

Соотношение между распределением структурных примесей в кристаллах алмаза и алмазоносностью кимберлитовых трубок (на примере Архангельской области и Якутии)

Ratio of structural impurity distribution in diamond crystals and kimberlite pipe diamond potentiak (case study of Arkhangelsk region and Yakutia)

Хачатрян Г. К., Анашкина Н. Е.

Khachatryan G. K., Anashkina N. E.

С применением метода ИК-спектроскопии проведено сравнительное изучение алмазов из 12 трубок Архангельской области. На фоне положительной корреляции средних содержаний азота и водорода в алмазах из разных объектов установлено, что кристаллы из убогоалмазоносных трубок характеризуются относительно повышенными концентрациями водорода по сравнению с алмазами из месторождений им. М. В. Ломоносова и им. Гриба.

По распределению структурных примесей алмазы архангельских месторождений отличаются от якутских, что, предположительно, обусловлено разным составом источников вещества сопоставляемых алмазов и термодинамическими условиями их роста. Показано, что в алмазах якутских трубок, так же как и в архангельских, водород является отрицательным фактором алмазоносности. Одной из возможных причин этого является блокирующее действие примеси на рост кристаллов алмаза.

Ключевые слова: алмаз, структурные примеси, азот, водород, кимберлитовые трубки, алмазоносность.

IR spectroscopy was used to compare diamonds from 12 pipes, Arkhangelsk region. Based on positive correlation between average N and H values in diamonds from various deposits, it was found that crystals from low-grade diamond pipes are relatively enriched in hydrogen compared with diamonds from Lomonosov and Grib deposits.

In terms of structural impurity distribution, Arkhangelsk deposit diamonds differ from Yakutian diamonds; it could be due to various composition of compared diamonds' source matter and thermodynamic conditions of their growth. It is shown that hydrogen is a negative factor of diamond potential in both Yakutian and Arkhangelsk diamonds. This can partly be explained by impurity blocking effect on diamond crystal growth.

Keywords: diamond, structural impurities, nitrogen, hydrogen, kimberlite pipes, diamond potential.

Для цитирования: © Хачатрян Г. К., Анашкина Н. Е. Соотношение между распределением структурных примесей в кристаллах алмаза и алмазоносностью кимберлитовых трубок (на примере Архангельской области и Якутии). Руды и металлы. 2021. № 3. с. 114–130. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10023.

For citation: © Khachatryan G. K., Anashkina N. E. Ratio of structural impurity distribution in diamond crystals and kimberlite pipe diamond potentiak (case study of Arkhangelsk region and Yakutia). Ores and metals, 2021, № 3, pp. 114–130. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10023.

Несмотря на простой химический состав алмаза, его реальная структура содержит многочисленные дефекты, природа которых различна. В настоящее время их известно более пятидесяти.

Наряду с собственными дефектами кристаллической решётки алмаза, представляющими собой вакансии и их скопления, смещённые атомы углерода, точечные и протяжённые дислокации, значительное число микродефектов имеет примесное происхождение. Структурные примеси представляют собой отдельные чужеродные атомы или группы атомов и их комбинации с вакансиями.

Примеси в кристаллической решётке алмаза, с нашей точки зрения, наиболее информативны в генетическом аспекте. Многие из них образуются непосредственно в процессе кристаллизации алмаза. При этом концентрация структурных примесей согласно теории роста кристаллов [19] определяется химическим составом среды, температурой и скоростью процесса. Всё это служит предпосылкой для использования примесей и дефектов кристаллической решётки алмаза в качестве чувствительных индикаторов условий природного алмазообразования.

Среди структурных примесей главную роль играет азот, изоморфно замещающий углеродные атомы в кристаллической решётке алмаза. Общее содержание этой примеси в природных алмазах может достигать 5000 at. ppm [26]. В алмазах из кимберлитов и лампроитов в количественном отношении доминируют азотные А- и В-центры. А-центры представляют собой пару смежных, замещающих углерод атомов азота [14, 21], а В-центры – тетраэдрически сгруппированные вокруг вакансии азотные атомы [20].

Как впервые показано на примере трубок Южной Африки [22–24], суммарное содержание структурного азота (N_{tot}) в алмазах взаимосвязано с типом эклогитовой или ультрабазитовой мантийной среды роста алмаза. Так, алмазы с включениями минералов ультрабазитовой ассоциации преимущественно низкоазотные ($N_{tot} < 400$ at. ppm), а в алмазах эклогитовой ассоциации содержание азота варьи-

руется в значительных пределах (20–1000 at. ppm).

Соотношение концентраций общего азота и его агрегированной формы в кристалле отражает температурный режим алмазообразования [27]. Оно может использоваться в качестве сравнительного полуколичественного критерия температурных условий роста кристалла алмаза.

В отличие от азота, который изоморфно замещает углеродные атомы, водород химически связан с углеродом алмазной решётки. Предполагаемые структурные модели водородных центров следующие: $^H>C=C<^H$ [14] или $>C=C<^H$ [28].

Концентрация водородных центров в алмазе отражает содержание водорода в среде алмазообразования. Водород захватывается преимущественно кубическими гранями алмаза при его росте. Ранее нами обосновывалась возможность блокирования роста алмаза при значительных содержаниях водорода в среде кристаллизации [4].

Наиболее информативным количественным методом анализа азотных и водородных центров в кристаллах алмаза является ИК-спектроскопия. С её помощью можно проводить массовое изучение кристаллов без их разрушения и специальной подготовки проб. Этот метод был базовым при исследовании алмазов из трубок Архангельской области и Якутии.

Объекты и метод исследования. Объектами изучения послужили кристаллы алмаза (715 шт.) из трубок Золотицкого, Черноозёрского и Кепинского полей Архангельской области (табл. 1). Распределение азота и водорода в архангельских алмазах сопоставлялось с результатами исследования алмазов из якутских трубок, опубликованными нами в работе [1].

Для анализа содержаний азотных центров в алмазах использовалась унифицированная методика, обеспечивающая сопоставимость авторских и зарубежных данных [17]. Концентрация водорода в алмазе прямо пропорциональна коэффициенту поглощения узкой спектральной линии около 3107 см^{-1} (K_{3107}), обусловленной водородными центрами, и оценивалась по величине K_{3107} .

1. Усреднённые концентрации структурных примесей в выборках и популяциях алмаза из трубок Архангельской области

1. Average concentrations of structural impurities in selected samples and diamond populations from Arkhangelsk region pipes

Поле	Трубка	Число образцов	Средние значения концентраций азота и водорода			Характеристика и тип главной популяции		
			N_{tot} , ppm	%N _B	H, усл. ед.	N_{tot} , ppm	%N _B	Тип
Черноозёрское	им. Гриба	30	$\frac{794}{(39 - 2796)}$	$\frac{39}{(10 - 65)}$	$\frac{0,7}{(0 - 2,7)}$	233 ± 133	32 ± 16	III
Золотицкое	им. Ломоносова	98	$\frac{838}{(98 - 2810)}$	$\frac{26}{(0 - 95)}$	$\frac{2,1}{(0 - 10,2)}$	186 ± 132	32 ± 30	III
	Пионерская	37	$\frac{224}{(3 - 707)}$	$\frac{24}{(0 - 71)}$	$\frac{1,7}{(0 - 16,9)}$	294 ± 94	29 ± 22	III
	Карпинского-1	64	$\frac{1106}{(28 - 3599)}$	$\frac{28}{(2 - 68)}$	$\frac{3,1}{(0 - 11,5)}$	1372 ± 274	19 ± 9	V
	Архангельская	37	$\frac{1396}{(349 - 2328)}$	$\frac{23}{(9 - 59)}$	$\frac{3,1}{(0,1 - 9,6)}$	1402 ± 162	22 ± 12	V
	Поморская	135	$\frac{1409}{(119 - 4328)}$	$\frac{26}{(0 - 72)}$	$\frac{4,1}{(0 - 16)}$	1396 ± 170	25 ± 11	V
	Снегурочка	106	$\frac{745}{(16 - 4886)}$	$\frac{38}{(0 - 100)}$	$\frac{3,7}{(0 - 28,2)}$	547 ± 123	50 ± 8	VI
	Кольцовская	36	$\frac{594}{(9 - 4193)}$	$\frac{50}{(6 - 100)}$	$\frac{3,4}{(0,1 - 47,2)}$	561 ± 125	49 ± 7	VI
	Первомайская	67	$\frac{471}{(9 - 1405)}$	$\frac{41}{(0 - 97)}$	$\frac{3,3}{(0 - 29,6)}$	539 ± 140	50 ± 6	VI
Кепинское	Юрасская	30	$\frac{778}{(25 - 2209)}$	$\frac{39}{(4 - 100)}$	$\frac{3,1}{(0 - 21,9)}$	857 ± 142	30 ± 12	IV
	ЦНИГРИ-Архангельская	23	$\frac{267}{(19 - 920)}$	$\frac{48}{(8 - 87)}$	$\frac{2,4}{(0 - 10)}$	267 ± 141	50 ± 19	III
	Степная	52	$\frac{332}{(0 - 1623)}$	$\frac{53}{(0 - 100)}$	$\frac{2}{(0 - 10,6)}$	112 ± 89	70 ± 32	II

Примечание. В числителе дроби – среднее по выборке значение, в знаменателе – минимальное и максимальное; при характеристике популяций вычислялись среднеквадратические отклонения N_{tot} и %N_B.

