



СТРУКТУРНЫЕ ДЕФЕКТЫ И МИНЕРАЛЬНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В АЛМАЗАХ ИЗ КИМБЕРЛИТОВЫХ ТРУБОК НАКЫНСКОГО И АЛАКИТ-МАРХИНСКОГО ПОЛЕЙ ПО ДАННЫМ КР- И ИК-СПЕКТРОСКОПИИ

Методом инфракрасной спектроскопии исследованы алмазы из кимберлитовых трубок Накынского и Алаakit-Мархинского полей Якутской алмазоносной провинции. Показано, что по типоморфным характеристикам (содержание и степень агрегации азота) эти алмазы существенно различаются. Установлена зависимость между содержанием структурной примеси азота в алмазах из кимберлитов Алаakit-Мархинского поля и алмазоносностью месторождений. Методом комбинационного рассеяния определён фазовый состав минеральных включений без разрушения алмазов, что позволило выявить соотношение эклогитовых и перидотитовых ассоциаций для каждой из кимберлитовых трубок.

Ключевые слова: алмазы, включения, кимберлит, Рамановская спектроскопия, ИК-спектроскопия.

Продуктивность алмазных месторождений определяется содержанием и качеством алмазов в породе [1]. Чтобы избежать трудоёмкого опробования при поисках кимберлитов и оценке их возможной алмазоносности по минеральному составу, обращают внимание на минералы-спутники, содержание которых на несколько порядков выше, чем алмазов. Внедрение, начиная с 70-х годов, инструментальных (спектральных) методов исследования и создание наборов банков данных по минеральному составу кимберлитов кардинально расширили наши знания о петрологии верхней мантии. Особенно интересны включения в алмазах, так как каждый кристалл алмаза с включениями других минералов представляет собой своеобразный уникальный контейнер, содержащий «законсервированный» материал среды своего формирования и в течение длительного времени сохраняющий его в неизменённом виде. В результате анализа этих данных и экспериментальных исследований стало очевидно, что кимберлит – глубинная порода, служащая транспортёром мантийного вещества к поверхности [17, 26]. Таким образом, истинными спутниками алмаза следует считать минералы, кристаллизующиеся совместно с алмазом или являющиеся материнской средой его образования и соответствующие по составу включениям в нём. Другие глубинные минералы, не имеющие с алмазом генетической связи, – можно назвать лишь характерными минералами кимберлитов.

В целях установления среды кристаллизации природных алмазов и состава исходных материнских пород литосферной мантии Якутской алмазоносной провинции нами с помощью методов инфракрасной спектроскопии (ИК) и комбинационного рассеяния

**Бардухинов
Леонид Данилович^{1,2}**

заведующий лабораторией, аспирант
bardukhinovld@alrosa.ru

**Специус
Здислав Витольдович¹**

доктор геолого-минералогических наук
ведущий научный сотрудник
spetsiuszv@alrosa.ru

**Липашова
Алла Николаевна¹**

старший научный сотрудник
lipashovaan@alrosa.ru

¹ Научно-исследовательское геологическое предприятие (НИГП) АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Мирный

² ФГБУН Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ

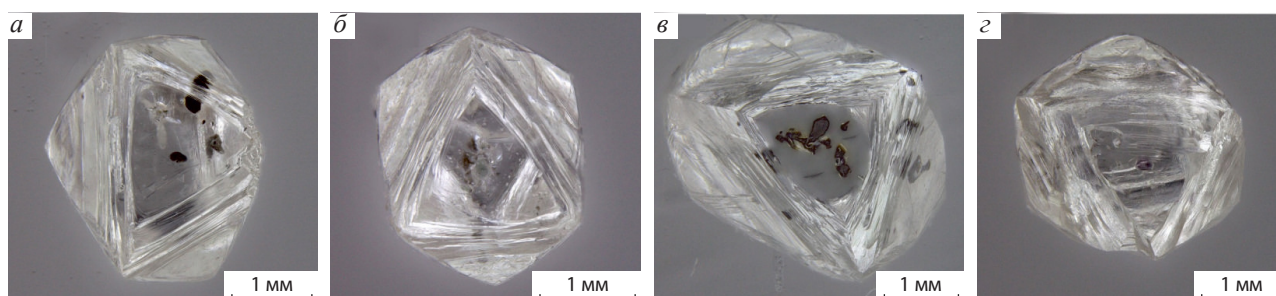


Рис. 1. ФОТО ВКЛЮЧЕНИЙ В АЛМАЗАХ ИЗ КИМБЕРЛИТОВ АЛАКИТ-МАРХИНСКОГО ПОЛЯ:

включения оливина и сульфида (а), омфацита (б), хромита (в), пиропы (з)

(КР) изучены алмазы и включения в них из Накынского и Алаakit-Мархинского промышленных алмазоносных полей.

Далдыно-Алаakitский алмазоносный район расположен в бассейне верхних течений рек Марха и Алаakit, в структурном плане – на юго-западном склоне Анабарской антеклизы, на который наложилось северо-восточное крыло Тунгусской позднепалеозойской синеклизы. Здесь широко развиты карбонатные породы раннего палеозоя, терригенные отложения позднего палеозоя, сложно интродуцированные телами траппов (Алаakit-Мархинское кимберлитовое поле), и обнаружены ~120 кимберлитовых тел [10]. Промышленные россыпи алмазов довольно редки, россыпи ближнего сноса представлены ручьями Пироповый и Мелкоильменитовый. В целом единичные находки алмазов в бассейнах рек Алаakit-Мархинского кимберлитового поля не позволяют с должной степенью вероятности соотносить их с кимберлитовыми телами района.

Среднемархинский алмазоносный район (Накынский кимберлитовое поле) охватывает правобережье среднего течения р. Марха, бассейн рек Ханья, Накын и верховье р. Тюкян, в структурном плане находится на южном склоне Анабарской антеклизы, на который наложился северо-западный борт Вилуйской синеклизы. Территория характеризуется более широко проявленной россыпной алмазоносностью по сравнению с Далдыно-Алаakitским районом. Детально изучена алмазоносность современных отложений на более чем 300-километровом участке р. Марха ниже устья р. Ханья [10].

Для интенсификации поисковых работ необходима, наряду с морфологическими, дополнитель-

ные критерии, позволяющие достоверно разграничивать ореолы россыпей. Наиболее значимыми, с точки зрения генетической информации, могут быть включения в алмазах, характеризующие среду и условия образования последних.

