

На правах рукописи

*Хачатрян*

**ХАЧАТРЯН Галина Карленовна**

**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 твердых  
полезных ископаемых, минерагения;
- 25.00.05 — минералогия, кристаллография

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора геолого-минералогических наук

Москва — 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов» (ФГУП ЦНИГРИ)

**Официальные  
оппоненты:**

**Афанасьев Валентин Петрович**, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории минералов высоких давлений и поисков месторождений алмазов ФГБУН «Институт Геологии и Минералогии им. В.С. Соболева СО РАН»

**Старостин Виктор Иванович**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых Геологического факультета ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

**Спивак Анна Валерьевна**, доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории флюидно-магматических процессов ФГБУН «Институт Экспериментальной минералогии РАН»

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ-РГГРУ)

Защита состоится 11 апреля 2017 г., в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 216.016.01 на базе Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов» (ФГУП ЦНИГРИ)

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

С диссертацией можно ознакомиться в геолфонде ФГУП ЦНИГРИ (по адресу: г. Москва, Варшавское шоссе, д. 129, корп. 1) и на сайте Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов» [http://www.tsnigri.ru/doc/Khachatryan\\_dis.pdf](http://www.tsnigri.ru/doc/Khachatryan_dis.pdf)

Автореферат разослан «\_\_» февраля 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета



Кряжев С.Г.

**Актуальность проблемы.** Актуальность определяется необходимостью решения дискуссионных вопросов генезиса алмаза и совершенствования критериев прогноза его месторождений на основе свойств самого алмаза, среди которых наиболее информативны примеси. Они не только отражают температурные условия, химизм и геологические особенности среды кристаллизации алмаза, но и служат типоморфными характеристиками этого минерала, которые используются в прогнозно-поисковых целях. В ряду типоморфных свойств алмаза важнейшими являются структурные примеси азота и водорода, а также включения минералов, флюидных фаз, органических соединений и изотопный состав углерода.

**Степень разработанности.** Генезис алмазных месторождений и связь их с геологической средой до сих пор остается предметом острых дискуссий, несмотря на то, что в последние десятилетия знания в этой области значительно продвинулись.

Геологический возраст и условия кристаллизации алмаза обычно оценивают косвенно на основании исследования минеральных включений в алмазе. С помощью минералов-спутников алмаза успешно находят главные его носители – тела кимберлитов и лампроитов, однако почти в 90 % случаев в них практически отсутствуют алмазы.

Основываясь на концепции ксеногенности алмаза по отношению к кимберлитам, одни исследователи считают алмаз продуктом кристаллизации основных и ультраосновных магм, а другие – результатом реакции оксидов и углеводородов в мантийных условиях, как в виде ювенильных флюидов, так и первично экзогенных образований, погруженных на большие глубины. Дискуссионность проблемы вызывает необходимость дополнительно исследовать те свойства самого алмаза, которые могут подтвердить или скорректировать упомянутые представления. К таким свойствам следует отнести прежде всего концентрации азота и водорода, входящих в кристаллическую решетку алмаза, распределение этих примесей в объеме кристалла в зависимости от механизма его роста, соотношения концентраций структурных примесей с составом разнообразных включений в алмазе. Для использования всех этих данных в геологоразведочной практике, т.е. при распространении закономерностей микромира на крупные геологические массы, актуальным является выделение значительных по объему групп кристаллов (популяций), обладающих единичными генетическими свойствами и условиями локализации.

**Цель исследований** – разработка проблем минерагии алмаза и совершенствование методических основ прогноза и поисков алмазных месторождений.

**Задачи исследований:**

1. Анализ состояния изученности и генетической информативности структурных и фазовых примесей в кристаллах алмаза, а также данных по изотопному составу алмаза.
2. Разработка унифицированной методики определения концентраций азотных центров в алмазе, обеспечивающей сопоставимость данных, полученных в разных лабораториях.

3. Создание базы данных по распределению азотных и водородных центров в кристаллах алмаза из кимберлитов и лампроитов разных платформ мира.

4. Систематизация кристаллов алмаза по общему содержанию азота и степени его агрегации с выделением статистически значимых групп – популяций.

5. Выявление латеральной зональности распределения алмазных популяций в провинции и относительных температур кристаллизации алмазов с эклогитовыми и ультрабазитовыми включениями.

6. Выяснение природы и генетической информативности водородных центров в алмазе на основе изучения:

— взаимосвязи содержания водородных центров в алмазе с механизмом его роста;

— вариации содержания водорода в истории роста кристалла – от его зарождения до заключительного этапа;

— соотношения концентраций водородных и азотных центров, примесей органических веществ в алмазах из метаморфических пород и кимберлитов;

— корреляции между содержанием водородных центров и изотопным составом углерода в объеме кристаллов с неоднородным внутренним строением.

7. Анализ соответствия выявленных минералогических характеристик алмаза существующим геодинамическим моделям алмазообразования.

8. Выявление новых генетически информативных типоморфных признаков алмаза.

9. Разработка методических основ и совершенствование критериев прогнозирования коренных месторождений на основе данных по распределению структурных примесей в кристаллах алмаза из россыпей.

### **Научная новизна.**

В диссертации на большом фактическом материале решается проблема генезиса азотных и водородных центров в алмазе, их связи с процессами формирования фундамента платформ, а также рассматривается возможность использования данных по распределению примесей и дефектов кристаллической решетки алмаза из россыпей для целей прогноза и поисков его коренных месторождений.

1. Среди алмазов из кимберлитов и лампроитов впервые проведено группирование по общему содержанию азота в кристаллах и степени его агрегации с выделением типов популяций, характеризующихся разными условиями алмазообразования в гипербазитовых и эклогитовых слоях мантии Земли. Для алмазных популяций установлена тенденция уменьшения общего содержания азота в кристаллах и одновременно увеличения его агрегированности при повышении температуры, которая связывается с увеличением глубинности.

2. На примере Сибирской платформы по распределению азота в кристаллах выявлена двусторонняя с элементами концентричности латеральная зональность размещения популяций алмаза: наиболее высокотемпературные популяции расположены в центральных частях, а наименее - соответственно по периферии платформы.

3. Автору принадлежит приоритет в выявлении особенностей состава структурных примесей в микроалмазах из метаморфических пород (Блинова, 1986, 1989), главными из которых, так же, как и в алмазах из кимберлитов и лампроитов, являются азот и водород. В целом, концентрация примеси азота в виде одиночных, замещающих углерод атомов, в алмазах из метаморфических пород выше на порядок и более, по сравнению с алмазами из кимберлитов и лампроитов.

4. В работе (Блинова, Каминский, Соболев Е.В., авторское свидетельство, 1984), автору диссертации принадлежит приоритет в установлении нового типоморфного признака алмаза – распределения водорода в кристаллах. В работах автора (Блинова, 1987; Блинова и др., 1988) впервые рассмотрена проблема генетической информативности водородных центров в алмазе.

5. Установлено участие экзогенных углеводородов в формировании водородных центров в кристалле алмаза, что подтверждается следующими фактами:

— прямыми находками фазовых примесей органических соединений в кристаллах алмаза из кимберлитов и метаморфических пород, обогащенных легким изотопом углерода, присущим биогенным углеводородам, а также обратной корреляцией между содержанием этих примесей и водородных центров в соответствующих кристаллах;

— положительной корреляцией между содержанием водородных центров и легкого изотопа углерода в объеме кристаллов алмаза, обладающих неоднородным внутренним строением (центральная область кристаллов обогащена водородом и легким изотопом углерода, по сравнению с периферической).

6. Автором установлена положительная корреляция между общим содержанием структурно связанного азота и водорода в кристаллах алмаза. В редких случаях эта корреляция линейная, например, в алмазах из трубок кластера Пандрэра района Жуина, Бразилия. Данная корреляция свидетельствует о сонахождении азота и водорода в среде алмазообразования и косвенно указывает на общий источник этих элементов.

7. Установлено влияние стресса на морфологию, внутреннее строение кристаллов и распределение в них структурных примесей и дефектов в истории роста алмаза.

8. Разработанные минералогические характеристики кристаллов алмаза и пространственное размещение популяций дают информацию о геологической структуре и геодинамике глубинной зоны алмазообразования в масштабах провинции.

### **Практическая значимость диссертации.**

1. Установлен новый типоморфный признак алмаза – структурная примесь водорода, в результате чего разработан «Способ поисков коренных месторождений алмазов». Способ основан на сравнении выборок алмаза из россыпей и известных трубок в исследуемом алмазоносном районе или поле по распределению водородных центров в кристаллах. В случае отличия сопоставляемых выборок, делается

прогноз о наличии нового, еще неизвестного коренного источника на исследуемой территории.

На «Способ поисков коренных месторождений алмазов», «Способ поисков месторождений алмазов» получены три Авторских свидетельства СССР: № 1254890 от 01.05.1984; № 1264736 от 15.06.1986; № 1419348 от 22.10.1986.

2. С использованием комплекса данных по распределению азота, водорода, плейтлети в кристаллах алмаза дан прогноз наличия новых еще не выявленных коренных источников алмаза в разных алмазоносных районах Якутии и других регионов.

3. Разработана унифицированная ИК-спектроскопическая методика оценки содержания азотных А- и В-центров в кристаллах алмаза, обеспечивающая сопоставимость аналитических данных, полученных в разных лабораториях.

4. Создана база данных по распределению структурных дефектов в кристаллах, содержащая характеристику их крупности, формы, окраски для алмазов из разных месторождений, кимберлитовых полей, рудных районов и провинций, которая может быть использована как при прогнозировании алмазных месторождений, так и для оценки качества кристаллов.

**Методология и методы исследования.** Основой методологии являлось установление связи структурных примесей и иных минералогических характеристик кристаллов алмаза с составом и геологией вмещающей среды.

Наиболее информативным методом количественной оценки содержания структурных и фазовых примесей в алмазах из кимберлитов и метаморфических пород является ИК-спектроскопия, которая использовалась автором в качестве базового метода исследований. ИК-спектры алмазов записывались в ЦНИГРИ на приборах Specord IR-75, Specord M-80 фирмы Carl Zeiss, Jena и ИК-Фурье спектрометре марки Nicolet 380 с микроскопом Centaurus компании THERMO Electron Corporation, USA. При этом была усовершенствована методика оценки концентраций азота в А- и В-формах в алмазе (Хачатрян Г.К., 2003). С помощью этого метода были проанализированы кристаллы алмаза из месторождений Урала и Кумды-Коля, Казахстан (предоставлены О.Д.Захарченко, Е.Д.Надеждиной, В.А.Печниковым, коллекция ЦНИГРИ), Якутии (предоставлены Ф.В.Каминским и О.Д.Захарченко, коллекция ЦНИГРИ, В.И.Коптилем, ЯНИГП ЦНИГРИ, Ю.М.Сибирцевым, ФГУНПП «Аэрогеология», Р.М.Базилевской, АО «Алмазы Анабара»), Архангельской области (предоставлены О.Д.Захарченко, коллекция ЦНИГРИ, а также Г.П.Кудрявцевой и В.К.Гараниным, МГУ им. Ломоносова), Венесуэлы, Бразилии и Канады (предоставлены Ф.В.Каминским, KM Diamond Corporation, Канада), Конго (предоставлены М.Г.Копыловой, University of British Columbia, Ванкувер, Канада).

Сопоставление кристаллов алмаза из коренных источников и россыпей проводилось на основе разработанной автором диссертации базы данных. Она включает информацию о 5435 образцах алмаза из 96 трубок кимберлитов и лампроитов и из россыпей.

Данные ИК-спектроскопии дополнялись результатами изучения морфологии и внутреннего строения кристаллов, состава минеральных включений, изотопного состава углерода алмаза. Значительная часть кристалломорфологических исследований алмазов выполнена О.Д.Захарченко и В.И.Коптилем. Внутреннее строение кристаллов алмаза анализировалось с помощью метода катодной люминесценции на растровом электронном микроскопе «Стереоскан МК-II А» на физическом факультете МГУ им. Ломоносова под руководством профессора Г.В.Сапарина и с помощью поляризационно-оптического метода в ЦНИГРИ на стереоскопическом микроскопе МПС-2, а интерпретация результатов проводилась диссертантом совместно с соавторами Г.А.Гуркиной, О.Д.Захарченко, Ф.В.Каминским, О.В.Палажченко, В.К.Гараниным и Г.П.Кудрявцевой. Данные по составу минеральных включений в алмазе и отчасти по изотопному составу углерода алмаза заимствованы автором из совместных публикаций с Ф.В.Каминским и О.Д.Захарченко. Отдельные анализы изотопного состава углерода выполнены в ЦНИГРИ С.Г.Кряжевым.

**Положения, выносимые на защиту:**

Тезис 1. По распределению структурной примеси азота в алмазах, вынесенных из недр кимберлитами и лампроитами, в месторождениях мира выделено 6 типов популяций, различающихся условиями формирования. Популяции образуют ряд, в котором увеличение температуры и соответствующей глубины алмазообразования сопровождается общей тенденцией уменьшения содержания азота и увеличения степени его агрегации в кристаллической решетке алмаза (от парной к четырехатомной конфигурации атомов), а также появлением включений высокобарических минералов в наиболее высокотемпературной популяции.

Тезис 2. Водородные центры, входящие в структуру кристалла алмаза, формируются в процессе его роста с участием экзогенных органических соединений, погруженных в мантию вместе с вмещающими толщами. Структурные примеси азота и водорода в алмазе имеют общие источники, включающие азотсодержащие органические вещества.

