов и полей с кимберлитами и родственными породами: а – мезозойского (MZ), б – палеозойского (PZ), в – допалеозойского возрастов (1 – Алакит-Мархинского, 2 – Далдынского, 3 – Мирнинского, 4 – Накынского, 5 – Мунского, 6 – Тайчикуно-Нембинского, 7 – Чадобецкого, 8 – Белозиминского, 9 – Окинского); 10 – Орто-Ыаргинского, 11 – Нижнекуонапского, 12 – Среднекуонапского, 13 – Восточно-Укукитского, 14 – Западно-Укукитского, 15 – Куранахского, 16 – Чомурдахского, 17 – Куойского, 18 – Молодинского, 19 – Попигайского; 5 – алмазы в аллювии; 6 – тела карбонатитов; 7 – тела щелочного и щёлочно-ультраосновного составов (а – массивы, б – пояс даек лампрофиров); 8 – границы зон распространения главных популяций алмаза (II-V) из тел кимберлитов (а) и из россыпей (б); 9 – области распространения алмазных популяций определённого типа; 10 – алмазоносные объекты Иркутской области: А – россыпи Присяня, Б – россыпи Нижней Тунгуски, В – Ингашинские тела лампроитов; 11 – некоторые известные места находок алмазов Присяня

и балласы. Наиболее распространены бесцветные кристаллы, при этом на поверхности некоторых из них имеются зелёные и бурые пятна пигментации. Реже отмечаются алмазы с зелёно-голубой, лилово-коричневой, жёлтой, бурой и фиолетовой окрасками. Характерная особенность алмазов из россыпей Присаянья – их высокая сохранность, причём доля целых, неповреждённых кристаллов составляет порядка 55%. Это может указывать на близость коренных источников алмазов россыпей, в случае если транспортировка алмазов осуществлялась водными потоками.

Наряду с россыпями Присаянья в Иркутской области известны россыпи алмазов в бассейне р. Нижняя Тунгуска (см. рис. 1). Алмазы упомянутых россыпей близки по кристалломорфологии, сохранности и другим типоморфным характеристикам [4].

Морфологические особенности кристаллов отражают лишь заключительную стадию их эволюции, поэтому для более обоснованного суждения о генезисе алмазов Присаянских россыпей и типе их коренных источников необходимо использовать весь комплекс генетически информативных типоморфных признаков алмаза. К ним относятся ранее не изученные: распределение структурных примесей в кристаллах, позволяющее оценивать температурные и глубинные условия алмазообразования [7], а также внутреннее строение кристаллов, отражающее механизм и историю их роста.

*Образцы и методы исследования.* С применением метода ИК-Фурье спектроскопии проанализированы 57 кристаллов алмаза из россыпей Присаянья средней массой 10 мг размером  $-2+1$  и  $-4+2$  мм. Большинство из них – бесцветные, также встречаются камни с дымчатой, бурой, красно-коричневой, желтоватой и зеленоватой окрасками. По кристалломорфологическим характеристикам (см. рис. 2 и таблицу) изученные образцы сходны с кристаллами, описанными в работе [4].

Метод ИК-спектроскопии позволяет оценивать содержание структурных дефектов и примесей в алмазах. Среди них наиболее информативными в генетическом плане являются азот в форме пар (А)-, одиночных (N)- и тетраэдрически сгруппированных (В) атомов, которые замещают углерод в кристаллической решётке алмаза, а также водород (Н) и плейтлетс (Р) – пластинчатые дефекты интерстициальной природы [5, 11, 13, 16, 19]. Кон-

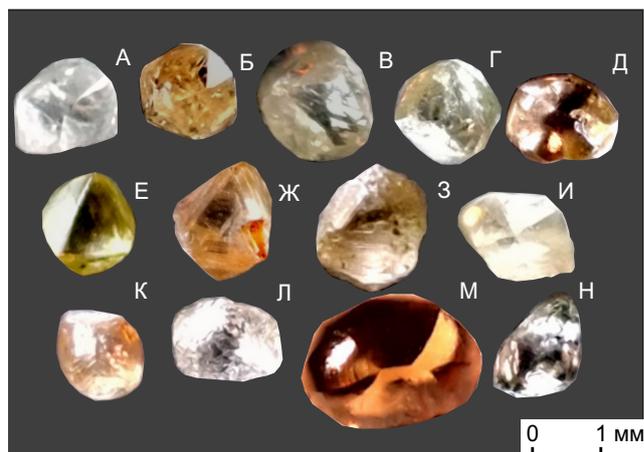


Рис. 2. Алмазы из россыпей Присаянья:

А–Д, Л–Н – додекаэдровиды (№№ 125, 130, 47, 124, 129, 150, 251, 151 соответственно); Е–К – кристаллы ряда октаэдр–ромбододекаэдр (№№ 142, 148, 144, 153, 147 соответственно)

центрация азота оценивалась количественно с использованием методики, изложенной нами ранее [8], а содержание водорода и плейтлетс в условных единицах – по коэффициентам поглощения спектральных линий около  $3107$  и  $1365$   $\text{см}^{-1}$  соответственно.