Визуальная идентификация минеральных включений в алмазе с использованием бинокулярного микроскопа не всегда даёт правильный результат из-за их оптических особенностей и субъективного подхода исследователя. ИК- и КР-спектроскопия позволяют исключить недостатки этого метода.

Для изучения отбирались алмазы из геологических коллекций кимберлитовых трубок Алаakit-Мархинского (30 лет Айхалу, Восток, Озёрная, Чукукская, Айхал, Заря, Юбилейная, Краснопресненская, Комсомольская, Радиоволновая, Молодость, Соболева, Одинцова, Сытыканская) и Накынского (Нюрбинская, Ботубинская) кимберлитовых полей. Отметим, что все исследования впервые проводились неdestructивными методами, с сохранением целостности алмазов (рис. 1).

Съёмка спектров комбинационного рассеяния включений выполнялась на КР микроскопе InVia (Renishaw) при комнатной температуре. Источник возбуждения – твёрдотельный лазер КР микроскопа, $\lambda=532$ (785) нм, мощность 100 мВт. Использовалась отражательная голографическая дифракционная решётка 1800 (1200) лин/мм, измеряемый спектральный диапазон при возбуждающем излучении 532 нм составлял 100–1800 см^{-1} . Объектив 50x (Leica). Приёмником излучения служила Пельтье-охлаждаемая CCD-матрица 1024×256, размер пикселя 26 мкм. Заявленные производителем спектральное разрешение не ниже 0,5 см^{-1} в видимом диапазоне (при использовании соответствующих комбинаций источников света, объективов и ре-

шётки), воспроизводимость не ниже $0,1 \text{ см}^{-1}$. Калибровка прибора осуществлялась с помощью монокристаллического кремниевого стандарта. В некоторых спектрах присутствуют узкие ($0,05 \text{ нм}$) паразитные пики, обусловленные сбавыванием матричного CCD-приёмника при случайном воздействии космических лучей. Включения в алмазах идентифицировались с помощью библиотеки Рамановских спектров RENISHAW и программного обеспечения CrystalSleuth.

ИК-спектроскопические исследования проводились на ИК-Фурье спектрометре VERTEX 70 (Bruker) в комплексе с ИК микроскопом Hyperion 2000. Диапазон измерений $400\text{--}5500 \text{ см}^{-1}$. Выполнена съёмка интегральных (со всего объёма кристалла) спектров. Нормирование спектров осуществлялось по поглощению в двухфонной области [16, 33]. По спектрам определялись концентрации А-, В1- и В2-дефектов алмазов. Коэффициенты поглощения на частотах 1973 и 2500 см^{-1} (соответственно $\alpha_{1973}=12,5 \text{ см}^{-1}$ и $\alpha_{2500}=4,9 \text{ см}^{-1}$) были выбраны в качестве параметров внутреннего стандарта. Дополнительно использовались материалы из базы данных НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО) по ИК-спектроскопии алмазов.

Минеральные включения в алмазах. В алмазах Якутии чаще присутствуют включения оливинов, гранатов и графитов. Минеральные включения в алмазах кимберлитовых трубок Алакит-Мархинского и Накынского кимберлитовых полей представлены в основном графитом, оливином, хромитом, пиропом, гранатом, хромдиопсидом, омфацитом, рутилом, сульфидом, коэситом и самим алмазом. Характерные спектры идентифицированных включений различных минералов приведены на рис. 2.

Включения *графита* в алмазах весьма многообразны [17]. Достаточно дискуссионен вопрос об их происхождении. Одни исследователи уверены в эпигенетической природе графита [24]. Доказательством служат его включения, развитые по трещинам или представленные в виде розеток, окружающих другие, в большинстве случаев сульфидные, включения (в этом случае графит является показателем высоких $>1000^\circ\text{C}$ температур на заключительной стадии эволюции алмаза [12]). Другие авторы [5, 20] считают включения графита, распространённые в центральных частях алмаза, имеющие закономерную ориентировку и хорошо различимые грани, протогенетическими. Также гра-

фит в алмазах встречается в составе полифазных микровключений, относимых к сингенетическим [34]. Такие алмазы часто чёрного цвета.

Оливин – один из самых распространённых силикатных включений в алмазах. Как правило, оливины из литосферных алмазов характеризуются пониженным содержанием фаялитового минала и, как следствие, повышенной магнезиальностью. В работе [29] отмечается, что для подавляющего большинства изученных оливинов магнезиальность $100\cdot\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$ определена между 91 и 94%. Исследования оливинов из ксенолитов и кимберлитов позволили выделить два типа: оливины I генерации (макротриаллы) и оливины II генерации ($<0,5 \text{ мм}$).

Гранаты в виде сингенетических включений в алмазах или индикаторных минералов кимберлитов также относятся к наиболее многочисленным среди минералов-спутников алмаза. Большинство исследований, посвящённых гранатам, касается двух взаимосвязанных проблем – генезису граната и алмазообразованию [27]. В последнее время повысился интерес к экспериментальному моделированию процесса природного алмазообразования, в том числе в системах с участием граната [7]. Например, удалось установить характерные парагенезисы включений гранатов с использованием КР-спектроскопии [15]. Так, алмазы из трубки Комсомольская-Магнитная с включениями гранатов эклогитового парагенезиса характеризуются высоким общим содержанием структурной примеси азота и средней его агрегацией, тогда как алмазы с включениями гранатов верлитового, дунит-гарцбургитового и лерцолитового парагенезисов отличаются низкой концентрацией азота и широкой вариацией степени агрегированности азота, что обычно свойственно алмазам перидотитового генезиса [15].

Коэсит в алмазе имеет ряд уникальных характеристик. Высокая сжимаемость и низкое тепловое расширение коэсита обеспечивают преимущество, состоящее в сохранении давления с малой зависимостью от температуры, а композиционная простота коэсита позволяет избежать химических вариаций состава, как в оливине, гранате, флюидных включениях [2].