Тезис 3. Для Сибирской платформы установлена двусторонняя с элементами концентричности латеральная зональность размещения главных популяций алмаза: наиболее высокотемпературные расположены в центре, а наименее – соответственно по периферии. Эта зональность характеризует увеличение глубины структурной зоны, в которой происходило образование алмазов, от периферии к центральным частям платформы и может служить одним из принципов её минерагенического районирования.

Тезис 4. Разработана оригинальная методика прогноза и поисков коренных месторождений алмаза, основанная на использовании комплекса его типоморфных признаков, включающего содержания в кристаллах структурной примеси водорода в совокупности с азотом в А-, В-формах и плейтлетс, а также тип алмазной популяции.

Предлагаемый комплекс признаков позволяет идентифицировать алмазы из россыпей и коренных источников, и сравнивать их между собой. Если алмазы в россыпях и известных месторождениях района отличаются, то это служит основанием для поиска нового еще не выявленного коренного алмазоносного объекта.

Тезис 5. Наличие в россыпях Арктической зоны Якутии популяций алмаза, сходных с популяциями алмаза из трубок кимберлит-лампроитового состава Зимнебережного района Архангельской области, позволяет прогнозировать аналогичные коренные источники алмазов в районах Якутии.

### **Степень достоверности и апробация результатов.**

Диссертация базируется на материалах исследований алмазов автором в ЦНИГРИ за период с 1981 по 2015 г.г. - около 5,5 тыс. кристаллов (свыше трех тысяч кристаллов алмаза изучено лично и более двух тысяч по литературным источникам). Основные положения диссертации опубликованы в трех книгах, 42 статьях и 20 тезисах. На разработки получены три авторские свидетельства. Материалы исследований докладывались или демонстрировались на международном геологическом конгрессе (Киото, 1992), на Международных кимберлитовых конференциях (Новосибирск, 1995; Кейптаун, 1998; Канада, 2003; Франкфурт, 2008; Бангалор, 2012), на Геологическом конгрессе (Порламар, Венесуэла, 1997), на научных конференциях в ЦНИГРИ (Москва, 1982, 1983), на Всесоюзной конференции «Самородное элементообразование в эндогенных процессах» (Якутск, 1985), на ВДНХ СССР (Москва, 1986), на II Всесоюзном совещании по геохимии углерода (Москва, 1986), Всесоюзном научно-техническом совещании «Основные проблемы и пути совершенствования технологии обогащения природных алмазов на основе использования их физических свойств» (Мирный, 1987), на VI Межведомственном совещании по геологии алмазных месторождений (Иркутск, 1990), на сессии Московского отделения Минералогического общества (Москва, 2001), на конференциях разных лет АК АЛРОСА (Мирный, 2003, 2008, Ялта, 2004), вошли в отчет по подсчету запасов месторождения им. М.В.Ломоносова, другие научно-производственные отчеты ЦНИГРИ, а также отчеты по договорным работам с АК «АЛРОСА» и АО «Алмазы Анабара». Достоверность проведенных исследований подтверждена рецензиями на отчеты по госбюджетным и договорным темам, а также публикациями в рецензируемых журналах. Основные положения диссертации опубликованы полностью в 31 статьях журналов, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий и Scopus.

В соавторских статьях автору диссертации полностью принадлежит проведенный ИК-спектроскопический анализ образцов алмаза и интерпретация полученных с его помощью результатов, частично описание granulometрии, окраски, кристалломорфологии образцов, анализ их внутреннего строения. Соавторам принадлежит значительная часть коллекций алмаза, которые они предоставляли для совместных исследований, характеристика геологической позиции кристаллов, частич-



но их морфологии, внутреннего строения, а также содержащихся в них включений и изотопного состава углерода алмаза.

**Объем работы.** Диссертация общим объемом 254 страниц состоит из введения, пяти глав, заключения, 84 рисунков и фотографий, 11 таблиц, сопровождается списком литературы из 337 наименований.

**Благодарности.** На формирование научных подходов к исследованиям минералогии и геологии алмазов большое влияние оказали в свое время консультации и плодотворное сотрудничество с канд. физ.-мат. наук. Е.В.Соболевым, светлая память о котором сохранилась и поныне. С уважением и благодарностью автор вспоминает д. г.-м.н. А.Д.Харькива и д. г.-м.н. Б.И.Прокопчука, оказывавших постоянную поддержку в работе на протяжении многих лет. Выражаю признательность О.Е. Ковальчуку, М.С.Медведевой, кандидатам г.-м. н. Ю.К. Голубеву, Г.А.Гуркиной, О.Д.Захарченко, Е.Д.Надеждиной, С.Г.Кряжеву, О.В.Кононову, В.И.Коптилю, В.М. Лапушкову, М.Г.Копыловой, кандидату физ.-мат. наук Ю.А.Клюеву, кандидату хим. наук Б.Н.Тарасевичу, докторам г.-м.н. В.И.Ваганову, А.В.Уханову, С.К.Симакову, Н.Н.Зинчуку, В.К.Гаранину, Г.П.Кудрявцевой, Д.Г.Кошугу, доктору хим. наук А.А.Ширяеву за консультации, предоставление кристаллов алмаза, данных по их свойствам и совместное обсуждение полученных результатов, а также Р.В.Базилевской, кандидатам г.-м.н. А.В.Герасимчуку, В.А.Печникову и доктору г.-м.н. В.П.Афанасьеву за предоставление коллекций и отдельных образцов алмаза.

Особую благодарность автор выражает д. г.-м. н. Ф.В.Каминскому за многолетнее плодотворное сотрудничество, предоставление коллекций алмаза и данных комплексного изучения этих кристаллов из зарубежных территорий, обсуждения проблем их геологии, инициативу публикаций в иностранных изданиях, а также д. г.-м. н. А.Н.Барышеву за консультации по вопросам геодинамики алмазоносных систем и за конструктивные советы по написанию диссертации.

**Глава 1** диссертации «**Состав примесей и изотопов углерода в алмазе в генетическом аспекте: обзор проблемы**» является вводной, посвящена изученности проблемы состава примесей и изотопов в кристаллах в генетическом аспекте. В главе проанализированы литературные данные о минеральных, полифазных, газовых включениях в кристаллах алмаза, структурных примесях и других дефектах кристаллической решетки, методах их изучения, а также изотопном составе углерода и иных элементов в алмазе.

Исследованию состава твердых включений в алмазе, которые являются фрагментами среды его кристаллизации, посвящено большое количество публикаций (Meyer, Boyd, 1968, 1969; Соболев Н.В., 1974; Chrenko, McDonald, Darrow, 1967; Navon *et. al.*, 1988; Гаранин и др., 1991; Буланова и др., 1993; Kaminsky *et. al.*, 2001; Stachel, 2001; Zedgenizov *et. al.*, 2004; Скузоватов и др., 2011, 2012; и другие). Согласно литературным данным, состав твердых включений в алмазе отражает термодинамические условия формирования и тип пород алмазоносного субстрата, а также зависит от внутреннего строения кристалла, обусловленного разным меха-

низмом его роста. Кристаллы алмаза с послойным внутренним строением из кимберлитов и лампроитов содержат включения минералов (редко полиминеральные образования), которые относятся к ультрабазитам, базитам и породам промежуточного ультрабазит-базитового состава. Их считают глубинным субстратом, в котором кристаллизуются алмазы. В кристаллах с волокнистым внутренним строением включения иные - преобладают водонасыщенные микровключения сложного хлоридно-силикатно-карбонатного составов.

Помимо твердофазных включений в алмазах присутствует ряд примесей, которые при нормальных условиях представляют собой газы: диоксид и оксид углерода, углеводороды, азот, водород,  $H_2O$  и в резко подчиненном количестве инертные газы (Melton, Salotti, Giardini, 1972; Melton, Giardini, 1974, 1975, 1981; Бартошинский и др., 1987; Тальникова, 1991; Томиленко и др., 1997; Аргунов, 2000; Smith, Kopylova, Frezzotti, Afanasiev, 2014).

На первичный характер газовых включений в алмазах указывают их соотношения с минералом-хозяином, а также с сингенетичными включениями минералов ультраосновной и экологитовой ассоциаций (Тальникова, 1991).

Присутствие молекулярного азота, водорода, углеводородов в среде кристаллизации алмаза служит предпосылкой вхождения азота и водорода в кристаллическую решетку алмаза. Именно эти химические элементы и их соединения являются главными по распространенности и концентрации структурными примесями в алмазе. Общее содержание структурно связанного азота в природных алмазах может достигать 5000 at.ppm (Scarratt, Fritsh, 1992), водорода - на 1-2 порядка меньше (по оценкам Е.В.Соболева, 1989). В виде структурной примеси в алмазе из кимберлитов известен бор, но частота встречаемости и концентрация его незначительна - 2-3 at.ppm (Lightowers, Collins, 1976).

В кристаллической решетке алмаза азот изоморфно замещает углерод, благодаря близости ковалентных радиусов этих элементов. Водород, в отличие от азота, химически связан с углеродом алмазной решетки.

Азот входит в кристаллическую решетку природных кристаллов алмаза в различных формах, образуя при этом многочисленные азотные центры (Соболев, 1978). Три из них являются доминирующими по концентрации в кристаллах и распространенности в алмазах месторождений разного типа. В алмазах из кимберлитов и лампроитов преобладают азотные центры: А - два атома азота, замещающие атомы углерода (Соболев, Лисойван, 1972; Davies, 1976), и В - тетраэдры из атомов азота, сгруппированных вокруг вакансии в решетке (Bursill, Glaisher, 1986). В алмазах из апоосадочных метаморфических пород основной формой вхождения азота являются одиночные, замещающие углерод атомы - N-центры, которые обычно сочетаются с азотом в А - форме.

Наиболее информативным методом, позволяющим идентифицировать и количественно оценивать содержания азотных N-, А-, В-центров и структурной примеси водорода в алмазе, является ИК-спектроскопия.

Общее содержание азота в алмазной решетке в определенной степени отражает химизм среды, а распределение азотных центров в кристаллах - температурный режим образования алмаза в глубинах Земли. За последнее десятилетие накоплен большой фактический материал по распределению примеси азота в алмазах с включениями ультраосновной и эцлогитовой ассоциаций, обобщенный в работах (Stachel, Harris, 1997; Shirey *et. al.*, 2013), а также в алмазах с включениями «сверхглубинных минералов» (СГМ) - феррипериклаза, минералов перовскитовой группы, мейджоритового граната, свободного железа, никеля и др. Эти данные показали, что наиболее глубокие алмазы, содержащие СГМ, как правило, относятся к «безазотному» типу IIa (Kaminsky, Khachatryan, 2001). По сравнению с ними, кристаллы, алмаза, сформировавшиеся на меньших глубинах, относительно обогащены азотом, но содержание в них этой примеси варьирует в зависимости от принадлежности алмаза к эцлогитовой или ультрабазитовой ассоциации, характеризующей состав алмазоносного субстрата. В алмазах ультраосновной ассоциации суммарная концентрация структурного азота обычно не превышает 400 at.ppm с модой 0-100 at.ppm, а в алмазах эцлогитовой ассоциации соответственно варьирует от 0 до 1200 at.ppm, с максимумами 0-100 и 500-700 at.ppm.

Согласно экспериментальным данным (Chrenko *et. al.*, 1977; Allen, Ewans, 1981; Клюев и др., 1982; Пальянов и др., 1997) и модельным представлениям (Ewans, Harris, 1986; Taylor *et. al.*, 1990; Taylor *et al.*, 1996), соотношения концентраций общего азота и его агрегированной формы в кристалле отражают температурный режим алмазообразования. Эти параметры могут использоваться в качестве сравнительного полуколичественного критерия температуры кристаллизации алмаза.

Изотопный состав углерода алмаза, варьирующий от значений  $\delta^{13}\text{C}$  -42 до +3‰ с преобладанием значений около -5,5 ‰ позволяет судить о природе источников вещества этого минерала. В ряде месторождений, например, в трубках Ягерсфонтейн (Южная Африка), Джерико (Канада), пластообразных телах кимберлитового состава района Гуаниамо (Венесуэла) кристаллы алмазы с аномально изотопно-легким составом углерода с  $\delta^{13}\text{C}$  от -42 до -11‰ представляют подавляющее большинство (Deines, Harris, Gurney, 1991; Kaminsky *et. al.*, 2000; De Stefano *et. al.*, 2009). Эти данные свидетельствуют о существенной роли корового органического вещества в образовании по крайней мере части алмазов из кимберлитов, на которое указывали В.В.Ковальский с соавторами (1972), В.С. и Н.В. Соболевы (1980), Ф.В.Каминский и Н.В.Соболев (1985), О.Г.Сорохтин с соавторами (1981, 1987, 2004), Л.А.Тэйлор и др. (2005). Вместе с тем природа изотопного состава углерода алмаза дискутируется. Одни исследователи связывают его преимущественно с мантийными источниками (Виноградов и др., 1965; Галимов, 1968, 1984), другие – с комбинированными мантийными и коровыми (Соболев, Соболев, 1980; Каминский, Н.Соболев, 1985; Kirkley *et. al.*, 1991; Schulze *et. al.*, 2004), третьи - преимущественно с коровыми, субдуцированными в мантию изотопно-легкими углеводородами и изотопно-тяжелыми карбонатами (О.Г.Сорохтин с соавторами 1981, 1987, 2004). О

привносе в глубинные области мантии корового материала свидетельствуют также данные по изотопному составу кислорода (Schulze *et. al.*, 2003; Тэйлор и др., 2005) и серы (Eldridge *et. al.*, 1991) минералов-узников в алмазе.