Спектры алмазов записывались на ИК-Фурье спектрометре Nicolet-380 корпорации Thermo, USA в комбинации с микроскопом Centaurus в диапазоне 650–4000 см⁻¹ с разрешением 4–6 см⁻¹.

Алмазы каждой из промышленно-алмазоносных трубок (им. Гриба, им. Ломоносова, Пионерская, Поморская, им. Карпинского-1, Архангельская), а также из убогоалмазоносных трубок (Кольцовская, Первомайская, Снегурочка, Степная, ЦНИГРИ-Архангельская и Юрасская) были представлены выборками кристаллов от 23 до 135 штук. Размер боль-

шинства проанализированных кристаллов составляет -2+1 мм, реже -1+0,5 и -4+2 мм.

В связи с ростовой природой примесей азота и водорода данные по их распределению в алмазах сопоставлялись с морфологией и особенностями внутреннего строения кристаллов.

За исключением алмазов из трубки им. Гриба, в основном представленных кристаллами октаэдрической и переходной от октаэдра к ромбододекаэдру формами, среди остальных алмазов Архангельской области преобладают округлые кристаллы ромбододекаэдрического габитуса – додекаэдроидры.

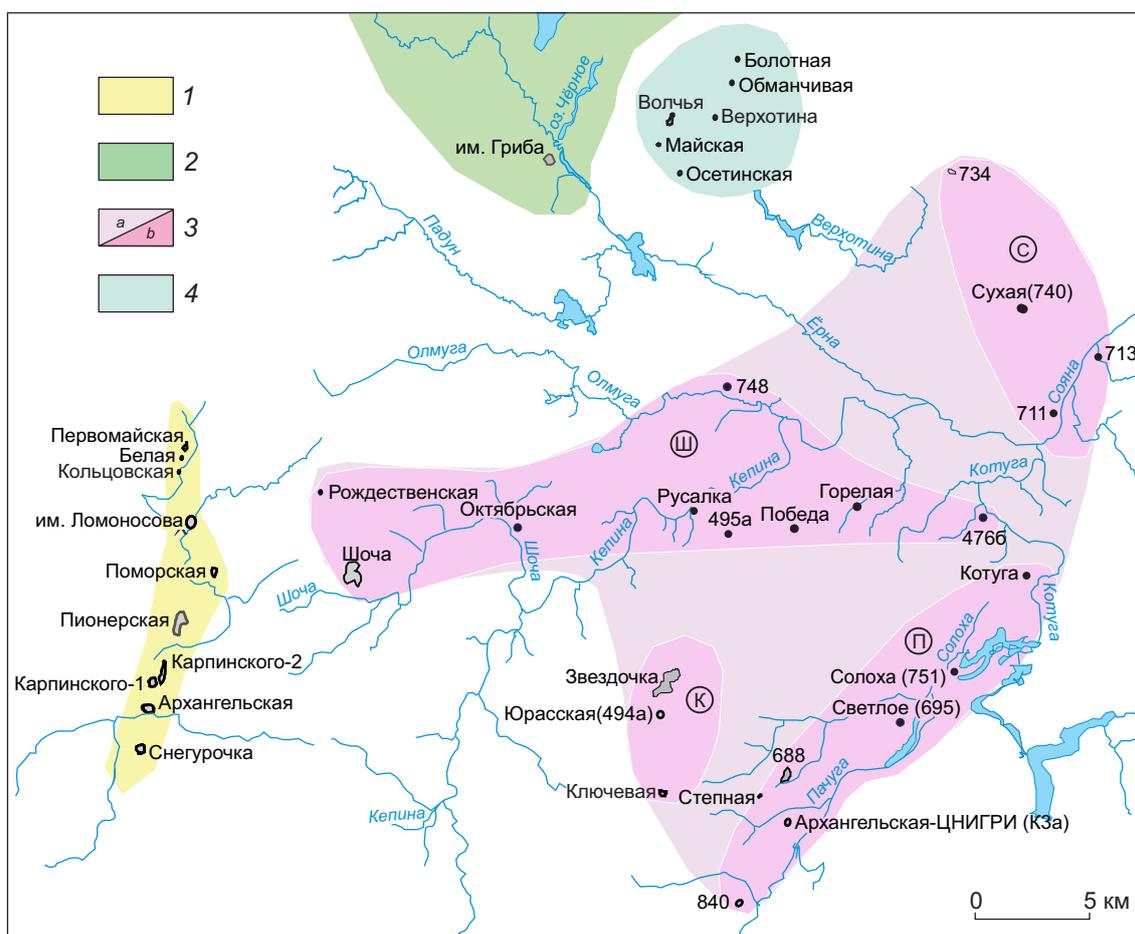


Рис. 1. Размещение трубок кимберлитов и пикритов Архангельской области:

поля кимберлитов: 1 – Золотицкое, 2 – Черноозёрское, 3 – Кепинское: *a* – поле, *b* – группы трубок Кепинского поля; Ш – Шочинская, П – Пачугская, К – Ключевская, С – Соянская, включающая тела пикритов; 4 – Верхотинское поле пикритов

Fig. 1. Location of kimberlite pipes and picrites, Arkhangelsk region:

kimberlite fields: 1 – Zolotitskoye, 2 – Chernoozerskoye, 3 – Kepsinskoye: *a* – field, *b* – groups of the Kepsinsky field pipes: Ш – Shochinskaya, П – Pachugskaya, К – Klyuchevskaya, С – Soyanskaya including picrite bodies; 4 – Verkhotinskoye picrite field

Соотношение морфологических разновидностей алмаза в каждой изученной выборке сопоставимо с их распространённостью в соответствующих трубках. Краткая характеристика алмазов рассматриваемых объектов и их геологической позиции приведена ниже.

Характеристика геологической позиции и особенностей морфологии кристаллов алмаза. В Архангельской области традиционно вы-

деляют несколько полей [5]: Верхотинское, Золотицкое, Черноозёрское, Кепинское (рис. 1), а также Мельское, Ижемское, Турьинское, Полтинское и Пинежское, причём вопрос об алмазоносности последних остаётся дискуссионным.

По геохимическим характеристикам кимберлиты Золотицкого поля относятся к глинозёмистой серии, а трубка им. Гриба Черно-

озёрского поля и трубки Кепинского поля – к железо-титанистой [12].

Отличительной особенностью Архангельской алмазоносной области по сравнению с районами Сибирской платформы является то, что на сравнительно небольшой площади сосредоточены десятки тел кимберлитов и родственных им пород (см. рис. 1), включающих алмазы с разнообразной морфологией и содержанием структурных примесей в кристаллах.

В *Золотицком поле* шесть промышленных трубок – им. Ломоносова, Пионерская, Поморская, им. Карпинского-1, им. Карпинского-2 и Архангельская, которые рассматриваются в качестве одного месторождения им. М. В. Ломоносова. Кроме них известны ещё четыре трубки: Кольцовская, Пионерская, Белая и Снегурочка, отличающиеся убогой алмазоносностью. Расстояние между отдельными трубками варьируется от 100 м до 2,5 км, общая протяжённость цепочки трубок 14 км.

В каждой трубке месторождения соотношения кристаллов различной формы варьируются [8], но преобладающей формой везде являются додекаэдровиды (в среднем около 70 %). Содержание октаэдрических индивидов низкое (обычно не более 15 %). В трубках им. Ломоносова и Пионерская содержание октаэдрических алмазов немного выше среднего по месторождению. В остальных трубках месторождения им. М. В. Ломоносова немного повышена доля алмазов кубического габитуса (тетрагексаэдровидов), составляющая от 7 до 27 % от общего количества.

Убогоалмазоносные трубки Первомайская, Кольцовская, Белая, а также Снегурочка расположены соответственно севернее и южнее площади месторождения им. М. В. Ломоносова (см. рис. 1).

