

## Распределение структурных примесей в алмазах из кимберлитовых трубок с различной алмазоносностью

Соотношение структурных примесей в алмазах и алмазоносности кимберлитов демонстрируется на примере представительных выборок алмазов из трубок Якутии, Архангельской области, Южной Африки, Бразилии. Намечается положительная корреляция алмазоносности кимберлитовых трубок с общим содержанием структурного азота в алмазах и, соответственно, отрицательная – со степенью его агрегации и соотношением концентраций водорода и азота в кристаллах.

Обсуждаются генетические аспекты выявленных соотношений, включающие характеристики источника углерода алмазов и условия их кристаллизации.

*Ключевые слова:* алмаз, алмазоносность, структурные примеси, азот, водород.

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

АНАШКИНА НАТАЛИЯ ЕВГЕНЬЕВНА, кандидат технических наук, научный сотрудник

БАРЫШЕВ АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, AlexBarGeol@mail.ru

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

## Distribution of structural impurities in diamonds from kimberlite pipes with different diamond-bearing potential

G. K. KHACHATRYAN, N. E. ANASHKINA, A. N. BARYSHEV

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

Relationship between structural impurities in diamonds and the diamond-bearing potential of the kimberlites is demonstrated on an example of representative statistical samples of diamonds from the pipes of Yakutia, Arkhangel'sk Region, South Africa, and Brazil. A positive correlation emerges of the diamond-bearing potential of the kimberlite pipes with the overall content of structural nitrogen in the diamonds and, correspondingly, a negative one, with the degree of its aggregation and with a ratio of the hydrogen and nitrogen concentrations in the crystals.

Genetic aspects are discussed of the revealed relationships, that include characteristics of the carbon source of the diamonds and their crystallization conditions.

*Key words:* diamond, diamond-bearing potential, structural impurities, nitrogen, hydrogen.

**Введение.** В настоящее время среди критериев, применяемых для оценки алмазоносности кимберлитовых тел, используются типохимизм кимберлитов, а также минералов алмазной ассоциации – граната, хромшпинелида и других [6, 7]. Однако далеко не все эти минералы сингенетичны алмазу, и, следовательно, не все они одинаково информативны. Так, на основании массового изучения кристаллографической ориентировки включений граната, оливина и магнезиохромита в алмазах Якутии установлено, что многие из этих включений протогенетические,

которые нередко сосуществуют с сингенетическими в одном и том же кристалле [15].

Вместе с тем особенности химического и изотопного состава самого алмаза учитываются недостаточно, хотя именно они позволяют объективно судить об источниках вещества и условиях кристаллизации алмазов. Эти факторы в значительной мере и определяют алмазоносность кимберлитовых трубок. В ряду типоморфных свойств алмаза первостепенное значение имеют структурные примеси, которые захватывались кристаллами непосредственно

в процессе их роста. В алмазах из кимберлитов главными являются изоморфная примесь азота, представленная парами и тетраэдрическими группами атомов (А- и В-дефекты соответственно), а также химически адсорбированная примесь водорода в виде винильных или винилиденовых групп [14, 25, 42].

При разработке подходов к оценке потенциальной алмазоносности кимберлитовых трубок ключевое значение имеет проблема источника вещества алмаза. Ранее в работах [13, 17, 37] рассматривалась концепция образования алмазов в мантии с участием субдуцированных органических веществ. В дальнейшем эта концепция нашла подтверждение в результате тонких минералогических исследований распределения примесей и изотопов углерода в объёме кристаллов алмаза [19, 21].

Присутствие органических соединений в среде алмазообразования подтверждается их наличием среди включений в алмазах. Например, в составе газов, выделенных из природных алмазов, помимо метана обнаружены этилен, пропилен, спирты [34]. Кроме того, в алмазах из кимберлитов выявлены примеси полиароматических углеводородов [9], солей карбоновых кислот [21], а в последние годы дополнительно к этому – разнообразных кислород-, азот- и серосодержащих органических соединений [39, 40].

На участие органических веществ (ОВ) в алмазообразовании в качестве источника углерода алмаза и входящих в его структуру примесей азота и водорода косвенно указывают ассоциация С-N-H, типичная для органических соединений, совместное нахождение азота и водорода в алмазах, а также закономерное распределение примесей в объёме кристаллов алмаза [21]. При этом отмечается обратная корреляция между содержанием примеси ОВ в алмазе и содержанием водородных центров.

Биогенный источник алмазообразующего ОВ обосновывается изотопным составом углерода алмаза. Присутствие в кимберлитовых трубках аномально изотопно-лёгких алмазов ( $\delta^{13}\text{C}$  от -11 до -35‰) объяснимо с позиции их биогенного источника и не находит достаточно убедительного объяснения с позиции изотопного фракционирования мантийного углерода. Примечательно, что кристаллы, обогащённые лёгким изотопом углерода, наиболее часто встречаются среди алмазов с включениями эклогитового парагенезиса. В связи с этим допускается, что часть алмазов эклогитового парагенезиса имела биогенный источник, находившийся среди базальтоидных толщ морского дна, подверженных субдукции. При этом считается, что источники алмазов ультраосновного парагенезиса – исключительно эндогенные. Однако нами было показано, что и они образовались с участием биогенных органических соединений,

субдуцированных в мантию совместно с ультрабазитами океанической коры [19]. Это подтверждается недавними находками аномально изотопно-лёгких алмазов ( $\delta^{13}\text{C}$  -22,9‰) в перидотитовом ксенолите в трубке Удачная [40].

Ранее в алмазах из трубок Архангельской области нами была выявлена положительная корреляция алмазоносности трубок с усреднённым общим содержанием азота в кристаллах и, соответственно, отрицательная – с содержанием водорода [24]. Подобные соотношения связывались с концентрацией источников вещества алмазов и влиянием на их рост примесей. Задача настоящей статьи – более детально рассмотреть иные возможные генетические аспекты взаимосвязи содержания примесей в алмазах и алмазоносности кимберлитов, уделяя внимание условиям алмазообразования. Разнообразие этих условий демонстрируют типы алмазных популяций [22], выделенные на основе распределения структурных примесей азота среди алмазов мира (~5,5 тыс. кристаллов из 96-ти трубок и россыпей).

**Объекты и методы исследования.** Сопоставление алмазов проводилось по средним значениям концентраций структурных примесей азота и водорода в выборках кристаллов из трубок Якутии, Архангельской области, Южной Африки, Бразилии (47 объектов). Концентрации структурных примесей в алмазах систематизированы в базе данных, разработанной в ЦНИГРИ [20]. Содержания азота в алмазах, включённые в базу данных, определялись по ИК-спектрам с помощью унифицированной методики [23] на основе аналитических зависимостей [26, 27]. Концентрация водородных центров оценивалась по коэффициенту поглощения «водородной» линии около  $3107\text{ см}^{-1}$ . Большинство материалов, представленных в базе данных, – авторские. Они были дополнены характеристиками алмазов из работ [1, 2, 4, 28–30].

Усреднённые концентрации азота и водорода в алмазах сопоставлялись с опубликованными материалами по содержанию алмазов в соответствующих объектах [10–12], а также с заимствованными из интернета данными из отчётов алмазодобывающих компаний и независимых экспертов.