По сравнению с изотопным составом углерода, изотопный состав азота в алмазах отличается большей изменчивостью и варьирует в широких пределах:  $\delta^{15}\text{N}$  от -26 до +18‰. При этом его интерпретация проводится в сочетании с данными по изотопному составу углерода алмаза (Shirey *et. al.*, 2013).

Таким образом, в аспекте проблем, затрагиваемых в диссертации, наименее изучены вопросы, связанные с происхождением и генетической информативностью структурной примеси водорода в природных кристаллах алмаза, разработке которых посвящена глава 3.

## **Глава 2 «Распределение азотных центров в кристаллах алмаза из кимберлитов и лампроитов, типы алмазных популяций» обосновывает**

*Тезис 1. По распределению структурной примеси азота в алмазах, вынесенных из недр кимберлитами и лампроитами, в месторождениях мира выделено 6 типов популяций, различающихся условиями образования. Популяции образуют ряд, в котором увеличение температуры и соответствующей глубины алмазообразования сопровождается общей тенденцией уменьшения содержания и увеличения степени агрегации азота (от парной к четырехатомной конфигурации) в кристаллической решетке алмаза, а также появлением включений высокобарических минералов в наиболее высокотемпературной популяции.*

### **Фактический материал и методология исследования**

Обобщение аналитических данных по алмазам из разных месторождений мира проводилось на основе разработанной автором диссертации базы данных. Её структура включает 13 полей, характеризующих свойства алмаза. Эти свойства подразделяются на три большие группы: 1) геологическая позиция образца; 2) внешние легко диагностируемые признаки образца (размер, окраска, форма); 3) данные по содержанию структурных дефектов в алмазе. База данных содержит информацию о 5435 образцах алмаза из 96 трубок кимберлитов и лампроитов, а также из россыпей Восточно-Европейской, Сибирской, Африканской, Австралийской, Северо-Американской, Южно-Американской, Индостанской и Хино-Корейской платформ. Около 60% всех данных основаны на собственном аналитическом материале, полученном с помощью метода ИК-спектроскопии по алмазам Урала, Архангельской области, Якутии, Южной Америки и частично Канады, остальные - заимствованы из литературы, опубликованной за период с 1979 г. по настоящее время.

Систематизация кристаллов по распределению в них азота впервые была начата автором в 2001 г. на основе собственных исследований коллекций алмаза из 32-х месторождений Сибири, Архангельской области, Канады и Южной Америки. Сопоставление этих данных с обширным фактическим материалом, имеющимся в

зарубежной литературе, оказалось затруднительным из-за отсутствия единой методики оценки концентраций азотных центров. Для проверки соответствия данных, получаемых с применением методик, принятых в России (Соболев, 1978, 1988, 1989; Бокий и др., 1986) и за рубежом (Boyd, Kiflawi, & Woods, 1994, 1995; Mendelssohn, Milledge, 1995; Taylor, Canil, & Milledge, 1996), нами было проведено сопоставление результатов, рассчитанных разными способами на материале более 500 кристаллов из разных месторождений. На основе этого была проведена корректировка зависимостей, предложенных ранее в работах (Kaizer, Bond, 1958; Соболев, 1978, 1988, 1989; Бокий и др., 1986):

$$N_A = K_A \cdot \mu_{1282} \quad (1)$$

$$N_B = K_B \cdot \mu_{1175} \quad (2)$$

$$N_N = K_N \cdot \mu_{1132} \quad (3),$$

где  $N_A$ ,  $N_B$ ,  $N_N$  - концентрация азота в А-, В-, N-формах;  $\mu_{1282}$ ,  $\mu_{1175}$ ,  $\mu_{1132}$  - коэффициенты поглощения индивидуальных А-, В-, N-систем соответственно спектральных линий 1282, 1175, 1132  $\text{см}^{-1}$ ,  $K_A$ ,  $K_B$ ,  $K_N$  - коэффициенты пропорциональности.

После корректировки, обеспечивающей сопоставимость результатов, полученных с помощью разных методик (Хачатрян, 2003), значения коэффициентов пропорциональности составили:  $K_A = 16,5$  и  $K_N = 25 \text{ at.ppm}/\text{см}^{-1}$  (согласно данным Boyd, Kiflawi, & Woods, 1994), а  $K_B \approx 26,5 \text{ at.ppm}/\text{см}^{-1}$ .

В работе Е.В. Соболева и С.В. Ленской (1965) впервые было показано, что концентрации азота в кристаллах одного месторождения могут существенно (на 1-2 порядка) варьировать, но преобладают обычно индивиды с фиксированными содержаниями примеси, характерными для каждой трубки. В связи с этим для сравнения кристаллов из разных объектов предлагалось использовать параметры распределения алмазов статистически представительной выборки ( $\geq 30$  штук) по содержанию в них структурной примеси азота.

Для сопоставления кристаллов разных объектов по распределению в них азота нами использовалось одновременно два переменных параметра кристалла алмаза: общее содержание примеси-  $N_{\text{tot}}$  и степень ее агрегации -  $\%N_B$ . По этим параметрам выделялись группы кристаллов - популяции, доминирующие среди индивидов каждой трубки или россыпи. Под популяцией, согласно определению (Комлев, Словарь иностранных слов, 2006), имеется в виду «...совокупность предметов, элементов, индивидов, единиц, на которых строятся статистические выводы». Обычно в одной трубке присутствует одна (главная) или две (главная и второстепенная) популяции кристаллов. Доля кристаллов основных популяций в трубке, как правило, составляет не менее 50-75%. В россыпях наличие более двух популяций кристаллов может быть обусловлено множественностью их коренных источников.

Выделение популяций проводилось с помощью построения кривых распределения алмазов одной выборки по общему содержанию азота ( $N_{\text{tot}} = N_A + N_B$ ) и степени его агрегации ( $\%N_B$ ), а также диаграмм в координатах  $N_{\text{tot}}$  -  $\%N_B$ . Если распре-

деление каждого из параметров одномодальное, то к одной популяции относилась совокупность кристаллов, группирующаяся вокруг модальных значений  $N_{tot}$  и  $\%N_B$ , составляющая не менее половины от всей выборки. При двумодальном распределении кристаллов выборки по двум названным параметрам выделить две популяции с взаимно согласованными значениями содержания азота и степени его агрегации можно графическим способом по областям наибольшей плотности фигуративных точек с координатами  $N_{tot}$  -  $\%N_B$ . В результате выделялись главная и второстепенная популяция, причем доля последней в выборке обычно не ниже 25% от общего количества кристаллов.

### Популяции алмаза и их характеристика

Характеристика основных популяций алмаза приведена в таблице. Кристаллы из трубок и россыпей разделены по платформам – алмазоносным провинциям, районам или полям. При этом в пределах платформы популяции алмаза отличаются значительными вариациями значений  $N_{tot}$  и  $\%N_B$ , тогда как в пределах одного и того же алмазоносного поля или района соответствующие параметры популяций зачастую сходны между собой.

По общему содержанию азота и степени его агрегации в кристаллах популяции алмаза изученных трубок и россыпей могут быть разделены на шесть типов. Фактический материал для их выделения представлен в таблице. Для последующего анализа типов в качестве дополнительной характеристики приведены присущие кристаллам алмаза включения эклогитовой и ультраосновной минеральных ассоциаций, относительные количественные соотношения их в выделенных популяциях.

Тип I —  $N_{tot}$  30-250 ppm и  $N_B$  85-95 %. Включает главные популяции алмаза из трубки Аргайл (Австралия), трубок и россыпей района Жуина (Южная Америка). В алмазах присутствует широкий спектр минералов больших глубин: мейджоритовый гранат, гранат гроссуляр-пироп-альмандинового состава, тетрагональная альмандин-пироповая фаза, магнезиальный и кальциевый силикаты со структурой перовскита, феррипериклаз и другие. По данным работы (Nauman, Kopylova, Kaminsky, 2003; Агаццо *et.al.*, 2012) кристаллы популяций типа I, сформировавшиеся преимущественно за счет послыонного механизма роста, нередко обладают блоковым (брекчиевидным) внутренним строением.

Тип II —  $N_{tot}$  25-290 ppm и  $N_B$  61-81 %. Популяции этого типа встречены в трубках Архангельской области, Якутии, Канады, Южной Америки и Китая, но наиболее они распространены в трубках Южной Африки, причем в тех из них, где включения в алмазах представлены преимущественно минералами эклогитовой ассоциации (трубки Орапа, Джваненг, Премьер, Ягерсфонтейн). Большинство алмазов популяций типа II имеют послыонно-октаэдрическое внутреннее строение.

Тип III —  $N_{tot}$  40-280 ppm и  $N_B$  26-51 %. Распространен в месторождениях разных платформ, но в особенности характерен для трубок Далдыно-Алакитского

Таблица. Характеристика и тип популяций алмаза в трубках и россыпях

Район, поле	Объект (Т – трубка, Р - россыпь)	n	N <sub>tot</sub> , ppm	% N <sub>B</sub>	Ассо- циация	Тип	
1	2	3	4	5	6	7	
<i>Восточно-Европейская платформа</i>							
Средний Урал	1. Р. Койво-Вижайского района	44	958±99	26±10		IV	
			474±61	52±18		VI	
Северный Урал	2. Р. Вишерского района	32	826±143	33±10	Э+У <sup>(1)</sup>	IV	
Зимний Берег, Золотичское поле	3. Т. Кольцовская	42	561+125	49±7		VI	
	4. Т. Снегурочка	36	547+123	50±8		VI	
	5. Т. им. Ломоносова	102	186±132	32±20		У <sup>(2)</sup>	III
			892±159	19±11		Э	(IV)
	6. Т. им. Карпинского-1	77	599±120	38±21		У>Э <sup>(2)</sup>	IV
			1365±145	23±8			(V)
	7. Т. Архангельская	39	1402±162	22±12		Э <sup>(2)</sup>	V
8. Т. Поморская	159	1396±170	25±11	Э <sup>(2)</sup>	V		
9. Т. Первомайская	62	539±140	50±6		VI		
Зимний Берег, Верхотинское поле	10. Т. Волчья	57	859±168	26±19		IV	
			70±47	43±31		(III)	
Зимний Берег, Кепинское поле	11. Т. им. Гриба	78	233±133	32±16	У <sup>(3)</sup>	III	
			12. Т. Юраская	30		857±142	30±12
Зимний Берег, Кепинское поле	13. Т. Степная	49	33±8	78±37		(II)	
			14. Т. Ермаковская-7	31		907±281	30±18
<i>Сибирская платформа</i>							
Нижнеленский	15. Р. Булкур	30	1472±91	29±6	Э <sup>(4)</sup>	V	
			543±183	50±9		(VI)	
	16. Р. Усат-Хая	30	404±211	50±14	Э <sup>(4)</sup>	VI	
1315±214			28±6	(V)			
Приленский	17. Р. Ольховый	33	462±163	48±13	Э <sup>(4)</sup>	VI	
	18. Р. Конгломератовый	32	254±141	23±11	У <sup>(4)</sup>	III	
			19. Р. Верх. Молодо	31		156±109	39±22
Анабарский	20. Р. Холломолоох	17	573±93	47±15		(VI)	
			21. Р. Верх.Биллях	19		1600±164	25±4
	22. Р. Верх. Маят	57	503±101	48±12	У <sup>(4)</sup>	VI	
			23. Р.Средн. Маят	81		959±139	27±4
	24. Р. Хас-Сара	32	430±120	51±15		VI	
			1446±278	30±11		(V)	
			456±157	33±14		IV	
			1547±201	29±18		(V)	

1	2	3	4	5	6	7
	25 Р. Кычкын	36	417±199	37±20		IV
			1380±240	29±10		(V)
	26. Т. Малокуонапская	60	732±111	19±15		IV
Мало- Ботуобин- ский	27. Т. им. XXIII съезда КПСС	62	752±118	19±5	У+Э <sup>(4,5)</sup>	IV
	28. Т. Спутник	34	589±110	26±10	У+Э <sup>(4)</sup>	IV
Мало- Ботуобин- ский	29.Т. Интернацио- нальная	57	743±114	24±4	У <sup>(4)</sup>	IV
	30. Т. Мир	30	413±75	35±11	У+Э <sup>(4,5)</sup>	IV
	31. Р. Солур	30	402±108	26±15		IV
	32. Р. Ирелях	30	415±157	15±8		IV
	33. Р. Горный	30	432±146	24±12		IV
Далдыно- Алаkitский	34. Т. Зарница	36	203±123	31±19	У <sup>(4)</sup>	III
			587±81	32±15		(IV)
	35. Т. Удачная	39	172±93	42±17	У <sup>(4)</sup>	III
			688±131	28±14		(IV)
	36. Т. Айхал	35	133±44	38±10	У <sup>(4)</sup>	III
	37. Т. Молодость-I	30	185±95	48±20	У <sup>(4)</sup>	III
	38. Т. Сытыканская	32	184±104	38±18	У <sup>(4)</sup>	III
	39. Т. Дальняя	35	122±70	41±19		III
	40. Т. Прогнозная	40	223±80	50±21	У <sup>(4)</sup>	III
	41. Т. Краснопрес- ненская	43	259±147	41±13	У>Э <sup>(4)</sup>	III
	42. Т. Комсомольская	39	242±103	40±17	У>>Э <sup>(4)</sup>	III
	43. Т. Юбилейная	90	105±74	38±23	У <sup>(4)</sup>	III
486±187			25±20	(IV)		
Среднеоле- нецкий	44. Т. Ленинград	28	280±150	27±18	У <sup>(4)</sup>	III
Муно- Тюнгский	45. Р.Средн. Муна	30	221±96	41±34	У <sup>(4)</sup>	III
	46. Р. Тюнг	30	114±76	33±14	У <sup>(4)</sup>	III
			515±100	33±19	У <sup>(4)</sup>	(IV)
	47. Т. Заполярная	31	95±52	29±19	У <sup>(4)</sup>	III
48. Т. Поисковая	30	71±33	66±17	Э> У <sup>(4)</sup>	II	
<b>Африканская платформа</b>						
Ботсвана	49. Т. Орапа <sup>(6)</sup>	118	175±88	66±10	Э>> У <sup>(6)</sup>	II
			919±98	13±10		Э <sup>(6)</sup>
	50. Т. Джваненг <sup>(7)</sup>	40	284±168	71±21	Э <sup>(7)</sup>	II
850±200			24±12	(IV)		
Поле Вене- ция, ЮАР	51. Т. Венеция <sup>(8)</sup>	271	175±125	66±21	У>>Э <sup>(8)</sup>	II
			919±121	13±10		Э <sup>(8)</sup>
Поле Прето- рия, ЮАР	52. Т. Премьер <sup>(9,10)</sup>	131	105±101	47±22	Э.У <sup>(9,10)</sup>	III
			801±210	35±17		Э <sup>(9,10)</sup>