Фазовый состав твёрдых включений в алмазах. В кимберлитовых телах Накынского и Алакит-Мархинского кимберлитового полей определены сингенетические включения перидотитовой (оливин,

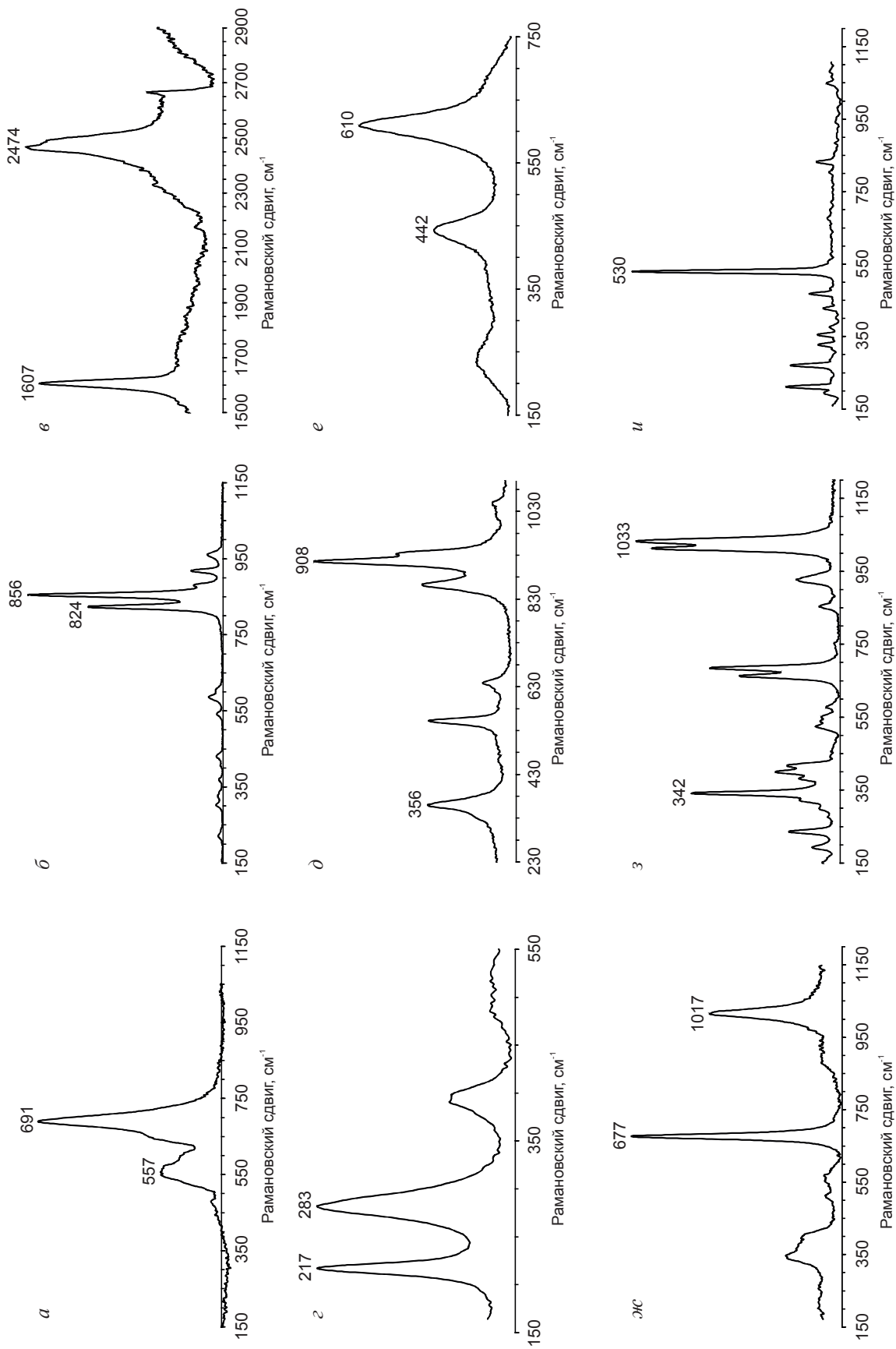


Рис. 2. СПЕКТРЫ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ ВКЛЮЧЕНИЙ В АЛМАЗАХ ИЗ КИМБЕРЛИТОВ ЯКУТСКОЙ АЛМАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ:

а – хромит, б – оливин, в – графит, г – сульфид, д – пироп, е – рутил, ж – омфациит, з – энстатит, и – коэсит

хромит, малиновый пироп, энстатит, хромдиопсид) и эклогитовой (оранжевый гранат, омфацит, коэзит) ассоциаций. Среди эпигенетических включений в алмазах наиболее распространён графит. Распространённость твёрдых включений и их ассоциаций оценена главным образом визуально и в большинстве случаев подтверждена Рамановской спектроскопией. Установлено, что число алмазов с твёрдыми включениями составляет >50% от общего объёма кристаллов. Основная их масса – это эпигенетические включения графита. Ниже приведены содержания включений в алмазах различных трубок без учёта кристаллов с включениями графита и сульфидов. Несмотря на то что определённая концентрация никеля [9] или изотопов Re-Os [30] в сульфидных включениях является характерным признаком алмазов различного происхождения, на данный момент метод КР-спектроскопии не может однозначно указывать на эклогитовый или перидотитовый тип парагенезиса.

На долю сингенетических включений приходится не более 3% (рис. 3). Отмечено, что наибольшая частота встречаемости включений свойственна алмазам Алакит-Мархинского кимберлитового поля, в частности образцам из трубок Чукукская и Озёрная (>2%), относительно высокая (>1%) – образцам из трубок Юбилейная (1,21%), Молодость

(1,43%), Краснопресненская (1,51%), Комсомольская (1,95%), Заря (1,64%), Восток (1,36%), более низкая – алмазам из кимберлитов Накынского поля (<0,5%), что достаточно хорошо согласуется с результатами работы [10].

Среди сингенетических включений наиболее распространены оливин и хромшпинелид, причём первый несколько преобладает (рис. 4, 5). Изученные кимберлитовые трубки можно разделить на два типа в зависимости от содержания включений оливинов в алмазах: >0,8% (30 лет Айхалу, Заря, Краснопресненская, Озёрная, Чукукская, Восток, Комсомольская, Молодость) и <0,8% (Айхал, Радиоволновая, Сытыканская, Ботуобинская, Юбилейная, Нюрбинская). Наибольшая частота встречаемости включений оливина выявлена в трубке Чукукская (1,46%), наименьшая – в трубках Сытыканская (0,16%), Нюрбинская (0,13%) и Ботуобинская (0,04%). Больше всего включений хромита в алмазах в трубках Комсомольская (0,63%) и Радиоволновая (0,48%), в остальных – <0,3%, преимущественно <0,1%.