Минералогические характеристики алмазов из трубок Первомайская, Кольцовская и Снегурочка достаточно сходны [5]. Во всех трёх рассматриваемых трубках преобладают кристаллы ромбододекаэдрического габитуса, доля которых составляет от 58 до 64 % от общего количества. Среди ромбододекаэдрических индивидов типично округлые додекаэдровиды доминируют над ламинарными ромбододека-

эдрами. Кристаллы октаэдрического габитуса и переходной от октаэдра к ромбододекаэдру формы присутствуют в подчинённом количестве и суммарно составляют от 17 до 22 % от общего числа кристаллов в соответствующих трубках. Относительное содержание алмазов кубического габитуса (тетрагексаэдровидов) среди кристаллов трубок Первомайская, Кольцовская и Снегурочка относительно невелико и составляет ~ 7–8 % от всех индивидов.

Месторождение им. Гриба, расположенное в *Черноозёрском поле*, представлено трубкой им. Гриба, характеризующейся самой высокой алмазоносностью среди известных трубок Архангельской области.

Алмазы трубки характеризуются высоким качеством, 80 % кристаллов прозрачны. В отличие от алмазов месторождения им. М. В. Ломоносова в месторождении им. Гриба преобладают кристаллы октаэдрической и переходной от октаэдра к ромбододекаэдру форм (около половины от общего числа) [5]. Алмазов ромбододекаэдрического габитуса в трубке содержится около одной третьей, а кубического (кубы, тетрагексаэдровиды) – соответственно одной десятой части от общего количества.

Кепинское поле включает более 30 трубок, среди которых выделяют четыре пространственно разобщённые группы: Шочинскую, Пачугскую, Ключевскую и Солянскую (см. рис. 1). Последняя преимущественно представлена телами пикритов. Расположенная в юго-восточной части Кепинского поля Пачугская группа – самая многочисленная, она включает трубки Степная и Архангельская-ЦНИГРИ. Западнее Пачугской группы располагается Ключевская, к которой относится трубка Юраская.

В связи с крайне низкой алмазоносностью трубок Кепинской территории сведения о свойствах алмазов, содержащихся в трубках, весьма ограничены. По данным В. К. Гаранина с соавторами [5], базирующимся на описании 117 кристаллов, среди них преобладают ромбододекаэдры (50–70 %), в подчинённом количестве присутствуют октаэдры и комбинационные формы ряда октаэдр – ромбододекаэдр (10–35 %). Алмазы кубического габитуса, включая тетрагексаэдровиды, не установлены.

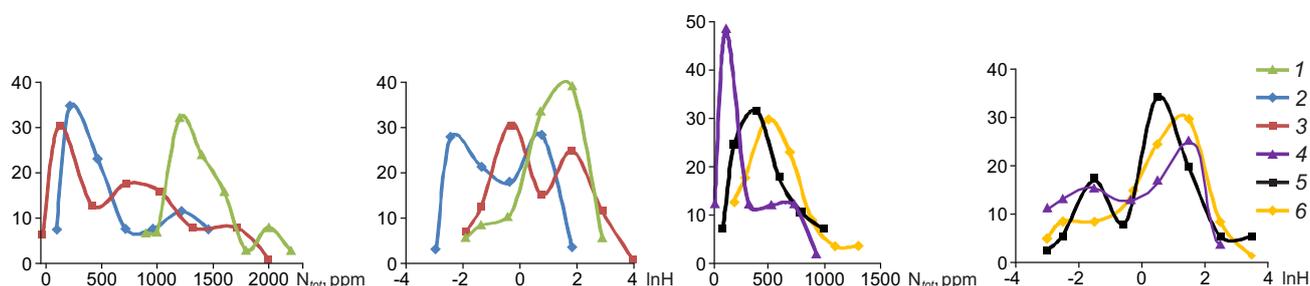


Рис. 2. Кривые распределения алмазов по распределению в кристаллах азота (N_{tot} at. ppm) и водорода (lnH):

трубки: 1 – Архангельская, 2 – им. Гриба, 3 – им. Ломоносова, 4 – Степная, 5 – Первомайская, 6 – Снегурочка; число образцов в выборках см. табл. 1.

Fig. 2. Diamonds distribution curves based on nitrogen (N_{tot} , at. ppm) and hydrogen (lnH) distribution in crystals:

pipes: 1 – Arkhangelskaya, 2 – Grib, 3 – Lomonosov, 4 – Stepnaya, 5 – Pervomaiskaya, 6 – Snegurochka; see table. 1 for the number of samples in selections

Распределение структурных примесей в алмазах Архангельской области. Выборки алмазов из месторождений Архангельской области охарактеризованы в табл. 1. Из неё видно, алмазы разных трубок даже в пределах одного кимберлитового поля отличаются по среднему содержанию структурного азота в кристаллах (N_{tot}). В Золотицком поле самыми высокоазотными являются алмазы из трубок им. Карпинского-1, Архангельская и Поморская (средние значения N_{tot} 1106, 1396 и 1409 at. ppm соответственно). Самые низкие средние значения N_{tot} зафиксированы в алмазах трубки Пионерская Золотицкого поля (224 at. ppm), а также Степная (332 at. ppm) и Архангельская-ЦНИГРИ (267 at. ppm) Кепинского поля. При этом последние существенно отличаются от кристаллов из трубки Пионерская по степени агрегации азота, соответственно составляющей в среднем 48–53 и 24 % (см. табл. 1). Пониженная степень агрегации азота (23–28 %) отмечена для алмазов всех изученных трубок месторождения им. М. В. Ломоносова, что существенно отличает их от алмазов убогоалмазоносных трубок Золотицкого поля, характеризующихся средними значениями %N_B 41–50.

Несмотря на то что по усреднённым значениям содержания азота и степени его агрега-

ции алмазы из месторождения им. Гриба сходны с алмазами из трубок Снегурочка и Юраская (см. табл. 1), первые характеризуются минимальными концентрациями водорода ($\bar{H} \sim 0,7$ усл. ед.).

Средние значения концентрации азота и водорода в кристаллах из разных трубок не всегда достаточно информативны при сопоставлении выборок алмаза. В особенности это относится к случаям двумодального распределения алмазов по содержанию в них примесей.

Как видно из рис. 2, содержание азота и водорода в алмазах из трубок им. Ломоносова, Архангельская варьируется в значительных пределах, при этом в каждой из трубок преобладают определённые группы кристаллов – популяции, характеризующие данный объект. Так, например, в трубке им. Ломоносова преобладают низкоазотные индивиды с общим модальным содержанием примеси (N_{tot}) ~ 180 at. ppm, а в трубке Архангельская – соответственно высокоазотные кристаллы с модой $N_{tot} \sim 1260$ at. ppm. Помимо этого, в трубке им. Ломоносова в подчинённом количестве присутствует группа кристаллов (второстепенная популяция) с модой $N_{tot} \sim 780$ at. ppm. Наличие двух и более популяций алмаза в одной трубке может быть связано с попаданием в неё

кристаллов из разных глубинных алмазоносных слоёв.

В отличие от алмазов большинства трубок месторождения им. М. В. Ломоносова, алмазы месторождения им. Гриба преимущественно низкоазотные (мода $N_{tot} \sim 275 \text{ at. ppm}$).

Модальные значения концентраций водорода в алмазах из трубок месторождений им. М. В. Ломоносова и им. Гриба положительно коррелируют с азотными максимумами (см. рис. 2). Так, высокоазотной моде трубки Архангельская соответствует водородный максимум $\ln H \sim +1,5$. Главная популяция алмазов из трубки им. Ломоносова характеризуется модой по водороду $\ln H \sim -0,5$, а трубки им. Гриба – модами $\ln H -1,5$ и $+0,5$.

Положительная корреляция содержаний азота и водорода в алмазах рассматривалась нами ранее [15] и объяснялась тем, что азот и водород являются компонентами единых (биогенных) источников вещества алмаза.

Для сравнения на рис. 2 приведены кривые распределения алмазов из убогоалмазоносных трубок Кольцовская, Первомайская и Степная по содержанию в кристаллах структурных примесей азота и водорода.

В Золотицком поле алмазы из убогоалмазоносных трубок Первомайская и Снегурочка отличаются по модальным значениям общего содержания азота, составляющего ~ 400 и $\sim 500 \text{ at. ppm}$ соответственно. Вместе с тем алмазы убогоалмазоносных трубок этого поля обладают относительно повышенным модальным содержанием водорода, сопоставимым с водородной модой высокоазотных алмазов трубки Архангельская. Так, мода $\ln H$ составляет $+1,5$ для трубки Снегурочка и $+0,5$ для трубки Первомайская.

Высокие модальные значения $\ln H \sim +1,5$ также характерны для главной популяции алмазов (мода $N_{tot} \sim 130 \text{ at. ppm}$) из трубки Степная Кепинского поля.

Таким образом, для алмазов из трубок Архангельской области отмечается тенденция относительного увеличения содержания водородных центров в алмазах из убогоалмазоносных трубок. Причинами этого могут быть не только специфические термодинамические ус-

ловия образования кристаллов, но и исходный состав (соотношение N/H) источников вещества алмаза.