1	2	3	4	5	6	7
Поле Пост-масбург, ЮАР	53. Т. Финш <sup>(9,10)</sup>	89	59±27	34±12	У>>Э <sup>(9,10)</sup>	III
Поле Ягерсфонтейн, ЮАР	54. Т. Робертс Виктор <sup>(11)</sup>	99	66±36	36±13	У>Э <sup>(11)</sup>	III
	55. Т. Ягерсфонтейн <sup>(12)</sup>	65	123±107	68±24	Э>У <sup>(12)</sup>	II
			114±109	39±29	У <sup>(12)</sup>	(III)
56. Т. Кофффонтейн <sup>(12)</sup>	61	76±45	68±34	У>Э <sup>(12)</sup>	II	
Гана	57. Р. Биррим <sup>(13)</sup>	99	102±33	36±15	У <sup>(13)</sup>	III
Намибия	58. Р.Намибии <sup>(14)</sup>	56	865±173	23±10	Э>>У <sup>(14)</sup>	IV
			752±235	75±11		VI
Гвинея	59. Р.Канкан <sup>(15-17)</sup>	91	25±20	81±23	СГМ, Э≈У <sup>(15-17)</sup>	II
<b>Австралийская платформа</b>						
Северные Территории	60. Т. Эктор <sup>(32)</sup>	47	148±80	32±21		III
Новый Южный Уэльс	61. Р. Веллингтон <sup>(18,19)</sup>	112	687±214	60±29	У>Э <sup>(18,19)</sup>	VI
	62. Р. Бингара <sup>(18,19)</sup>	75	399±242	60±34	Э>У <sup>(18,19)</sup>	VI
	63. Р. Коуптон <sup>(18,19)</sup>	31	141±42	29±20	Э>У <sup>(18,19)</sup>	III
Западная Австралия	64. Т. Аргайл <sup>(20)</sup>	114	250±202	88±41	Э>>У <sup>(20)</sup>	I
<b>Северо-Американская платформа</b>						
Северо - Западные Территории	65. Т. ДО-27	186	661±122	39±20	Э>У <sup>(21)</sup>	IV
			280±153	51±14		(III)
	66. Т. Панда <sup>(22)</sup>	105	41±23	34±19	У>>Э <sup>(22)</sup>	III
67. Т. Пойнт Лейк <sup>(33)</sup>	68	363±215	85±39		(II)	
		194±109	61±29		II	
Онтарио	68. Вулканиды Вава <sup>(34)</sup>	37	811±99	11±3		(IV)
			102±30	51±40	Э>У <sup>(34)</sup>	III
Альберта	69. Т. К-252 <sup>(23)</sup>	113	419±30	24±30		(IV)
			122±95	79±55	Э>>У <sup>(23)</sup>	II
			1504±236	29±13		(V)
<b>Южно-Американская платформа</b>						
Коромандель, Бразилия	70. Р. Криминоза	32	504±119	57±9	У>>Э <sup>(24)</sup>	VI
	71. Р.Эспирито Санто	32	535±89	51±12	У>>Э <sup>(24)</sup>	VI
	72. Р.Грота до Пимпим	34	532±139	55±11	У>>Э <sup>(24)</sup>	VI
	73. Р. Имбе	32	504±131	63±11	У>>Э <sup>(24)</sup>	VI
Юж. Диамантина, Бразилия	74 Р. Жекититонья с притоками, Абаете <sup>(35)</sup>	65	436±149	24±14		IV
			72±36	35±19		(III)
Сев. Диамантина, Бразилия	75 Р. Каете - Мирим <sup>(35)</sup>	12	521±189	19±8		IV

1	2	3	4	5	6	7
Лоскокитос, Венесуэла	76. Р. Лоскокитос	52	778±143	67±12	Э>>У <sup>(25)</sup>	VI
Гуаниамо, Венесуэла	77. Силлы Гуаниамо	51	768±180	69±19	Э>>У <sup>(26)</sup>	VI
	78. Р. Сентелья	40	601±172	73±8	Э>>У <sup>(26)</sup>	VI
	79. Р. Чуауа	33	772±58	72±10	Э>>У <sup>(26)</sup>	VI
	80. Р. Кебрада Гранде	40	802±70	70±8	Э>>У <sup>(26)</sup>	VI
	81. Р. Ринхи-Ринхи	33	692±67	63±3	Э>>У <sup>(26)</sup>	VI
Жуина, Бразилия	82. Р. Цикора	34	51±25	92±19	СГМ <sup>(27)</sup>	I
	83. Р. Сорисо <sup>(28)</sup>	36	31±15	87±11	СГМ <sup>(28)</sup>	I
	84. Р. Сан Луис	31	93±21	92±12	СГМ <sup>(27)</sup>	I
	85. Р. Вермельо	33	111±29	90±21	СГМ <sup>(27)</sup>	I
	86. Т. Пандрэа-1	59	65±55	92±14	СГМ <sup>(29)</sup>	I
	87. Т. Пандрэа-2	106	61±45	91±12	СГМ <sup>(29)</sup>	I
Жуина, Бразилия	88. Т. Пандрэа-3	53	53±35	90±14	СГМ <sup>(29)</sup>	I
	89. Т. Пандрэа-6	85	56±38	89±13	СГМ <sup>(29)</sup>	I
	90. Т. Пандрэа-7	60	47±36	90±17	СГМ <sup>(29)</sup>	I
	91. Т. Колльер-4	60	78±35	67±19	СГМ <sup>(29)</sup>	II
	92. Т. Арипуана-1	60	69±44	85±12	СГМ <sup>(29)</sup>	I
<b>Индостанская платформа</b>						
Южная Индия	93. Т. группа Вайракарур	26	439±82	30±11		IV
			108±60	47±15		(III)
Восточная Индия	94. Т. группа Бехердих	16	669±197	36±8		IV
<b>Хино-Корейская платформа</b>						
Мьянма	95. Р. Момейк и Зейндо <sup>(30)</sup>	114	736±136	32±19	У>>Э <sup>(30)</sup>	IV
Фусянь	96. Тр. №50 <sup>(31)</sup>	61	383±129	70±14	У <sup>(31)</sup>	VI

**Обозначения:** n - количество образцов,  $N_{\text{tot}}$  - среднее значение общего содержания азота и его среднеквадратическое отклонение в кристаллах данной популяции; %  $N_{\text{v}}$  - среднее значение относительного содержания азота в В-форме и его среднеквадратическое отклонение; в графе «тип популяции» указаны основные и второстепенные (в скобках), СГМ - «сверхглубинные минералы», Э-и У-минералы эколгитовой-и ультраосновной ассоциаций соответственно. Данные заимствованы из публикаций: <sup>(1)</sup> - (Захарченко, Хачатрян, Гречишников, 2006), <sup>(2)</sup> - (Захарченко, Махин, Хачатрян, 2002), <sup>(3)</sup> - (Палажченко, 2008), <sup>(4)</sup> - (Зинчук, Коптиль, 2003), <sup>(5)</sup> - (Гаранин, Кудряцева, 1990), <sup>(6)</sup> - (Deines, Harris Gurney, 1993), <sup>(7)</sup> - (Cartigny, Harris, Javoy, 1998) <sup>(8)</sup> - (Viljoen, 2002), <sup>(9)</sup> - (Deines, Harris, Gurney, 1984), <sup>(10)</sup> - (Deines et al., 1989), <sup>(11)</sup> - (Deines, Harris, Gurney, 1987), <sup>(12)</sup> - (Deines, Harris, Gurney, 1991), <sup>(13)</sup> - (Stachel, Harris, 1997), <sup>(14)</sup> - (Cartigny et al., 2003), <sup>(15,16)</sup> - (Stachel et al., 2000, 2002), <sup>(17)</sup> - (Stachel, Brey, Harris, 2000), <sup>(18)</sup> - (Davies, 1998), <sup>(19)</sup> - (Davies, O'Reilly, Griffin, 1999), <sup>(20)</sup> - (Yakubovsky, Adriaenssens, 2002), <sup>(21)</sup> - (Stachel et al., 2003), <sup>(22)</sup> - (Cartigny et al., 2009), <sup>(23)</sup> - (Banas et al., 2005), <sup>(24)</sup> - (Kaminsky, Zakharchenko, Khachatryan, Shiryayev, 2001), <sup>(25)</sup> - (Kaminsky, Zakharchenko, Khachatryan, 2006), <sup>(26)</sup> - (Kaminsky et al., 2000) <sup>(27)</sup> - (Kaminsky et al., 2001) <sup>(28)</sup> - (Hayman, Kopylova, Kaminsky, 2003), <sup>(29)</sup> - (Kaminsky et al., 2009) <sup>(30)</sup> - (Win et al., 2001), <sup>(31)</sup> - (Cartigny et al., 1997), <sup>(32)</sup> - (Ли и др., 1997), <sup>(33)</sup> - (Taylor, Gurney, Milledge, 1995), <sup>(34)</sup> - (De Stefano, Lefebvre, Kopylova, 2006), <sup>(35)</sup> - (Chaves et al., 2001).

района Якутии. В месторождениях, где доминируют кристаллы этого типа, алмаз ассоциирует главным образом с включениями минералов ультрабазитов. Для кристаллов алмаза популяций типа III свойственно преимущественно послойно-октаэдрическое квазиоднородное или зональное внутреннее строение.

Тип IV —  $N_{\text{tot}}$  400-960 ppm и  $N_B$  10-40 %. Широко представлен в месторождениях Мало-Ботуобинского района Якутии и Урала. Алмазы из этих месторождений содержат включения как ультраосновной, так и эклогитовой ассоциаций. При этом нередко в алмазах одной трубки или россыпи включения ультраосновной и эклогитовой ассоциаций присутствуют в сопоставимых количествах (таблица). Наиболее часто кристаллы типа IV имеют послойно-октаэдрическое или секториально-зональное внутреннее строение.

Тип V —  $N_{\text{tot}}$  1300-1600 ppm и  $N_B$  20-30%. Из всех изученных коренных месторождений кристаллы алмаза этого типа доминируют только в нескольких трубках Золотицкого поля Архангельской области. Минеральные включения в высокоазотных алмазах типа V из этих трубок очень редки, но все они по данным (Захарченко, Махин, Хачатрян, 2002) относятся к эклогитовой ассоциации. Большинство кристаллов типа V имеет волокнистое внутреннее строение. В россыпях кристаллы типа V встречены на Севере Якутии, при этом все они содержат минеральные включения эклогитовой ассоциации (Зинчук, Коптиль, 2003).

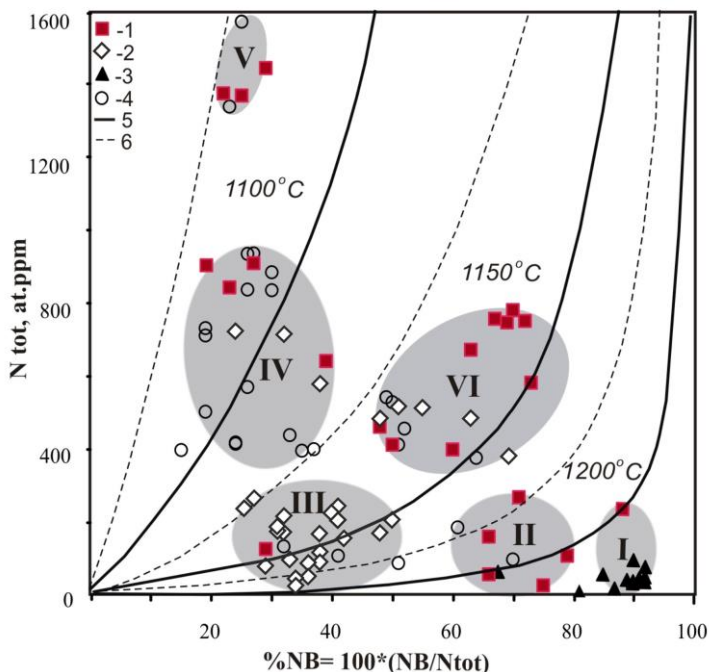
Тип VI —  $N_{\text{tot}}$  390-810 ppm и  $N_B \sim 48-75\%$ . Часто встречается в россыпях Южной Америки и Севера Якутии. Алмазы популяций этого типа сравнительно редки в кимберлитовых и лампроитовых трубках и встречены в некоторых трубках Золотицкого поля Архангельской области. Основные популяции алмаза типа VI отличаются по составу минеральных включений. Например, в россыпях района Коромандель (Бразилия) алмазы с включениями ультраосновной ассоциации преобладают над алмазами эклогитовой, а в россыпях районов Гуаниамо и Лос Кокитос в Венесуэле, напротив, доминируют кристаллы эклогитовой ассоциации.