**Распределение структурных примесей в алмазах из трубок с различной алмазоносностью.** В алмазах из кимберлитов наиболее информативными в генетическом плане являются общее содержание структурно связанного азота  $N_{\text{tot}}$ , равное сумме концентраций азота в А- и В-формах ( $N_{\text{tot}} = \text{NA} + \text{NB}$ ), а также доля азота в агрегированной форме (% NB) [31, 41].

*Общее содержание азота в алмазах ( $N_{\text{tot}}$ ).* Азот – главная примесь, входящая в структуру природных алмазов, содержание которой в кристаллах достигает 0,5% [36]. Изоморфное замещение углерода алмаза

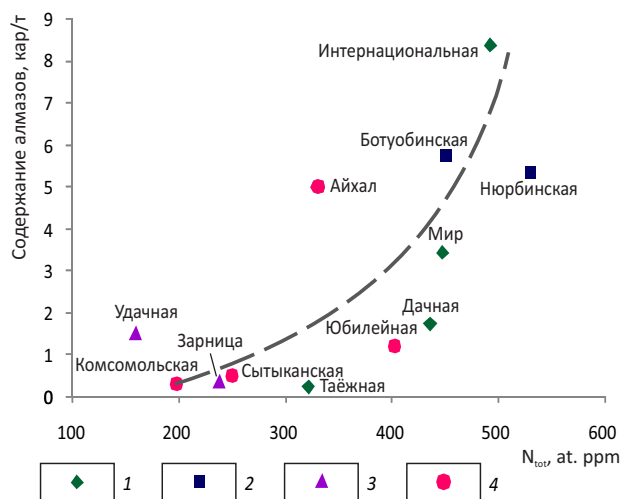


Рис. 1. Соотношение среднего содержания азота ( $N_{tot}$ , at. ppm) в алмазах и содержания алмазов (кар/т) в трубках кимберлитовых полей Якутии. Данные по азоту в выборках алмаза (56–507 шт.) заимствованы из работы [4]:

поля : 1 – Мирнинское, 2 – Накынское, 3 – Далдынское и 4 – Алакит-Мархинское

азотом, обусловленное близостью атомных радиусов этих химических элементов, происходит в процессе кристаллизации алмаза и зависит от химизма среды и термодинамических условий алмазообразования. Это подтверждается закономерным распределением структурной примеси азота по зонам роста внутри кристаллов алмаза [14, 33]. Таким образом, одним из главных факторов, определяющих концентрацию структурного азота в алмазах, служит содержание азота в среде алмазообразования. При этом алмазы с включениями минералов ультрабазитовой ассоциации преимущественно низкоазотные ( $N_{tot} < 400$  at. ppm), а в алмазах эклогитовой ассоциации содержание азота достигает 1000 at. ppm [32]. Из этого следует, что базитовый алмазоносный субстрат относительно обогащён азотом по сравнению с гипербазитовым.

Если допустить, что углерод алмаза и азот в мантийной среде имеют общие источники, например, азотсодержащие органические соединения [19], цианиды металлов [5], продукты реакций азота и метана [3] и другие, то содержание азота в алмазах будет взаимосвязано с алмазоносностью кимберлитов. Рассмотрим эти соотношения на примере трубок отдельных алмазоносных полей и районов.

Наибольшее число высокоалмазоносных (ВА) и весьма высокоалмазоносных (ВВА) трубок мира [7] сосредоточено на территории Якутии. Впервые взаи-

мосвязь между содержанием азота в алмазах и алмазоносностью кимберлитов Якутии выявили Ю.М. Биленко и Е.В. Соболев [6]. На примере месторождений Мало-Ботуобинского и Далдыно-Алакитского районов ими обнаружена тенденция увеличения концентрации в алмазах азота в А-форме по мере увеличения содержания алмазов в кимберлитах. Хотя авторы и не располагали данными по азоту в В-форме, полученные ими результаты можно распространить и на общее содержание азота в кристаллах ( $N_{tot}$ ). Это обусловлено тем, что применительно к якутским алмазам А-форма в количественном отношении является доминирующей и в значительной степени определяет суммарное содержание азота в кристаллах.

Наши данные, полученные на более представительном материале по алмазам разных районов Якутии и других регионов, согласуются с выводами Ю.М. Биленко и Е.В. Соболева [6]. На рис. 1 видно, что самые высокие содержания алмазов ( $> 5$  кар/т) установлены в якутских трубках Интернациональная, Нюрбинская, Ботуобинская, характеризующихся относительно повышенными средними содержаниями азота ( $N_{tot} > 450$  at. ppm) в кристаллах. Напротив, в трубках с более низкой алмазоносностью ( $< 0,5$  кар/т) Комсомольская, Стытыканская, Зарница, Таёжная преобладают кристаллы со средними значениями  $N_{tot}$  190–325 at. ppm. Положительная корреляция алмазоносности трубок и усреднённого содержания  $N_{tot}$  в кристаллах наглядно прослеживается в масштабах Мирнинского поля (см. рис. 1). Так, в низкоалмазоносной (НА) трубке Таёжная распространены относительно низкоазотные алмазы, а по мере увеличения содержания алмазов в трубке Мир и далее в трубке Интернациональная средние значения  $N_{tot}$  в соответствующих кристаллах возрастают.

Таким образом, для алмазов из двенадцати трубок Мирнинского, Алакит-Мархинского, Далдынского и Накынского кимберлитовых полей Якутии прослеживается отчётливая тенденция нарастания содержания азота в кристаллах с увеличением алмазоносности кимберлитов. Несколько иным соотношением указанных параметров характеризуется весьма высокоалмазоносная трубка Айхал (см. рис. 1), что обусловлено множественностью факторов, определяющих алмазоносность кимберлитов.

Представляется интересным сопоставить данные по алмазам Якутии и алмазам из трубок Южной Африки, характеризующихся высокой (Орапа, Джваненг, Венеция), средней (Премьер, Финш) и низкой (Ягерсфонтейн, Коффифонтейн, Робертс Виктор) алмазоносностью. По содержанию алмазов африканские трубки уступают крупным месторождениям Мирнинского и Накынского полей Якутии. В связи с этим для сравнения более удобно воспользоваться

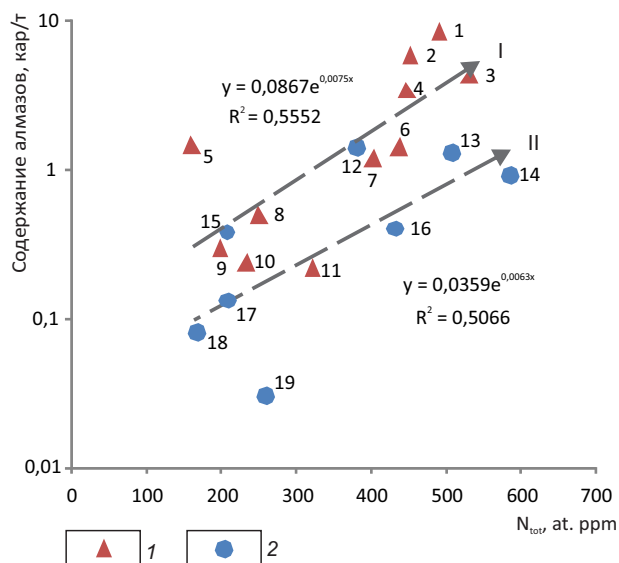


Рис. 2. Корреляционные соотношения среднего содержания азота ( $N_{tot}$ , at. ppm) в алмазах и содержания алмазов (кар/т) в трубках Якутии и Южной Африки. Данные по азоту в выборках алмаза (40–507 шт.) заимствованы из работ [4, 28–30]:

трубки: 1 – Якутии и 2 – Южной Африки: 1 – Интернациональная, 2 – Ботуобинская, 3 – Нюрбинская, 4 – Мир, 5 – Удачная, 6 – Дачная, 7 – Юбилейная, 8 – Сытыканская, 9 – Комсомольская, 10 – Зарница, 11 – Таёжная, 12 – Венеция, 13 – Джваненг, 14 – Орапа, 15 – Финш, 16 – Премьер, 17 – Ягерсфонтейн, 18 – Коффифонтейн, 19 – Робертс Виктор; I и II – якутский и южноафриканский тренды соответственно

логарифмической шкалой содержаний алмазов в кимберлитах (рис. 2). В такой системе координат график для якутских алмазов выглядит иначе, чем на рис. 1. При этом имеет место положительная корреляция между алмазоносностью трубок и средними значениями  $N_{tot}$  в кристаллах (см. рис. 2), представленная трендами I (Якутия) и II (Южная Африка).

Как было показано ранее [22], алмазы из якутских и южноафриканских трубок в целом отличаются по распределению азотных центров в кристаллах и условиям их образования в мантии. Эти условия охарактеризованы типами алмазных популяций (I–VI), причём в ряду популяций  $V \rightarrow I$  общее содержание азота ( $N_{tot}$ ) в алмазах уменьшается, а степень агрегации (% NB) возрастает. Подобное распределение азота в сочетании с данными термобарометрии включений в алмазах свидетельствует о последовательном нарастании температуры и глубинности образования алмазных популяций от типа V к типу I [19, 22]. В месторождениях Якутии доминируют алмазные популяции типов III и IV, а в Южной Аф-

рике – соответственно типа II, которые являются более глубинными.

**Степень агрегации азота в алмазах (% NB).** Обратная корреляция между алмазоносностью трубок и степенью агрегации азота в алмазах, содержащихся в этих трубках, наиболее наглядно видна на примере месторождений Мирнинского поля Якутии (рис. 3). Алмазы весьма высокоалмазоносных трубок Интернациональная, им. XXIII съезда КПСС, Мир характеризуются самыми низкими средними значениями  $NB < 30\%$ , среднеалмазоносных (СА) трубок Спутник и Дачная –  $30\text{--}40\%$ , а низкоалмазоносной трубки Таёжная –  $42\%$ . К числу ВВА относятся трубки Накынского поля Ботуобинская и Нюрбинская, алмазы которых обладают относительно пониженной агрегацией азота, составляющей в среднем соответственно 28 и 33%. Данные по трубкам Алакит-Мархинского (за исключением трубки Айхал), Далдынского и Верхне-Мунского кимберлитовых полей также демонстрируют обратную корреляцию между алмазоносностью трубок и степенью агрегации азота в кристаллах. Таким образом, степень агрегации азота в алмазах из месторождений Якутии, отражающая температуру их кристаллизации [31, 41], является отрицательным фактором алмазоносности кимберлитов. На территории Сибирской платформы алмазные популяции, сформировавшиеся на разных

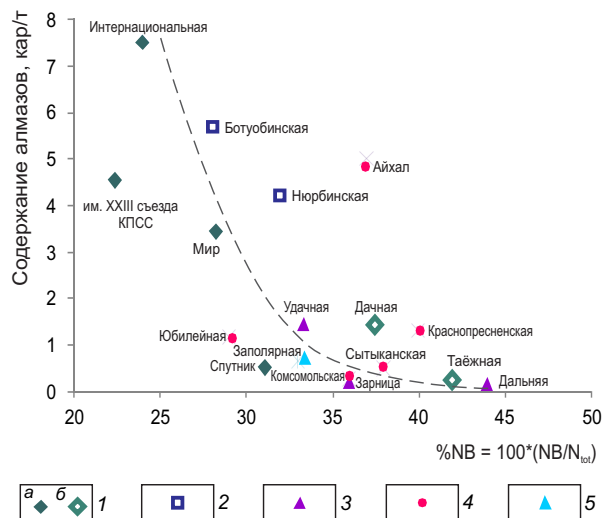
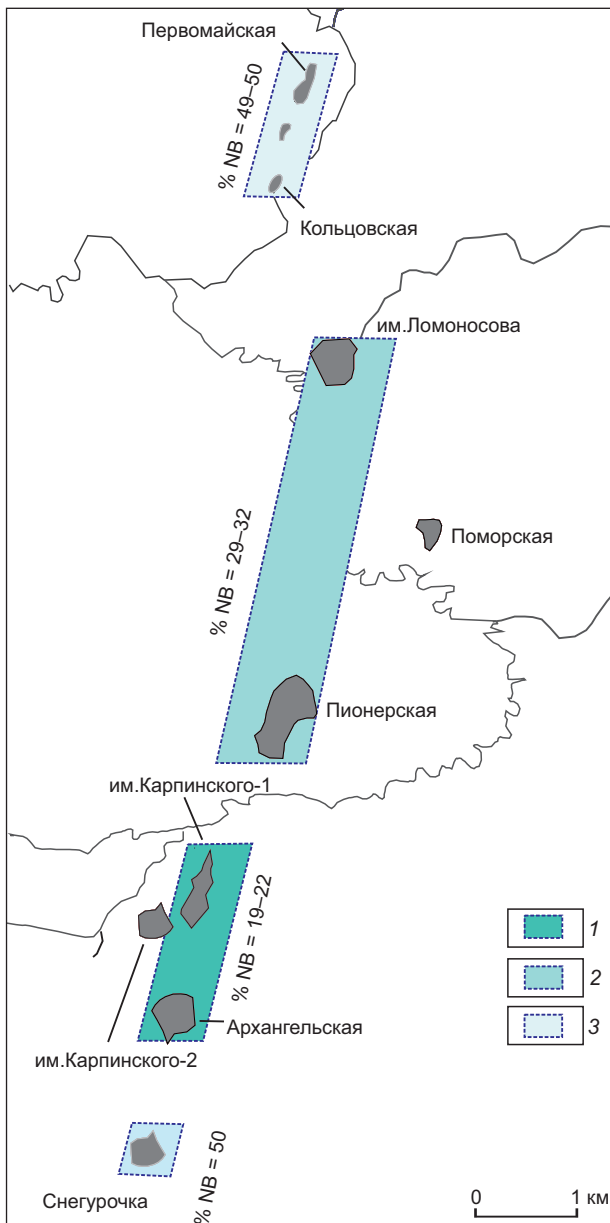


Рис. 3. Соотношение среднего значения степени агрегации азота (% NB) в алмазах (31–507 шт.) из разных трубок и содержания в них алмазов (кар/т):

трубки: 1 (а, б) – Мирнинского, 2 – Накынского, 3 – Далдынского, 4 – Алакит-Мархинского и 5 – Верхнемунского полей Якутии; 1б и 2 – по данным [4]



**Рис. 4. Вариации степени агрегации азота (% NB) в алмазах из трубок Золотицкого поля Архангельской области, обладающих разной алмазонасностью (в кар/т):**

1 – 0,98–1,15; 2 – 0,44–0,69; 3 – 0,03–0,13

глубинах, размещены концентрически зонально [19, 22]. Трубки с наиболее высокотемпературными и глубинными алмазами, характеризующиеся повышенными значениями % NB (популяции II и III типов), приуроченные к центральным частям Сибирской платформы, менее алмазонасны, чем окружающие их с севера и юга трубки с алмазами популяций IV типа.

