

Типоморфизм алмазов трубки Снегурочка (Архангельская область) по данным ИК-спектроскопии

Аннотация. С применением метода ИК-спектроскопии изучено распределение структурных примесей и дефектов в алмазах трубки Снегурочка, расположенной в Золотицком поле. Среди них преобладают кристаллы с повышенной степенью агрегации азота, не типичные для трубок месторождения им. М. В. Ломоносова Архангельской области. По сравнению с месторождениями Центральных районов Якутии в трубке Снегурочка распространены алмазы с высоким содержанием структурной примеси водорода и плейтлетс. По комплексу типоморфных свойств они не имеют аналогов среди кристаллов из высокоалмазонасных кимберлитов России и мира, при этом часто встречаются в россыпях с неустановленными коренными источниками. Предполагается, что в качестве таких первоисточников можно рассматривать кимберлит-лампроитовые (кимберлитовые) трубки, сходные с трубкой Снегурочка и расположенные в краевых частях платформ. Концентрирование алмазов из этих трубок происходит в течение длительного времени во вторичных коллекторах.

Ключевые слова: алмаз, азот, водород, плейтлетс, степень агрегации азота, структурные примеси и дефекты, типоморфизм, месторождение, трубка, коренной источник, россыпь.

ХАЧАТРЯН ГАЛИНА КАРЛЕНОВНА, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник¹, khachatryan_g_k@mail.ru

АНАШКИНА НАТАЛИЯ ЕВГЕНЬЕВНА, кандидат технических наук, ведущий инженер², for_nataliya@list.ru

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов» (ФГБУ «ЦНИГРИ»), г. Москва

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), г. Москва

Typomorphism of diamonds from the Snegurochka pipe, Arkhangelsk Region, based on IR spectroscopy

G. K. KHACHATRYAN¹, N. E. ANASHKINA²

¹ Federal State Budgetary Institution "Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals" (TsNIGRI), Moscow

² Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (IGEM RAS), Moscow

Annotation. Distribution of the structural impurities and defects in diamonds from the Snegurochka pipe located in the Zolotitskoye field was studied using IR spectroscopy. The diamonds are dominated by crystals with an elevated degree of nitrogen aggregation, which is not typical for diamond pipes at the M. V. Lomonosov deposit in the Arkhangelsk Region. Compared to deposits in the central regions of Yakutia, the Snegurochka pipe is characterized by diamonds with a high content of structural hydrogen impurities and platelets. In terms of typomorphic properties, these diamonds are unique among crystals from highly diamondiferous kimberlites in Russia and around the world, although they are often found in placers with unknown source areas. It is assumed that kimberlite-lamproite (kimberlite) pipes similar to the Snegurochka pipe and located in the marginal parts of platforms can be considered as such the primary sources. Diamonds from these pipes accumulate over long periods of time in secondary collectors.

Key words: diamond, nitrogen, hydrogen, platelets, nitrogen aggregation degree, structural impurities and defects, typomorphism, mineral deposit, pipe, primary source, placer.

Введение. Трубка Снегурочка расположена в Золотицком поле Архангельской области южнее месторождения им. М. В. Ломоносова. В него входят трубки Архангельская, им. Карпинского-2, им. Карпинского-1, Пионерская, им. М. В. Ломоносова и низкоалмазоносная трубка Поморская. Все эти тела располагаются в виде субмеридиональной цепочки протяжённостью около 14 км, в северной части которой находятся мелкие убогоалмазоносные трубки Первомайская, Кольцовская и Белая.

При эксплуатационной разведке трубки Снегурочка из геологоразведочных проб было извлечено более 1000 кристаллов алмаза, массовое изучение которых с применением современных физико-химических методов ранее не проводилось. По данным В. К. Гаранина с соавторами [2], они отличаются достаточно высоким ювелирным качеством и близки по минералогическим характеристикам к алмазам месторождения им. М. В. Ломоносова. Согласно предварительным оценкам [9], по содержанию алмазов эта трубка сопоставима с трубкой им. Карпинского-2 и превосходит трубку Поморская. Настоящая работа направлена на выявление типоморфных характеристик и оценку условий образования алмазов трубки Снегурочка на основе детального исследования распределения в них структурных примесей с применением метода ИК-спектроскопии. Эти данные могут быть использованы при разработке и совершенствовании критериев прогноза и поисков алмазных месторождений.

Образцы и методы исследования. Объектами исследования послужили 102 кристалла алмаза размером от 0,5 до 4 мм из кимберлитовой трубки Снегурочка (коллекция В. К. Гаранина). Среди них 53 образца относятся к классам крупности -4+2 и -2+1 мм. Немногим более половины образцов от всех алмазов, – бесцветные, реже встречаются индивиды с серой окраской, в подчинённом количестве отмечаются жёлтые и дымчато-коричневые кристаллы. Большинство образцов – целые или незначительно повреждённые, тогда как на долю обломков и осколков в сумме приходится около 40 % от общего количества кристаллов. В изученной коллекции доминируют алмазы ромбододекаэдрического габитуса (~ 2/3 от общего количества), представленные додекаэдроидами (рис. 1, А–В) с разнообразным характером граней, включая грубослоистые кристаллы с округло-ступенчатой скульптурой поверхности. Следующими по распространённости

являются алмазы октаэдрического габитуса (см. рис. 1, Е–З) и переходной от октаэдра к ромбододекаэдру формы (см. рис. 1, Г–Д). В подчинённом количестве присутствуют кристаллы кубического габитуса (см. рис. 1, И) и тетрагексаэдроиды. Алмазы разных классов крупности несколько отличаются друг от друга по морфологическому спектру. Так, в классе крупности -1+0,5 мм доля октаэдрических кристаллов по отношению с ромбододекаэдрическим выше, чем среди кристаллов размером от 1 до 4 мм. Подобное отмечалось и для алмазов из трубок Пионерская и Архангельская Золотицкого поля [5].

В ультрафиолетовых лучах большинство кристаллов обнаруживают сине-голубое и зелёное свечение, реже – слабое розово-сиреневое. В подчинённом количестве присутствуют алмазы с жёлтой фотолюминесценцией, а также без видимого свечения. В изученной коллекции преобладают (> 90 %) образцы с однородным характером свечения, что указывает на отсутствие контрастных изменений во внутреннем строении и истории роста кристаллов. Лишь для единичных образцов отмечается зональный характер фотолюминесценции: жёлтая или жёлто-оранжевая в центральной области и сине-голубая – в периферической. Цвет люминесценции взаимосвязан с кристалломорфологическими характеристиками изученных образцов (рис. 2). Октаэдрические алмазы чаще всего демонстрируют сине-голубое свечение (см. рис. 2, А), реже розовато-сиреневое (см. рис. 2, Б), либо практически не люминесцируют. Вместе с тем среди алмазов ромбододекаэдрического габитуса наиболее распространены индивиды с сине-голубым и зелёным свечением при незначительном преобладании последних (см. рис. 2, Г). Алмазы переходной от октаэдра к ромбододекаэдру формы (см. рис. 2, В) в основном люминесцируют в сине-голубых, реже в зелёных тонах.