### **Условия образования алмазных популяций разных типов и тенденция уменьшения содержания структурной примеси азота в кристаллах с глубиной**

Дифференциация популяций алмаза по распределению азота в кристаллах и другим типоморфным характеристикам свидетельствует о различных условиях алмазообразования в глубинных источниках.

В соответствии с разработанными моделями (Taylor, Jaques, Ridd, 1990; Evans, 1992; Taylor, Milledge, 1995), кристаллы алмаза популяций разных типов сформировались при различных температурах. Вариации условных температур формирования изученных алмазов популяций I - VI типов отражены на диаграмме (рисунок 1), из которой видно последовательное уменьшение температуры от типа I к типу V. При этом алмазы популяций I типа одновременно являются и самыми глубинными, так как содержат характерные включения «сверхглубинных» минера-

лов. Популяции VI типа среднеазотных алмазов сопоставимы по температуре формирования с популяциями III типа низкоазотных алмазов.



I-VI- типы популяций; области их распространения показаны серым цветом. Обозначения. Преимущественный состав минеральных включений в алмазах разных популяций (1-4): 1 – эклогитовый, 2 – ультрабазитовый, 3 – «сверхглубинные» минералы, 4 – нет данных, 5, 6 – изотермы для условного возраста алмаза 3 и 1 млрд. лет соответственно.

Рисунок 1 Относительные температуры формирования популяций алмаза из трубков и россыпей разных платформ по модели (Taylor, Milledge, 1995)

Алмазные популяции сформировались не только при разных температурах (на разных глубинах), но и в разных средах. Так, алмазы популяций типов II и V образовались преимущественно в эклогитовом субстрате, популяции III типа – соответственно в ультрабазитовом, а IV и VI типов – эклогитовом и ультрабазитовом (таблица, рисунок 1). Как видно из рисунка 1, алмазы с включениями эклогитовой ассоциации в целом более высокоазотные, чем соответственно ультраосновной. При этом в популяциях типов IV, VI и особенно V отчетливо видно, что в алмазах с включениями эклогитовой ассоциации общее содержание азота существенно больше, чем в алмазах с включениями ультрабазитовой ассоциации.

Распределение азота в кристаллах алмазных популяций обнаруживает тенденцию увеличения степени агрегации азота с падением общего его содержания (рисунок 1). Небольшие отклонения характерны лишь для алмазов популяций VI

типа, что может быть связано со спецификой их генезиса, например, очень длительным нахождением в глубинных источниках.

Выявленная тенденция (рисунок 1) обусловлена уменьшением общего содержания структурной примеси азота в кристаллах с ростом температуры алмазообразования. Уменьшение общего содержания азота в сторону увеличения температур кристаллизации алмаза вплоть до максимально высоких температур, при которых появляются включения высокобарических минералов, свидетельствует о том, что главная причина нарастания температур кристаллизации связана с естественным глубинным температурным градиентом. То есть изменение температуры косвенным образом указывает на изменение литостатического давления.

Одной из возможных причин уменьшения содержания азота в кристаллах может быть уменьшение изоморфной смесимости азот-углерод в кристаллах алмаза с глубиной.

### **Глава 3. «Водородные центры в кристаллах алмаза и их генетическая информативность» обосновывает**

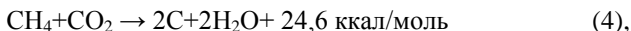
*Тезис 2. Водородные центры, входящие в структуру кристалла алмаза, формируются в процессе его роста с участием экзогенных органических соединений, погруженных в мантию вместе с вмещающими толщами. Структурные примеси азота и водорода в алмазе имеют общие источники, включающие азотсодержащие органические вещества.*

Генезис водородных центров и факторы, определяющие вхождение водорода в структуру кристалла алмаза мало изучены. До настоящего времени не выяснено, за счет каких химических соединений происходит формирование водородных центров, каковы временные соотношения этого процесса с алмазообразованием, а также какова природа источников вещества водорода и азота в кристаллах алмаза. Для решения этих вопросов автором было исследовано соотношение концентрации водородных центров:

1) с морфологией и механизмом роста кристаллов; 2) с зонами роста от центра к периферии; 3) с общим содержанием структурной примеси азота; 4) с включениями органического вещества и его концентрацией в алмазе; 5) с изотопным составом углерода в истории роста кристалла алмаза.

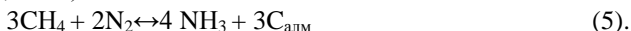
В кристаллической решетке алмаза, водород химически связан с атомами углерода, а его концентрация составляет в среднем  $\sim 100$  at.ppm (Соболев, 1989). Предполагаемые структурные модели водородных центров следующие:  $^H>C=C<^H$  (Соболев, Лисойван, 1971) или  $>C=C<^H_N$  (Woods, Collins, 1983). Вхождение водорода в кристаллическую решетку алмаза обусловлено его заимствованием из среды алмазообразования, состав которой отражают сингенетичные газово-жидкие включения в алмазе. Прямыми наблюдениями в алмазах кимберлитового типа установлены углекислотно-азотно-углеводородные (Томиленко и др., 1997) и углекислотно-азотные включения (Smith, Kopylova, Frezzotti, Afanasiev, 2014).

Наличие в кристаллах газовых включений, содержащих окисленную (CO<sub>2</sub>) и восстановленную (CH<sub>4</sub> и его гомологи) формы углерода, служит предпосылкой протекания окислительно-восстановительных реакций, приводящих к образованию алмаза типа:



Компоненты этой реакции H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub> являются самыми распространенными фазами, встречающимся во всех без исключения кристаллах алмаза (Melton, Salotti, Giardini, 1972; Melton, Giardini, 1974, 1975, 1981; Бартошинский и др., 1987; Тальникова, 1991; Аргунов, 2000).

Химически инертный азот может быть как самостоятельным компонентом углеродсодержащих флюидов, так и при избытке углеводородов в среде вступать в реакцию с метаном, как это предполагалось нами ранее (Блинова, Симаков, Гуркина, Фролова, 1988):



### **Соотношение водородных центров с морфологией и механизмом роста кристаллов алмаза**

Образование водородных центров происходит непосредственно в процессе роста алмаза. Это подтверждается вхождением водорода в структуру алмаза и закономерным распределением примеси в объеме кристалла в зависимости от формы и механизма его роста.

Природные кристаллы алмаза образовались за счет роста по тангенциальному (послойному) и нормальному механизмам (Бокий и др., 1986). Послойный рост происходит преимущественно в направлении, параллельном уже сформировавшейся грани (чаще всего грани октаэдра). Нормальный рост осуществляется в направлении перпендикулярном поверхности кристалла и приводит к образованию волокнистой (столбчатой структуры), в которой оси волокон совпадают с направлением роста.

Габитус кристалла алмаза отражает механизм заключительного этапа его роста, при этом октаэдрическая форма свидетельствует о тангенциальном, а кубическая о соответственно, о нормальном механизме роста. На основе исследования около двух тысяч кристаллов алмаза из разных кимберлитовых трубок и россыпей Сибирской и Восточно-Европейской платформ установлено, что минимальные концентрации водорода (обычно не более 2 усл. ед.) типичны для октаэдрических кристаллов с тригональной формой граней, а максимальные (6-8 усл. ед. и более) характерны для кубов, кубоидов и тетрагексаэдроидов (Хачатрян, 2009).

В связи с неоднородностью внутреннего строения природных алмазов - сочетанием в одном кристалле зон с послойным и волокнистым строением, автором изучено распределение водородных центров по зонам роста в объеме отдельных кристаллов. Исследование осуществлялось с помощью цветной катодоллюминесценции на ориентированных пластинах, вырезанных из целых кристаллов. Всего было изучено 94 алмаза из разных месторождений Якутии, Архангельской области, Присяняня и Северного Урала, среди кристаллов было 25 октаэдров, 48 додекаэдроидов, 21 куб и тетрагек-

саэдроид. Менее половины из них обладали однотипным послойно-октаэдрическим либо волокнистым зональным внутренним строением. Отдельные кристаллы имели секториальное строение с гранями, образованными одновременно в результате нормального и тангенциального (смешанного) механизмов роста. В другом случае неоднородность обусловлена последовательной сменой механизмов роста: смешанного на тангенциальный, нормального на тангенциальный, тангенциального на нормальный, а также неоднократной сменой нормального и тангенциального механизмов.

Несмотря на многообразие типов внутреннего строения природных кристаллов алмаза, распределение в них водородных центров носит закономерный характер. Самые низкие содержания водородных центров (обычно не более 2 усл. ед.) отмечаются в послойно-октаэдрических зонах кристаллов октаэдрического и ромбододекаэдрического габитуса. Несколько более высокими содержаниями водорода характеризуются пирамиды роста октаэдрических граней в кристаллах с центральной секториальной структурой. Зоны с волокнистым внутренним строением в октаэдрах, додекаэдроидях, тетрагексаэдроидях и кубах обладают повышенными концентрациями водорода (1,8-5,8 усл. ед.). Максимально высокая концентрация водородных центров, достигающая 9-16 усл. ед., типична для пирамид роста куба в центральной секториальной структуре.

Таким образом, механизм роста кристаллов является важным фактором, влияющим на вхождение водорода в структуру алмаза: при нормальном механизме роста способность кристалла захватывать примесь выше, чем, соответственно, при тангенциальном. Другим фактором, определяющим концентрацию водорода в структуре кристалла, служит содержание водорода (алмазообразующих углеводородов) в среде. Вариации относительного содержания углеводородов в глубинных источниках служат причиной различной концентрации водородных центров в кристаллах, сходных по габитусу и внутреннему строению, например, в алмазах из трубок Якутии и Архангельской области (Kaminsky, Khachanryan, 2004). Третьим фактором, влияющим на вхождение водорода в структуру алмаза, является температура. Прямое воздействие температуры на водородные центры и их частичное разрушение наблюдалось в пластически деформированных кристаллах в экспериментах при 1800 - 2000 °С и давлении 7 ГПа (Куприянов и др., 2006).

### **Уменьшение содержания водорода в зонах роста кристалла от его центра к периферии**

Содержание водородных центров в алмазе закономерно меняется от центра кристалла ( $N_0$ ) к его периферии ( $N_1$ ). Наиболее контрастное уменьшение концентраций водорода ( $N_0-N_1$ ) прослеживается в кристаллах октаэдрического и ромбододекаэдрического габитусов со сменой механизма роста нормального на тангенциальный и смешанного на тангенциальный. Тренд уменьшения содержания структурной примеси водорода  $N_0 > N_1$  прослеживается даже для кристаллов со сменой тангенциального механизма роста на нормальный (рисунок 2 а), а также для кристаллов с

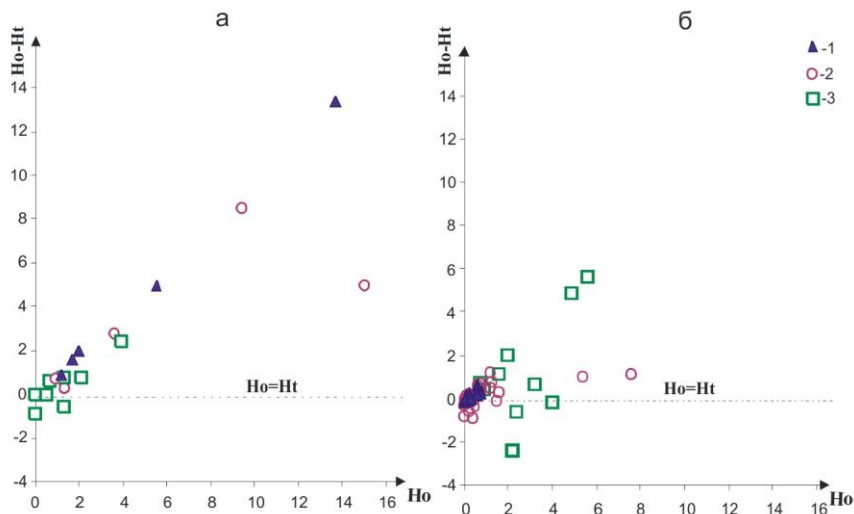


Рисунок 2. Распределение водородных центров в объеме кристаллов алмаза октаэдрического (1), ромбодекаэдрического (2) и кубического (3) габитуса со сменой механизма роста (а) и без (б)  $H_o$  и  $H_t$ -концентрации структурной примеси водорода в условных единицах

однородным или зональным послойно-октаэдрическим или волокнистым внутренним строением (рисунок 2 б). Однако, в объеме кристаллов с однотипным внутренним строением разброс концентраций водорода  $H_o$ - $H_t$  меньше, чем в кристаллах со сменой механизма роста. Таким образом, уменьшение концентраций водорода от центра к периферии кристалла характерно для кристаллов разного габитуса и типа внутреннего строения. Из этого следует, что максимальное вхождение водорода в структуру алмаза на начальном этапе роста кристалла, отражает эволюцию состава среды алмазообразования: постепенного обеднения ее водородом от момента зарождения кристалла до завершающего этапа роста. Принимая за основу реакцию (4), можно предположить, что водородные центры формируются за счет алмазообразующих предельных углеводородов, концентрация которых в среде на этапе зарождения кристалла алмаза максимальна и уменьшается со временем, в результате чего реакция затухает. Механизм возникновения водородных центров, представленных группировками  $\text{H} > \text{C} = \text{C} < \text{H}$  и  $> \text{C} = \text{C} < \text{H}$ , может быть связан с процессом окисления  $\text{CH}_4$  и его гомологов и взаимодействием образующихся при этом свободных радикалов  $-\text{CH}_2$  с углеродом алмаза.