Рассмотрим соотношение между % NB в алмазах и алмазонасностью трубок Золотицкого поля Архангельской области, в котором находится месторождение им. М. В. Ломоносова. К месторождению относятся пять среднеалмазонасных трубок им. Ломоносова, Пионерская, им. Карпинского-1, им. Карпинского-2 и Архангельская, а также низкоалмазонасная трубка Поморская, расположенная восточнее по отношению к остальным трубкам (рис. 4). На северном фланге месторождения располагаются низкоалмазонасные трубки Первомайская, Кольцовская и Белая, а на южном – трубка Снегурочка. В трубках Золотицкого поля Архангельской области, так же как и в трубках Якутии, алмазонасность кимберлитов коррелирует со степенью агрегации азота в алмазах. Самыми алмазонасными являются трубки южной группы им. Карпинского-1 и Архангельская, в алмазах которых зафиксированы минимальные средние значения степени агрегации азота (NB ~ 19–22%). Далее в алмазах северной группы трубок месторождения, обладающих более низкой алмазонасностью, чем соответственно южной, степень агрегации азота нарастает (NB ~ 29–32%). И, наконец, в кристаллах низкоалмазонасных трубок за пределами месторождения степень агрегации азота достигает максимальных значений 49–50% (см. рис. 4).

Приведённые примеры позволяют предположить, что в области термодинамической стабильности алмаза увеличение температуры и давления негативно сказывается на алмазообразовании.

*Соотношение H/N.* В алмазах из кимберлитов водород является второй по распространённости после азота структурной примесью. В статье [24] была выявлена взаимосвязь между соотношением концентраций водорода и азота в кристаллах (H/N) и алмазонасностью кимберлитовых трубок Архангельской области и Якутии. Была предложена диаграмма распределения трубок с различной алмазонасностью в зависимости от соотношения средних содержания водорода и азота в кристаллах, которая может быть использована для предварительной оценки потенциальной алмазонасности кимберлитовых тел на ранних стадиях поисково-оценочных работ. В настоящей статье мы уточнили и дополнили эту диаграмму, включив в неё литературные данные по трубкам Якутии, а также собственные материалы по алмазам из семи трубок района Жуина, Бразилия (рис. 5). Как видно на рисунке, алмазы из трубок с разной алмазонасностью занимают три обособленные области. Первая из них, представленная преимущественно алмазами ВВА, характеризуется относительно повышенным средним содержанием азота в кристаллах (> 400 at. ppm) и пониженным ( $\leq 1$  усл. ед.) содержанием водорода (трубки Мир,

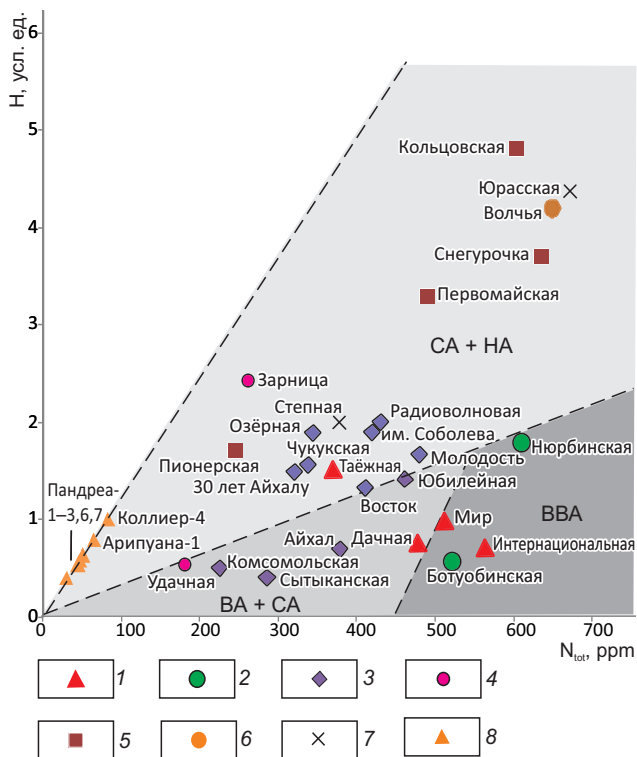


Рис. 5. Усреднённые содержания азота ( $N_{tot}$ , ат. ppm) и водорода (Н, усл. ед.) в алмазах (31–507 шт.) из трубок с разной алмазноностью. По авторским и литературным [1, 2, 4] данным:

кимберлитовые поля: Якутии: 1 – Мирнинское, 2 – Накынское, 3 – Алакит-Мархинское, 4 – Далдынское и Архангельской области: 5 – Золотицкое, 6 – Верхотинское, 7 – Кепинское; 8 – район Жуина, Бразилия; оттенками серого обозначены поля трубок с различной алмазноностью; границы полей намечены штриховой линией; BVA – весьма высокоалмазные, VA – высокоалмазные, CA – среднеалмазные и NA – низкоалмазные трубки

Интернациональная, Ботубобинская). Вторая область включает алмазы из трубок VA и CA. При этом подавляющее большинство алмазов из VA трубок по водороду сходны с алмазами BVA, но отличаются от последних более низкими значениями  $N_{tot}$  (0–400 ат. ppm). Алмазы NA и CA трубок, занимающие третью область, характеризуются повышенным отношением H/N. Причём максимально высокие значения этого параметра отмечаются для алмазов из трубок Архангельской области, что свидетельствует о высокой концентрации их биогенных источников в протолите [24]. Алмазы из трубок одного и того же кимберлитового поля, характеризующихся различной алмазноностью, обладают разным отношением H/N (см. рис. 5). Например, в Мирнинском поле в алмазах

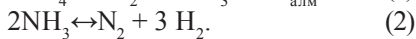
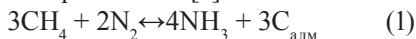
трубки Таёжная (НА) это соотношение выше, чем в алмазах трубок Мир и Интернациональная (BVA). В Алакит-Мархинском поле соответствующие пропорции H/N служат критерием отличия алмазов низкоалмазных трубок Молодость, 30 лет Айхалу, Чукукская, Радиоволновая, Озерная, им. Соболева от трубок Юбилейная, Сытыканская, Айхал и Комсомольская (CA, VA и BVA), а Далдынском поле – соответственно алмазов трубок Зарница (CA) и Удачная (VA). На диаграмме распределения алмазов по соотношению водорода и азота в кристаллах (см. рис. 5) области распространения BVA, VA + CA, CA + NA объектов намечены штриховыми линиями. Разумеется, границы эти – условные, отражающие лишь основную тенденцию изменчивости соотношения H/N в алмазах в трубках с разными содержаниями алмазов.