Большинство ИК-спектров получено на ИК-Фурье спектрометре Nicolet 380 с помощью микроскопа Centaurus компании THERMO Scientific в диапазоне  $650$ – $4000$   $\text{см}^{-1}$  со спектральным разрешением  $2$ – $4$   $\text{см}^{-1}$ . Более крупные кристаллы ( $-4+2$  мм) анализировались в диапазоне  $400$ – $4000$   $\text{см}^{-1}$  на том же спектрометре с использованием микроскопической приставки фирмы Carl Zeiss, Jena.

Внутреннее строение алмазов изучалось на примере одного из кристаллов (№ 157), из которого была изготовлена плоскопараллельная пластина. Исследование проводилось методом цветной катодной люминесценции на растровом электронном микроскопе «Стереоскан МК-II А» на физическом факультете МГУ им. М. В. Ломоносова.

*Результаты исследований.* По данным ИК-спектроскопии (см. таблицу), в изученной коллекции алмазов преобладают (~30% от всех) кристаллы с относительно низким суммарным содержанием азота ( $N_{\text{tot}}$ ), не превышающим  $110$  at.ppm. В этих кристаллах за небольшим исключением (№№ 131, 143, 147, 148) основной формой вхождения азота

Концентрации структурных дефектов в алмазах из россыпей Присяня

№ образца	Габитус кристалла	Содержание азота, ат.ррм			%NB	P, см <sup>-1</sup>	H, см <sup>-1</sup>
		NA	NB	Ntot			
47	д	>150	570	–	–	12,3	1,3
52	д	169	142	311	46	4,4	0,1
77	о	18	13	31	42	0,1	0,0
78	д	152	240	392	61	17,9	0,5
79	о	85	98	183	54	7,4	0,6
80	д	493	214	707	30	13,5	0,1
81	д	134	117	251	47	9,9	0,2
82	д	45	187	232	81	12,6	1,6
83	р/д	90	208	298	70	14,0	0,2
84	д	129	91	220	41	7,3	0,3
85	о	132	70	202	35	0,0	0,0
86	р/д	113	202	315	64	14,6	0,9
87	д	372	436	808	54	27,5	2,3
89	о	67	27	94	29	2,1	0,7
90	д	36	9	45	20	0,2	0,5
92	д	148	41	189	22	3,5	0,1
93	о	238	182	420	43	7,7	0,3
94	р/д	104	2	106	2	0,0	0,0
119	д	258	173	431	40	10,6	0,5
120	д?	114	114	228	50	9,6	1,9
121	д	298	270	568	48	18,5	1,4
122	д	170	198	368	54	14,7	1,1
124	д	>140	332	–	–	10,5	6,3
125	д	>160	151	–	–	8,2	0,1
126	р/д	121	110	231	48	9,3	0,3
127	д	285	175	460	38	7,1	0,2
128	о	84	158	242	65	12,1	2,1
129	д	157	193	350	55	13,3	1,7
130	д	221	746	967	77	17,2	6,7
131	–	25	32	57	56	2,2	0,5
133	д	125	358	483	74	12,9	0,4
134	д	202	168	370	45	10,8	1,2
135	д	182	173	355	49	12,7	0,4
136	д	>190	470	–	–	17,0	0,8
138	о	74	40	114	35	2,0	0,5
139	о	29	28	57	49	1,2	0,0
142	о	17	16	33	48	0,8	0,3
143	д	19	86	105	82	4,0	1,5

Окончание таблицы

№ образца	Габитус кристалла	Содержание азота, at.ppm			%NB	P, см <sup>-1</sup>	H, см <sup>-1</sup>
		NA	NB	Ntot			
144	р/д	102	38	140	27	2,3	0,9
145	д	34	8	42	19	0,5	0,1
146	д	>150	225	–	–	5,3	0,0
147	р/д	18	72	90	80	2,2	3,1
148	о	9	95	104	91	0,5	3,0
149	д	10	1	11	9	0,7	0,1
150	р/д	168	152	320	48	2,9	2,6
151	д	29	5	34	15	0,7	0,3
152	д	19	249	268	93	1,1	1,2
153	р/д	38	17	55	31	1,4	0,4
154	д	19	13	32	41	0,5	0,1
157	о	30	8	38	21	0,3	0,4
158	д	25	7	32	22	0,7	0,1
196	о	423	217	640	34	2,4	0,4
251	д	352	55	407	14	2,3	0,0
252	д	54	191	245	78	6,3	0,9
253	д	528	74	602	12	6,5	0,1
254	д	439	123	562	22	2,9	0,1
255	д	371	92	463	20	3,0	0,0

Примечание. о – октаэдр, д – додекаэдр, р/д – ромбододекаэдр и промежуточные члены ряда октаэдр–ромбододекаэдр; «–» – нет данных.