### Примеси органического вещества в природных алмазах и его роль в образовании водородных центров

Органические вещества (ОВ), представленные главным образом предельными углеводородами, присутствуют в составе газовых включений в алмазе. Кроме того, в карбонадо и монокристаллах алмаза из кимберлитов обнаружены синегенетичные алмазу полиароматические углеводороды (ПАУ), являющимися продуктами



поликонденсации простейших ароматических углеводородов типа бензола. При этом для образцов карбонадо установлено, что и алмазное вещество, и ассоциирующая с ним органика имеют практически одинаковый изотопно-легкий состав углерода, и, следовательно, единые источники (Каминский и др. 1985).

В целом примеси ОВ в алмазах мало изучены, несмотря на то, что они играют ключевую роль в решении проблемы генезиса алмаза и входящих в его структуру водородных центров. Уже сам факт присутствия ОВ в алмазе в сочетании с изотопно-легким изотопным составом углерода алмаза свидетельствует об участии биогенных углеводородов в алмазообразовании по реакции типа (4). При этом обратная корреляция между содержаниями ОВ и структурной примеси водорода в кристаллах указывает на то, что алмазообразующие углеводороды одновременно служат источником водородных центров в алмазе.

Чувствительным методом, позволяющим фиксировать органическое вещество в алмазе, является ИК-спектроскопия. В ИК-спектрах природных окрашенных (черных, серых, бурых, серо-зеленых, буровато-желтых) алмазов из кимберлитов и метаморфических пород нередко проявляется характеристическая система полос поглощения около 2860, 2930 и 2960  $\text{см}^{-1}$ , которая согласно работе (Казицына, Куплетская, 1971) связана с колебаниями  $\text{CH}_3$ - и  $\text{CH}_2$  – групп алифатических структур (предельные углеводороды или их фрагменты).

*Алмазы из кимберлитов и связанных с ними россыпей.* Примеси ОВ зафиксированы автором в двух кристаллах ромбодекаэдрического габитуса, имеющих прозрачное бесцветное ядро и темно-серую полупрозрачную внешнюю зону. Один кристалл - из кимберлитовой трубки Юбилейная (Якутия) из коллекции В.К.Гаранина, а второй из россыпей района Жуина (Бразилия) из коллекции В.П.Афанасьева. Органическое вещество в каждом из кристаллов приурочено, главным образом, к темноокрашенным внешним зонам, тогда как в центральных зонах содержание ОВ мало.

Оба кристалла алмаза характеризуются повышенным относительным содержанием легкого изотопа углерода. Значения  $\delta^{13}\text{C}$  составляют: -9,6‰ – для алмаза из трубки Юбилейная и -22,0‰ – для алмаза из россыпей района Жуина.

В алмазе из трубки Юбилейная ОВ распределено крайне неравномерно и представлено тонкими буроватыми или коричневыми пленками на поверхности осколков раздробленного кристалла. По характеру ИК-спектра (рисунок3) ОВ сходно с солями карбоновых кислот (пропионовой, масляной). ОВ в большинстве случаев ассоциирует с карбонатом, который по набору и соотношению интенсивностей спектральных линий  $\sim (3685+3644) \text{ см}^{-1}$ ,  $\sim (1560+1440) \text{ см}^{-1}$  и 1075, 1015, 960  $\text{см}^{-1}$  идентифицирован как брунъятеллит с формулой  $\text{Mg}_6\text{Fe}(\text{CO}_3)(\text{OH})_{13}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ . Концентрация водородных центров в алмазе находится в обратной линейной зависимости ( $R^2 = 0,56$ ) от относительного содержания фазовых примесей ОВ. В алмазе из россыпей района Жуина, по данным ИК-спектроскопии, тоже имеется примесь ОВ, но карбонат не обнаружен. В этом кристалле так же, как и в алмазе из трубки Юбилейная, прослеживается тенденция взаимосвязанного распределения ОВ и водородных цен-

тров с максимальным содержанием водородных центров в центральной прозрачной области кристалла. Данная тенденция может быть результатом того, что в обоих кристаллах водородные центры вместе с алмазом образовались за счет ОВ и карбоната при реакциях типа (4).

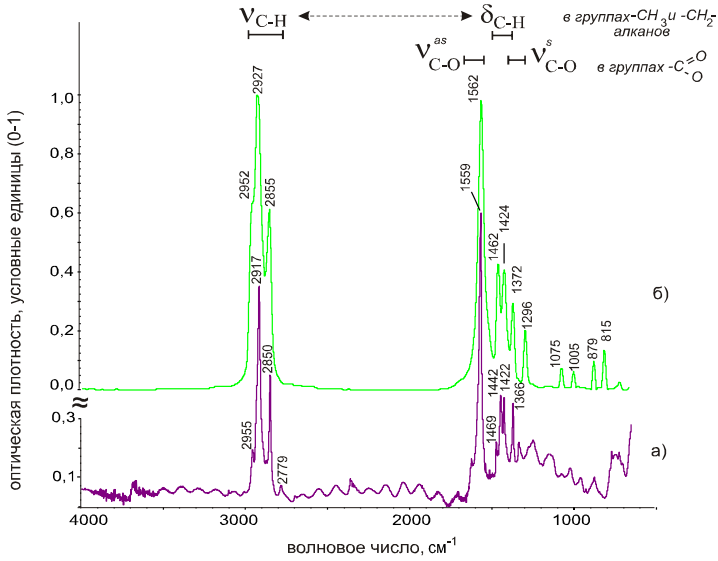


Рисунок 3. ИК-спектры ОВ, содержащегося в алмазе из трубки Юбилейная (а) и Na-соли пропионовой кислоты (б)

Общей чертой генезиса изученных кристаллов является смена Р-Т параметров в процессе роста: на раннем этапе кристаллизация проходила в области термодинамической стабильности алмаза, а на завершающем - соответственно равновесия графит – алмаз. На раннем этапе углеводородный компонент реакции (4) полностью расходовался с образованием алмаза и водородных центров. На заключительном этапе роста произошло снижение давления или давления и температуры кристаллизации алмаза, что привело к образованию графит-алмазного агрегата с реликтами органического вещества.

*Алмазы из метаморфических пород.* Примесь ОВ в микроалмазах из метаморфических пород идентифицирована автором с помощью ИК-спектроскопии по группе характеристических линий около 3380, 3270, 2965, 2920, 2850–2840, 1430, 1360, 1320 см<sup>-1</sup>. Помимо ОВ в этих кристаллах ранее были выявлены фазовые примеси воды и карбонатов (Ситникова, Шацкий, 2009), что свидетельствует о сходном химизме образования алмазов из метаморфических пород и кимберлитов и по реакции типа (4).

Важная роль ОВ как источника вещества алмаза и содержащихся в его структуре азота и водорода подтверждается закономерным распределением этих приме-

сей в трех группах кристаллов из метаморфических пород Кумды-Коля (Хачатрян, 2013). В структуру кристаллов первой группы с повышенным содержанием ОВ входит лишь одиночный азот (N-центры). В кристаллах второй группы с более низким содержанием ОВ водородные центры не обнаружены, а одиночный азот доминирует над азотом в А-форме. И, наконец, в кристаллах третьей группы без признаков ОВ главными структурными примесями являются водород и азот в А-форме, тогда как одиночный азот присутствует в подчиненном количестве. Согласно данным работы (Taylor, Canil, Milledge, 1996), температура формирования кристаллов вышеупомянутых групп последовательно увеличивается от первой к третьей. При минимальных температурах в среде вместе с алмазом, по-видимому, присутствуют не прореагировавшие ОВ, которые захватываются микрокристаллами алмаза в процессе их роста. По мере увеличения температуры углеводородный компонент реакции полностью расходуется с образованием алмаза и содержащихся в нем структурных примесей водорода и азота. При этом водород входит в структуру кристаллов при максимальной температуре, соответствующей массовому образованию азотных пар - А-центров (Хачатрян, 2013). Совместное образование водородных и азотных А-центров в микроалмазах Кумды-Коля подтверждается прямой линейной корреляцией между концентрациями этих структурных примесей в кристаллах ( $R^2 = 0,73$ ).

#### **Взаимосвязь распределения водородных центров и изотопов углерода в объеме кристалла как свидетельство участия биогенных углеводородов в алмазообразовании**

Как показали исследования (Галимов и др., 1990; Shulze *et. al.*, 2003; Скузоватов и др., 2011, 2012), внутри одного и того же кристалла алмаз ранней генерации более богат легким изотопом углерода по сравнению с алмазом поздней генерации. Это согласуется с рассмотренной выше тенденцией снижения концентрации структурной примеси водорода в процессе роста кристалла (от его центра к периферии). Таким образом, можно полагать, что водородные центры образовались вместе с алмазом с участием биогенного ОВ, концентрация которого в начале роста была максимальной.

При решении вопроса об источниках углерода алмаза и содержащихся в нем водородных центров особый интерес представляют тонкие исследования распределения изотопов углерода в объеме отдельно взятого кристалла. В ряде случаев между содержанием водородных центров и изотопным составом углерода в кристаллах намечается корреляция. Согласно работе С.Ю.Скузоватова с соавторами (2012), из 9 алмазов в оболочке (IV разновидность по Ю.Л.Орлову), отобранных из трубки Сытыканская, 6 имеют легкий изотопный состав углерода ( $\delta^{13}\text{C}$  до  $-19,7\%$ ). В них легким изотопом богаты лишь октаэдрические ядра, а волокнистые оболочки имеют  $\delta^{13}\text{C}$  от  $-5,9\%$  до  $-7,2\%$ . Одновременно с этим октаэдрические ядра данных кристаллов содержат примерно на порядок больше водородных центров (2,7-18,5 усл. ед.) по сравнению с оболочками (0,4-1,6 усл.ед.).

## Соотношение концентраций структурных примесей водорода и азота в алмазе и их общие источники

Несмотря на разную кристаллохимическую сущность примесей водорода и азота, в природных кристаллах алмаза они почти всегда сосуществуют. В целом между концентрациями структурных примесей азота и водорода в кристаллах алмаза прослеживается положительная корреляция (Блинова, Симаков, Гуркина, Фролова, 1988; Хачатрян, 2009). В редких случаях эта корреляция носит линейный характер и свидетельствует об общности источников азота и водорода в алмазе (Хачатрян, 2013).

При рассмотрении вопроса об источниках азота в мантии (области термодинамической стабильности алмаза) высказывается предположение, что азот, так же, как и водород, находился в древние эпохи развития Земли в составе ювенильных флюидов. Однако геохимические данные по распределению азота в оболочках Земли, в породах и отдельных минералах мантии не вполне согласуются с этим предположением. С одной стороны, азот - типичный элемент атмосферы, гидросферы и биосферы (Иванов, 1994). С другой стороны, в составе древних глубинных минералов азот очень редок или присутствует в ничтожных количествах. В перидотитовых ксенолитах, оливине, клинопироксене из этих ксенолитов разных регионов мира содержание азота не превышает 0,1-0,8 ppm (Yokochi *et. al.*, 2009). Однако в кристаллах алмаза из кимберлитов и лампроитов концентрация структурной примеси азота достигает 3000-5000 ppm.

С учетом приведенных выше данных о происхождении водородных центров в алмазе, можно предположить, что источниками азота и водорода, входящих в кристаллическую решетку алмаза, были органические и аммонийные соединения. При этом редкость линейной корреляции между концентрациями азота и водорода в кристаллах можно объяснить тем, что не все органические соединения содержали азот.

### Основные источники вещества алмаза и их оптимальные пропорции

Выше были приведены доказательства участия биогенных углеводов в природном алмазообразовании по реакции типа (4). Роль окислителя в ней выполняет  $\text{CO}_2$ , что согласуется с распространенностью двуокиси углерода в составе газовой-жидких включений в алмазе. В последние десятилетия все большее число исследователей обосновывает концепцию, согласно которой одним из основных источников алмаза являются углеводороды и минералы группы карбонатов, присутствовавшие в толщах земной коры, погруженных в архее и раннем протерозое на уровне современного фундамента платформ (Sharp, 1974; Сорохтин и др., 2004). При этом углекислый газ образуется в результате термической диссоциации карбонатов (Сорохтин и др., 2004).

Изотопный состав углерода алмаза, образующегося по реакции (4), определяется изотопным составом компонентов реакции:

$$\delta C^{13}_{\text{алм}} = 0,5 \delta C^{13}_{\text{метан}} + 0,5 \delta C^{13}_{\text{карбонат}} \quad (6)$$

Если принять  $\delta C^{13}$  для  $CH_4$  равным  $-25\%$ , что соответствует изотопному составу метаморфических графитов, развитых по древней биомассе на Алданском щите (Кошевой, Ройзенман, 1989), а для  $CO_2$  за  $0\%$  (изотопный состав экзогенных карбонатов, (Schidlowski *et. al.*, 1975), то при указанных процентных соотношениях в смеси углеродсодержащих газов, значение  $\delta C^{13}$  составит около  $-12,5\%$ . Однако в реальности в связи с колониальным размещением биогенных ОБ - основного источника метана, реакция (4) протекает при его недостатке и в избытке двуокиси углерода. Не исключено, что пропорции смешения  $CO_2$  и  $CH_4$  в природном алмазообразовании были близки к соотношению объемов метана и двуокиси углерода, соответственно,  $30\%$  и  $70\%$ , при которых в экспериментах А.П.Руденко и И.И.Кулаковой скорость наращивания алмаза по реакции (4) была максимальной (Кулакова, 2006). Подобное соотношение метана и диоксида углерода приводит к образованию алмазов с  $\delta C^{13}$  порядка  $-7,5\%$ . Это значение соответствует интервалу значений  $\delta C^{13}$  от  $0$  до  $-10\%$ , характеризующему подавляющее большинство алмазов из кимберлитов (Галимов, Каминский, Ивановская, 1978).