Интересно, что максимальное отношение H/N выявлено в «сверхглубинных» алмазах из кимберлитовых трубок в районе Жуина (Бразилия). При этом в отличие от алмазов других регионов мира концентрации азота и водорода в бразильских алмазах находятся в чёткой линейной зависимости (см. рис. 5). Возможные причины подобных соотношений концентраций структурных примесей в алмазах будут рассмотрены ниже.

**Обсуждение результатов и выводы.** Корреляционные зависимости между распределением структурных примесей в алмазах и содержанием алмазов в кимберлитовых трубках свидетельствуют о тесной ассоциации углерода, азота и водорода в мантийных источниках. Ассоциация C-N-H, включающая углерод алмаза и главные примеси его кристаллической структуры, унаследована алмазами от древнейшего биогенного органического вещества, погружённого в мантию – область термодинамической стабильности алмаза. Наиболее вероятными источниками органического вещества и концентраторами азота могли быть цианобактериальные маты на дне морских бассейнов, которые были первыми биоценозами на Земле. В настоящее время в Австралии обнаружены литифицированные бактериальные маты возрастом до 3,5 млрд лет [35]. Базируясь на концепции происхождения алмазов за счёт биогенных источников, погружённых вместе с вмещающей средой в мантию при субдукции, можно ожидать, что алмазноность мантийных пород, определяющая потенциальную алмазноность кимберлитов, обусловлена двумя основными факторами. Во-первых, алмазноность материнских пород будет тем выше, чем больше концентрация биомассы в алмазном протолите [24]. Во-вторых, процесс образования алмазов и их содержание в материнском субстрате, вероятно, будут зависеть от термодинамических условий

алмазообразования. Это проявляется в виде обратной корреляции алмазоносности со степенью агрегации азота в алмазах, которая отражает температуру и глубинность их кристаллизации. Иначе говоря, глубинность алмазообразования в силу разных причин негативно сказывается на алмазоносности кимберлитов.

Отрицательная корреляция алмазоносности трубок и соотношения H/N в кристаллах ранее интерпретировалось нами как результат блокирующего воздействия примеси водорода на рост кристаллов алмазов вплоть до его полного прекращения [24]. Однако такое объяснение не единственно возможное. Весьма вероятно, что отношение H/N, так же как и % NB, в алмазах зависит от глубины их кристаллизации. На это указывает распределение водородных и азотных центров в алмазах из трубок района Жуина в Бразилии. Алмазы в этих трубках в основном безазотные и низкоазотные, а содержание водорода в них, напротив, может быть весьма значительно. В итоге среди всех изученных объектов в сверхглубинных алмазах района Жуина (I тип популяций) отношение H/N максимально. Одним из возможных объяснений этого факта является геохимическое разделение азота и водорода в процессе метаморфизма биогенных источников вещества алмаза при их погружении в глубины Земли. Как известно, метаморфизм ОВ сопровождается потерей органическими соединениями азота, в результате чего соотношение H/N в биомассе увеличивается. Не исключено, что строго определённое соотношение H/N в сверхглубинных алмазах может быть обусловлено тем, что они кристаллизовались за счёт высокометаморфизованного органического вещества, содержащего какой-либо один вид азотсодержащих радикалов. Примером таких радикалов служат амино- или цианогруппы, обнаруженные во флюидных включениях в природных алмазах [16]. Можно было бы также допустить, что строго определённые пропорции азота и водорода в алмазах района Жуина обусловлены совместным участием этих компонентов в реакции алмазообразования [3]:



Однако аммиак, являющийся одним из продуктов реакции (1), полностью отсутствует в составе флюидных включений в природных алмазах [16], что делает данное предположение маловероятным.

Основные тенденции взаимосвязи алмазоносности трубок и распределения структурных примесей азота и водорода в алмазах отражены на схеме (рис. 6).

На рисунке видно, что трубки, содержащие средне- и высокоазотные алмазные популяции (IV и V ти-

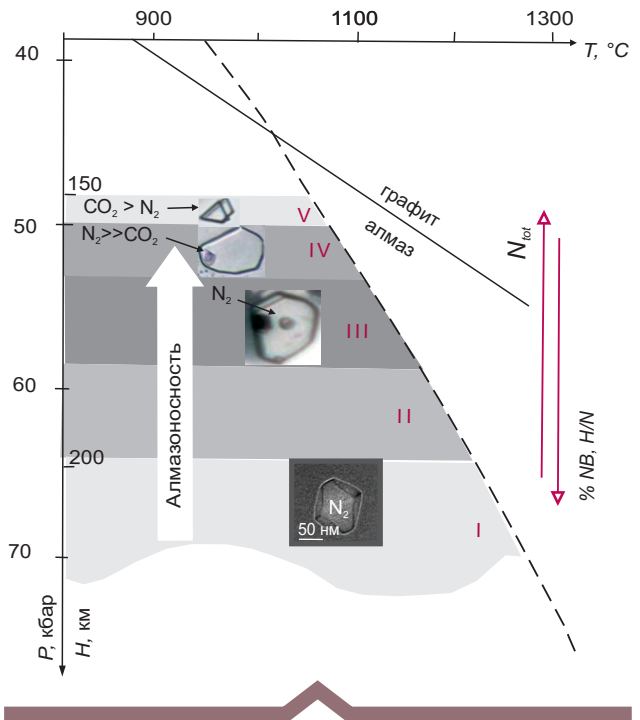


Рис. 6. Тенденции изменчивости алмазоносности кимберлитовых трубок, содержащих разноглубинные популяции алмазов типов I–V. На фото представлены характерные флюидные включения (увеличены в 1000–2000 раз) в алмазах популяций типов III, IV, V, по данным работы [38], а также в алмазах популяций типа I, по работе [8]:

$N_{\text{tot}}$ , at. ppm – общее содержание структурно связанного азота в алмазах, % NB – степень его агрегации, H/N – соотношение концентраций водорода и азота в кристаллах; штриховая линия – современная континентальная геотерма, по работе [17]; интервалы температур формирования алмазных популяций типов I–V оценены по диаграмме [41] для условного возраста алмазов 1 млрд лет

пы, относящиеся в основном к эклогитовому парагенезису), более алмазоносны, чем трубки с низкоазотными популяциями (III тип преимущественно ультраосновного парагенезиса). Данная тенденция наиболее отчётливо проявляется в масштабах отдельно взятого кимберлитового района или поля.

В алмазах популяций от V к I типу с увеличением температуры и давления возрастает не только степень агрегации азота, но и отношение H/N. На фоне общего понижения содержания азота в среде кристаллизации алмазов с глубиной происходит последовательное отщепление азота от углеводородного «скелета» органических соединений, что в конечном итоге приводит к соответствующему увеличению отношения H/N в кристаллах. Тем не менее химически инертный молекулярный азот зачастую присутствует во флюидных включениях в алмазах

I, III и IV типов популяций (см. рис. 6). Интересно, что в безазотных алмазах из трубок района Жуина обнаружены октаэдрические включения, полностью состоящие из молекулярного азота [8] (см. рис. 6). Можно предположить, что с увеличением глубины алмазообразования происходит перераспределение азота между кристаллом (структурные примеси) и флюидом.