Рассмотрим условия образования архангельских алмазов более детально с использованием геотермометрии, основанной на модели В. Р. Тейлора с соавторами [27]. Данные для рассмотрения представлены в табл. 1, содержащей не только средние по выборкам содержания азота и водорода, но и характеристики главных алмазных популяций по каждой трубке. Принципы выделения популяций и их типизация описаны в работе [16].

Распределение азота в кристаллах и тип алмазной популяции, как было показано ранее [15, 16], служат характеристиками мантийных условий образования алмазов из коренных и россыпных проявлений. На рис. 3 видно, что самые низкотемпературные (наименее глубинные) алмазы Архангельской области – из трубок Золотицкого поля Архангельская, Поморская и им. Карпинского-1. Они относятся к популяциям типа V, сформировавшимся преимущественно в эклогитовой среде. Остальные трубки месторождения им. М. В. Ломоносова, а также месторождения им. Гриба в Черноозёрском поле характеризуются относительно более высокотемпературными (глубинными) популяциями алмаза типа III, сформировавшимися главным образом в ультраосновном мантийном субстрате. Как видно из рис. 3, по температурам формирования ($1100 \text{ }^\circ\text{C}/1 \text{ млрд лет}$) к низкоазотным алмазам популяций типа III близки среднеазотные алмазы популяций типа VI, преобладающие в убогоалмазоносных трубках Золотицкого поля Кольцовская, Первомайская и Снегурочка.

Алмазы трубки ЦНИГРИ-Архангельская (К3а) Кепинского поля принадлежат к популяции типа III. Алмазы другой рассматриваемой трубки Пачугской группы – Степной – являются самыми высокотемпературными и глубинными среди алмазов из трубок Архангельской области и относятся к типу популяций II. Среди алмазов изученных трубок популяция типа IV установлена только в трубке Юраская, входящей в Ключевскую группу трубок Кепинского поля.

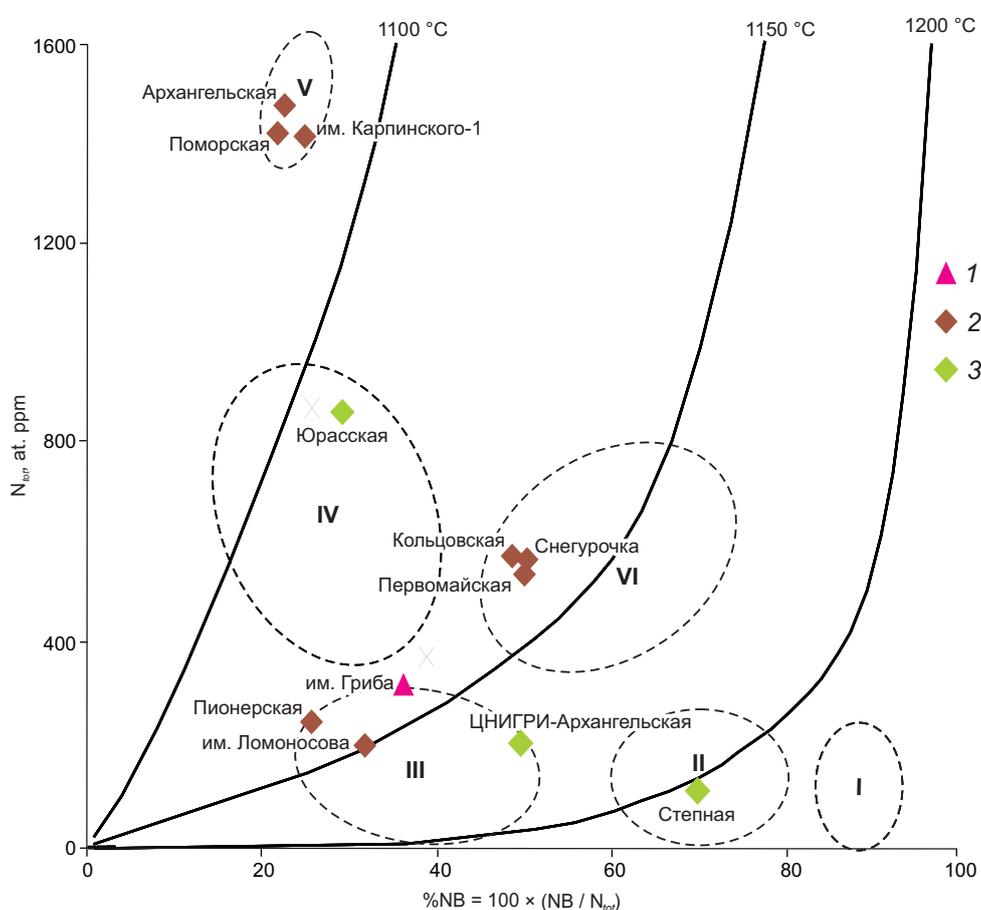


Рис. 3. Распределение азота в главных популяциях алмаза на диаграмме [27]:

алмазы из трубок: 1 – им. Гриба Черноозёрского поля, 2 – Золотицкого поля; 3 – Кепинского поля; римские цифры – номера типов популяций; число образцов в выборках см. табл. 1

Fig. 3. Nitrogen distribution in the main diamond populations, diagram [27]:

diamonds from pipes: 1 – Grib, Chernoozerskoye field; 2 – Zolotitskoye field; 3 – Kepinskoye field; roman numerals – population types; see table 1 for the number of samples in selections

Таким образом, в Архангельской области наиболее продуктивными являются те трубки, в которых алмазы принадлежат популяциям типов III и V, распространённым в месторождениях им. М. В. Ломоносова и им. Гриба.

Сравнительная характеристика алмазов из трубок Архангельской области и Якутии. В сравнении с архангельскими якутские алмазы, открытые в середине прошлого столетия, изучены более полно и досконально. Е. В. Соболев впервые на примере трубки Мир показал, что распределение азота в выборке алмазов

месторождения индивидуально и может использоваться для идентификации кристаллов из разных объектов [13]. Это послужило толчком для последующих исследований генетической информативности структурных примесей в алмазах и использовании типоморфизма алмаза в прогнозно-поисковых целях. В связи с хорошей изученностью якутских алмазов представляется целесообразным сопоставить их свойства со свойствами алмазов Архангельской области. С нашей точки зрения, это поможет выявить специфику условий и ис-



тории их роста и в какой-то мере судить об источниках вещества архангельских алмазов.

Несмотря на то что территория проявления алмазоносного вулканизма в Архангельской области намного меньше по сравнению с Якутской провинцией, архангельские алмазы более разнообразны по распределению азота и водорода в кристаллах. Особенно это относится к алмазам из трубок Золотицкого поля, представленным, как было показано выше, популяциями типов III, V и VI. По сравнению с этим в кимберлитовых полях Якутии главные популяции алмазов принадлежат к какому-либо одному типу [16].

Существенным отличием сопоставляемых алмазов является то, что продуктивная для Архангельской области популяция типа V в трубках Якутии вообще не обнаружена. Это относится и к популяции типа VI, широко распространённой в убогоалмазоносных трубках Золотицкого поля. Вместе с тем популяции типа IV, характерные для богатейших месторождений Якутии (трубки Интернациональная, Нюрбинская, Мир), а также популяции типа II, типичные для месторождения Муно-Тюнгское, в Архангельской области встречены лишь в убогоалмазоносных трубках.

Таким образом, алмазы основных месторождений Архангельской области (III + V типы популяций) и Якутии (I–IV типы популяций) сформировались в разных по глубинности горизонтах мантии, причём последние в целом более высокотемпературные и глубинные. Выявленные отличия проявились в морфологии и внутреннем строении сопоставляемых кристаллов и зависят, согласно экспериментальным данным, от термодинамических параметров роста алмазов [10]. В области стабильности алмаза кубические формы роста формируются при пониженных температурах, а октаэдрические – при повышенных.

Как отмечалось выше, архангельские алмазы, за исключением кристаллов из трубки им. Гриба, преимущественно представлены додекаэдроидами. В якутских трубках доля типично округлых додекаэдроидов обычно незначительна, при этом наиболее распространены октаэдры, ламинарные ромбододекаэ-

дры и переходные между ними формы. Так, в трубке Удачная преобладают ламинарные ромбододекаэдры, октаэдры и переходные от октаэдра к ромбододекаэдру формы (соответственно ~ 37, 24 и 23 % от общего количества) [9]. При этом доля додекаэдроидов и кубов составляет лишь первые проценты от всех кристаллов.

Внутреннее строение и история роста большинства архангельских алмазов также весьма своеобразны по сравнению с алмазами Якутии, преимущественно характеризующимися послойно-октаэдрической зональностью с прямолинейными границами между зонами, параллельными граням октаэдра. Такая зональность, обусловленная неравномерным захватом примесей растущими гранями, является результатом послойного (тангенциального) механизма роста кристаллов. Октаэдрический габитус кристаллов алмаза и послойно-октаэдрическое внутреннее строение отражают медленный рост кристаллов алмаза в условиях термодинамической стабильности.