#### **Глава 4. «Зональное распределение типов популяций алмаза в пространстве и факторы выбора оптимальной модели геодинамики формирования алмазных структур», в сумме с материалом предыдущих глав, обосновывает**

*Тезис 3. Для Сибирской платформы установлена двусторонняя с элементами концентричности латеральная зональность размещения главных популяций алмаза: наиболее высокотемпературные расположены в центре, а наименее – соответственно по периферии. Эта зональность характеризует увеличение глубины структурной зоны, в которой происходило образование алмазов, от периферии к центральным частям платформы и может служить одним из принципов её минерогенического районирования.*

Рассмотренные в предыдущих главах примесные центры в алмазе использовались для решения минералогических проблем генезиса алмаза. Однако общие статистические данные о распределении популяций алмаза, сформировавшихся при различных температурах, в сочетании с рядом геологических фактов могут дать информацию об особенностях глубинной структуры алмазоносной провинции. В сумме с дополнительными данными, включающими роль регионального метаморфизма, влияние тектонических напряжений на структуру кристаллов алмаза и механизм их роста, выявленная зональность может служить одним из важных доводов для выбора оптимальной общей геодинамической модели алмазоносной системы.

#### **Латеральная зональность размещения алмазных популяций в провинции**

Вопросы размещения алмазов и кимберлитов на платформах ранее были затронуты в разных аспектах. Для Сибирской платформы проводилось районирование, основанное на комплексном массовом изучении минералогии и типоморфных свойств

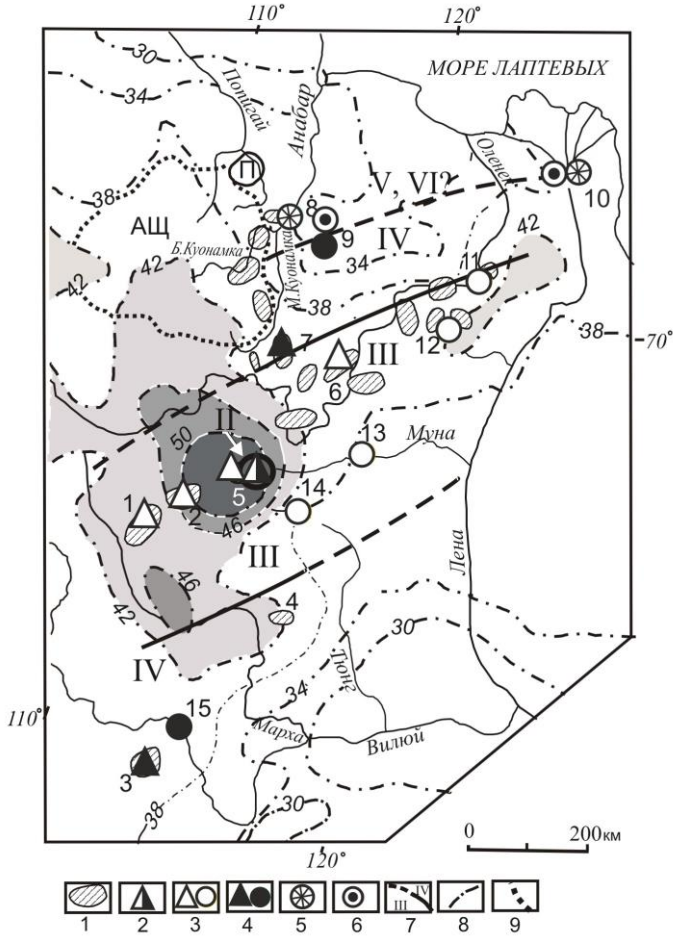
алмаза (Зинчук, Коптиль, 2003), а также путем анализа размещения на ее территории морфогенетических типов алмаза (Афанасьев, Лобанов, Похиленко и др., 2011).

Ф.В. Каминский (1972) наметил зональность в размещении алмазов разного габитуса, а также различных по составу кимберлитовых и родственных кимберлитам пород. Зональность размещения кимберлитов разного возраста и соотношение их позиции относительно тел щелочных пород на примере Африки рассмотрены Р.Митчеллом (1986).

Характеристикой латеральных и глубинных особенностей строения алмазонной провинции в общей ее геологической модели может служить зональное распределение типов популяций алмаза. Распределение типов популяций в плане алмазонной провинции Якутии показано на схеме (рисунок 4). В основу построения схемы зональности положено размещение главных популяций алмаза в трубках и россыпях различных полей и районов Якутии (см. таблицу). Границы зон популяций, по сравнению с работой (Хачатрян, 2010), уточнены в соответствии с работой (Барышев, Хачатрян, 2015). На северо-востоке и юго-западе провинции границы зон не замкнуты из-за отсутствия представительных данных по популяциям. Вместе с тем, следует еще раз обратить внимание на то, что зональность не односторонняя, а двусторонняя с элементами концентричности. Наиболее высокотемпературная для Сибири популяция II типа присутствует лишь в трубке палеозойского возраста Поисковая Муно-Тюнгского района. Эта территория совпадает с резким возрастанием (до 57 км) вертикальной мощности кристаллической земной коры (Ротман, Мананков, 2007). В поле распространения популяций III типа, окружающем популяции II типа, кимберлиты имеют разный возраст: большая часть - палеозойский, меньшая - мезозойский. Популяции типа IV расположены в двух зонах: к северо-западу и к юго-востоку от поля популяции III. В северо-западной зоне преобладают кимберлиты мезозойского, а в юго-восточной - палеозойского возрастов. Популяции V и VI типов установлены только в мезозойских россыпях Севера Якутии. Генезис алмаза из этих россыпей до настоящего времени остается дискуссионным, граница между популяциями IV и V (VI) намечена условно.

Наличие в единых зонах популяций алмаза, принадлежащих кимберлитам с разным возрастом извержений, свидетельствует о том, что тип алмаза не связан напрямую с возрастом кимберлитового вулканизма, а определяется температурными особенностями среды, в которой до этого рос алмаз.

В сочетании с материалами второй главы диссертации о том, что температура образования алмазных популяций обусловлена естественным глубинным градиентом, можно оценить объемную структуру зоны, в которой происходило образование алмазов под Сибирской платформой. Эта зона характеризуется увеличением глубины от периферии к центральным частям платформы и детализирует ранее установленную общую минерагеническую зональность платформ от кимберлитов в центре к карбонатитам и щелочным интрузивам по периферии. Зональное размещение



1 – контуры кимберлитовых полей (по данным Н.Н.Зинчука и В.И. Коптиля, 2003); 2-6 – типы популяций алмаза в трубках (треугольники) и в россыпях (кружки): 2 – II, 3 – III, 4 – IV, 5 – V, 6 – VI типы; 7 – условные границы зон с разными типами популяций алмаза; 8 – изопакиты кристаллической земной коры по работе (Ротман, Манаков, 2007); 9 – контур Анабарского щита (АЩ). П – Попигайская структура взрывных брекчий. Кимберлитовые поля: 1 – Алаakit-Мархинское, 2 – Далдынское, 3 – Мирнинское, 4 – Накынское, 5 – Мунское, 6 – Укуитское (Восточно-Укуитское), 7 – Куранахское. Поля россыпей: 8 – Нижнезбеляхское, 9 – Верхнезбеляхское, 10 – Нижнеленское, 11 – Кютюнгинское, 12 – Молодо-Далдынское, 13 – Среднемунское, 14 – Верхнетюнское, 15 – Ботубинско-Вилуйское. Оттенками серого цвета выделены области с повышенной мощностью земной коры.

Рисунок 4. Зональное размещение главных популяций алмаза и мощность кристаллической земной коры Якутии

популяций алмаза, которые характеризуются разными температурами и глубиной формирования в мантии, следует учитывать при минерагеническом районировании Сибирской платформы. Популяции в дальнейшем могут войти в характеристику типов алмазных месторождений, подобно тому, как в рудных месторождениях выделяются типы по соотношению цветных металлов или по глубине образования (например, золоторудные месторождения).

Алмазы одной трубки могут быть образованными в разных слоях мантии, далее совместно поступаая в кимберлиты при доставке их к земной поверхности. Дополнительную информацию о температурах (глубинности) и последовательности залегания алмазоносных эклогитизированных базитов и ультрабазитов в мантии можно получить с помощью выделения популяций алмаза среди групп кристаллов одной трубки, содержащих минеральные включения эклогитовой или ультраосновной ассоциаций. В этом аспекте большой фактический материал накоплен по алмазам африканских трубок Премьер, Орапа, Финш, Венеция, Ягерсфонтейн и Коффи-фонтейн (Deines, Harris, Gurney, 1984, 1991, 1993; Deines, Harris, Spear, Gurney, 1989; Viljoen, 2002). Как было показано в главе 2, в одной и той же трубке, например, в африканской трубке Премьер, наряду с алмазами, содержащими включения ультраосновной ассоциации (III тип популяций) могут присутствовать одновременно две популяции алмазов с включениями эклогитовой ассоциации, относящиеся к IV и III типам – Э2 и Э-1 соответственно. Алмазы, сформировавшихся в эклогитовом субстрате (Э2) размещаются выше по отношению к популяциям алмаза, сформировавшимся среди ультрабазитов. Это соответствует нормальному залеганию толщ океанической коры (базиты располагаются выше ультрабазитов). Иная картина характерна для алмазов из трубки Ягерсфонтейн, в которой алмазы с включениями эклогитовой ассоциации Э1, относящиеся к популяциям типа II, более высокотемпературны, чем кристаллы с включениями ультраосновной ассоциации (III тип популяций). Подобные соотношения могут соответствовать перевернутому залеганию толщ океанической коры.

Особенности морфологии, внутреннего строения и механизма роста кристаллов алмаза свидетельствуют о геодинамических условиях алмазообразования, что может служить дополнительной характеристикой формирования глубинной геолого-структурной зоны, в которой размещались популяции алмаза до их извлечения к земной поверхности. Эти особенности кристаллов в диссертации рассмотрены подробно, сопровождаясь фотографиями. Здесь же кратко остановимся на наиболее важных данных.

### **Минералогические признаки алмаза, свидетельствующие о его кристаллизации в твердой среде в процессе регионального метаморфизма**

Представления о кристаллизации алмаза в твердой среде при метаморфизме впервые были высказаны Г.Мейером и Ф.Бойдом (Meyer, Boyd, 1969). Вместе с тем Г.Мейер также допускал связь кристаллизации алмаза с событиями расплавления и



метасоматоза, в которых участвовали растворенные  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  (Meyer, 1985). Представления о твердой или чрезвычайно вязкой среде алмазообразования высказывали ранее А.П.Руденко и И.И.Кулакова (2004) и В.В. Бескрованов (1992). К выводу о кристаллизации алмаза в твердом субстрате пришел Б.А.Мальков, считая, что в литосферной мантии кристаллы алмаза растут подобно идиобластам других минералов в метаморфических породах. Более того, так как алмазы растут в твердой анизотропной среде, то внешняя симметрия кристаллов почти всегда ниже истинной кубической (Мальков, 1997).

Тренд изменения температуры в объеме кристалла алмаза. Распространенно му представлению о кристаллизации алмаза из расплава при снижении температуры противоречит то, что не все природные кристаллы алмаза демонстрируют понижение температуры алмазообразования от центра к периферии. Как было показано нами ранее (Kaminsky, Khachatryan, 2004), в разных кристаллах алмаза фиксируется две противоположных тенденции. Во многих кристаллах, имеющих послойную октаэдрическую зональность, температура, оцененная с помощью диаграммы Тэйлора-Милледж (Taylor, Milledge, 1995), практически не меняется на всем протяжении роста или же несколько уменьшается от центра к периферии кристалла. Однако в кристаллах кубического габитуса с волокнистым внутренним строением из трубок Удачная (Якутия), им. Карпинского и им. Ломоносова (Зимний Берег) температура формирования внешней зоны заметно выше по сравнению с центральной. Ранее мы объясняли этот эффект кинетическими факторами (Kaminsky, Khachatryan, 2004), но есть основание полагать, что формирование внешних областей кристалла происходило на стадии прогрессивного метаморфизма, в связи с погружением алмазоносных толщ при субдукции в более нагретые части мантии (Барышев, 2006; Барышев, Хачатрян, 2015).

Диссимметризация кристаллов косвенным образом свидетельствует о том, что кристаллизация происходила в твердой среде, в которой поле напряжений при наличии стресса характеризуется эллипсоидом. Такое поле создает диссимметрию кристаллов, выражающуюся неоднородностями их роста в разных направлениях, а также особенностями ориентировки кристаллов (Рамберг, 1970; Егоров-Тисменко, 2005). Тот факт, что природные октаэдрические кристаллы алмаза часто имеют уплощенную (по оси  $L_3$ ), удлинненную (по оси  $L_2$ ) и сложно искаженную форму, служит признаком того, что кристаллизация происходила не в изотропной среде, то есть не в газовой и не в растворе или расплаве. Диссимметризация внутреннего строения алмаза проявляется в том, что две пары граней октаэдра растут по тангенциальному механизму, а две по нормальному, что может быть обусловлено влиянием стрессового напряженного состояния среды кристаллизации (Барышев, Хачатрян, 2015).