Анализ твёрдых включений в алмазах позволил определить долю кристаллов с включениями ультраосновной и эклогитовой ассоциаций. Преобладают алмазы с включениями ультраосновной ассоциации (P-тип), на долю эклогитовой (E-тип)

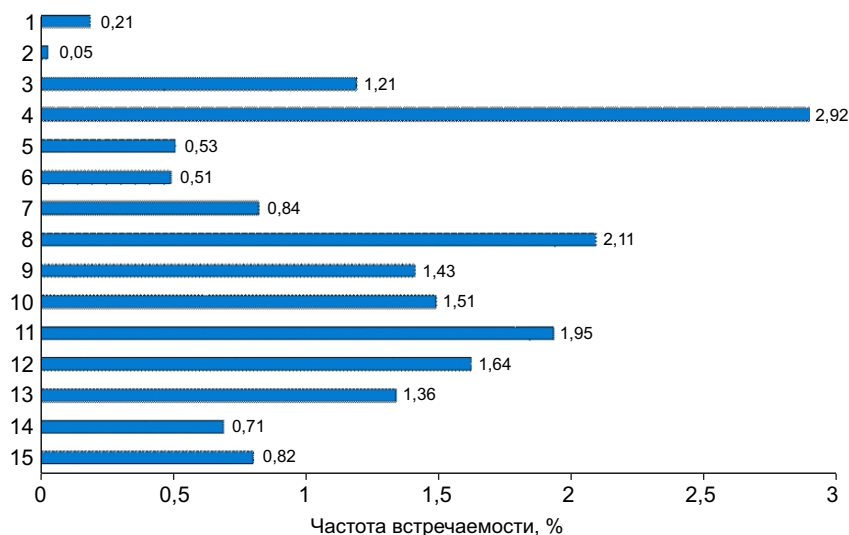


Рис. 3. ЧАСТОТА ВСТРЕЧАЕМОСТИ СИНГЕНЕТИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В АЛМАЗАХ ИЗ КИМБЕРЛИТОВЫХ ТРУБОК НАКЫНСКОГО И АЛАКИТ-МАРХИНСКОГО ПОЛЕЙ (в скобках – представительность выборки):

1 – Нюрбинская (26 572); 2 – Ботуобинская (16 483); 3 – Юбилейная (9971); 4 – Чукукская (137); 5 – Сытыканская (3809); 6 – Соболева (393); 7 – Радиоволновая (825); 8 – Озёрная (807); 9 – Молодость (1744); 10 – Краснопресненская (2999); 11 – Комсомольская (8310); 12 – Заря (2497); 13 – Восток (804); 14 – Айхал (2961); 15 – 30 лет Айхалу (122)

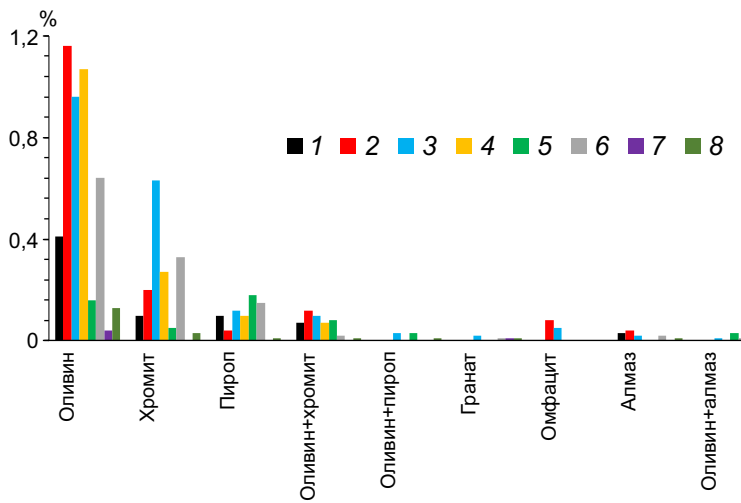


Рис. 4. ЧАСТОТА ВСТРЕЧАЕМОСТИ СИНГЕНЕТИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В АЛМАЗАХ ИЗ ВЫСОКО- И СРЕДНЕПРОДУКТИВНЫХ КИМБЕРЛИТОВЫХ ТРУБОК НАКЫНСКОГО И АЛАКИТ-МАРХИНСКОГО ПОЛЕЙ (в скобках – число изученных алмазов):

1 – Айхал (2961); 2 – Заря (2497); 3 – Комсомольская (8310); 4 – Краснопресненская (2999); 5 – Сытыканская (3809); 6 – Юбилейная (9971); 7 – Ботубобинская (16 483); 8 – Нюрбинская (26 572)

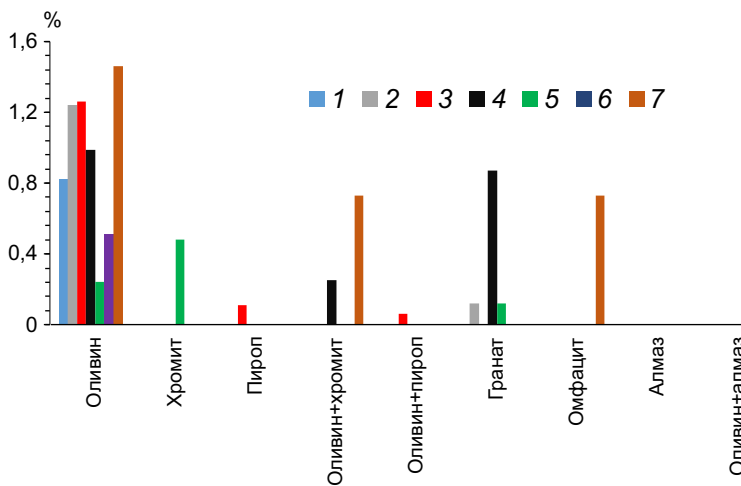


Рис. 5. ЧАСТОТА ВСТРЕЧАЕМОСТИ СИНГЕНЕТИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В АЛМАЗАХ ИЗ НИЗКОПРОДУКТИВНЫХ КИМБЕРЛИТОВЫХ ТРУБОК АЛАКИТ-МАРХИНСКОГО ПОЛЯ (в скобках – число изученных алмазов):

1 – 30 лет Айхалу (122); 2 – Восток (804); 3 – Молодость (1744); 4 – Озёрная (807); 5 – Радиоволновая (825); 6 – Соболева (393); 7 – Чукукская (137)