Большинство архангельских алмазов (значительная часть додекаэдроидов и кристаллы кубического габитуса) из трубок месторождения им. М. В. Ломоносова частично или полностью сформировались в результате нормального механизма роста.

Признаком роста алмаза по нормальному механизму служит волокнистое внутреннее строение кристаллов, а также волнистый характер фронта роста. Формирование таких кристаллов было сложным и часто сопровождалось сменой послойного механизма роста в начале кристаллизации на нормальный [8]. Иногда такая смена происходила неоднократно [18]. Всё это свидетельствует о нестабильности условий алмазообразования.

Рассмотренный выше тип зональности архангельских алмазов для якутских алмазов не типичен. Нормальный механизм роста у них проявляется в основном на начальном этапе, но в дальнейшем он сменяется послойным [6]. Нередко рост якутских кристаллов начинался по смешанному механизму: нормальному (границы куба) и послойному (границы октаэдра). В результате в центральных частях кристаллов

2. Сравнительная характеристика морфологических разновидностей алмазов Архангельской области и Якутии по распределению структурных примесей в кристаллах и условиям их формирования

2. Comparative characterization of morphological diamond varieties, Arkhangelsk region and Yakutia, based on structural impurity distribution in crystals and their formation conditions

Форма кристаллов	Месторождение им. М. В. Ломоносова (Архангельск)					Трубка Удачная (Якутия)				
	<i>n</i>	N_{tot} , ppm	%N _B	<i>H</i> , усл. ед.	<i>T</i> , °C	<i>n</i>	N_{tot} , ppm	%N _B	<i>H</i> , усл. ед.	<i>T</i> , °C
Октаэдр*	26	331 (0–1270)	36	1,1 (0–3,7)	1150	17	268 (89–490)	24	0,2 (0–0,5)	1140
Октаэдр – ромбододекаэдр**	38	1061 (44–2103)	34	2,1 (0–5,9)	1120	23	301 (15–587)	36	0,5 (0–1,3)	1150
Куб, кубоид, тетрагексаэдр	30	1344 (265–2767)	16	4,1 (0–11,1)	1090	20	655 (376–934)	22	2,3 (1,1–3,6)	1110

Примечание. В числителе – средние по выборке значения, в знаменателе – минимальные и максимальные; * – октаэдры с тригональной формой граней, ** – октаэдры и комбинационные кристаллы ряда октаэдр – ромбододекаэдр с дитригональной формой граней, *n* – число кристаллов, N_{tot} – общее содержание структурного азота, %N_B – доля азота в В-форме, *H*, усл. ед. – содержание структурного водорода в условных единицах, *T* – температура алмазообразования для условного возраста 1 млрд лет по диаграмме [27].

образуется своеобразная секториальная структура типа «мальтийский крест». При этом волнистое внутреннее строение с характерным для него волнистым фронтом роста отмечается лишь в алмазах кубического габитуса и алмазах в оболочке, доля которых в якутских трубках очень незначительна.

Среди всех морфологических групп архангельских алмазов только октаэдрические индивиды, присутствующие в трубках в подчинённом количестве, характеризуются послойно-зональным или квазиоднородным внутренним строением [8, 11, 18]. Такие кристаллы сформировались в результате послойного механизма роста и по своим морфологическим особенностям они сходны с алмазами Якутии.

Таким образом, возможными причинами разного распределения структурных примесей в алмазах Архангельской области и Якутии служат разные термодинамические условия и механизм роста сопоставляемых кристаллов. Помимо этого следует принимать во внимание химические факторы (состав источников вещества и среды образования алмаза), о чём свидетельствует сравнение одноимён-

ных морфологических групп алмазов из разных трубок, сходных между собой по условиям кристаллизации.

Для корректного сравнения отбирались группы кристаллов, сходных по габитусу и другим внешним морфологическим признакам: октаэдры с тригональными гранями, октаэдры и комбинационные кристаллы ряда октаэдр – ромбододекаэдр с дитригональной формой граней, а также алмазы кубического габитуса из трубок месторождения им. М. В. Ломоносова и Удачная (табл. 2). Средние содержания примесей в кристаллах всех сопоставляемых групп в алмазах месторождения им. М. В. Ломоносова выше, чем в алмазах из трубки Удачная. Ключевое значение при сравнении имеют группы алмазов с тригональной формой граней, обладающих послойно-октаэдрическим внутренним строением, которые характеризуются сходным распределением азота в кристаллах и температурами алмазообразования, но существенно различаются по содержанию водорода (см. табл. 2).

Подобные отличия морфологических групп алмазов пространственно разобщённых мес-

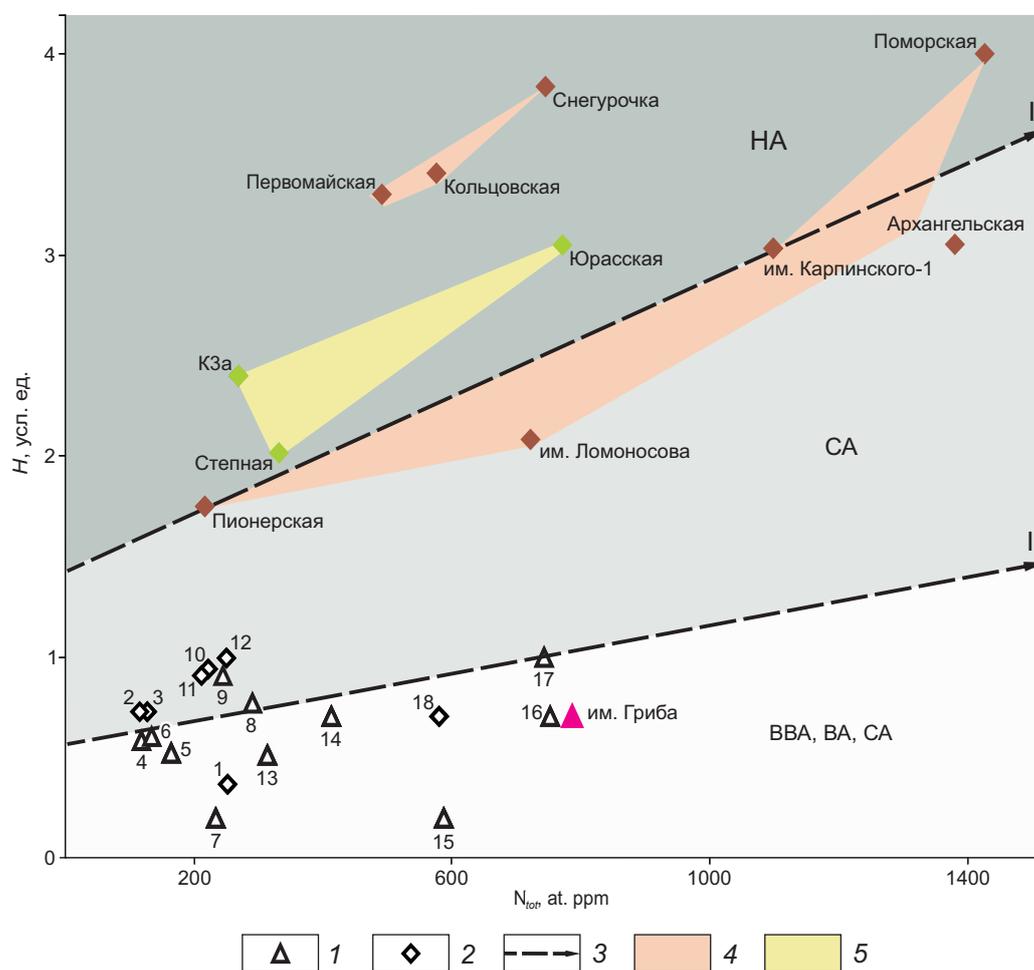


Рис. 4. Усреднённые содержания азота (N_{tot} , at. ppm) и водорода (H, усл. ед.) в алмазах (23–135 шт.) из трубок Архангельской области (тренд I) и Якутии (тренд II):

трубки: 1 – Заполярная, 2 – Поисковая, 3 – Дальняя, 4 – Айхал, 5 – Сытыканская, 6 – Удачная, 7 – Юбилейная, 8 – Молодость-1, 9 – Комсомольская, 10 – Прогнозная, 11 – Зарница, 12 – Краснопресненская, 13 – Ленинград, 14 – Мир, 15 – Спутник, 16 – им. XXIII съезда КПСС, 17 – Интернациональная, 18 – Малокуонапская; доминантные формы алмазов в трубках Якутии: 1 – октаэдрическая, 2 – ромбододекаэдрическая, 3 – линия тренда; области алмазов: 4 – Золотицкого поля, 5 – Кепинского поля; BBA, BA, CA, HA – соответственно весьма высокоалмазоносные, высокоалмазоносные, среднеалмазоносные и низкоалмазоносные месторождения; остальные усл. обозн. см. рис.3