в алмаз являются А-дефекты, то есть концентрация азотных пар – NA – выше, чем тетраэдрических групп – NB. При этом доля азота в В-форме или степень его агрегации (%NB) составляет от 2–49% (см. таблицу). Подавляющее большинство низкоазотных алмазов характеризуется пониженным содержанием структурной примеси водорода и плейтлетс. Низкоазотный кристалл № 157 был исследован более детально с помощью методов цветной катодной люминесценции и ИК-спектроскопии (рис. 3). Этот кристалл октаэдрического габитуса принадлежит к ряду октаэдр–додекаэдр и характеризуется дитригональной формой октаэдрических граней.

Строение кристалла контрастно-зональное, что подчёркивается разными цветами катодной люминесценции и внутренним строением соответствующих зон. Центральная область (тёмно-синяя),

не считая включений (красные), выглядит достаточно однородной, промежуточная (зелёная) характеризуется волнистыми контурами фронта роста граней и волокнистым строением, а узкая внешняя зона (жёлто-зелёная) имеет послойно-октаэдрическое строение граней с прямолинейными границами между ними. Всё это указывает на смену механизма роста алмаза в процессе его кристаллизации. Вместе с тем значимые различия в распределении структурных примесей в объёме этого кристалла не наблюдаются. На фоне низкого содержания основных структурных дефектов в ИК-спектрах проявляется только азот в А-форме (главный пик около 1282 см<sup>-1</sup>) и водород (линия около 3107 см<sup>-1</sup>). Содержание структурного водорода от центра кристалла к его периферии снижается (см. рис. 3). Помимо структурных примесей в этом алмазе присутствует фазовая примесь

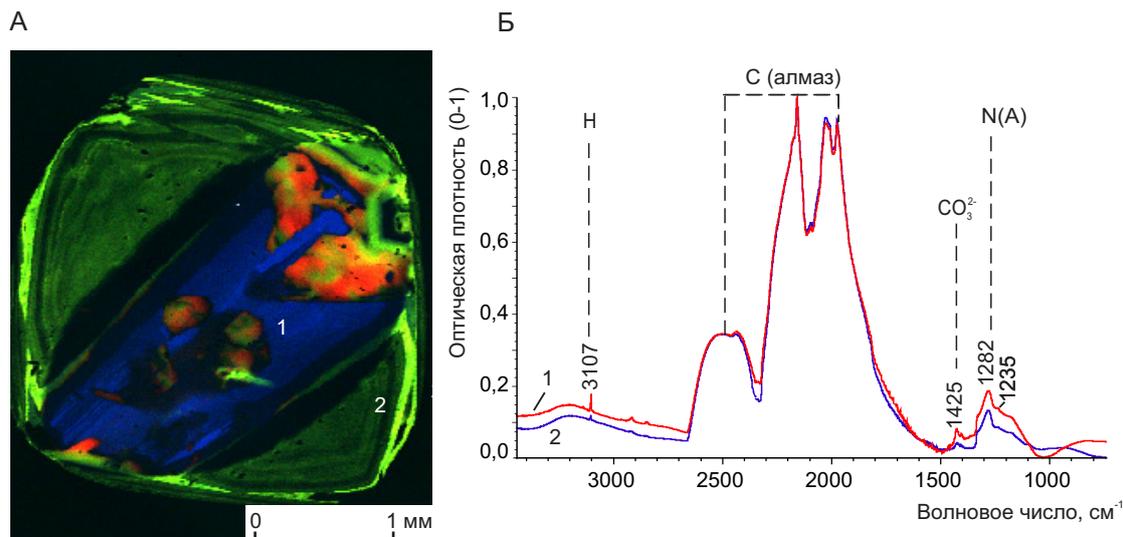


Рис. 3. Внутреннее строение (А) и ИК-спектры (Б) разных зон (1, 2) кристалла алмаза из россыпей Присяянья

карбоната, проявляющаяся пиком около  $1425\text{ см}^{-1}$ , что довольно типично для алмазов с волокнистым внутренним строением [12].

Распределение структурных примесей в алмазах изученной коллекции взаимосвязано с габитусом кристаллов (см. таблицу и рис. 4). Так, октаэдры с тригональной и дитригональной формой граней, а также плоскогранные ромбододекаэдры и переходные между октаэдром и ромбододекаэдром формы (см. рис. 2, Е–К) преимущественно характеризуются относительно пониженным общим содержанием азота ( $<420\text{ at.ppm}$ ). По сравнению с ними значительная часть додекаэдров, например кристаллы, представленные на рис. 2, А–Г, обладает более высокими содержаниями азота, составляющими  $430\text{--}967\text{ at.ppm}$ . Остальные додекаэдровиды, такие как кристаллы на рис. 2, Д, Л–Н, по распределению структурных дефектов подобны октаэдрам и ромбододекаэдрам и, по-видимому, образовались за счёт растворения последних.