Метод ИК-спектроскопии позволяет оценивать концентрации структурных дефектов и примесей в алмазе, которые служат важнейшими индикаторами условий природного алмазообразования. Среди них наиболее информативными в генетическом плане являются азот в форме пар (А)-, одиночных (N)- и тетраэдрически сгруппированных (В)-атомов, замещающих углерод в кристаллической решётке алмаза, а также водород (Н) и плейтлетс (Р) – пластинчатые дефекты интерстициальной природы [11, 18, 19, 21, 24]. Концентрация азота оценивалась количественно с ис-

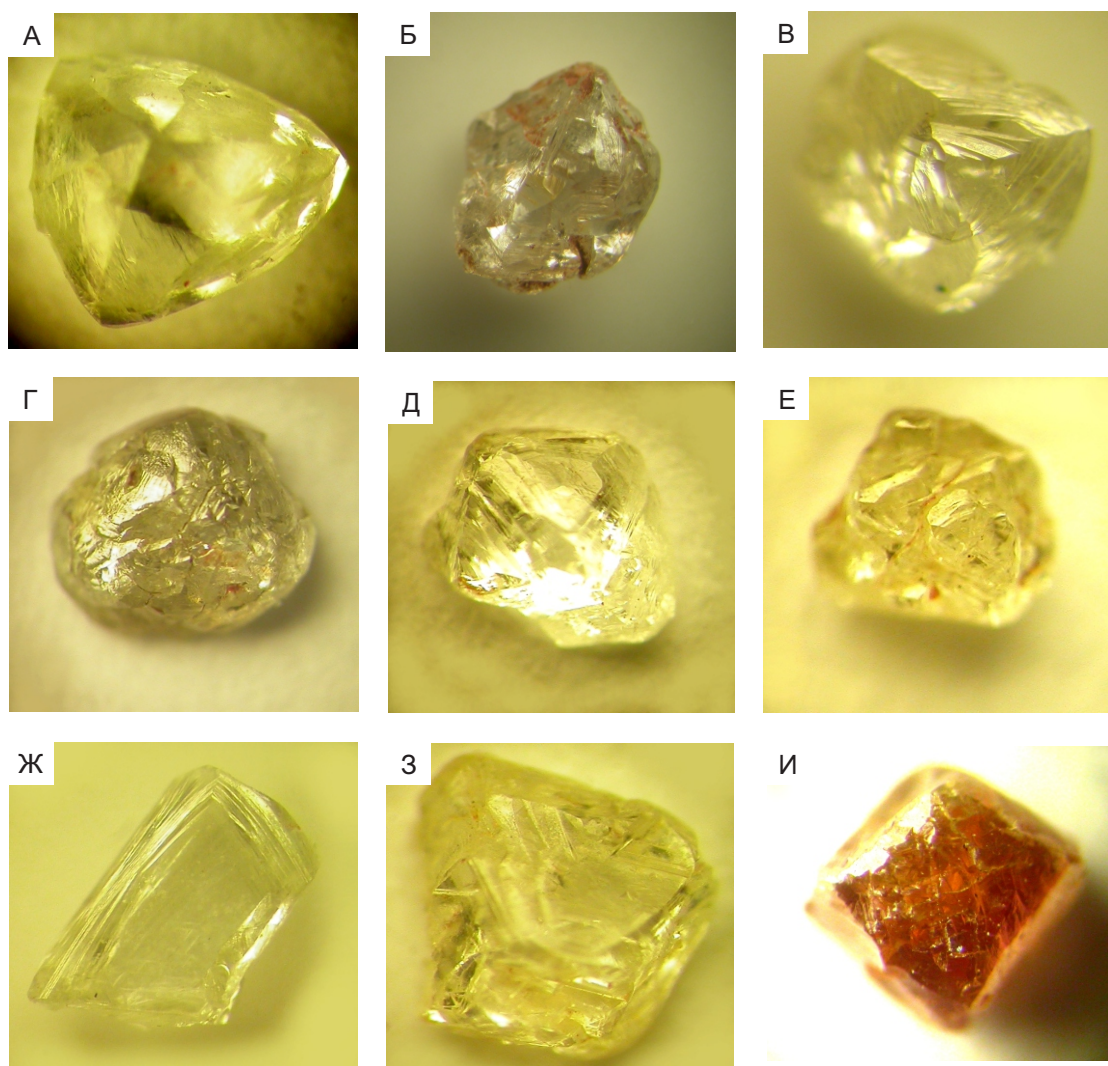


Рис. 1. Внешний облик кристаллов алмаза различного габитуса, распространённых в трубке Снегурочка:

ромбододекаэдрические: с концентрической штриховкой (А), с желобчатой скульптурой (Б), с округло-ступенчатой скульптурой (В); комбинационные ряда октаэдр–додэкаэдр (Г–Д); октаэдрические: с полицентрическим строением граней (Е, З), с дитригональной формой граней (Ж); кубические (И); кристаллы размером (в мм): Б, Г, Д, И – 2–4, А, В, Е, З – 1–2, Ж – 0,5–1

пользованием методики, изложенной нами ранее [16], а содержание водорода и плейтлетс в условных единицах – по коэффициентам поглощения спектральных линий около 3107 и 1365 cm^{-1} соответственно.

ИК-спектры изученных алмазов записывались на ИК-Фурье спектрометре Nicolet 380 корпорации THERMO Scientific с разрешением 2–4 cm^{-1} . При этом образцы размером < 1 мм исследовались с помощью микроскопа Centaurus в диапазоне 650–4000 cm^{-1} , а более крупные (-4+2 и -2+1 мм)

анализировались в диапазоне 400–4000 cm^{-1} с использованием микроосветительной приставки фирмы Carl Zeiss, Jena.

Структурные примеси и дефекты в алмазах. Распределение структурной примеси азота в алмазах из трубки Снегурочка показано на рисунке 3. Суммарное содержание азота (N_{tot}) в кристаллах варьирует в значительных пределах от 40 до ~ 2000 at.ppm, причём наиболее распространены индивиды с концентрацией примеси более 400 at.ppm. По степени агрегации азота (%NB) они

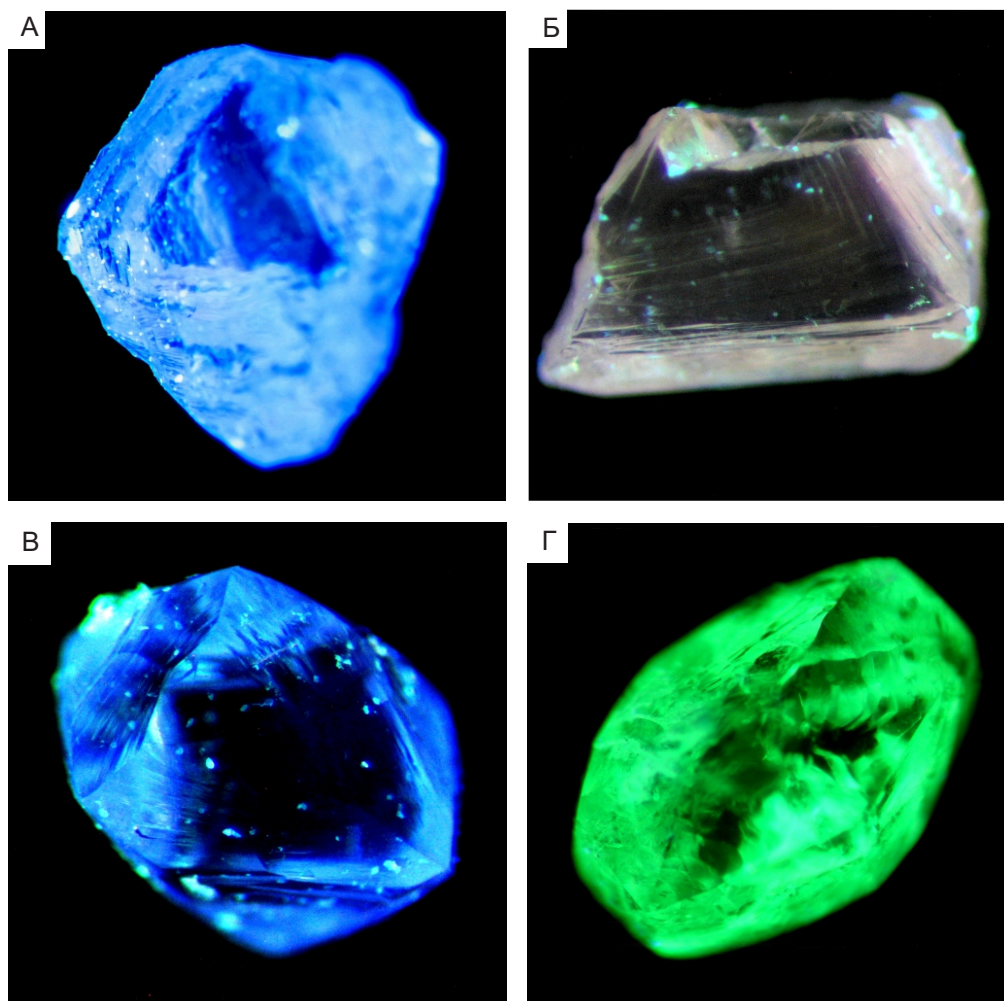


Рис. 2. Разнообразное свечение алмазов трубки Снегурочка в ультрафиолетовых лучах:

кристаллы: октаэдрические (А, Б), комбинационные ряда октаэдр–ромбододекаэдр (В) и ромбододекаэдрические (Г); размер кристаллов: А, В, Г – от 1 до 2 и Б – соответственно от 0,5 до 1 мм

разделяются на две группы: кристаллы с повышенными значениями %NB (35–55), преобладающие в количественном отношении (главная популяция), и, соответственно, с пониженными значениями этого параметра, составляющими 5–30 % (второстепенная популяция). При этом среди алмазов главной популяции доля более крупных кристаллов (-4+2 и -2+1 мм) несколько выше, чем среди мелких индивидов размером от 0,5 до 1 мм (см. рис. 3).

Наличие двух основных популяций алмаза в трубке Снегурочка подтверждается бимодальным характером кривых распределения кристаллов по

относительному содержанию в них азота в В-форме, причём максимум %NB ~ 45 соответствует главной популяции, а %NB ~ 5–15 – второстепенной (рис. 4, Б). Несмотря на незначительные отличия распределения мелких и более крупных алмазов по содержанию в них структурных дефектов и примесей, в целом сопоставляемые группы сходны между собой (см. рис. 4, А–Г). Этим они отличаются от алмазов из трубок месторождения им. М. В. Ломоносова Золотицкого поля, в которых мелкие кристаллы являются низкоазотными и представляют собой самостоятельную генерацию [20].

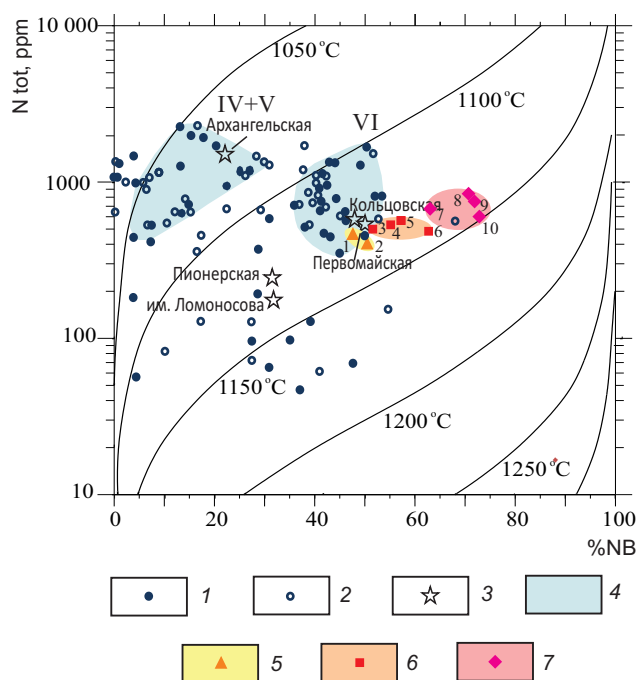


Рис. 3. Распределение структурной примеси азота в алмазах трубки Снегурочка и оценка условий их кристаллизации по модели [23] для условного возраста алмазов 3 млрд лет:

1 и 2 – кристаллы размером от 1 до 4 мм и от 0,5 до 1 мм соответственно; 3 – усреднённые данные по главным популяциям алмаза из трубок Золотицкого поля; 4 – область распространения алмазов главной (VI) и второстепенной (IV + V) популяций трубки Снегурочка; 5 – усреднённые данные по главным популяциям алмаза из триасовых россыпей Нижнеленского района Якутии: 1 – Ольховый (40), 2 – Усат-Хая (30); 6 – усреднённые данные по главным популяциям алмаза из россыпей района Коромандель, Бразилия: 3 – Эспирито Санто (32), 4 – Грота до Пимпим (34), 5 – Криминоза (32), 6 – Имбе (32); 7 – усреднённые данные по главным популяциям алмаза из россыпей района Гуаниамо, Венесуэла: 7 – Ринхи-Ринхи (33), 8 – Кебрада Гранде (40), 9 – Чиуауа (33), 10 – Сентелья (40); числа в круглых скобках – количество образцов в выборках алмаза; 3, 5–7 – наши данные [14]

По общему содержанию азота алмазы трубки Снегурочка характеризуются модальными значениями N_{tot} 500–550 at.ppm и сопоставимы с алмазами из кимберлитовой трубки Мир (см. рис. 4, А) и других месторождений Мало-Ботуобинского района Якутии [15]. Однако, как видно на рис. 4, Б, степень агрегации азота в этих алмазах ни-

же, чем в кристаллах главной популяции трубки Снегурочка (моды %NB ~ 29 и 45 соответственно). Преобладание в трубке Снегурочка кристаллов с повышенной степенью агрегации азота сопровождается высокими концентрациями в них плейтлетс (Р). Алмазы этой трубки представлены двумя группами: с главной модой Р ~ 2,5 см⁻¹ и дополнительной Р ~ 12,5 см⁻¹ (см. рис. 4, В). Главная мода является «универсальной» и характерна не только для трубки Снегурочка, но и для ряда месторождений Якутии. Вместе с тем дополнительную моду можно рассматривать в качестве типоморфной характеристики алмазов этой трубки.

По распределению водорода (мода lnH ~ 0,5) мелкие и более крупные кристаллы из трубки Снегурочка сходны между собой (см. рис. 4, Г), а также с алмазами из близлежащей трубки Архангельская [5]. По сравнению с этим в выборках алмаза из трубок Якутии зафиксированы более низкие концентрации водородных центров и модальные значения lnH < 0 [15].

От алмазов из месторождения им. М. В. Ломоносова изученные кристаллы заметно отличаются по общему содержанию азота (рис. 5). По сравнению с ними в трубках Пионерская и им. М. В. Ломоносова распространены более низкоазотные индивиды (моды N_{tot} ~ 140 и 170 at.ppm соответственно), а в трубках им. Карпинского-1 и Архангельская – более высокоазотные (моды N_{tot} ~ 1400–1420 at.ppm). Вместе с тем большинство алмазов этого месторождения характеризуется относительно низкой степенью агрегации азота (%NB ~ 12–20), что отличает их от главной популяции алмазов трубки Снегурочка (см. рис. 5).

Алмазы из трубок Золотицкого поля обладают не только большим разнообразием, но и чертами сходства, которые свидетельствуют об общности условий их кристаллизации в глубинных источниках. Так, по распределению структурной примеси азота в алмазах трубки Снегурочка, Кольцовская и Первомайская близки между собой (см. рис. 3). Примечательно, что второстепенная популяция алмазов трубки Снегурочка сопоставима с кристаллами, распространёнными в трубках Архангельская (см. рис. 3), им. Карпинского-1 и Поморская [5].