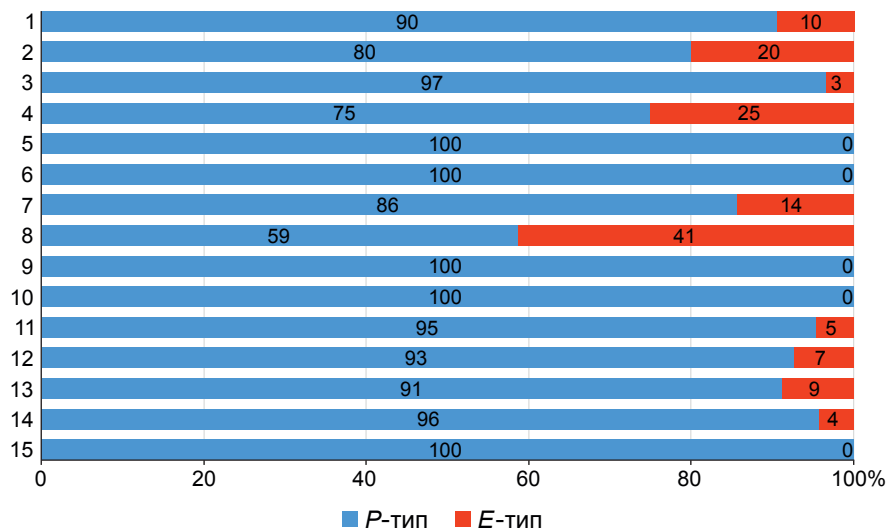


Рис. 6. ДОЛЯ КРИСТАЛЛОВ АЛМАЗОВ С ВКЛЮЧЕНИЯМИ УЛЬТРАОСНОВНОЙ (P-тип) И ЭКЛОГИТОВОЙ (E-тип) АССОЦИАЦИЙ В АЛМАЗАХ ИЗ КИМБЕРЛИТОВЫХ ТРУБОК НАКЫНСКОГО И АЛАКИТ-МАРХИНСКОГО ПОЛЕЙ:

названия кимберлитовых трубок и представительность выборки см. рис. 3

приходится <50% (рис. 6). На фоне преобладания алмазов перидотитового генезиса можно выделить трубки с относительно повышенной долей алмазов с включениями эклогитовой ассоциации: Озёрная (41%), Чукукская (25%), Ботуобинская (20%), Радиоволновая (14%) (см. рис. 6), что, вероятно, свидетельствует о своеобразии среды, термодинамических и геохимических условий образования.

Проведённые авторами инструментальные исследования по диагностике минеральных включений в алмазах для кимберлитовых трубок в большинстве случаев подтвердили соотношение эклогитовой и перидотитовой ассоциаций. Также подтвердилось заметное отличие алмазов Накынского кимберлитового поля, где на порядок выше содержание кристаллов с включениями основного состава в сравнении с таковыми из Алакит-Мархинского поля, за исключением трубок Озёрная, Радиоволновая и Чукукская, где эклогитовых ~41, 14 и 25% соответственно [10]. По данным Э.С.Ефимовой и др. [8], Н.Н.Зинчука и др. [10], доля сингенетических включений эклогитовой ассоциации составляет для алмазов из трубок Ботуобинская 20–30%, Нюрбинская до 20%, Айхал – не встречены, Сытыканская не более 0,3%, Юбилейная ~0,6%, Комсомольская 5%, что в целом указывает на сопоставимость этих данных с результатами нашей работы с применением метода КР-спектроскопии.

Включения в алмазах трубки Ботуобинская детально изучены авторами работы [11]. Ими установлено, что соотношение алмазов с включениями ультраосновного и основного парагенезисов составляет ~3:1. Эти данные не противоречат полученным нами результатам для трубки Ботуобинская, где доля алмазов эклогитовой ассоциации ~20%.

Структурные примеси в алмазах. Дефектно-примесный состав и разнообразие морфологических форм алмазов в большой степени определены условиями образования (температура, давление, состав среды кристаллизации) [4, 13, 14, 21]. Структурная примесь азота в алмазах часто используется как один из типоморфных признаков при прогнозно-поисковых работах [3, 18], наряду с морфологией, включениями и изотопным составом. Вместе с тем, содержание азота и степень его агрегации в алмазах несут в себе генетическую информацию об условиях образования алмаза, выходящая геотермометром [22, 23, 32].

О методических подходах по исследованию поглощения алмазов в инфракрасной области и применении полученных характеристик в качестве инструмента при минералогическом районировании известно давно [3, 19]. Так, по распределению структурной примеси азота и водорода Г.К.Хачатрян выделяет шесть типов популяций алмаза. В одной трубке обычно можно выделить главную популяцию алмазов, реже – две, одна из которых будет находиться в подчинённом положении [19, 25]. По мнению авторов, в зависимости от температуры и соответствующей ей глубины алмазообразования изменяются содержание и степень агрегации азота. Предложенная методика прогноза и поиска коренных месторождений алмаза, основанная на его типоморфных признаках (тип популяции, содержание азота, водорода и т.д.) [18], позволяет идентифицировать алмазы из россыпей и коренных источников и сравнивать их между собой. Признаком ещё не выявленного коренного источника может быть различие в типоморфизме алмазов известного коренного источника с россыпным проявлением. Одно из ограничений предложенной Г.К.Хачатрян методики – отсутствие апробации представленных моделей на реальных алмазоносных россыпях.

Предыдущие исследователи постулируют уникальность выборок алмазов конкретного месторождения по набору азотных и водородных дефектов. Большое внимание уделено алмазам высокопродуктивных и среднепродуктивных тел, но мало освещены типоморфные особенности алмазов из слабопродуктивных трубок Накынского и Алакит-Мархинского полей.