Fig. 4. Average nitrogen (N_{tot} , at. ppm) and hydrogen (H, conv. units) contents in diamonds (23–135 samples) from pipes of the Arkhangelsk region (trend I) and Yakutia (trend II):

pipes: 1 – Zapolyarnaya, 2 – Poiskovaya, 3 – Dalnyaya, 4 – Aikhal, 5 – Sytykanskaya, 6 – Udachnaya, 7 – Yubileynaya, 8 – Molodost-1, 9 – Komsomolskaya, 10 – Prognoznaya, 11 – Zarnitsa, 12 – Krasnopresnenskaya, 13 – Leningrad, 14 – Mir, 15 – Sputnik, 16 – CPSU XXIII Congress, 17 – Internatsionalnaya, 18 – Malokuonapskaya; the dominant diamond shapes in the Yakutian pipes: 1 – octahedral, 2 – rhombic dodecahedral, 3 – trend line, 4 – diamond area within Zolotitskoye field, 5 – diamond area within Kepinskoye field; BBA, BA, CA, HA – respectively, quite high-grade, high-grade, medium-grade and low-grade diamond deposits; see Fig. 3 for other legend

торождений могут быть обусловлены разным содержанием азота и водорода в источнике вещества алмаза.

Два тренда распределения азота и водорода в кристаллах алмаза. Как показано выше, наличие двух групп кристаллов, характеризующихся разным соотношением азота и водорода в кристаллах, обусловлено механизмом их роста, термодинамическими факторами алмазообразования и составом биогенных источников алмазного вещества. На диаграмме (рис. 4) эти группы образуют два тренда: архангельский (I) и якутский (II). Каждый из трендов демонстрирует положительную корреляцию содержания водорода и азота в кристаллах. Однако относительное содержание водорода в архангельских алмазах выше, чем в якутских. Положительная корреляция концентраций азота и водорода в алмазах из разных трубок отмечалась нами ранее [15] и интерпретировалась как результат общности источников азота и водорода в среде алмазообразования. Интересно, что в алмазах отдельных кимберлитовых трубок, например в трубках кластера Пандрэа (район Жуина, Бразилия), корреляция содержаний азота и водорода носит линейный характер. Это признак того, что азот и водород входили в состав одного и того же химического соединения или являлись компонентами какой-либо химической реакции. Однако в большинстве случаев пропорции между концентрациями азота и водорода в алмазах варьируются. Это может быть связано с разным соотношением азота и водорода в составе алмазообразующих органических соединений, а также с тем, что часть водорода может иметь собственный источник. Так, главными компонентами газов, выделенных из алмаза, являются N_2 , H_2O , H_2 , CH_4 [25], среди которых отмечается разнообразие водородных соединений, а азот представлен лишь одной формой.

Из рис. 4 видно, что фигуративные точки алмазов из убогоалмазоносных трубок Архангельской области Снегурочка, Первомайская, Кольцовская, Поморская (Золотицкое поле), а также Юраская, Степная, Архангельская-ЦНИГРИ лежат выше линии тренда I, то есть

характеризуются относительно повышенными содержаниями водорода. Также это наглядно видно на кривых распределения алмазов архангельских трубок по содержанию в них азота и водорода (см. рис. 2).

В пределах якутского тренда (II), построенного по 744 кристаллам алмаза из 18 трубок, концентрации водорода в алмазах значительно ниже, а их вариации относительно невелики. К сожалению, в нашем распоряжении не было коллекций алмаза из убогоалмазоносных трубок Якутии, но опубликованные данные [3] подтверждают тенденции, установленные для архангельских алмазов. В работе [3] проведено массовое исследование распределения азота и водорода в алмазах убогоалмазоносных трубок Якутии: Восток, 30 лет Айхалу, Озёрная, Радиоволновая, им. Соболева, Чукукская, а также высокоалмазоносных трубок Нюрбинская, Ботуобинская, Айхал, Комсомольская и Юбилейная. В исследованиях авторы пользовались оригинальной методикой определения концентраций азота и водорода в алмазах, которая не является общепринятой, поэтому нельзя исключить систематической погрешности между их данными и нашими. Тем не менее общая тенденция относительного увеличения концентрации водорода в алмазах убогоалмазоносных трубок прослеживается и на примере Якутии. Это видно из рис. 5, основанного на данных работы [3].

В развитие исследований взаимосвязи алмазоносности трубок Якутии со свойствами кристаллов алмаза Л. Д. Бардухинов проанализировал распределение азота в алмазах из различных коренных месторождений Якутии [2]. Алмазоносность этих трубок варьируется от 0,5 до ~ 9 кар/т. Оказалось, что в алмазах самых высокопродуктивных трубок Интернациональная, Нюрбинская, Мир среднее содержание азота в алмазах выше по сравнению с трубками, содержащими низкоазотные алмазы, – Айхал, Удачная, Зарница, Комсомольская и Юбилейная. Эта особенность позволяет оценить генетическую информативность азота и его роль в природном алмазообразовании.

Взаимосвязь распределения примесей в алмазах из разных трубок и их алмазоносности.

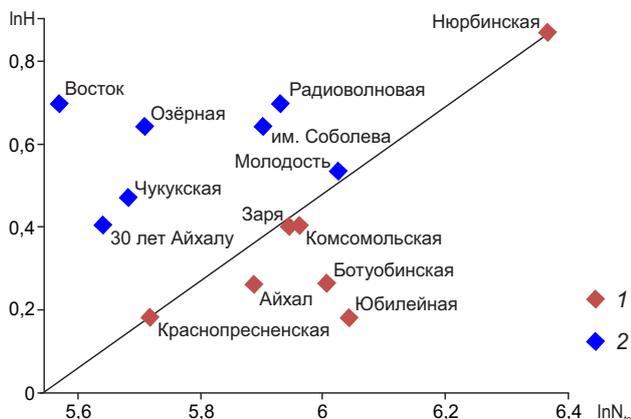


Рис. 5. Соотношение усреднённых концентраций азота ($\ln N_{tot}$) и водорода ($\ln H$) в алмазах из высокопродуктивных (1) и убогоалмазоносных (2) трубок Якутии с использованием данных [3]

число образцов в каждой изученной выборке алмаза не менее 100 штук

Fig. 5. The ratio of the average nitrogen ($\ln N_{tot}$) and hydrogen ($\ln H$) concentrations in diamonds from highly productive (1) and low-grade (2) Yakutian diamond pipes using data from [3]

the number of samples in each studied diamond selected group is at least 100

Обобщая полученные данные (около 1,5 тыс. кристаллов из 30 объектов), мы можем сделать вывод, что распределение азота и водорода в выборках алмаза из разных трубок коррелирует с их алмазоносностью (см. рис. 4). При этом относительное содержание водорода является отрицательным фактором алмазоносности, а суммарное содержание азота – положительным.

Согласно классификации коренных месторождений алмазов для прогнозно-поисковых целей [7] по содержанию алмазов выделяют четыре группы тел: весьма высокоалмазоносные (Интернациональная, им. XXIII съезда КПСС, Мир), высокоалмазоносные (Удачная, Юбилейная), среднеалмазоносные (Спутник, Дачная, Сытыканская, Комсомольская, Дальняя, Краснопресненская, Заполярная, им. Ло-

моносова, Пионерская, им. Карпинского-1 и -2, Архангельская) и низкоалмазоносные (Поморская). На диаграмме (см. рис. 4) алмазы весьма (ВВА) и высокоалмазоносных (ВА), а также среднеалмазоносных (СА) трубок располагаются ниже линии тренда архангельских алмазов. Алмазы низкоалмазоносной (НА) трубки Поморская месторождения им. М. В. Ломоносова, а также других убогоалмазоносных тел Архангельской области приурочены к верхней части диаграммы и находятся выше линии тренда I.

Причины взаимосвязи алмазоносности трубок и распределения структурных примесей в алмазах могут быть различными. Скорее всего, мы имеем дело с результирующим влиянием сразу нескольких (и, возможно, разнонаправленных) воздействий и факторов.

С позиций разрабатываемой нами концепции образования алмаза с участием органического вещества, погружённого в мантию [15], можно предположить, что общее содержание азота в алмазах отражает концентрацию азотсодержащей биомассы в протолите. Чем она выше, тем выше будет потенциальная алмазоносность мантийной среды, которая выносится на поверхность кимберлитовыми трубками. Водород – также составляющая биомассы, однако, как отмечалось выше, его источники в мантийной среде могут быть и другими. В связи с этим чёткой линейной корреляции между содержаниями азота и водорода, как правило, нет, а положительная связь концентраций этих элементов фиксируется лишь в виде общей тенденции. Фактически же алмазы с одинаковым содержанием азота, отобранные из разных трубок, могут существенно отличаться по содержанию водорода. Например, алмазы из трубок Интернациональная, им. Ломоносова и Снегурочка (см. рис. 4), сходные по распределению азота, характеризуются разным содержанием водорода (соответственно 1, 2,1 и 3,7).