Таким образом, в россыпях Присяянья преобладают алмазы с пониженными значениями общего содержания азота и степени его агрегации в кристаллах. Они представлены индивидами с послойным строением граней ряда октаэдр–ромбододекаэдр и производными от них додекаэдроидами. Область распространения таких кристаллов выделена на диаграмме (см. рис. 4) цветом и в

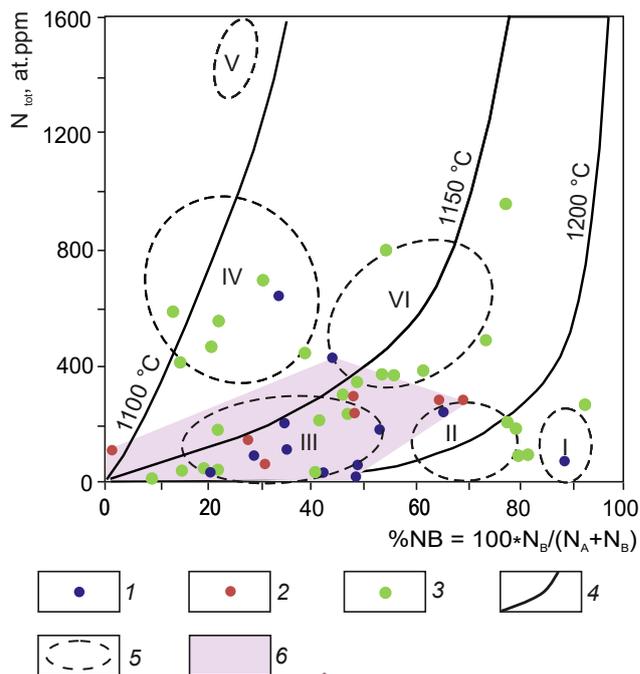


Рис. 4. Распределение азотных центров в алмазах из россыпей Присяянья и сравнительная характеристика условий их кристаллизации по модели [18]:

1 – октаэдры; 2 – алмазы ряда октаэдр–ромбододекаэдр; 3 – додекаэдровиды; 4 – изотермы для условного «возраста» алмазов 3 млрд лет; 5 – области распространения алмазных популяций типов I–VI, по [7]; 6 – область распространения алмазов с послойным строением граней

основном соответствует полю среднетемпературных популяций алмазов III типа [7].

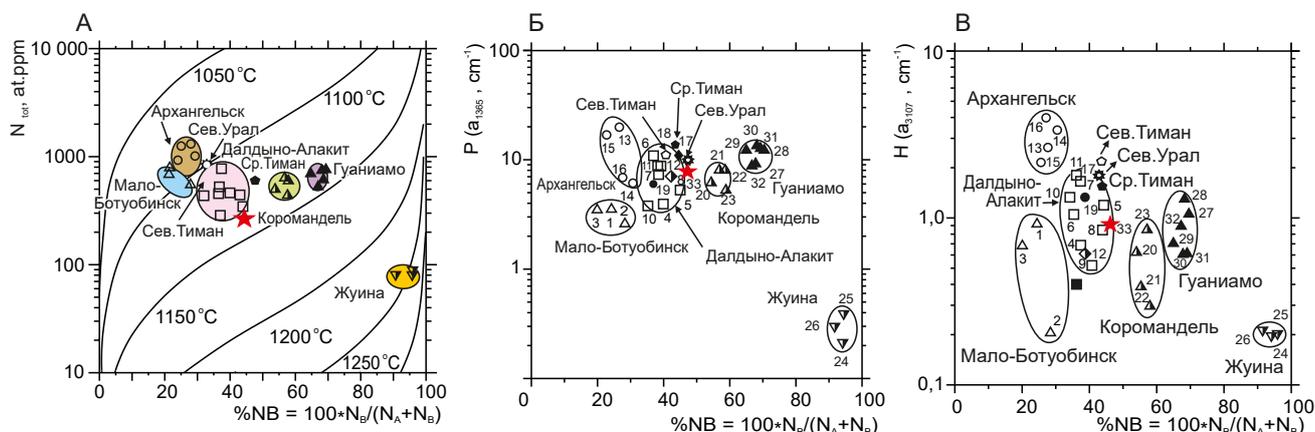
Усреднённые значения содержаний водорода, плейтлетс, азота ( $N_{tot}$ ) и степени его агрегации для изученной выборки алмазов из россыпей Присаянья нанесены на диаграммы (рис. 5, А–В). По этим параметрам они сходны с алмазами из трубок Далдыно-Алакитского района Якутии.

По комплексу свойств, включая кристалломорфологию, довольно близкими аналогами саянских алмазов являются алмазы из россыпей Северного и Среднего Тимана и Северного Урала (см. рис. 5, А–В), коренные источники которых тоже неизвестны.