Для кимберлитовых тел Алакит-Мархинского поля характерны алмазы с пониженным (~100 at. ppm) содержанием структурной примеси азота $N_{tot}=N_A+N_B$, высока доля «безазотных» кристаллов (<25 at. ppm) (рис. 7 а, б). Алмазы каждой из трубок имеют достаточно близкие содержания азота, при этом следует отметить небольшую долю алмазов с повышенным содержанием (>800 at. ppm) из трубок Чукукская, Озёрная, что хорошо согласуется с большей долей включений эклогитовой ассоциации, определённой для них (см. рис. 6). Алмазы трубок Нюрбинская и Ботуобинская резко отличаются по содержанию и степени агрегации азота от таковых Алакит-Мархинского поля (таблица; см. рис. 7). Для них характерны средние содержания примеси азота (400–800 at. ppm) и относи-

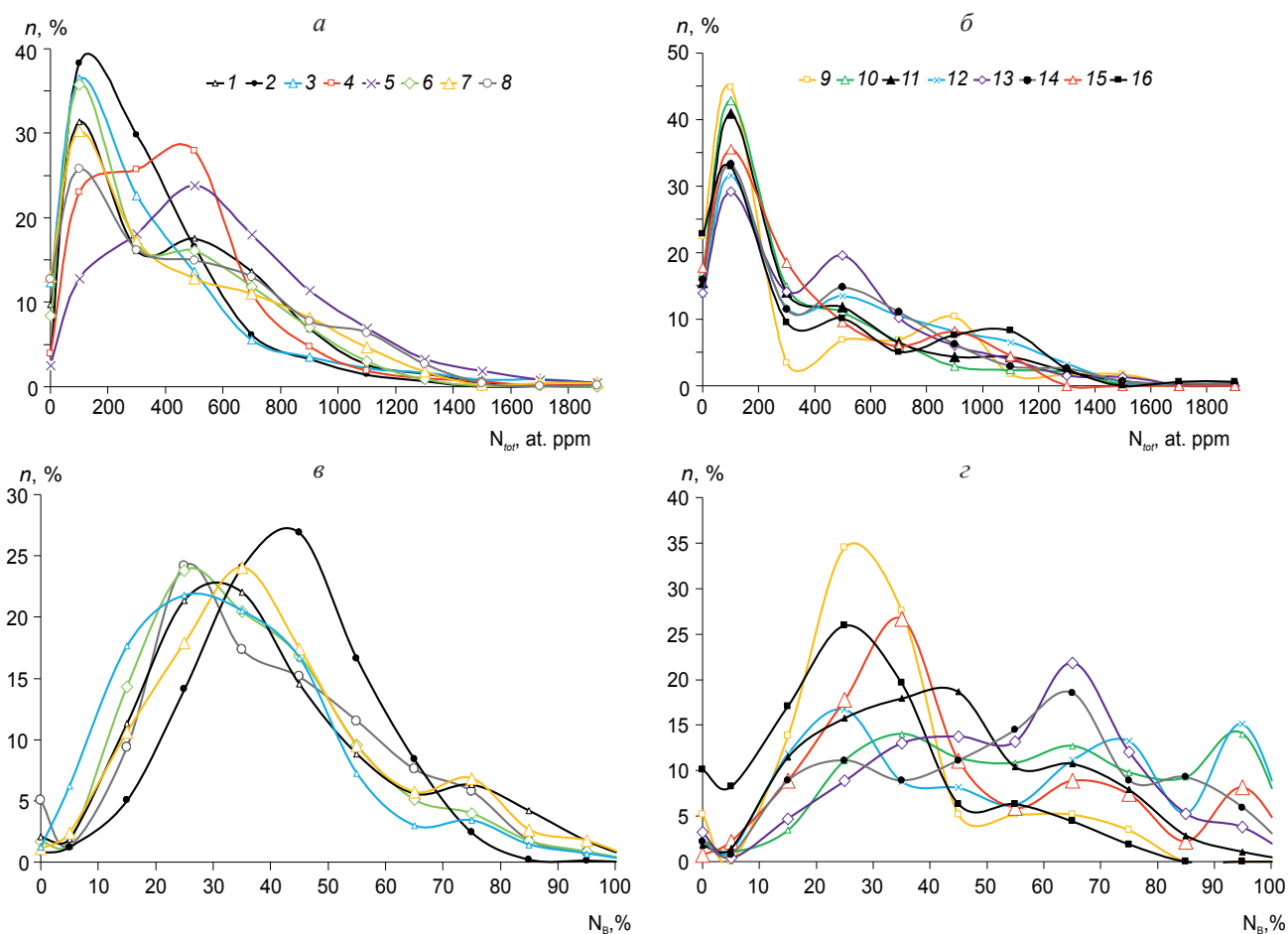


Рис. 7. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АЛМАЗОВ ИЗ КИМБЕРЛИТОВ НАКЫНСКОГО И АЛАКИТ-МАРХИНСКОГО ПОЛЕЙ ПО СОДЕРЖАНИЮ СТРУКТУРНОЙ ПРИМЕСИ (а, б) И СТЕПЕНИ АГРЕГАЦИИ (в, г) АЗОТА (в скобках – число изученных алмазов):

1 – Заря (1786); 2 – Краснопресненская (1269); 3 – Сытыканская (964); 4 – Ботуобинская (1436); 5 – Нюрбинская (2301); 6 – Айхал (802); 7 – Комсомольская (453); 8 – Юбилейная (1724); 9 – 30 лет Айхалу (58); 10 – Восток (378); 11 – Озёрная (279); 12 – Молодость (430); 13 – Радиоволновая (531); 14 – Соболева (270); 15 – Чукукская (135); 16 – Одинцова (158)

тельно низкая (20–30%) степень его агрегации $V = N_B \cdot 100\% / (N_A + N_B)$.

На основании полученных статистических распределений алмазов по общему содержанию структурной примеси азота и степени его агрегации (см. рис. 7), а также с учётом усреднённых данных (см. таблицу) выделены три группы: «безазотные» ($N_{tot} < 25$ ppm), «малоазотные» (< 300 ppm) и «среднеазотные» (300–600 ppm). Для трубок со средней и высокой алмазоносностью (Нюрбинская, Ботуобинская, Айхал, Сытыканская, Комсомольская, Краснопресненская, Юбилейная, Заря) доля «безазотных» алмазов в выборке составляет $< 13\%$, а для некоторых даже $< 10\%$, для убогоалмазоносных (30 лет Айхалу, Восток, Озёрная, Одинцова, Моло-

дость, Радиоволновая, Соболева, Чукукская) – $> 13\%$ (см. рис. 7). В выборках изученных алмазов в зависимости от степени агрегации азота устанавливаются также три группы алмазов (см. рис. 7 в, г): $V = 25-45$, $V = 55-75$, $V = 85-100\%$. Отчётливо видно, что для трубок со средней и высокой алмазоносностью характерен один широкий максимум в распределении алмазов по степени агрегации азота (20–60%), в то время как для трубок с низкой алмазоносностью в распределении фиксируются три моды, что, может быть, обусловлено множественностью геохимических и *PT*-условий образования, а также посткристаллизационным отжигом алмазов. Отметим также, что суммарная доля алмазов со степенью агрегации азота ~ 25 и 45% для вы-