Таким образом, в Золотицком поле на относительно небольшой территории проявлены кимберлитовые трубки, содержащие разнообразные по свойствам и условиям образования алма-

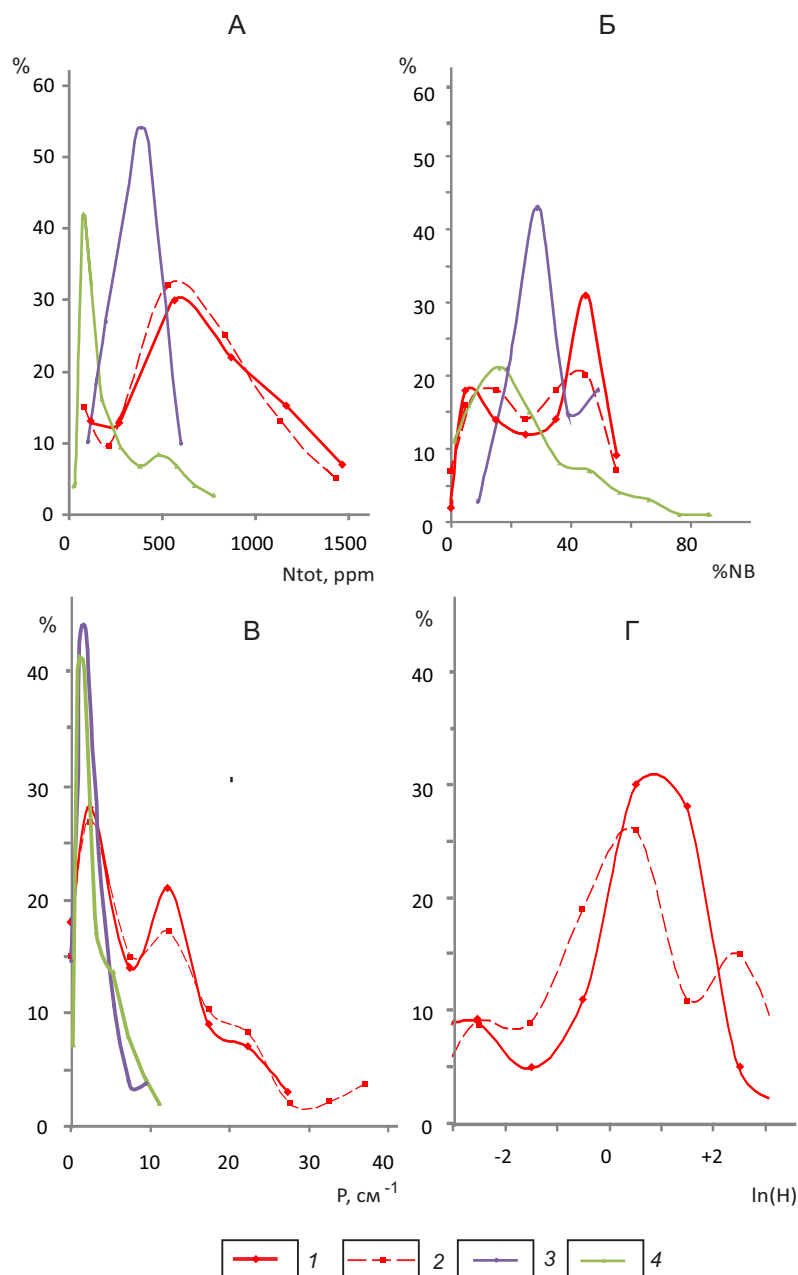


Рис. 4. Кривые распределения алмазов из трубок Снегурочка, Мир и Юбилейная по общему содержанию в них азота (Ntot), степени его агрегации (%NB), относительному содержанию плейтлетс (P) и водорода (lnH):

1–4 – алмазы: 1 – размером от 1 до 4 мм из трубки Снегурочка ($n = 53$), 2 – размером < 1 мм из трубки Снегурочка ($n = 49$), 3, 4 – размером от 1 до 2 мм соответственно из трубок Мир ($n = 30$) и Юбилейная ($n = 90$)

зы: от низкоазотных в трубках Пионерская и им. М. В. Ломоносова до высокоазотных в трубках им. Карпинского-1 и Архангельская. В этом ряду по общему содержанию азота алмазы из трубки Снегурочка занимают промежуточное между ними положение и одновременно характеризуются

повышенной степенью агрегации азота, что нетипично для алмазов из трубок месторождения им. М. В. Ломоносова.

Обсуждение результатов. Как было показано выше, алмазы главной популяции трубки Снегурочка отличаются по распределению азота от

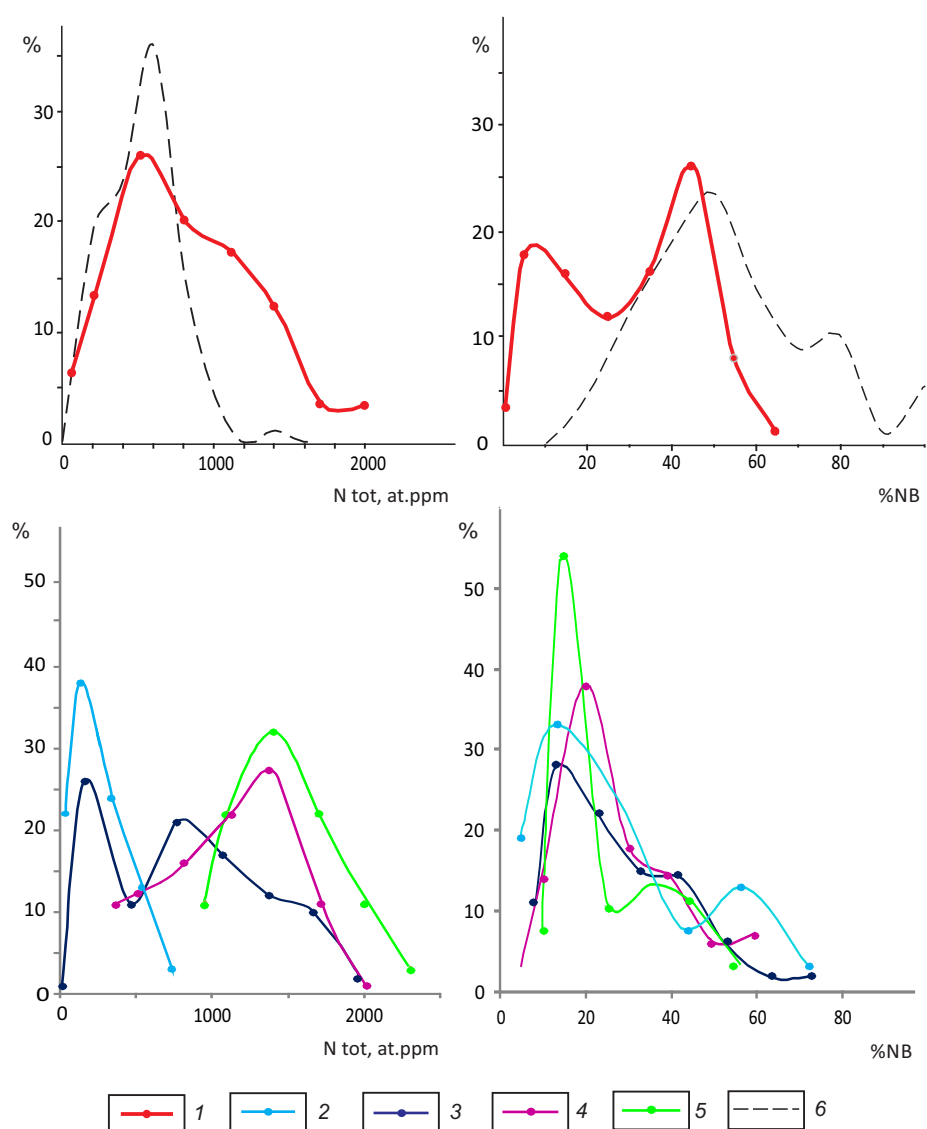


Рис. 5. Кривые распределения алмазов из трубок Золотицкого поля Архангельской области и трубки Светлана (Якутия) по общему содержанию азота (Ntot), степени его агрегации (%NB) в кристаллах:

трубки: 1 – Снегурочка ($n = 102$), 2 – Пионерская ($n = 36$), 3 – им. М. В. Ломоносова ($n = 102$), 4 – им. Карпинского-1 ($n = 77$), 5 – Архангельская ($n = 39$), 6 – Светлана (данные работы [7], $n = 89$); n – число образцов в выборках

алмазов из месторождений им. М. В. Ломоносова Архангельской области и Центральной части Сибирской платформы. Вместе с тем по температурам формирования изученные кристаллы в большинстве своём близки к алмазам трубки Пионерская. Это подчёркивается общим трендом, характеризующим соотношение в кристаллах концентраций плейтлетс (P) и азота в В-форме (NB). На рисунке 6 показаны три группы кристаллов с

различным распределением этих структурных дефектов. Алмазы первой группы, представленные преимущественно алмазами трубок Снегурочка (главная популяция) и Пионерская, характеризуются максимальным соотношением P/NB и демонстрируют положительную корреляцию указанных параметров (тренд 1). Вторая относительно немногочисленная группа включает небольшую часть кристаллов из трубок им. Карпинского-1,

Архангельская и Снегурочка. На диаграмме эти алмазы располагаются вдоль линии тренда 2 и обладают пониженным значением P/NB по сравнению с кристаллами группы 1. Как известно, плейтлетс образуются только в алмазах, содержащих азотные В-центры, причём ранее предполагалось, что соотношение этих параметров постоянно и соответствует графику тренда 2 [3]. Однако по мере накопления экспериментальных данных выяснилось, что распределение в кристаллах плейтлетс и азота в агрегированной форме зависит от температуры алмазообразования. Так, в алмазах с включениями сверхглубинных минералов, содержащих азот в агрегированной форме ($\%NB \sim 90-100$), плейтлетс практически отсутствуют. Это, по-видимому, обусловлено их деградацией под действием высоких температур, в соответствии с экспериментальными данными [19]. В большинстве кристаллов с волокнистой структурой концентрация плейтлетс, как правило, незначительна [17], что наводит на мысль о взаимосвязи этих дефектов с типом внутреннего строения и механизмом роста алмаза. Однако, по данным [10], кубоидные ядра с волокнистым строением внутри октаэдрических кристаллов сформировались в условиях высоких температур и характеризуются значимыми содержаниями плейтлетс. Исходя из этого можно полагать, что формирование пластинчатых дефектов во многом зависит от температуры алмазообразования. На диаграмме (рис. 6) алмазы с пониженным содержанием плейтлетс (0–3 условных единиц), представленные в основном кристаллами из трубок Архангельская и им. Карпинского-1, группируются вдоль оси NB (тренд 3). Таким образом, тренды 1–3 отражают разную температуру алмазообразования, что согласуется с данными работы [22], авторы которой предлагают использовать плейтлетс в геотермометрии.

Для сравнительной характеристики температур и особенностей химизма среды алмазообразования нами были выделены шесть типов алмазных популяций. Популяции V–I образуют ряд, в котором увеличение температуры и соответствующей глубины алмазообразования сопровождается уменьшением общего содержания и степени агрегации азота в кристаллах, а также появлением высокотемпературной популяции типа I [14]. Данная тенденция не вытекает из модели В. Р. Тэйлора [23], согласно которой при постоянных темпе-

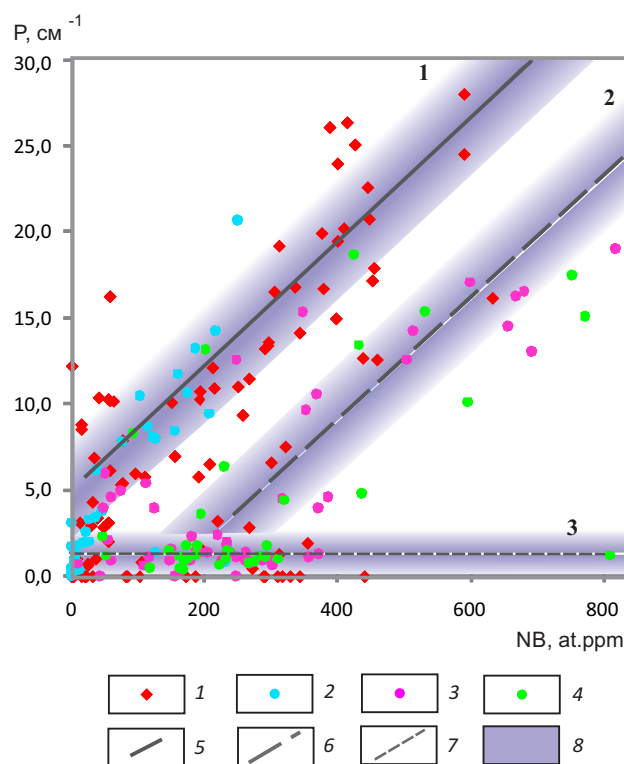


Рис. 6. Соотношение относительного содержания плейтлетс (P) и концентрации азота в В-форме (NB) в алмазах из трубок:

Снегурочка (1), Пионерская (2), им. Карпинского-1 (3) и Архангельская (4); 5–7 – соответственно высокотемпературный, среднетемпературный и низкотемпературный тренды 1–3; 8 – области группирования алмазов вокруг трендов

ратуре и времени отжига степень агрегации азота увеличивается с ростом его общего содержания в кристалле. С учётом этого можно полагать, что распределение азота в алмазах в ряду популяций типов V–I, прежде всего, обусловлено закономерностями природного алмазообразования, а именно – уменьшением общего содержания азота в среде с глубиной. Лишь в популяциях типа VI, распространённых главным образом среди алмазов из россыпей с неустановленными коренными источниками, средне- и высокоазотные алмазы преимущественно содержат азот в агрегированной форме, что соответствует модели В. Р. Тэйлора [23].

Рассмотренные выше типы алмазных популяций удобно использовать при сопоставлении и характеристике условий образования алмазов из

трубки Снегурочка и других трубок Золотицкого поля (рис. 7). Главные популяции алмазов из трубок Архангельская и Карпинского-1 относятся к наиболее низкотемпературным и менее глубинным популяциям типа V. Подобные алмазы близки по свойствам и внутреннему строению к кристаллам на рисунке 7, А–Б. Часть из них сформировалась в результате смены послонного механизма роста на нормальный (см. рис. 7, А), а другая – полностью за счёт нормального механизма (см. рис. 7, Б). Это проявляется в волокнистом внутреннем строении кристалла с извилистыми границами фронта его роста. Помимо них в рассматриваемых трубках выявлена [20] ещё одна генерация кристаллов, представленная низкоазотными индивидами размером < 1 мм (III тип популяций). Большинство алмазов из трубок Пионерская и им. М. В. Ломоносова принадлежат к популяциям III типа, занимающим промежуточное положение по температурам и глубинности образования в ряду популяций $V \rightarrow I$. Они в основном представлены низкоазотными индивидами с послонно-октаэдрическим внутренним строением и близки по морфологии и истории роста к кристаллу на рис. 7, Д.

Главная популяция алмазов трубки Снегурочка относится к типу VI. Значительная часть этих алмазов сходна по морфологическим особенностям с кристаллом на рис. 7, Е, который сформировался преимущественно за счёт послонного роста октаэдрических граней. Алмазы этой трубки, принадлежащие к второстепенной популяции (тип IV), характеризуются разнообразным внутренним строением и механизмом роста: послонным (см. рис. 7, Г) и сочетанием послонного с нормальным (см. рис. 7, В).