Конечно, проблема генезиса алмазов ещё далека от своего разрешения. Многие исследователи в наши дни недооценивают или даже полностью исключают роль биогенных источников алмазов и их происхождение при субдукции толщ, вмещающих источник углерода. Распространена точка зрения о том, что алмазы образовались из мантийного C-N-O-флюида, но эта концепция не в полной мере объясняет соотношения между свойствами алмазов и алмазоносностью их мантийных источников.

В настоящей статье не рассматривались негативные факторы алмазоносности кимберлитовых трубок, обусловленные потерями алмазов при их доставке к земной поверхности в результате окислительного растворения или графитизации. Эти процессы также необходимо учитывать при прогнозной оценке алмазоносности кимберлитов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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 учёной степени канд. геол.-минерал. наук / Бардухинов Леонид Данилович. – Улан-Удэ : ГИН СО РАН, 2020. – 143 с.
2. Бардухинов Л. Д., Специус 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.
3. Блинова Г. К., Симаков С. К., Гуркина Г. А., Фролова Л. Н. Некоторые особенности химизма среды кристаллизации природных алмазов // Доклады АН СССР. – Т. 300, № 4. – М., 1988. – С. 950–952.
4. Богуш И. Н. Методическое пособие по исследованию поглощения алмазов в инфракрасной области при прогнозировании и поисках коренных месторождений. – Мирный : АК АЛРОСА (ПАО), 2004. – 32 с.
5. Бокый Г. Б., Безруков Г. Н., Клюев Ю. А. [и др.] Природные и синтетические алмазы – М. : Наука, 1986. – 221 с.
6. Геология и генезис алмазных месторождений: монография. В 2 кн. Кн. 2 / Под ред. Б. М. Зубарева. – М. : ЦНИГРИ, 1989. – 424 с.
7. Геология, прогнозирование, методика поисков, оценки и разведки месторождений алмазов / В. М. Подчасов, В. Е. Минорин, И. Я. Богатых [и др.]. – Т. 1. Коренные месторождения. – Якутск : ЯФ ГУ СО РАН, 2004. – 548 с.
8. Каминский Ф. В. Особенности нижнемантийных алмазов // Смирновский сборник: научно-литературный альманах. – М. : МАКС Пресс, 2017. – С. 164–174.
9. Каминский Ф. В., Кулакова И. И., Оглоблина А. И. О полициклических ароматических углеводородах в карбонадо и алмазе // Доклады АН СССР. – Т. 283, № 4. – М., 1985. – С. 985–988.
10. Кириллин А. Д., Кириллин О. А., Кириллин Г. А. Мировой алмазный рынок. – М. : АК АЛРОСА, 1999. – 397 с.
11. Ковальчук О. Е., Зуев В. М., Гаранин К. В. Оценка продуктивности кимберлитов по микроалмазам: методическое пособие. – Мирный : АК АЛРОСА (ПАО), 2020. – 63 с.
12. Ларченко В. А., Степанов В. П., Минченко Г. В., Кечик И. А. Алмазоносность кимберлитов и родственных им пород зимнего берега // Вестник Воронежского университета. Геология. – 2004. – № 2. – С. 134–147.
13. Соболев В. С., Соболев Н. В. Новые доказательства погружения на большие глубины эклогитизированных пород земной коры // Доклады АН СССР. – Т. 250, № 3. – М., 1980. – С. 683–685.
14. Соболев Е. В. Тверже алмаза. – Новосибирск : Наука, 1989. – 191 с.
15. Соболев Н. В., Сереткин Ю. В., Логвинова А. М., Павлушин А. Д., Узатыева С. С. Кристаллографическая ориентировка и геохимические особенности минеральных включений в алмазах // Геология и геофизика. – 2020. – Т. 61, № 5–6. – С. 774–793.
16. Сокол А. Г., Томиленко А. А., Бульбак Т. А., Сокол И. А., Заикин П. А., Соболев Н. В. Состав флюида восстановленной мантии по экспериментальным данным и результатам изучения флюидных включений в алмазах // Геология и геофизика. – 2020. – Т. 61, № 5–6. – С. 810–825.
17. Сорохтин О. Г., Митрофанов Ф. П., Сорохтин Н. О. Глобальная эволюция Земли и происхождение алмазов. – М. : Наука, 2004. – 269 с.
18. Сорохтин О. Г., Митрофанов Ф. П., Сорохтин Н. О. Происхождение алмазов и перспективы алмазоносности восточной части Балтийского щита. – Апатиты : КНЦ РАН, 1996. – 144 с.
19. 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.
20. Хачатрян Г. К. Азотные и водородные центры в алмазе, их генетическая информативность и значение для решения прогнозно-поисковых задач // Руды и металлы. – 2009. – № 4. – С. 73–80.
21. Хачатрян Г. К. Органическое вещество в алмазах из кимберлитовых источников: генетическая информативность // Руды и металлы. – 2017. – № 3. – С. 77–84.
22. Хачатрян Г. К. Типизация алмазов из кимберлитов и лампроитов по распределению азотных центров в кристаллах // Руды и металлы. – 2010. – № 2. – С. 46–60.