**Обсуждение результатов.** Как показали проведённые исследования, по условиям образования алмазы из россыпей Присаянья наиболее близки к алмазам из трубок Далдыно-Алакитского района Якутии: Дальняя, Айхал, Прогнозная и других. Наиболее наглядно это сходство прослеживается при детальном сравнении соответствующих кри-

сталлов по содержанию в них азота в различных формах, плейтлетс и водорода на примере трубки Дальняя (рис. 6). Возникает вопрос, почему сопоставляемые алмазы столь различны по кристалломорфологии? В россыпях доминируют округлые алмазы – додекаэдриды, а в трубках – плоскогранные ромбододекаэдры. Возможно, что алмазы из россыпей имеют не один, а два или более коренных источника, как предполагается в работе [3]. Действительно, главная популяция алмазов из россыпей Присаянья, относящаяся к III типу [7], преимущественно представлена именно ламинарными кристаллами, подобными алмазам из средне- и высокоалмазоносных кимберлитовых тел Якутии (см. рис. 4).

Вместе с тем часть округлых алмазов так называемого «уральского типа» из этих же россыпей, по-видимому, имеет иной коренной источник, так как относится к популяциям (см. рисунки 4 и 5), сопоставимым с алмазами из россыпей Урала и некоторых других районов [9]. Примерами



**Рис. 5. Усреднённые значения содержаний структурных дефектов в выборках алмазов из разных месторождений мира: А – азота ( $N_{tot}$ ) и степени его агрегации (%NB), Б – плейтлетс (P), В – водорода (H):**

трубки Мало-Ботубинского района: 1 – Интернациональная (57), 2 – Спутник (34), 3 – им. XXIII партсъезда (62); трубки Далдыно-Алакитского района: 4 – Айхал (35), 5 – Дальняя (35), 6 – Комсомольская (39), 7 – Краснопресненская (43), 8 – Прогнозная (40), 9 – Сытыканская (32), 10 – Удачная (38), 11 – Зарница (36); россыпи северо-восточной Якутии: 12 – Тас-Ары (43); трубки Архангельской области: 13 – Архангельская (39), 14 – им. Карпинского-1 (77), 15 – им. М. В. Ломоносова (102), 16 – Поморская (159); россыпи Северного Урала: 17 – (32); 18 – трубка Премьер, ЮАР (19); 19 – трубка DO-27, Канада (201); россыпи района Коромандель, Бразилия: 20 – Грота до Пимпим (34), 21 – Эспириту-Санто (32), 22 – Имбе (32), 23 – Криминоза (32); россыпи района Жуина: 24 – Сан-Луис (31), 25 – Вермельо (33), 26 – Цикора (34); силлы и россыпи Венесуэлы: 27 – силлы (51), 28 – Кебрада-Гранде (40), 29 – Лос Кокитос (52), 30 – Чиуауа (33), 31 – Ринги-Ринги (33), 32 – Сентелья (40), 33 – россыпи Присаянья (57); в скобках – число кристаллов в каждой выборке; изотермы (А) проведены для «возраста» алмазов 3 млрд лет, по [18]