Как было показано выше (см. рис. 3), в трубке Снегурочка преобладают относительно высокотемпературные алмазы, сопоставимые по условиям образования с кристаллами из трубок Пионерская и им. М. В. Ломоносова (III тип популяций). Однако, по нашим данным [13], на глубинах, где происходит кристаллизация алмазов III типа популяций, содержание химически активного азота в среде относительно низкое. В связи с этим можно допустить, что средне- и высокоазотные алмазы популяций VI типа изначально сформировались и при пониженных температурах и давлениях, отвечающих популяциям типов V и IV (см. рис. 7). В дальнейшем они вместе с вмещающей средой были погружены в область более высоких

температур и давлений, где происходило их дорастание и посткристаллизационный отжиг. То есть имело место достаточно редкое явление увеличения температуры в процессе роста кристаллов, которое привело к перераспределению азота во всем их объёме. Следует отметить, что условия роста внешних зон кристаллов одновременно являются условиями отжига сформировавшихся ранее внутренних областей. В результате этого распределение азота в алмазах становится более однородным, причём модельные значения температур алмазообразования [23] в разных частях отдельно взятого кристалла должны быть примерно одинаковы во всём его объёме. Это можно проиллюстрировать данными о распределении азота в кристалле из трубки Архангельская (см. рис. 7, Е). Внутренняя область характеризуется послонно-октаэдрическим строением, а также высокими общим содержанием азота (~ 1259 at.ppm) и степенью его агрегации ($\%NB \sim 64$). Это соответствует температуре алмазообразования около 1120 °C для модельного «возраста» кристалла 3 млрд лет. Во внешней зоне этого кристалла содержание азота снижается примерно на один порядок ($N_{tot} \sim 144$ at.ppm), причём степень агрегации примеси также уменьшается ($\%NB \sim 30$). Однако температура формирования внешней зоны, оценённая по модели [23], близка к соответствующей температуре для внутренней зоны и составляет порядка 1130 °C для условного возраста алмаза 3 млрд лет. Весьма вероятно, что изначально внутренняя область этого алмаза, подобная кристаллу на рисунке 7, Г, сформировалась при более низких температурах, характерных для популяций IV типа. В результате дорастания высокоазотного алмаза с пониженным $\%NB$ ($N_{tot} \sim 971$ at.ppm, $\%NB \sim 10$) в условиях более высоких температур и давлений степень агрегации азота в кристалле увеличивается и может достичь значений, типичных для алмазов популяций типа VI.

Предположение о формировании главной популяции алмазов трубки Снегурочка при нарастающей температуры подтверждается результатами их минералогического изучения. Как отмечалось выше, среди изученных алмазов сравнительно невелика доля кристаллов с зональной фотолюминесценцией (~ 9 % от общего количества). Это может быть результатом высокотемпературного отжига алмазов на заключительном этапе их роста, который способствует более однородному распределению примесей в объёме кристалла. Для срав-

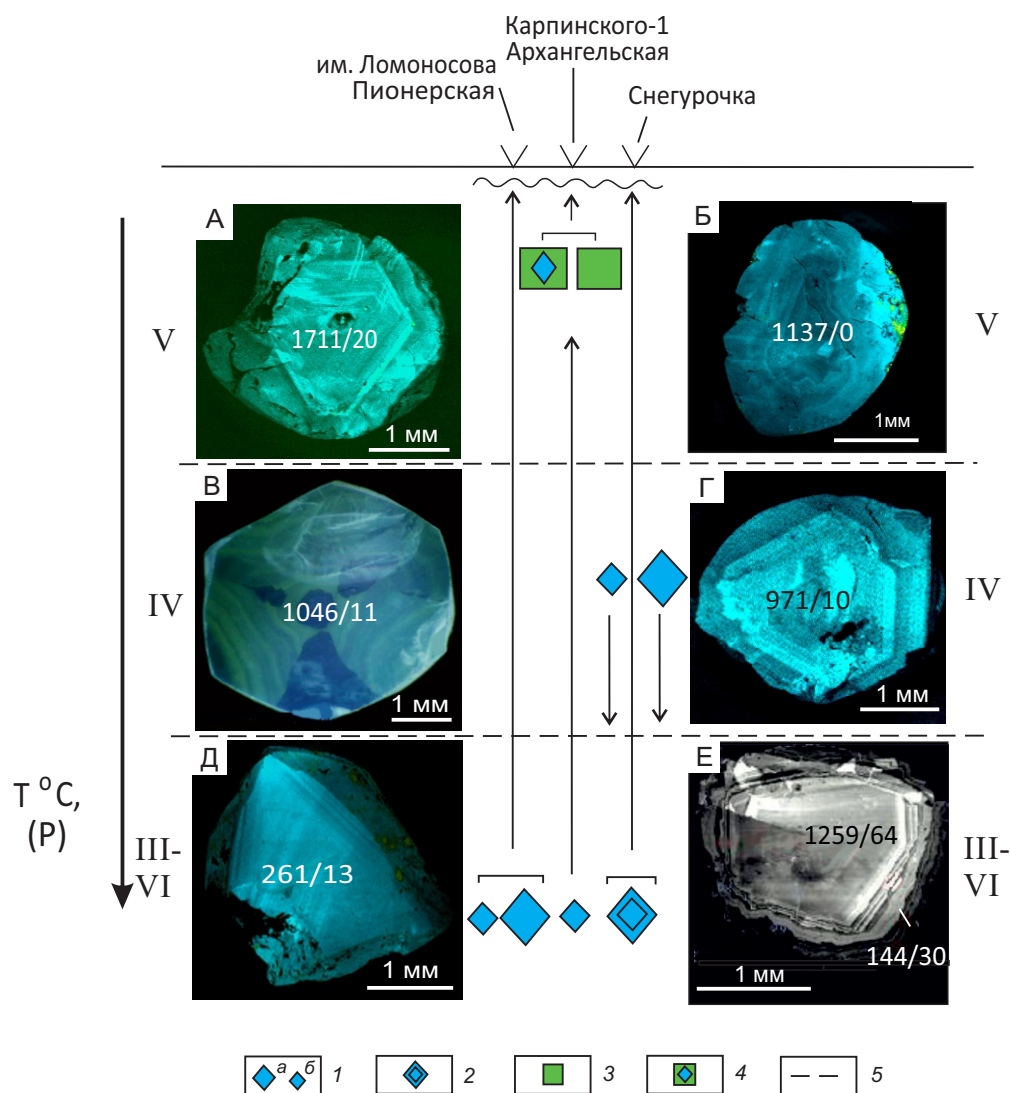


Рис. 7. Характерные особенности примесного состава и внутреннего строения главных популяций алмаза из трубок Золотицкого поля и предполагаемые условия алмазообразования:

1 – кристаллы с послойным внутренним строением соответственно размером: а – от 1 до 4 мм и б – < 1 мм; 2–4 – алмазы: 2 – с послойным внутренним строением, температура кристаллизации которых увеличивалась в процессе роста, 3 – с волокнистым внутренним строением, 4 – с послойно-октаэдрическим ядром и волокнистой внешней областью; 5 – условные границы областей распространения алмазных популяций типов III–VI, IV и V; римские цифры – типы алмазных популяций; в числителе дроби на картинах внутреннего строения приведено значение N_{tot} , в знаменателе – соответственно %NB; А–Д – кристаллы алмаза из трубки им. Капинского-1, по нашим данным [5, 17], Е – кристалл алмаза из трубки Архангельская, по данным работы [8]

нения отметим, что, согласно нашим данным, в трубках Мало-Ботуобинского района Якутии такие алмазы составляют 10–14 %, а в трубках Далдыно-Алакитского – соответственно 16–23 % [1]. Предлагаемое объяснение генезиса алмазов трубки Снегурочка согласуется также с данными о распределении азота в кристаллах разных клас-

сов крупности. В отличие от мелких индивидов (-1+0,5мм) более крупные кристаллы, с более длительной историей роста характеризуются повышенной степенью агрегации азота.