Роль водорода как отрицательного фактора алмазоносности может быть обусловлена негативным влиянием примесей на рост кристаллов алмаза. Как известно из теории и экспериментальных данных, примеси, отлагаясь на растущей поверхности алмаза, препятст-

вуют сначала послойному росту, а при значительных концентрациях – и росту по нормальному механизму. При определённых термодинамических параметрах кристаллизации существуют пороговые значения концентраций примесей, начиная с которых рост кристаллов полностью прекращается. В этом плане азот представляется менее агрессивной примесью по сравнению с водородом. Атом азота близок по размеру к атому углерода и изоморфно замещает его в алмазной решётке, а водород химически адсорбирован растущей поверхностью и образует дефекты, препятствующие дальнейшему «воспроизведению алмазной структуры». Возможность активного воздействия примеси водорода на рост кристаллов алмаза показана нами в работе [4]. Поэтому не исключено, что повышенное содержание водородных центров в алмазах из трубок с низкой алмазоносностью обусловлено тем, что водо-

родные дефекты могут блокировать рост алмазов, так что он прекращается на раннем этапе с образованием большого числа микрокристаллов. По такой же причине в метаморфических породах Кокчетавского массива могут образовываться микроалмазы, характеризующиеся экстремально высокими концентрациями водородных центров.

Таким образом, намечена положительная корреляция алмазоносности архангельских и якутских трубок со средним содержанием азота в кристаллах и, соответственно, отрицательная – с содержанием водорода.

С практической точки зрения выявленное соотношение между распределением примесей в алмазах из разных трубок и их алмазоносностью должно учитываться при предварительной оценке продуктивности прогнозируемых коренных источников алмазов из россыпей.

Список литературы

1. Анашкина Н. Е., Хачатрян Г. К. Применение метода ИК-Фурье-спектроскопии для оценки технологических свойств и качества алмазного сырья // Руды и металлы. – 2015. – № 3. – С. 70–77.
2. Бардухинов Л. Д. Особенности алмазов и состав включений в них как поисковые признаки на примере Накынского и Алакит-Мархинского кимберлитовых полей : специальность 25.00.11 «Геология, поиски и разведка твёрдых полезных ископаемых, минерагения» : дис. на соискание учёного степен. канд. геол.-минерал. наук / Бардухинов Леонид Данилович. – Улан-Удэ, 2020. – 143 с.
3. Бардухинов Л. Д., Спеццус З. В., Липашова А. Н. Структурные дефекты и минеральные включения в алмазах из кимберлитовых трубок Накынского и Алакит-Мархинского полей по данным КР- и ИК-спектроскопии // Руды и металлы. – 2018. – № 4. – С. 76–86.
4. Блинова Г. К. Структурные примеси как индикаторы механизма роста природных кристаллов алмаза // Доклады АН СССР. – 1987. – Т. 294, № 4. – С. 868–871.
5. Гаранин В. К., Криулина Г. Ю., Гаранин К. В., Самосоров Г. Г. Архангельские алмазы. Новые данные : монография. – М. : МГУ, 2018. – 232 с.
6. Геншафт Ю. С., Якубова С. А., Волкова Л. М. Внутренняя морфология природных алмазов // Исследования глубинных минералов. – М. : ИФЗ РАН, 1977. – С. 5–131.
7. Геология, прогнозирование, методика поисков, оценки и разведки месторождений алмазов. Книга 1. Коренные месторождения / В. М. Подчасов, В. Е. Минорин, И. Я. Богатых [и др.]. – Якутск : ЯФ ГУ СО РАН, 2004. – 548 с.
8. Захарченко О. Д., Махин А. И., Хачатрян Г. К. Типоморфные свойства алмазов : монография. – М. : ЦНИГРИ, 2002. – 104 с.
9. Зинчук Н. Н., Коптиль В. И. Типоморфизм алмазов Сибирской платформы : монография. – М. : Недра, 2003. – 603 с.
10. Литвин Ю. А., Бутузов В. П. О росте кристаллов искусственного алмаза // Доклады АН СССР. – 1968. – Т. 181, № 5. – С. 1123–1125.
11. Палажченко О. В. Комплексные исследования алмаза из месторождений Архангельской кимберлитовой провинции: обобщение, генетические и практические следствия // Вестник Московского государственного университета. Серия 4. Геология. – 2008. – № 2. – С. 68–75.
12. Саблуков С. М., Саблукова Л. И. Реконструкция строения мантийного субстрата Зимнебережно-

- го алмазоносного района по особенностям мантйных ксенолитов и вещественному составу вулканических пород // Региональная геология и металлогения. – 2005. – № 26. – С. 94–102
13. *Соболев Е. В., Ленская С. В.* О проявлении «газовых» примесей в спектрах природных алмазов // Геология и геофизика. – 1965. – № 2. – С. 157–159.
 14. *Соболев Е. В., Лисовайн В. И.* Примесные центры в алмазах // Тезисы VIII Отчётной научной конференции. – Новосибирск, 1971. – С. 60–61.
 15. *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.
 16. *Хачатрян Г. К.* Типизация алмазов из кимберлитов и лампроитов по распределению азотных центров в кристаллах // Руды и металлы. – 2010. – № 2. – С. 46–60.
 17. *Хачатрян Г. К.* Усовершенствованная методика оценки концентраций азота в алмазе и практическое применение // Геологические аспекты минерально-сырьевой базы АК «АЛРОСА». Современное состояние, перспективы, решения. – Мирный, 2003. – С. 319–321.
 18. *Хачатрян Г. К., Палажченко О. В., Гаранин В. К., Иванников П. Ф., Веричев Е. М.* Генезис «неравновесных» кристаллов алмаза из кимберлитовой трубки им. Карпинского-1 по данным катодной люминесценции и ИК-спектроскопии // Вестник Московского государственного университета. Серия 4. Геология. – 2008. – № 2. – С. 38–45.
 19. *Чернов А. А., Гиваргизов Е. И., Багдасаров Х. С. [и др.]*. Современная кристаллография : монография. Том 3. Образование кристаллов / Под ред. Б. К. Вайнштейна, А. А. Чернова, Л. А. Шувалова. – М. : Наука, 1980. – 408 с.
 20. *Bursill L. A., Glaisher R. W.* Aggregation and dissolution of small and extended defect structures in type I a diamond // *American Mineralogist*. – 1985. – V. 70. – P. 608–618.
 21. *Davies G.* The A nitrogen aggregate in diamondits symmetry and possible structure // *Journal of Physics: Conference Series*. – 1976. – V. 9. – P. 537–542.
 22. *Deines P., Harris J. W., Gurney J. J.* Associated chemical and carbon isotopic composition variations in diamonds from Finsch and Premier kimberlite, South Africa // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1984. – V. 48, № 2. – P. 325–342.
 23. *Deines P., Harris J. W., Gurney J. J.* The carbon isotopic composition and nitrogen content of lithospheric and asthenospheric diamonds from the Jagersfontein and Koffifontein Kimberlite, South Africa; evidens for super ¹³C depletion in mantle // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1991. – V. 55, № 5. – P. 2615–2625.
 24. *Deines P., Harris J. W., Spear P. M., Gurney J. J.* Nitrogen and C¹³ content of Finsch and Premier diamonds and their implications // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1989. – V. 53. – P. 1367–1378.
 25. *Melton C. E., Salotti C. A., Giardini A. A.* The observation of nitrogen, carbon dioxide, methane and argon as impurities in natural diamonds // *American Mineralogist*. – 1972. – V. 57, № 9–10. – P. 1518–1523.
 26. *Scarratt K. A., Fritsh E.* Note on diamond types // *Gems & Gemology*. – 1992. – Spring. – P. 38–42.
 27. *Taylor W. R., Jaques L. A., Ridd M.* Nitrogen-defect aggregation characteristics of Australian diamonds: Time-temperature constraints on the source regions of pipe and alluvial diamonds // *American Mineralogist*. – 1990. – V. 75. – P. 1290–1310.
 28. *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. – P. 471–475.