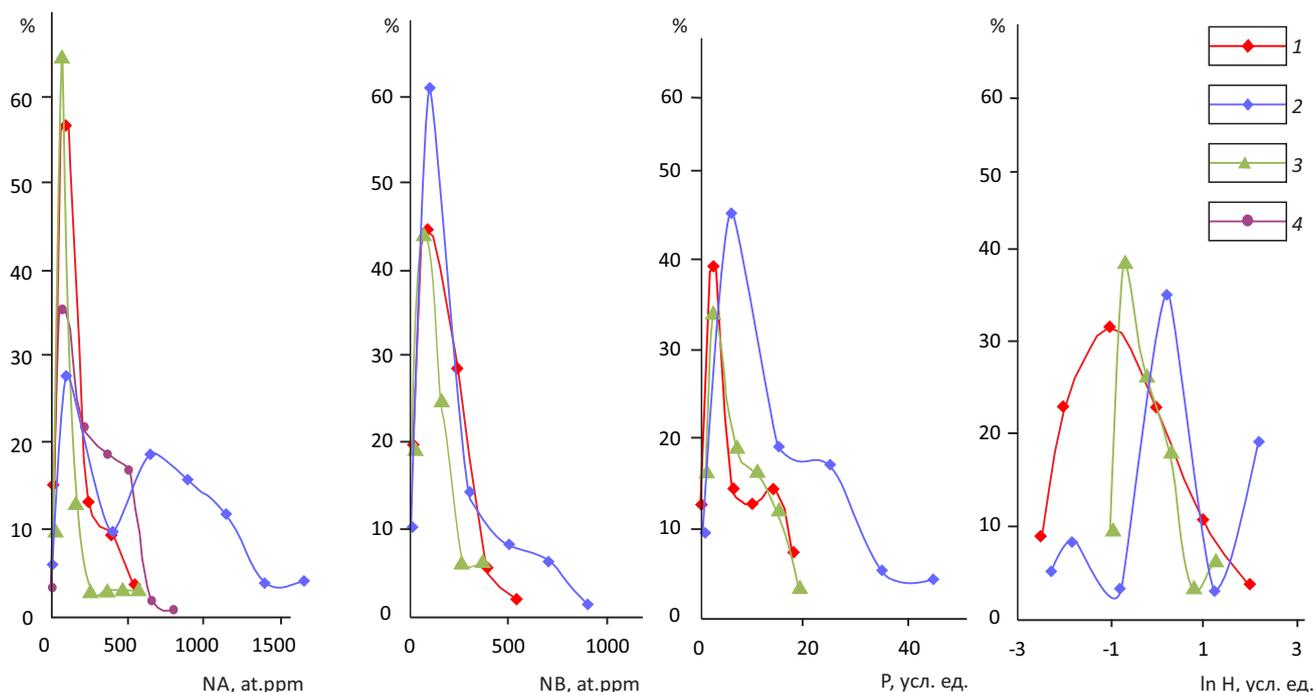


Рис. 6. Кривые распределения алмазов из россыпей Иркутской области и кимберлитовых трубок:

1 – россыпи Присаянья (57); 2 – трубка им. М. В. Ломоносова, Архангельская область (102); 3 – трубка Дальняя, Якутия (35); 4 – россыпи Нижней Тунгуски (110) [2]; в скобках приведено число образцов в выборке

коренных проявлений алмазов этого типа служат кимберлитовые трубки, приуроченные к краевым частям платформ, такие как трубки Золотицкого поля (Восточно-Европейская платформа), трубка Шенгли (Северо-Китайская платформа). С учётом геологической позиции россыпей Присаянья (см. рис. 1) наличие ещё не выявленных кимберлитовых трубок подобного типа в Иркутской области вполне вероятно. Об этом свидетельствует сходство алмазов из россыпей Присаянья и из трубки им. М. В. Ломоносова Золотицкого поля Архангельской области (главная популяция) по распределению структурных дефектов в кристаллах (см. рис. 6).

Вопрос о лампроитовом источнике алмазов из россыпей Присаянья [1], с нашей точки зрения, пока остаётся открытым. Это обусловлено тем, что типоморфные свойства алмазов Ингашинских лампроитов, которые, по мнению В. П. Афанасьева с соавторами (2011), питали эти россыпи, изучены недостаточно. Вместе с тем очевидное сходство между алмазами россыпей Присаянья и известных лампроитовых трубок не прослеживается. Так, например, по распределению азота по-

пуляции алмазов из россыпей относятся типу III (см. рис. 4), а из лампроитовой трубки Аргайл – соответственно к типу I [7]. По изотопному составу углерода алмазы из россыпей Присаянья, изученные в работе [14], не обнаруживают отчётливых совпадений с алмазами из лампроитовых трубок Аргайл и Маджгаван [6, 17].

В работе [4] отмечено подобие кристалломоρφологических характеристик алмазов из россыпей Иркутской области, расположенных в Присаянье и в районе Нижней Тунгуски. Как видно на рис. 6, оно подчёркивается сходным распределением азота в А-форме в кристаллах из сопоставляемых россыпей. Всё это, по-видимому, свидетельствует о подобии или общности их коренных источников. Если транспорт алмазов осуществлялся водными потоками, то с учётом высокой сохранности россыпных алмазов можно допустить относительную пространственную близость их коренного источника. Предположение о «местном» локальном коренном источнике алмазов россыпей в Иркутской области, расположенной в краевой части Сибирской платформы, согласуется с необычным внутренним строением

отдельных кристаллов (см. рис. 3). Оно отражает сложную, многоэтапную историю формирования алмазов, которая сопровождалась перерывами и сменой механизма роста. Именно такие особенности весьма характерны для алмазов краевых частей платформ в разных регионах земного шара [10, 15].

Таким образом, можно предположить, что в россыпях Присаянья алмазы главной популяции, в большинстве своём сходные с алмазами из тру-

бок Далдыно-Алакитского района Якутии, произошли за счёт кимберлитовых источников. Не исключено, что ещё не выявленные тела алмазоносных кимберлитов, питающих россыпи Присаянья и Нижней Тунгуски, расположены на территории Иркутской области.