Заключение. Таким образом, данные о распределении структурных примесей и дефектов в кристаллах служат важными типоморфными харак-

теристиками алмазов из трубки Снегурочка. Они отличаются от алмазов из месторождений Центральных районов Якутии повышенными относительными содержаниями структурной примеси водорода (мода $\ln N \sim 0,5$). По сравнению с алмазами из трубок Мир и Юбилейная, а также других трубок Малоботуобинского и Далдыно-Алакитского районов [15] в трубке Снегурочка преобладают кристаллы с повышенной степенью агрегации азота (мода $\%NB \sim 45$). Кроме того, специфической чертой алмазов этой трубки является распространённость кристаллов с высоким относительным содержанием плейтлетс (мода $P \sim 12,5$ условных единиц).

В пределах Золотицкого поля алмазы трубки Снегурочка можно идентифицировать по преобладанию кристаллов с повышенными значениями $\%NB$. Они относятся к VI типу популяций и весьма своеобразны по распределению азота в кристаллах, а также условиям их формирования. Подобные алмазы до настоящего времени не обнаружены ни в одной из высокоалмазоносных трубок России и мира, при этом они широко распространены в россыпных месторождениях с неустановленными коренными источниками. В качестве примеров можно привести россыпи Нижнеленского района Якутии, районов Гуаниамо и Лос Кокитос (Венесуэла), Коромандель (Бразилия), а также Нового Южного Уэльса (Австралия). Характерной особенностью таких россыпей является преобладание в них округлых алмазов ромбодекаэдрического габитуса. Эти алмазы, согласно представлениям А. Д. Харькива с соавторами (1995), принадлежат к «особому морфологическому типу кристаллов», коренными источниками которых являются средне- и низкоалмазоносные тела кимберлитов, приуроченные к краевым частям в общей структуре кимберлитовых провинций, где они ассоциируют с иными платформенными вулканитами: пикритами, альнеитами, мелилититами и другими. Поиск таких кимберлитов с помощью шлихо-минералогического метода осложняется из-за низкого содержания в них минералов-спутников алмаза [12].

Как видно на рис. 3, алмазы главной популяции трубки Снегурочка наиболее близки к алмазам из верхнетриасовых прибрежно-морских россыпей Нижнеленского района Якутии (участки

Ольховый и Усат-Хая), а также некоторых россыпей района Коромандель. Однако в целом изученные алмазы отличаются от кристаллов из россыпей Южной Америки пониженной степенью агрегации азота.

Алмазоносные отложения карнийского яруса верхнего триаса обнажаются в низовьях р. Лена в районе о. Тас-Ары в виде пласта мощностью от первых сантиметров до полуметра и протягиваются к западу вдоль береговой линии более чем на 500 км [4]. Ранее высказывались гипотезы о «нетрадиционных», некимберлитовых коренных источниках алмазов из верхнетриасовых россыпей [4, 6]. Однако позднее на основе сходства этих кристаллов с алмазами из архангельских трубок Поморская и Снегурочка было показано, что наиболее вероятным источником алмазов верхнетриасовых россыпей являются тела кимберлит-лампроитов [13]. Одновременно с этим [7] на Севере Якутии в низкоалмазоносной трубке Светлана, расположенной в Западно-Укукитском кимберлитовом поле, были обнаружены алмазы, близкие по свойствам и распределению азота к алмазам трубки Снегурочка (см. рис. 5). В связи с этим трубку Светлана можно рассматривать в качестве одного из аналогов кимберлитовых источников алмазов прибрежно-морских россыпей Нижнеленского района Севера Якутии.

Результаты исследования типоморфных особенностей и условий формирования алмазов трубки Снегурочка позволяют уточнить и дополнить представления о прогнозировании коренных проявлений округлых алмазов. С большой долей вероятности можно считать, что их источники преимущественно относятся к кимберлит-лампроитовому (трубка Снегурочка) или кимберлитовому (трубка Светлана) типам. Алмазы этих трубок характеризуются сложной и необычной термической историей роста, поэтому такие объекты имеют весьма ограниченное распространение. Концентрирование алмазов из таких трубок происходит во вторичных коллекторах в течение длительного времени за счёт дезинтеграции кимберлитов и переотложения алмазов. При этом можно допустить, что часть коренных источников не сохранилась до наших дней.

Авторы благодарят В. К. Гаранина за предоставление образцов для исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блинова Г. К., Илутин И. П., Гуркина Г. А., Фролова Л. Н. Примесные центры в алмазах двух районов Сибирской кимберлитовой провинции // Геология и геофизика. – Новосибирск : СО РАН, 1991. – № 8. – С. 95–98.
2. Гаранин В. К., Криулина Г. Ю., Гаранин К. В., Самосоров Г. Г. Архангельские алмазы. Новые данные. – М. : МГУ им. Ломоносова, 2018. – 231 с.
3. Геология и генезис алмазных месторождений : монография. В 2 кн. Кн. 2 / Под ред. Б. М. Зубарева. – М. : ЦНИГРИ, 1989. – 424 с.
4. Граханов С. А. Геологическое строение и алмазность россыпей Севера Якутской алмазоносной провинции. – Воронеж : ВГУ, 2000. – 78 с.
5. Захарченко О. Д., Махин А. И., Хачатрян Г. К. Типоморфные свойства алмазов. – М. : ЦНИГРИ, 2002. – 104 с.
6. Зинчук Н. Н., Коптиль В. И. Типоморфизм алмазов Сибирской платформы. – М. : Недра, 2003. – 602 с.
7. Корнилова В. П., Спеццус З. В., Помазанский Б. С. Петрографо-минералогические особенности и целесообразность переоценки алмазности кимберлитовых трубок Лорик и Светлана (Западно-Укукитское поле, Якутия) // Региональная геология и металлогения. – 2016. – № 68. – С. 92–99.
8. Кязимов В. О., Криулина Г. Ю., Гаранин В. К. Зональные кристаллы алмаза из трубки Архангельская (Архангельская алмазоносная провинция, Россия) // Новые данные о минералах. – 2012. – Вып. 47. – С. 26–32.
9. Ларченко В. А., Степанов В. П., Минченко Г. В., Кечик И. А. Алмазность кимберлитов и родственных им пород Зимнего берега // Вестн. Воронеж. ун-та. Геология. – 2004. – № 2. – С. 134–147.
10. Скузоватов С. Ю., Зедгенизов Д. А., Ракевич А. Л. [и др.] Полистадийный рост алмазов с облакоподобными микровключениями из кимберлитовой трубки Мир: по данным изучения оптически-активных дефектов // Геология и геофизика. – 2015. – Т. 56, № 1–2. – С. 426–441.
11. 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.
12. Харьков А. Д., Зинчук Н. Н., Крючков А. И. Геолого-генетические основы шликер-минералогического метода поисков алмазных месторождений. – М. : Недра, 1995. – 345 с.
13. Хачатрян Г. К. Азот и водород в алмазах мира как индикаторы их генезиса и критерии прогноза и поисков коренных алмазных месторождений : специальности 25.00.11 «Геология, поиски и разведка твёрдых полезных ископаемых, минерагения»; 25.00.05 «Минералогия, кристаллография» : автореф. дис. на соискание учён. степ. докт. геол.-минерал. наук / Хачатрян Галина Карленовна. – М. : ЦНИГРИ, 2016. – 48 с.
14. 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.
15. Хачатрян Г. К. Типоморфизм алмазов Якутии по данным ИК-спектроскопии // Геологические аспекты минерально-сырьевой базы АК «АЛРОСА». Современное состояние, перспективы, решения. – Мирный : ООО «Мирнинская городская типография», 2003. – С. 322–326.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. Khachatryan G. K., Kaminsky F. V. «Equilibrium» and «non-equilibrium» diamonds from deposits in the East European platform, as revealed by infrared absorption data // Canadian Mineralogist. – 2003. – V. 41. – P. 171–184.
21. Smith W. V., Sorokin P. P., Gelles I. L., Lasher G. I. Electronspin resonance of nitrogen donors in diamond // Physical Review. – 1959. – V. 115. – P. 1546–1552.
22. Speich L., Kohn-G. P., Bulanova S. C., Smith C. B. The behaviour of platelets in natural diamonds and the development of a new mantle thermometer // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 2018. – 173:39. – DOI : <https://doi.org/10.1007/s00410-018-1463-4>.
23. 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 // 6th International Kimberlite Conference : Extended Abstract. – Novosibirsk. – 1995. – P. 620–622.