23. *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, 2003. – С. 319–321.
24. *Хачатрян Г. К., Анашкина Н. Е.* Соотношение между распределением структурных примесей в кристаллах алмаза и алмазонасностью кимберлитовых трубок (на примере Архангельской области и Якутии) // Руды и металлы. – 2021. – № 3. – С. 114–130.
25. *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.
26. *Boyd S. R., Kiflawi I., Woods G. S.* Infrared absorption by the B nitrogen aggregate in diamond // *Philosophical Magazine Part B*. – 1995. – V. 72. – P. 351–361.
27. *Boyd S. R., Kiflawi I., Woods G. S.* The relationship between infrared absorption and A-defect concentration in diamond // *Philosophical Magazine*. – V. 69, № 6. – London, 1994. – P. 1149–1153.
28. *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.
29. *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 <sup>13</sup>C depletion in mantle // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1991. – V. 55, № 5. – P. 2615–2625.
30. *Deines P., Harris J. W., Spear P. M., Gurney J. J.* Nitrogen and C <sup>13</sup> content of Finsch and Premier diamonds and their implications // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1989. – V. 53. – P. 1367–1378.
31. *Evans T.* Aggregation of nitrogen in diamond // *The properties of natural and synthetic Diamond*. – London : Academic Press, 1992. – P. 259–290.
32. *Kaminsky F. V., Khachatryan G. K.* Characteristics of nitrogen and other impurities in diamond, as revealed by infrared absorption data // *The Canadian Mineralogist*. – 2001. – V. 39. – P. 1733–1745.
33. *Kaminsky F. V., Khachatryan G. K.* The relationship between the distribution of the nitrogen impurity centers in diamond crystals and their internal structure and mechanism of growth // *Lithosphere*. – V. 77, № 1–4. – Washington D. C., 2004. – P. 255–271.
34. *Melton C. E., Giardini A. A.* The nature and significance of occluded fluids in tree Indian diamonds // *American Mineralogist*. – V. 66, № 7–8. – Chantilly, VA, USA, 1981. – P. 746–750.
35. *Noffke N., Christian D., Wacey D., Hazen R. M.* Microbially Induced Sedimentary Structures Recording an Ancient Ecosystem in the ca. 3.48 Billion-Year-Old Dresser Formation, Pilbara, Western Australia // *Astrobiology*. – 2013. – V. 13, № 12. – P. 1103–1124.
36. *Scarratt K., Fritsh E.* Note on diamond types // *Gems & Gemology, Spring*. – V. 28, № 1. – Easton, MD, 1992. – P. 38–42.
37. *Sharp W. E.* A plate tectonic origin for diamond-bearing kimberlites // *Earth and Planetary Science Letters*. – 1974. – V. 21, № 4. – P. 351–354.
38. *Smith E. M., Kopylova M. G., Frezzotti M. L., Afanasiev V. P.* N-rich fluid inclusions in octahedrally-grown diamond // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2014. – V. 393. – P. 39–48.
39. *Sobolev N. V., Logvinova A. M., Tomilenko A. A., Wirth R., Bul'bak T. A., Luk'yanova L. I., Fedorova E. N., Reutsky V. N., Efimova E. S.* Mineral and fluid inclusions in diamonds from the Urals placers, Russia: Evidence for solid molecular N<sub>2</sub> and hydrocarbons in fluid inclusions // *Geochimica Et Cosmochimica Acta*. – 2019. – V. 266. – P. 197–219.
40. *Sobolev N. V., Tomilenko A. A., Bul'bak T. A., Logvinova A. M.* Composition of hydrocarbons in diamonds, garnet, and olivine from diamondiferous peridotites from the Udachnaya pipe in Yakutia, Russia // *Engineering*. – 2019b. – V. 5. – P. 471–478.
41. *Taylor W. R.* Nitrogen aggregation character, thermal history and stable isotope composition of some xenolith-derived diamonds from Roberts Victor and Finch/W. R. Taylor, H. J. Milledge // 6<sup>th</sup> International Kimberlite Conference: Extended Abstract. – Novosibirsk. – 1995. – P. 620–622.
42. *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. *Bardukhinov L. D.* Osobennostialmazov i sostav vklucheniyy v nikh kak poiskovyie priznaki na primere Nakynskogo i Alakit-Markhinskogo kimberlitovykh poley [Peculiarities of diamonds and composition of inclusions in them as prospecting features on the example of Nakyn and Alakit-Markhin kimberlite fields]. Ulan-Ude, GIN SO RAN publ., 2020, 143 p. (In Russ.).
2. *Bardukhinov L. D., Spetsius Z. V., Lipashova A. N.* Strukturnyye defekty i mineral'nyye vklucheniya v almazakh iz kimberlitovykh trubok Nakynskogo i Alakit-Markhinskogo poley po dannym KR- i IK-spektroskopii [Structural defects and mineral inclusions in diamonds from kimberlite pipes of the Nakyn and Alakit-Markhin fields according to Raman and IR spectroscopy data]. *Rudy i metally* [Ores and Metals], 2018, No. 4, pp. 76–86. (In Russ.).
3. *Blinova G. K., Simakov S. K., Gurkina G. A., Frolova L. N.* Nekotoryye osobennosti khimizma sredy kristallizatsii prirodnykhalmazov [Some features of the chemistry of natural diamond crystallization medium]. *Doklady AN SSSR*, V. 300, No. 4, Moscow, 1988, pp. 950–952. (In Russ.).
4. *Bogush I. N.* Metodicheskoye posobiye po issledovaniyu pogloshcheniyaalmazov v infrakrasnoy oblasti pri prognozirovani i poiskakh korennykh mestorozhdeniy [Methodological manual for the study of the absorption of diamonds in the infrared region in the forecasting

- and search for primary deposits]. *Mirnyy*, AK ALROSA publ., 2004, 32 p. (In Russ.).
5. *Bokii G. B., Bezrukov G. N., Klyuyev Yu. A.* [et al.] *Prirodnyye i sinteticheskiye almazy* [Natural and synthetic diamonds]. Moscow, Nauka [Science] publ., 1986, 221 p. (In Russ.).
  6. *Geologiya i genezis almaznykh mestorozhdeniy: monografiya. V 2 kn. Kn. 2* [Geology and genesis of diamond deposits: monograph. In 2 books. Book. 2]. Moscow, TSNIGRI publ., 1989, 424 p. (In Russ.).
  7. *Geologiya, prognozirovaniye, metodika poiskov, otsenki i razvedki mestorozhdeniy almazov* [Geology, forecasting, methods of prospecting, evaluation and exploration of diamond deposits]. V. 1 *Korennyye mestorozhdeniya* [Primary deposits]. Yakutsk, YAF GU SO RAN publ., 2004, 548 p. (In Russ.).
  8. *Kaminskiy F. V.* *Osobennosti nizhnemantiynykh almazov* [Features of lower-mantle diamonds]. *Smirnovskiy sbornik: nauchno-literaturnyy al'manakh*, Moscow, MAKS Press publ., 2017, pp. 164–174. (In Russ.).
  9. *Kaminskiy F. V., Kulakova I. I., Ogloblina A. I.* *O politsiklicheskikh aromatischeskikh uglevodorodakh v karbonado i almaze* [On polycyclic aromatic hydrocarbons in carbonado and diamond]. *Doklady AN SSSR*, V. 283, No. 4, Moscow, 1985, pp. 985–988. (In Russ.).
  10. *Kirillin A. D., Kirillin O. A., Kirillin G. A.* *Mirovoy almaznyy rynek* [World diamond market]. Moscow, AK ALROSA publ., 1999, 397 p. (In Russ.).
  11. *Koval'chuk O. Ye., Zuyev V. M., Garanin K. V.* *Otsenka produktivnosti kimberlitov po mikroalmazam: metodicheskoye posobiye* [Evaluation of the productivity of kimberlites by microdiamonds: a manual]. *Mirnyy*, AK ALROSA publ., 2020, 63 p. (In Russ.).
  12. *Larchenko V. A., Stepanov V. P., Minchenko G. V., Kechik I. A.* *Almazonosnost' kimberlitov i rodstvennykh im porod zimnego berega* [Diamond content of kimberlites and related rocks of the winter coast]. *Vestnik Voronezhskogo universiteta. Geologiya* [Bulletin of the Voronezh University. Geology], 2004, No. 2, P. 134–147. (In Russ.).
  13. *Sobolev V. S., Sobolev N. V.* *Novyye dokazatel'stv pogruzheniya na bol'shiye glubiny eklogitizirovannykh porod zemnoy kory* [New evidence of subsidence to great depths of eclogitized rocks of the earth's crust]. *Doklady AN SSSR*, V. 250, No. 3, Moscow, 1980, pp. 683–685. (In Russ.).
  14. *Sobolev Ye. V.* *Tverzhe almaza* [Harder than diamond]. *Novosibirsk, Nauka* [Science] publ., 1989, 191 p. (In Russ.).
  15. *Sobolev N. V., Seretkin Yu. V., Logvinova A. M., Pavlushin A. D., Ugap'yeva S. S.* *Kristallograficheskaya oriyehtirovka i geokhimicheskiye osobennosti mineral'nykh vkluycheniy v almazakh* [Crystallographic orientation and geochemical features of mineral inclusions in diamonds]. *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics], 2020, V. 61, No. 5–6, pp. 774–793. (In Russ.).
  16. *Sokol A. G., Tomilenko A. A., Bul'bak T. A., Sokol I. A., Zaikin P. A., Sobolev N. V.* *Sostav flyuida vosstanovlennoy mantii po eksperimental'nym dannym i rezul'tatam izucheniya flyuidnykh vkluycheniy v almazakh* [Fluid composition of the reduced mantle according to experimental data and the results of studying fluid inclusions in diamonds]. *Geologiya i geofizika* [Geology and geophysics], 2020, V. 61, No. 5–6, pp. 810–825. (In Russ.).
  17. *Sorokhtin O. G., Mitrofanov F. P., Sorokhtin N. O.* *Global'naya evolyutsiya Zemli i proiskhozhdeniye almazov* [Global evolution of the Earth and the origin of diamonds]. Moscow, Nauka [Science] publ., 2004, 269 p. (In Russ.).
  18. *Sorokhtin O. G., Mitrofanov F. P., Sorokhtin N. O.* *Proiskhozhdeniye almazov i perspektivy almazonosnosti vostochnoy chasti Baltiyskogo shchita* [The origin of diamonds and prospects for diamond content in the eastern part of the Baltic Shield]. *Apatity, KNTS RAN* publ., 1996, 144 p. (In Russ.).
  19. *Khachatryan G. K.* *Azot i vodorod v kristallakh almaza v aspekte geologo-geneticheskikh i prognozno-poiskovykh problem almaznykh mestorozhdeniy* [Nitrogen and hydrogen in diamond crystals in the aspect of geological-genetic and predictive-search problems of diamond deposits]. *Otechestvennaya geologiya* [Domestic geology], 2013, No. 2, P. 29–40. (In Russ.).
  20. *Khachatryan G. K.* *Azotnyye i vodorodnyye tsenry v almaze, ikh geneticheskaya informativnost' i znachenije dlya resheniya prognozno-poiskovykh zadach* [Nitrogen and hydrogen centers in diamond, their genetic information content and significance for solving predictive and search problems]. *Rudy i metally* [Ores and Metals], 2009, No. 4, pp. 73–80. (In Russ.).
  21. *Khachatryan G. K.* *Organicheskoye veshchestvo v almazakh iz kimberlitovykh istochnikov: geneticheskaya informativnost'* [Organic matter in diamonds from kimberlite sources: genetic information content]. *Rudy i metally* [Ores and Metals], 2017, No. 3, P. 77–84. (In Russ.).
  22. *Khachatryan G. K.* *Tipizatsiya almazov iz kimberlitov i lamproitov po raspredeleniyu azotnykh tsevtrov v kristallakh* [Typification of diamonds from kimberlites and lamproites according to the distribution of nitrogen centers in crystals]. *Rudy i metally* [Ores and Metals], 2010, No. 2, P. 46–60. (In Russ.).
  23. *Khachatryan G. K.* *Usovershenstvovannaya metodika otsenki kontsentratsiy azota v almaze i yeyo prakticheskoye primeneniye* [An improved method for assessing nitrogen concentrations in diamond and its practical application]. *Geologicheskiye aspekty mineral'no-syr'yevoy bazy AK "ALROSA": Sovremennoye sostoyaniye, perspektivy, resheniya*. *Mirnyy*, 2003, P. 319–321. (In Russ.).
  24. *Khachatryan G. K., Anashkina N. Ye.* *Sootnosheniye mezhdru raspredeleniyem strukturnykh primesey v kristallakh almaza i almazonosnost'yu kimberlitovykh trubok (na primere Arkhangel'skoy oblasti i Yakutii)* [Relationship between the distribution of structural impurities in diamond crystals and the diamond content of kimberlite pipes (on the example of the Arkhangelsk region and Yakutia)]. *Rudy i metally* [Ores and Metals], 2021, No. 3, pp. 114–130. (In Russ.).
  25. *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.
  26. *Boyd S. R., Kiflawi I., Woods G. S.* *Infrared absorption by the B nitrogen aggregate in diamond*. *Philosophical Magazine*, V. 72, No. 3, London, 1995, P. 351–361.