*Авторы благодарят Ф. В. Каминского за предоставление материалов для проведения исследований и ценные замечания.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Афанасьев В. П., Лобанов С. С., Похиленко Н. П.* и др. Полигенез алмазов Сибирской платформы // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52, № 3. – С. 335–353.
2. *Биленко Ю. М.* Примесный азот в алмазах из месторождений Якутии : специальность 04.00.20 «Минералогия» : автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. геол.-минерал. наук / Биленко Юрий Михайлович. – Новосибирск : Институт геологии и геофизики, 1983. – 14 с.
3. *Егоров К. Н.* Вклад члена-корреспондента АН СССР М. М. Одинцова в развитие минерально-сырьевого комплекса Восточной Сибири // Геодинамика и тектонофизика. – 2011. – Т. 2, № 4. – С. 325–340. DOI:10.5800/GT-2011-2-4-0048
4. *Зинчук Н. Н., Коптиль В. И.* Типоморфизм алмазов Сибирской платформы. – М. : Недра, 2003. – 604 с.
5. *Соболев Е. В., Лисойван В. И.* Примесные центры в алмазах // Тезисы VIII отчетной научной конференции Института неорганической химии Сиб. отд. АН СССР (13–23 апр. 1971 г.). – Новосибирск : Сиб. отд. АН СССР, 1971. – С. 60–61.
6. *Соболев Н. В., Галимов Э. М., Ефимова Э. С.* и др. Кристаллические включения, изотопный состав углерода, азотные центры алмазов и особенности состава граната из трубки Маджгаван (Индия) // Геология и геофизика. – 1993. – Т. 34, № 12. – С. 85–91.
7. *Хачатрян Г. К.* Азот и водород в кристаллах алмаза в аспекте геолого-генетических и прогнозно-поисковых проблем алмазных месторождений // Отечественная геология. – 2013. – № 2. – С. 29–40.
8. *Хачатрян Г. К.* Усовершенствованная методика оценки концентраций азота в алмазе и её практическое применение // Геологические аспекты минерально-сырьевой базы АК «АЛРОСА». Современное состояние, перспективы, решения. – Мирный : ООО «Мирнинская городская типография», 2003. – С. 319–321.
9. *Хачатрян Г. К., Зинчук Н. Н., Коптиль В. И.* и др. Исследование оптически активных центров в алмазах из россыпей Урала в связи с проблемой выявления их коренных источников // Геология и геофизика. – 2004. – Т. 45, № 2. – С. 244–252.
10. *Хачатрян Г. К., Палажченко О. В., Гаранин В. К.* и др. Генезис «неравновесных» кристаллов алмаза из кимберлитовой трубки им. Карпинского-1 по данным катодной люминесценции и ИК-спектроскопии // Вестник МГУ. Серия 4: Геология. – 2008. – № 2. – С. 38–45.
11. *Bursill L. A., Glaisher R. W.* Aggregation and dissolution of small and extended defect structures in type I a diamond // American Mineralogy. – 1985. – V. 70. – P. 608–618.
12. *Chrenko R. M., McDonald R. S., Darrow K. A.* Infrared spectrum of diamond coat // Nature. – 1967. – V. 214. – P. 474–476.
13. *Evans T., Kiflawi I., Van Luyten W.* et al. Conversion of platelets into dislocation loops and voids in type IaB diamonds // Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. – 1995. – V. 449. – P. 295–313.
14. *Galimov E. M., Kaminsky F. V., Ivanovskaya I. N.* Carbon isotope composition of diamonds from the Urals, Taiman, Sayan, the Ukraine and elsewhere // Geochemistry International. – 1978. – V. 15, № 2. – P. 11–18.
15. *Lu T., Chen H., Qiu Z.* et al. Multiple core growth structure and nitrogen abundances of diamond crystals from Shandong and Liaoning kimberlite pipes, China // European Journal of Mineralogy. – 2012. – V. 24. – P. 651–656.
16. *Smith W. V., Sorokin P. P., Gelles I. L., Lasher G. I.* Electron spin resonance of nitrogen donors in diamond // Physical Review. – 1959. – V. 115. – P. 1546–1552.
17. *Stachel T., Harris J. W., Hunt L.* et al. Argyle Diamonds: How Subduction Along the Kimberley Craton Edge Generated the World's Biggest Diamond Deposit // Society of Economic Geologists, Inc. Special Publication. – 2018. – № 20. – P. 145–167.
18. *Taylor W. R., Milledge H. J.* Nitrogen aggregation character, thermal history and stable isotope composition of some xenolith-derived diamonds from Roberts Victor and Finch // 6<sup>th</sup> International Kimberlite Conference : Extended Abstract. – Novosibirsk. – 1995. – P. 620–622.
19. *Woods G. S., Collins A. T.* Infrared absorption spectra of hydrogen complexes in Type I diamonds // Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 1983. – V. 44, № 5. – P. 471–475.