References

1. Anashkina N. E., Khachatryan G. K. *Primenenie metoda IK-Fur'e-spektroskopii dlya otsenki tekhnologicheskikh svoistv i kachestva almaznogo syr'ya* [The use of the IR Fourier spectroscopy method for assessing the technological properties and quality of diamond raw materials], *Rudy i metally* [Ores and Metals], 2015, No 3, pp. 70–77. (In Russ.).
2. Bardukhinov L. D. *Osobnosti almazov i sostav vkluyucheni v nikh kak poiskovye priznaki na primere Nakynskogo i Alakit-Markhinskogo kimberlitovykh polei* [Diamond features and the composition of inclusions in them as search signs on the example of the Nakyan and Alakit-Marharian kimberlite fields: Extended abstract of candidate's thesis], Ulan-Ude, 2020, 143 p.
3. Bardukhinov L. D., Spetsius Z. V., Lipashova A. N. *Strukturnye defekty i mineral'nye vkluyucheniya v almazakh iz kimberlitovykh trubok Nakynskogo i*

- Alakit-Markhinskogo polei po dannym KR- i IK-spektrskopii [Structural defects and mineral inclusions in diamonds from Kimberlite tubes of the Naryn and Alakit – Marchin fields according to the data of the Cr- and IR spectroscopy], *Rudy i metally* [Ores and Metals], 2018, No 4, pp. 76–86. (In Russ.).
4. Blinova G. K. Strukturnye primesi kak indikator mekhanizma rosta prirodnykh kristallov almaza [Structural impurities as indicators of the mechanism of natural diamond crystals], *Doklady AN SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1987, V. 294, No 4, pp. 868–871. (In Russ.).
 5. Garanin V. K., Kriulina G. Yu., Garanin K. V., Samosorov G. G. Arkhangel'skie almazy. Novye dannye [Arkhangelian diamonds. New data], Moscow, MGU Publ., 2018, 232 p.
 6. Genshaft Yu. S., Yakubova S. A., Volkova L. M. Vnutrennyaya morfologiya prirodnykh almazov [Internal morphology of natural diamonds], *Issledovaniya glubinykh mineralov* [Studies of deep minerals], Moscow, IFZ RAN Publ., 1977, pp. 5–131.
 7. Geologiya, prognozirovaniye, metodika poiskov, otsenki i razvedki mestorozhdenii almazov. Kniga 1. Korennyye mestorozhdeniya [Geology, forecasting, methods of searches, assessment and exploration of diamond deposits. Book 1. Indigenous fields], Yakutsk, YaF GU SO RAN Publ., 2004, 548 p.
 8. Zakharchenko O. D., Makhin A. I., Khachatryan G. K. Tipomorfnye svoystva almazov [Typomorphic properties of diamonds], Moscow, TsNIGRI Publ., 2002, 104 p.
 9. Zinchuk N. N., Koptil' V. I. Tipomorfizm almazov Sibirskoi platformy [Siberian platform diamond typomorphism], Moscow, Nedra Publ., 2003, 603 p.
 10. Litvin Yu. A., Butuzov V. P. O roste kristallov iskusstvennogo almaza [On the growth of artificial diamond crystals], *Doklady AN SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1968, V. 181, No 5, pp. 123–1125. (In Russ.).
 11. Palazhchenko O. V. Kompleksnyye issledovaniya almaza iz mestorozhdenii Arkhangel'skoi kimberlitovoi provintsii: obobshchenie, geneticheskie i prakticheskie sledstviya [Comprehensive diamond studies from the Arkhangelsk Kimberlite Province fields: generalization, genetic and practical consequences], *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya* [Moscow University Bulletin. Series 4. Geology], 2008, No 2, pp. 68–75. (In Russ.).
 12. Sablukov S. M., Sablukova L. I. Rekonstruktsiya stroeniya mantiinogo substrata Zimnerezhnogo almazonosnogo raiona po osobennostyam mantiinykh ksenolitov i veshchestvennomu sostavu vulkanicheskikh porod [Comprehensive diamond studies from the Arkhangelsk Kimberlite Province fields: generalization, genetic and practical consequences], *Regional'naya geologiya i metallogeniya* [Regional Geology and Metall], 2005, No 26, pp. 94–102. (In Russ.).
 13. Sobolev E. V., Lenskaya S. V. O proyavlenii "gazykh" primesei v spektrakh prirodnykh almazov [On the manifestation of "gas" impurities in the spectra of natural diamonds], *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 1965, No 2, pp. 157–159. (In Russ.).
 14. Sobolev E. V., Lisovain V. I. Primesnye tsentry v almazakh [Impurity centers in diamonds], *Tezisy VIII Otchetnoi nauchnoi konferentsii* [Abstracts of the VIII Report Scientific Conference], Novosibirsk, 1971., pp. 60–61.
 15. Khachatryan G. K. Azot i vodorod v kristallakh almaza v aspekte geologo-geneticheskikh i prognozno-poiskovykh problem almaznykh mestorozhdenii [Typing diamonds from kimberlites and lamproitons on the distribution of nitrogen centers in crystals], *Otechestvennaya geologiya* [National Geology], 2013, No 2, pp. 29–40. (In Russ.).
 16. Khachatryan G. K. Tipizatsiya almazov iz kimberlitov i lamproitov po raspredeleniyu azotnykh tse ntrov v kristallakh [Typing diamonds from kimberlites and lamproitons on the distribution of nitrogen centers in crystals], *Rudy i metally* [Ores and Metals], 2010, No 2, pp. 46–60. (In Russ.).
 17. Khachatryan G. K. Uovershenstvovannaya metoda otsenki kontsentratsii azota v almaze i ee prakticheskoe primeneniye [An improved method of estimating nitrogen concentrations in diamond and its practical application], *Geologicheskie aspekty mineral'no-syr'evoi bazy AK "ALROSA". Sovremennoe sostoyaniye, perspektivy, resheniya* [Geological aspects of the mineral resource base of AK "ALROSA". Modern condition, prospects, solutions], Mirnyi, 2003, pp. 319–321. (In Russ.).
 18. Khachatryan G. K., Palazhchenko O. V., Garanin V. K., Ivannikov P. F., Verichev E. M. Genezis "neravnovesnykh" kristallov almaza iz kimberlitovoi trubki im. Karpinskogo-1 po dannym katodnoi lyuminesentsii i IK-spektrskopii [The genesis of "non-equilibrium" diamond crystals from a kimberlite tube them. Karpinsky-1 according to cathode luminescence and IR spectroscopy], *Vestnik Moskovskogo*

- gosudarstvennogo universiteta [Moscow University Bulletin. Series 4. Geology]*, 2008, No 2, pp. 38–45. (In Russ.).
19. Chernov A. A., Givargizov E. I., Bagdasarov Kh. S. [et al.] *Sovremennaya kristallografiya. Tom 3. Obrazovanie kristallov [Modern crystallography. Volume 3. The formation of crystals]*, Moscow, Nauka Publ., 1980, 408 p.
 20. Bursill L. A., Glaisher R. W. Aggregation and dissolution of small and extended defect structures in type I a diamond, *American Mineralogist*, 1985, V. 70, pp. 608–618.
 21. Davies G. The A nitrogen aggregate in diamond: symmetry and possible structure, *Journal of Physics: Conference Series*, 1976, V. 9, P. 537–542.
 22. Deines P., Harris J. W., Gurney J. J. Associated chemical and carbon isotopic composition variations in diamonds from Finsch and Premier kimberlite, South Africa, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, V. 48, No 2, pp. 325–342.
 23. Deines P., Harris J. W., Gurney J. J. The carbon isotopic composition and nitrogen content of lithospheric and asthenospheric diamonds from the Jagersfontein and Koffifontein Kimberlite, South Africa; evidens for super ^{13}C depletion in mantle, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, V. 55, No 5, pp. 2615–2625.
 24. Deines P., Harris J. W., Spear P. M., Gurney J. J. Nitrogen and C^{13} content of Finsch and Premier diamonds and their implications, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, V. 53, pp. 1367–1378.
 25. Melton C. E., Salotti C. A., Giardini A. A. The observation of nitrogen, carbon dioxide, methane and argon as impurities in natural diamonds, *American Mineralogist*, 1972, V. 57, No 9–10, pp. 1518–1523.
 26. Scarratt K. A., Fritsh E. Note on diamond types, *Gems & Gemology*, 1992, Spring, pp. 38–42.
 27. Taylor W. R., Jaques L. A., Ridd M. Nitrogen-defect aggregation characteristics of Australian diamonds: Time-temperature constraints on the source regions of pipe and alluvial diamonds, *American Mineralogist*, 1990, V. 75, pp. 1290–1310.
 28. 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.

Авторы

Хачатрян Галина Карленовна

доктор геолого-минералогических наук
ведущий научный сотрудник
khachatryan_g_k@mail.ru

Анашкина Наталия Евгеньевна

кандидат технических наук
научный сотрудник
for_nataliya@list.ru

ФГБУ «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов», г. Москва

Authors

Khachatryan Galina Karlenovna

PhD
leading researcher
khachatryan_g_k@mail.ru

Anashkina Nataliya Evgenevna

PhD
researcher
for_nataliya@list.ru

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