24. 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. *Blinova G. K., Ilupin I. P., Gurkina G. A., Frolova L. N.* Primesnyye tsenry v almazakh dvukh rayonov Sibirskoy kimberlitovoy provintsii [Impurity centers in diamonds from two regions of the Siberian kimberlite province], *Geologiya i geofizika*, Novosibirsk, SO RAN publ., 1991, No. 8, pp. 95–98. (In Russ.)
2. *Garanin V. K., Kriulina G. Yu., Garanin K. V., Samosorov G. G.* Arkhangel'skiye almazy. Novyye dannyye [Arkhangel'sk Diamonds. New Data], Moscow, MGU im. Lomonosova publ., 2018, 231 p. (In Russ.)
3. *Geologiya i genezis almaznykh mestorozhdeniy, monografiya. V 2 kn. Kn. 2* [Geology and genesis of diamond deposits, monograph. In 2 books. Book 2], ed. B. M. Zubarev, Moscow, TSNIGRI publ., 1989, 424 p. (In Russ.)
4. *Grakhanov S. A.* Geologicheskoye stroyeniye i almazonosnost' rossypey Severa Yakutskoy almazonosnoy provintsii [Geological structure and diamond potential of placers in the North of the Yakut diamondiferous province], Voronezh, VGU publ., 2000, 78 p. (In Russ.)
5. *Zakharchenko O. D., Makhin A. I., Khachatryan G. K.* Tipomorfnyye svoystva almazov [Typomorphic properties of diamonds], Moscow, TSNIGRI publ., 2002, 104 p. (In Russ.)
6. *Zinchuk N. N., Koptil V. I.* Tipomorfizm almazov Sibirskoy platformy [Typomorphism of diamonds of the Siberian platform], Moscow, Nedra publ., 2003, 602 p. (In Russ.)
7. *Kornilova V. P., Spetsius Z. V., Pomazanskiy B. S.* Petrografo-mineralogicheskiye osobennosti i tselesoobraznost' pereotsenki almazonosnosti kimberlitovykh trubok Lorik i Svetlana (Zapadno-Ukukitskoye pole, Yakutiya) [Petrographic and mineralogical features and the feasibility of re-evaluating the diamond potential of the Lorik and Svetlana kimberlite pipes (West Ukukit field, Yakutia)], *Regional'naya geologiya i metallogeniya*, 2016, No. 68, pp. 92–99. (In Russ.)
8. *Kyazimov V. O., Kriulina G. Yu., Garanin V. K.* Zonal'nyye kristally almaza iz trubki Arkhangel'skaya (Arkhangel'skaya almazonosnaya provintsiya, Rossiya) [Zonal diamond crystals from the Arkhangel'skaya pipe (Arkhangel'sk diamondiferous province, Russia)], *Novyye dannyye o mineralakh*, 2012, Is. 47, pp. 26–32. (In Russ.)
9. *Larchenko V. A., Stepanov V. P., Minchenko G. V., Kechik I. A.* Almazonosnost' kimberlitov i rodstvennykh im porod Zimnego berega [Diamond potential of kimberlites and related rocks of the Winter Coast], *Vestn. Voronezh. un-ta. Geologiya*, 2004, No. 2, pp. 134–147. (In Russ.)
10. *Skuzovatov S. Yu., Zedgenizov D. A., Rakevich A. L.* [et al.] Polistadiynnyy rost almazov s oblakopodobnymi mikrovklyucheniymi iz kimberlitovoy trubki Mir: po dannym izucheniya opticheski-aktivnykh defektov [Multistage growth of diamonds with cloud-like microinclusions from the Mir kimberlite pipe: based on data from a study of optically active defects], *Geologiya i geofizika*, 2015, V. 56, No. 1–2, pp. 426–441. (In Russ.)
11. *Sobolev Ye. V., Lisoyvan V. I.* Primesnyye tsenry v almazakh [Impurity centers in diamonds], *Tezisy VIII otchetnoy nauchnoy konferentsii Instituta neorganicheskoy khimii Sib. otd. AN SSSR (13–23 apr. 1971 g.)*, Novosibirsk, Sib. otd. AN SSSR publ., 1971, pp. 60–61. (In Russ.)
12. *Khar'kiv A. D., Zinchuk N. N., Kryuchkov A. I.* Geologo-geneticheskiye osnovy shlikho-mineralogicheskogo metoda poiskov almaznykh mestorozhdeniy [Geological and genetic foundations of the panning-mineralogical method of prospecting for diamond deposits], Moscow, Nedra publ., 1995, 345 p. (In Russ.)
13. *Khachatryan G. K.* Azot i vodorod v almazakh mira kak indikatory ikh genezisa i kriterii prognoza i poiskov korennykh almaznykh mestorozhdeniy [Nitrogen and hydrogen in the world's diamonds as indicators of their genesis and criteria for forecasting and prospecting for primary diamond deposits], Moscow, TSNIGRI publ., 2016, 48 p. (In Russ.)
14. *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 forecast-prospecting problems of diamond deposits], *Otechestvennaya geologiya*, 2013, No. 2, pp. 29–40. (In Russ.)
15. *Khachatryan G. K.* Tipomorfizm almazov Yakutii po dannym IK-spektroskopii [Typomorphism of Yakutia diamonds based on IR spectroscopy data], *Geologicheskkiye aspekty mineral'no-syr'yevoy bazy AK "ALROSA". Sovremennoye sostoyaniye, perspektivy, resheniya*, Mirnyy, OOO "Mirninskaya gorodskaya tipografiya" publ., 2003, pp. 322–326. (In Russ.)

16. *Khachatryan G. K.* Uovershenstvovannaya metodika otsenki kontsentratsiy azota v almaze i yeyo prakticheskoye primeneniye [Improved Methodology for Estimating Nitrogen Concentrations in Diamonds and Its Practical Application], *Geologicheskiye aspekty mineral'no-syr'yevoy bazy AK "ALROSA". Sovremennoye sostoyaniye, perspektivy, resheniya*, Mirnyy, OOO "Mirninskaya gorodskaya tipografiya" publ., 2003, pp. 319–321. (In Russ.)
17. *Khachatryan G. K., Palazhchenko O. V., Garanin V. K.* [et al.] Genezis "neravnovesnykh" kristallov almaza iz kimberlitovoy trubki im. Karpinskogo-1 po dannym katodnoy lyuminesentsii i IK-spektroskopii [Genesis of "Nonequilibrium" Diamond Crystals from the Karpinsky-1 Kimberlite Pipe Based on Cathodic Luminescence and IR Spectroscopy Data], *Vestnik MGU. Seriya 4: Geologiya*, 2008, No. 2, pp. 38–45. (In Russ.)
18. *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.
19. *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.
20. *Khachatryan G. K., Kaminsky F. V.* "Equilibrium" and "non-equilibrium" diamonds from deposits in the East European platform, as revealed by infrared absorption data, *Canadian Mineralogist*, 2003, V. 41, pp. 171–184.
21. *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.
22. *Speich L., Kohn-G. P., Bulanova S. C., Smith C. B.* The behaviour of platelets in natural diamonds and the development of a new mantle thermometer, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2018, 173:39, DOI: <https://doi.org/10.1007/s00410-018-1463-4>.
23. *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, 6th International Kimberlite Conference, Extended Abstract, Novosibirsk, 1995, pp. 620–622.
24. *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 15.01.26; одобрена после рецензирования 03.03.26; принята к публикации 03.03.26.
The article was submitted 15.01.26; approved after reviewing 03.03.26; accepted for publication 03.03.26.