## REFERENCES

1. *Afanas'yev V. P., Lobanov S. S., Pokhilenko N. P.* et al. Poligenez almazov Sibirskoy platformy [Polygenesis of diamonds of the Siberian platform]. *Geologiya i geofizika*, 2011, V. 52, No. 3, pp. 335–353. (In Russ.)
2. *Bilenko Yu. M.* Primesnyy azot v almazakh iz mestorozhdeniy Yakutii [Impurity nitrogen in diamonds from deposits of Yakutia]. Novosibirsk, Institut geologii i geofiziki publ., 1983, 14 p. (In Russ.)
3. *Yegorov K. N.* Vklad chlena-korrespondenta AN SSSR M. M. Odintsova v razvitiye mineral'no-syr'yevogo kompleksa Vostochnoy Sibiri [Contribution of Corresponding Member of the USSR Academy of Sciences M.M. Odintsov in the development of the mineral resource complex of Eastern Siberia]. *Geodinamika i tektonofizika*, 2011, V. 2, No. 4, pp. 325–340. (In Russ.)
4. *Zinchuk N. N., Koptil' V. I.* Tipomorfizm almazov Sibirskoy platformy [Typomorphism of diamonds of the Siberian platform]. Moscow, Nedra publ., 2003, 604 p. (In Russ.)
5. *Sobolev Ye. V., Lisoyvan V. I.* Primesnyye tsentry v almazakh [Impurity centers in diamonds]. Tezisy VIII otchetnoy nauchnoy konferentsii Instituta neorganicheskoy khimii Sib. otd. AN SSSR, Novosibirsk, Siberian Branch of the Academy of Sciences of the USSR publ., 1971, pp. 60–61. (In Russ.)
6. *Sobolev N. V., Galimov E. M., Yefimova E. S.* et al. Kristallicheskiye vkluyecheniya, izotopnyy sostav ugleroda, azotnyye tsentry almazov i osobennosti sostava granata iz trubki Madzhavan (Indiya) [Crystalline inclusions, isotopic composition of carbon, nitrogen centers of diamonds, and compositional features of garnet from the Majgavan pipe (India)]. *Geologiya i geofizika*, 1993, V. 34, No. 12, pp. 85–91. (In Russ.)
7. *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 predictive-search problems of diamond deposits]. *Otechestvennaya geologiya*, 2013, No. 2, pp. 29–40. (In Russ.)
8. *Khachatryan G. K.* Uovershenstvovannaya metodika otsenki kontsentratsiy azota v almaze i yeyo prakticheskoye primeneniye [An improved method for estimating nitrogen concentrations in diamond and its practical application]. Mirnyy, Mirninskaya gorodskaya tipografiya publ., 2003, pp. 319–321. (In Russ.)
9. *Khachatryan G. K., Zinchuk N. N., Koptil' V. I.* et al. Issledovaniye opticheski aktivnykh tse­n­trov v almazakh iz rossypey Urala v svyazi s problemoy vyyavleniya ikh korennykh istochnikov [Investigation of optically active centers in diamonds from placers of the Urals in connection with the problem of identifying their primary sources]. *Geologiya i geofizika*, 2004, V. 45, No. 2, pp. 244–252. (In Russ.)
10. *Khachatryan G. K., Palazhchenko O. V., Garanin V. K.* et al. Genezis “neravnovesnykh” kristallov almaza iz kimberlitovoy trubki im. Karpinskogo-1 po dannym katodnoy lyuminesstentsii i IK-spektroskopii [The genesis of “non-equilibrium” diamond crystals from the kimberlite pipe im. Karpinsky-1 according to the data of cathode luminescence and IR spectroscopy]. *Vestnik MGU. Seriya 4 Geologiya*, 2008, No. 2, pp. 38–45. (In Russ.)
11. *Bursill L. A., Glaisher R. W.* Aggregation and dissolution of small and extended defect structures in type I a diamond. *American Mineralogy*, 1985, V. 70, pp. 608–618.
12. *Chrenko R. M., McDonald R. S., Darrow K. A.* Infrared spectrum of diamond coat. *Nature*, 1967, V. 214, pp. 474–476.
13. *Evans T., Kiflawi I., Van Luyten W.* et al. Conversion of platelets into dislocation loops and voidite in type IaB diamonds. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1995, V. 449, pp. 295–313.
14. *Galimov E. M., Kaminsky F. V., Ivanovskaya I. N.* Carbon-isotope composition of diamonds from the Urals, Timan, Sayan, the Ukraine and elsewhere. *Geochemistry International*, 1978, V. 15, No. 2, pp. 11–18.
15. *Lu T., Chen H., Qiu Z.* et al. Multiple core growth structure and nitrogen abundances of diamond crystals from Shandong and Liaoning kimberlite pipes, China. *European Journal of Mineralogy*, 2012, V. 24, pp. 651–656.
16. *Smith W. V., Sorokin P. P., Gelles I. L., Lasher G. I.* Electronspin resonance of nitrogen donors in diamond. *Physical Review*, 1959, V. 115, pp. 1546–1552.
17. *Stachel T., Harris J. W., Hunt L.* et al. Argyle Diamonds: How Subduction Along the Kimberley Craton Edge Generated the World's Biggest Diamond Deposit. *Society of Economic Geologists, Inc. Special Publication*, 2018, No. 20, pp. 145–167.
18. *Taylor W. R., Milledge H. J.* Nitrogen aggregation character, thermal history and stable isotope composition of some xenoliths-derived diamonds from Roberts Victor and Finch. 6<sup>th</sup> International Kimberlite Conference, Extended Abstract, Novosibirsk, 1995, pp. 620–622.
19. *Woods G. S., Collins A. T.* Infrared absorption spectra of hydrogen complexes in Type I diamonds. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 1983, V. 44, No. 5, pp. 471–475.

Статья поступила в редакцию 27.06.23; одобрена после рецензирования 07.07.23; принята к публикации 07.07.23.  
The article was submitted 27.06.23; approved after reviewing 07.07.23; accepted for publication 07.07.23.