27. *Boyd S. R., Kiflawi I., Woods G. S.* The relationship between infrared absorption and A-defect concentration in diamond, *Philosophical Magazine*, V. 69, No. 6, London, 1994, P. 1149–1153.
28. *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, P. 325–342.
29. *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  $^{13}\text{C}$  depletion in mantle, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, V. 55, No. 5, P. 2615–2625.
30. *Deines P., Harris J. W., Spear P. M., Gurney J. J.* Nitrogen and  $\text{C}^{13}$  content of Finsch and Premier diamonds and their implications, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, V. 53, P. 1367–1378.
31. *Evans T.* Aggregation of nitrogen in diamond, The properties of natural and synthetic Diamond, London, Academic Press, 1992, P. 259–290.
32. *Kaminsky F. V., Khachatryan G. K.* Characteristics of nitrogen and other impurities in diamond, as revealed by infrared absorption data, *The Canadian Mineralogist*, 2001, V. 39, P. 1733–1745.
33. *Kaminsky F. V., Khachatryan G. K.* The relationship between the distribution of the nitrogen impurity centers in diamond crystals and their internal structure and mechanism of growth, *Lithosphere*, V. 77, No. 1–4, Washington D.C., 2004, P. 255–271.
34. *Melton C. E., Giardini A. A.* The nature and significance of occluded fluids in tree Indian diamonds, *American Mineralogist*, V. 66, No. 7–8, Chantilly, VA, USA, 1981, P. 746–750.
35. *Noffke N., Christian D., Wacey D., Hazen R. M.* Microbially Induced Sedimentary Structures Recording an Ancient Ecosystem in the ca. 3.48 Billion-Year-Old Dresser Formation, Pilbara, Western Australia, *Astrobiology*, 2013, V. 13, No. 12, P. 1103–1124.
36. *Scarratt K., Fritsh E.* Note on diamond types, *Gems & Gemology*, Spring, V. 28, No. 1, Easton, MD, 1992, P. 38–42.
37. *Sharp W. E.* A plate tectonic origin for diamond-bearing kimberlites // *Earth and Planetary Science Letters*, 1974, V. 21, No. 4, P. 351–354.
38. *Smith E. M., Kopylova M. G., Frezzotti M. L., Afanasiev V. P.* N-rich fluid inclusions in octahedrally-grown diamond.// *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, V. 393, P. 39–48.
39. *Sobolev N. V., Logvinova A. M., Tomilenko A. A., Wirth R., Bul'bak T. A., Luk'yanova L. I., Fedorova E. N., Reutsky V. N., Efimova E. S.* Mineral and fluid inclusions in diamonds from the Urals placers, Russia: Evidence for solid molecular  $\text{N}_2$  and hydrocarbons in fluid inclusions, *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2019, V. 266, P. 197–219.
40. *Sobolev N. V., Tomilenko A. A., Bul'bak T. A., Logvinova A. M.* Composition of hydrocarbons in diamonds, garnet, and olivine from diamondiferous peridotites from the Udachnaya pipe in Yakutia, Russia, *Engineering*, 2019b, V. 5, P. 471–478.
41. *Taylor W. R.* Nitrogen aggregation character, thermal history and stable isotope composition of some xenoliths-derived diamonds from Roberts Victor and Finch / W. R. Taylor, H. J. Milledge, 6<sup>th</sup> International Kimberlite Conference: Extended Abstract, Novosibirsk, 1995, P. 620–622.
42. *Wood 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.