УСРЕДНЁННЫЕ СОДЕРЖАНИЯ ДЕФЕКТОВ В АЛМАЗАХ ИЗ КИМБЕРЛИТОВ НАКЫНСКОГО И АЛАКИТ-МАРХИНСКОГО ПОЛЕЙ

Объекты	Число, шт.	N_{tot} , at. ppm	B, %	B_2 , cm^{-1}	ν_{B_2} , cm^{-1}	H, cm^{-1}
30 лет Айхалу	58	281,8	32,9	2,3	1365,7	1,5
Айхал	802	360,0	37,4	4,9	1364	1,3
Восток	378	263,2	57,4	4,0	1364,1	2,0
Заря	1786	384,3	40,6	5,4	1372,1	1,5
Комсомольская	453	387,8	40,9	5,8	1365,2	1,5
Краснопресненская	1269	303,8	42,0	5,0	1364,2	1,2
Молодость	430	415,3	54,1	7,4	1367,9	1,7
Озёрная	279	302,5	43,0	4,4	1363,7	1,9
Радиоволновая	531	375,8	54,0	6,1	1364,9	2,0
Соболева	270	366,0	53,7	6,4	1364,2	1,9
Сытыканская	964	318,0	33,9	4,2	1363,7	1,5
Чукукская	135	293,6	45,1	4,9	1363,3	1,6
Юбилейная	1724	422,5	40,4	5,2	1365,9	1,2
Нюрбинская	2301	583,5	31,7	5,9	1367,4	2,4
Ботубинская	1436	405,3	23,5	3,0	1365,9	1,3

Примечание. H – коэффициент поглощения H-центра (3107 cm^{-1}).

соко- и среднеалмазоносных трубок превышает 35% от выборки, для низкоалмазоносных данный показатель <35%.

Среди низкоалмазоносных трубок наиболее близкие значения, характерные для высокоалмазоносных трубок, имеют алмазы из следующих кимберлитовых тел: по доле «безазотных» кристаллов – Радиоволновая (13,9%), Молодость (13,7%); по суммарной доле алмазов со степенью агрегации азота 25 и 45% – Одиноцова (32,3%), Озёрная (34,4%). Однако полного соответствия указанных двух параметров промышленному содержанию среди низкоалмазоносных трубок не выявлено. Не исключена возможность проведения на данных трубках крупнообъёмного опробования для получения представительной партии алмазов.

«Безазотными» принято считать алмазы с концентрацией N <20 ppm [28]. В наших исследованиях к типу IIa по физической классификации алмаза [13] отнесены кристаллы с концентрацией <25 ppm. На сегодняшний день не существует корректной гипотезы образования «безазотных» (тип IIa) алмазов. Остаются открытыми вопросы о механизме и условиях роста таких уникальных природных кристаллов. В работах по выращиванию искусственных кристаллов типа IIa часто используют геттеры азота, например Ti [31]. Считается, что такие химиче-

ские элементы, как Ti, связывают азот в нитриды. Изучение взаимосвязи алмазоносности месторождений с количеством в кимберлитах TiO_2 показало, что при увеличении концентрации Ti содержание алмазов в месторождении уменьшается [6]. В результате выполненных нами оптико-спектроскопических исследований алмазов из трубок Алаakit-Мархинского и Накынского полей выявлена корреляция между содержанием в выборках «безазотных» алмазов, при увеличении доли которых содержание алмазов в трубке снижается. Предположительно, можно говорить не только об отрицательной зависимости концентрации Ti и алмазоносности месторождения, но и об обратной зависимости содержания «безазотных» кристаллов и продуктивности кимберлитовых тел Алаakit-Мархинского поля.

Таким образом, в большинстве низкопродуктивных кимберлитов Алаakit-Мархинского поля повышена доля алмазов с включениями эклогитового парагенезиса, «безазотных» кристаллов и понижено содержание алмазов со степенью агрегации азота ~25 и 45%.

Авторы выражают благодарность рецензенту за ценные критические замечания и конструктивные предложения, способствовавшие улучшению статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н., Похиленко Н.П. Поисковая минералогия алмаза. – Новосибирск: Гео, 2010.
2. Бардухинов Л.Д., Специус З.В., Монхоров Р.В. Включение коэсита в алмазах Якутии // ДАН. 2016. Т. 470. № 5. С. 558–561.
3. Богуш И.Н. Методическое пособие по исследованию поглощения алмазов инфракрасной области при прогнозировании и поисках коренных месторождений. – Мирный: Алроса, 2004.
4. Буланова Г.П., Барашков Ю.П., Тальникова С.Б., Смелова Г.Б. Природный алмаз – генетические аспекты. – Новосибирск: Наука, 1993.
5. Буланова Г.П., Варшавский А.В., Лескова Н.В., Никишова Л.В. О «центральных» включениях в природном алмазе // ДАН СССР. 1979. Т. 224. № 3. С. 261–269.
6. Василенко В.Б., Толстов А.В., Кузнецова Л.Г., Минин В.А. Петрохимические критерии оценки алмазности кимберлитовых месторождений Якутии // Геохимия. 2010. № 4. С. 366–376.
7. Гранаты пироп-кноррингитового ряда в условиях мантии Земли: экспериментальное изучение в системе / А.М.Дорощев, Г.П.Брай, А.В.Гирнис и др. // Геология и геофизика. 1997. Т. 38 (2). С. 523–545.
8. Ефимова Э.С., Соболев Н.В. Распространенность кристаллических включений в алмазах Якутии // ДАН СССР. 1977. Т. 237. № 6. С. 1475–1478.
9. Ефимова Э.С., Соболев Н.В., Поспелова Л.Н. Включения сульфидов в алмазах и особенности их парагенезиса // Зап. ВМО. 1983. Т. 112. С. 300–310.
10. Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Типоморфизм алмазов Сибирской платформы. – М.: ООО «Недра-Бизнес-центр», 2003.
11. Митюхин С.И., Специус З.В. Включения в алмазах из кимберлитовой трубки Ботубинская (Накынское поле, Якутия) // Геология и геофизика. 2005. Т. 46 (12). С. 1246–1258.
12. Нечаев Д.В., Хохряков А.Ф. Образование эпигенетических включений графита в кристаллах алмаза: экспериментальные данные // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 4. С. 523–532.
13. Орлов Ю.Л. Минералогия алмаза. – М.: Наука, 1984.
14. Пальянов Ю.Н., Сокол А.Г., Хохряков А.Ф., Крук А.Н. Условия кристаллизации алмаза в кимберлитовом расплаве по экспериментальным данным // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 1–2. С. 254–272.
15. Парагенезисы включений гранатов в алмазах из кимберлитов Якутии по данным Рамановской и ИК-спектроскопии / Л.Д.Бардухинов, З.В.Специус, Е.В.Кислов и др. // ЗРМО. 2018. Ч. 147. Вып. 2. С. 25–35.
16. Природные и синтетические алмазы / Г.Б.Бокий, Г.Н.Безруков, Ю.А.Клюев и др. – М.: Наука, 1986.
17. Соболев Н.В. Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. – Новосибирск: Наука, 1974.
18. Хачатрян Г.К. Азот и водород в кристаллах алмаза в аспекте геолого-генетических и прогнозно-поисковых проблем алмазных месторождений // Отечественная геология. 2013. № 2. С. 29–42.
19. Хачатрян Г.К. Типизация алмазов из кимберлитов и лампроитов по распределению азотных центров в кристаллах // Руды и металлы. 2010. № 2. С. 46–60.
20. *Diamond-graphite relationships in ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Kokchetav massif, Northern Kazakhstan* / A.V.Korsakov, M.Perraki, D.Zedgenizov et al. // J. Petrol. 2010. Vol. 51. P. 763–783.
21. *Directional chemical variations in diamonds showing octahedral following cuboid growth* / D.A.Zedgenizov, B.Harte, V.S.Shatsky et al. // Contrib. Mineral Petrol. 2006. Vol. 151. P. 45–57.
22. *Evans T. Aggregation of nitrogen in diamond* // The properties of natural and synthetic diamond. London, 1992. P. 259–290.
23. *Evans T., Qi Z. The kinetics of aggregation of nitrogen atoms in diamonds* // Proc. Roy. Soc. London, 1982. A381. P. 238–242.
24. *Harris J.W., Vance E.R. Induced graphitization around crystalline inclusions in diamond* // Contr. Miner. Petrol. 1972. Vol. 35. P. 227–234.
25. *Kaminsky F.V., Khachatryan G.K. Characteristics of nitrogen and other impurities in diamond, as revealed by infrared absorption date* // Canad. Miner. 2001. Vol. 39. P. 1733–1745.
26. *Meyer H.O.A. Inclusions in diamond* // Mantle xenoliths. 1987. P. 501–522.
27. *Meyer H.O.A. Chrome-pyrop: an inclusion in natural diamonds* // Science. 1968. Vol. 160. P. 1447.
28. *Moore A.E. Type II diamonds: Flamboyant Megacrysts?* // South Afr. J. Geol. 2009. Vol. 112. P. 23–38.
29. *Petrogenetic significance of minor elements in olivines from diamonds and peridotite xenoliths from kimberlites of Yakutia* / N.Sobolev, A.Logvinova, D.Zedgenizov et al. // Lithos. 2009. Vol. 112. P. 701–713.
30. *Richardson S.H., Shirey S.B., Harris J.W., Carlson R.W. Archean subduction recorded by Re-Os isotopes in eclogitic sulfide inclusions in Kimberley diamonds* // Earth Planet. Sci. Lett. 2001. Vol. 191. P. 257–266.
31. *Strong H.M., Wentorf R.H. Growth of large, high-quality diamond crystals at General Electric* // Am. J. Phys. 1991. Vol. 59 (11). P. 1005–1008.
32. *Taylor W.R., Canil D., Milledge H.J. Kinetics of Ib to IaA nitrogen aggregation in diamond* // Geochim. Cosmochim. Acta. 1996. Vol. 60. P. 18–124.
33. *Zaitsev A.M. Optical properties of diamond: A data handbook.* – Springer Berlin Heidelberg, 2001.
34. *Zedgenizov D.A., Kagi H.K., Shatsky V.S., Sobolev N.V. Carbonatitic melts in cuboid diamonds from Udachnaya kimberlite pipe (Yakutia): evidence from vibrational spectroscopy* // Miner. Mag. 2004. Vol. 68. P. 61–73.

STRUCTURAL DEFECTS AND MINERAL INCLUSIONS IN DIAMONDS FROM NAKYN AND ALAKIT-MARKHIN FIELD KIMBERLITE PIPES BASED ON RAMAN AND IR SPECTROSCOPY DATA

L.D.Bardukhinov^{1,2}, Z.V.Spetsius¹, A.N.Lipashova¹
 (¹Research Geological Enterprise (RGE) JSC ALROSA (PJSC), Mirny; ²Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude)

Diamonds from Nakyn and Alakit-Markhin field kimberlite pipes (Yakutian diamondiferous province) were studied using IR spectroscopy method. It is shown that these diamonds greatly vary in typomorphic features (N content and degree of aggregation). Relations of nitrogen structural admixture content in diamonds from Alakit-Markhin field kimberlites and diamond potential of deposits were found. Phase composition of mineral inclusions was determined using Raman scattering method avoiding diamond destruction which allowed to identify eclogite and peridotite association relationship for every kimberlite pipe.

Keywords: diamonds, inclusions, kimberlite, Raman spectroscopy, IR spectroscopy.



ПОДПИСЧИКАМ

ПОДПИСКА В ПОЧТОВЫХ ОТДЕЛЕНИЯХ

по каталогу «Газеты. Журналы» Агентства «Роспечать»
 (индекс 47218)

ПОДПИСКА НА ЭЛЕКТРОННУЮ ВЕРСИЮ ЖУРНАЛА

на сайте Научной Электронной Библиотеки elibrary.ru

Вышедшие номера журнала можно приобрести в редакции:

Адрес: 117545, г. Москва, Варшавское шоссе, 129, корп. 1

Контактный телефон: 8 (495) 315-28-47. Факс: 315-43-47

E-mail: rudandmet@tsnigri.ru, rudandmet@yandex.ru

Периодичность – 4 номера в год. Цена подписки на год 1200 рублей