Включения обломанных кристаллов алмаза и их осколков в «алмазе-хозяине» свидетельствуют о наличии шоковых ситуаций, прерывающих рост алмаза в твердой среде, что можно связывать с древними землетрясениями. Подобные включения распространены в кристаллах из россыпей Урала и трубок Архангельской области (Захар-

ченко, Хачатрян, Гречишников, 2006; Захарченко, Махин, Хачатрян, 2002; Хачатрян и др., 2008), а также встречаются в трубках Якутии (Гаранин, Кудрявцева, 2006).

Деформации во время роста алмаза с образованием трещин скалывания и отрыва. Микросдвиговые деформации, не затрагивающие внешнюю зону растущего кристалла, отмечались ранее А.В.Варшавским (1968), В.В.Бескровановым (2000), И.И.Кулаковой и А.П.Руденко (2004) для алмазов из кимберлитов. В диссертации подобное явление демонстрируется трещиной скалывания, зафиксированной нами во внутренней зоне послыно-октаэдрического кристалла алмаза, взятого из россыпи Северного Урала (Захарченко, Хачатрян, Гречишников, 2006). В начальную онтогеническую фазу кристалл рос как октаэдр с послыноной зональностью, но был нарушен прямолинейной трещиной скалывания, пересекающей зоны центральной части. После образования трещины кристалл рос по тангенциальному механизму с зональностью, параллельной трещине скалывания. Наличие сдвиговых деформаций в кристалле алмаза свидетельствует о его нахождении в твердой среде во время роста, так как в малоподвижной жидкости или расплаве тангенциальные напряжения и соответственно сдвиги отсутствуют.

Деформации, подобные трещинам отрыва, фиксируются в кристалле алмаза из района Гуаниамо (Венесуэла) по заливам алмаза второй генерации в волнистую трещину в кристалле первой генерации, имеющем послыно-октаэдрическое внутреннее строение (Schulze *et. al.*, 2003).

### **Факторы выбора геодинамической модели алмазообразования**

Рассмотренные выше свойства алмаза и их изменчивость в пространстве позволяют наметить ряд критериев, которым должна удовлетворять наиболее приемлемая, из множества существующих, общая геодинамическая модель алмазообразования:

— алмазы образуются с участием экзогенных соединений углерода, погруженных на большие глубины совместно с базитами и ультрабазитами.

— рост алмаза протекает в обстановке стресса как при прогрессивном, так и при регрессивном метаморфизме, обуславливающим разный тренд температур от ядер к периферии кристаллов, их диссимметризацию, синровые сколы и отрывы.

— алмазоносные эклогитизированные базиты и ультрабазиты по вертикали занимают двоякую позицию: базиты залегают выше ультрабазитов и наоборот;

— двусторонняя с элементами концентричности зональность алмазных популяций на платформе с максимально высокотемпературными и наиболее глубинными в центре.

Геодинамические модели алмазообразования, рассматривающие погружение экзогенных соединений углерода вместе с вмещающими их толщами в мантию можно разделить на две группы.

Модели первой группы, предложенные Р. Митчеллом (1986, 1991), Н.Л. Добрецовым и А.Г. Кирдяшкиным (1994), О.Г. Сорохтиным (1996, 2004), О.М. Розеном

с соавторами (2010), Н.Л. Добрецовым и И.Ю. Кулаковым (2012), С.Б. Шири с соавторами (2013), рассматривают погружение океанической литосферы в виде плиты. В ней под воздействием конвектирующей мантии в виде плюмов на разной глубине зарождаются кимберлитовые трубки, проникающие через литосферу вверх.

Модели второй группы, разработанные Рамбергом (1985), Л.Л. Перчуком (2004), М.А. Гончаровым (2005), А.Н. Барышевым (2006), рассматривают процесс погружения океанической литосферы в качестве краевого эффекта ячеистой конвекции.

Анализ соответствия рассматриваемых моделей критериям, перечисленным выше, позволяет выбрать конвективную модель в качестве оптимальной. Модель рассмотрена на примере территории Сибирской платформы (Барышев, Хачатрян, 2015). При этом используются некоторые дополнения к ее характеристике, позволяющие судить о возрасте алмазобразования. По заключению В.Е.Хаина (2001), кратонизация Сибирской платформы завершилась во второй половине раннего протерозоя, в основном к 1,9-1,8 млрд. лет. Окаймление фундамента платформы поясами метаморфизма именно этого возраста наиболее сходно в плане с картиной двусторонней горизонтальной зональности разно температурных популяций алмаза, проявленной в Якутии. Все вместе взятое позволяет с наибольшим основанием относить начало образования алмазов на Сибирской платформе к времени около 1,8-2,0 млрд. лет тому назад.

Таким образом, комплекс существующих критериев тестирования геодинамических моделей алмазоносных провинций может быть дополнен минералогическими критериями, разработанными в диссертации.

## **Глава 5. «Использование распределения структурных примесей в алмазах в качестве критерия при прогнозе и поисках коренных месторождений»**

обосновывает тезисы 4 и 5

*Тезис 4. Разработана оригинальная методика прогноза и поисков коренных месторождений алмаза, основанная на использовании комплекса его типоморфных признаков, включающего содержания в кристаллах структурной примеси водорода в совокупности с азотом в А-, В-формах и плейтлетс, а также тип алмазной популяции.*

*Предлагаемый комплекс признаков позволяет идентифицировать алмазы из россыпей и коренных источников, и сравнивать их между собой. Если алмазы в россыпях и известных месторождениях района отличаются, то это служит основанием для поиска нового еще не выявленного коренного алмазоносного объекта.*

*Тезис 5. Наличие в россыпях Арктической зоны Якутии популяций алмаза, сходных с популяциями алмаза из трубок кимберлит-лампроитового состава Зимнебережного района Архангельской области, позволяет прогнозировать аналогичные коренные источники алмазов в районах Якутии.*

В ряду типоморфных характеристик алмаза первостепенную роль играют те признаки, которые непосредственно отражают условия его кристаллизации и механизм роста. К ним, прежде всего, относятся концентрации структурных примесей азота и водорода в кристалле. Особенности распределения структурных дефектов в кристалле служат важнейшим идентификационным признаком алмаза, что находит применение в поисковой минералогии.

Исследования в этом направлении начались в середине 60-х годов XX века. Первоначально из всех известных структурных дефектов в алмазе в качестве основного типоморфного признака рассматривался лишь азот в А-форме. Е.В.Соболев и С.В.Ленская (1965) на примере трубки Мир показали, что для характеристики алмазов месторождения необходимо использовать представительные выборки кристаллов с последующей статистической обработкой аналитических данных. Эти исследования нашли дальнейшее развитие в работах Ю.А. Ключева с соавторами (1980), Ю.М. Биленко (1979, 1982, 1983) и Е.В. Соболева с соавторами (1989). На основе массовых исследований алмазов Якутии Ю.М.Биленко (1983) было установлено, что кристаллы из месторождений разных районов кимберлитовой провинции различаются по распределению в них азота в А-форме. При этом алмазы Мало-Ботуобинского района относительно обогащены А-центрами по сравнению с алмазами Далдыно-Алакитского района. Вместе с тем, в том же Далдыно-Алакитском районе алмазы некоторых трубок мало отличаются друг от друга по содержанию азота в А-форме. В связи с этим для более достоверной идентификации алмазов из различных объектов при решении прогнозно-поисковых задач предложено использовать наряду с азотом в А- и В-формах, концентрацию структурной примеси водорода в кристаллах (Блинова, Каминский, Соболев, Авт. св. СССР, 1984), одиночного азота – N-центров (Соболев, Аксенов, Блинова, Медведева, Авт. св. СССР, 1986,) и оптически активных центров, проявляющихся в спектрах фототока алмаза (Лапушков, Каминский, Красников, Блинова, Авт. св. СССР, 1986). Вопросам разработки прогнозно-поисковых (типоморфных) признаков алмаза также посвящены публикации автора и научные отчеты ЦНИГРИ за период с 1982 по 2010 г.г. Показано, что достоверность сравнительной характеристики алмазов повышается с учетом максимально большего числа типоморфных свойств кристаллов. При этом оптимальным является использование метода ИК-спектроскопии, позволяющего определять одновременно четыре типоморфные характеристики алмаза: концентрацию азота в А-, В-(или N-)формах, плейтлетс и водорода (Каминский, Бартошинский, Блинова и др., 1988). Кроме того, структурные примеси в алмазе, установленные с применением ИК-спектроскопии, могут служить для предварительной оценки технологических свойств и качества алмазного сырья (Анашкина, Хачатрян, 2015).

### **Структурная примесь водорода – типоморфный признак кристаллов алмаза**

Водородные центры являются важным типоморфным признаком алмаза, который может быть использован при решении поисково-прогнозных задач. Систематиче-

ские исследования распределения водородных центров в алмазах из кимберлитовых трубок и метаморфических пород проводились автором более тридцати лет. На первом этапе было изучено распределение водородных центров в алмазах из 15 трубок Мирнинского, Далдынского, Алаakit-Мархинского кимберлитовых полей Якутии и Золотицкого поля Архангельской области (Каминский, Бартошинский, Блинова, и др. 1988). Алмазы каждой из трубок были представлены выборками от 30 до 200 образцов. В результате нами был установлен типоморфизм алмазов по распределению водородных центров в кристаллах, что позволило использовать структурную примесь водорода в качестве критерия при прогнозировании и поисках месторождений алмаза.

Несмотря на то, что оптимальным для идентификации алмазов из различных источников является использование всего комплекса оптически активных центров, в ряде случаев при решении прогнозно-поисковых задач использование водородных центров наиболее информативно. Например, при сравнительной характеристике «безазотных» алмазов, составляющих от 25 до 55 % от общего количества кристаллов в трубках кластера Пандрэа района Жуина в Бразилии, водородные центры выявлены в более чем 80 % кристаллов каждой выборки (Kaminsky, Khachatryan, 2004; Kaminsky, Khachatryan, Andreazza, Araujo, Griffin, 2009). Алмазы из трубок Пандрэа-1, Пандрэа-6 и Пандрэа-7 по распределению водородных центров существенно отличаются друг от друга, причем в ряду трубок №№ 6-7-3-1 концентрация водорода в кристаллах нарастает.

Другой пример – распределение азота в А-форме и водорода в алмазах (выборки по 30-40 кристаллов) из якутских трубок Удачная, Зарница, Прогнозная Далдынского поля и Комсомольская, Краснопресненская, Сытыканская Алаakit-Мархинского поля. Модальные значения концентраций структурного азота в алмазах упомянутых трубок достаточно близки, а водородные максимумы контрастно варьируют от трубки к трубке. Так в Далдынском поле существенно различаются по водороду алмазы трубок Удачная и Зарница, а в Алаakit-Мархинском поле – в трубках Комсомольская и Краснопресненская.

### **Методические основы прогнозирования коренных месторождений алмаза по распределению структурных дефектов в кристаллах**

Как было отмечено выше, наиболее информативным методом оценки содержания основных структурных дефектов в алмазе является ИК-спектроскопия. При использовании этого метода не требуется пробоподготовка и разрушение кристалла. Одновременно с этим его достоинства являются экспрессность и возможность количественного определения концентраций одновременно четырех структурных дефектов в алмазе: азота в А- и В-формах, плейтлетс и водорода. Подобный набор дефектов типичен для алмазов из кимберлитов и лампроитов, тогда как в алмазах из метаморфических пород метод позволяет анализировать азотные N-, А- и водородные центры. При сравнении и идентификации алмазов из россыпей и трубок необходимо опираться как на более общие, так и на «частные» типоморфные признаки алмаза. К

первым относятся параметры распределения азота в кристаллах, отражающие температурный режим и особенности химизма среды кристаллизации алмаза в глубинных источниках. Эти условия кристаллизации алмаза нашли свое отражение в шести типах алмазных популяций. Распределение в кристаллах плейтлетс и водорода относится к «частным» или более детальным отличительным свойствам алмазов. Эти структурные дефекты в значительной мере связаны с механизмом и скоростью роста кристаллов алмаза (Блинова, 1987; Хачатрян, 2009).

Основным принципом прогнозирования коренных месторождений алмаза по данным о распределении структурных дефектов в кристаллах является сходство между типоморфными свойствами алмазов из россыпей и их коренных источников.

Ограничением предложенного метода является отсутствие россыпных проявлений алмаза на исследуемой территории.

Хотя находки алмазов в россыпях служат прямым поисковым признаком, они далеко не всегда свидетельствуют о наличии в районе поисков новой, еще не выявленной трубки. В районах, где имеются россыпи и трубки с алмазами, вывод может быть сделан на основе сопоставления соответствующих алмазов. Прогнозировать новый коренной источник можно, имея в россыпях популяции алмаза с аномальным для данного района распределением структурных дефектов в кристаллах.

На практике методика реализуется следующим образом: 1) формируется выборка алмазов, характеризующая исследуемый объект (россыпь или трубка); 2) в алмазах этой выборки определяются концентрации структурных дефектов; 3) проводится статистическая обработка результатов анализа; 4) параметры распределения алмазов по содержанию в них структурных дефектов сопоставляются с соответствующими данными по эталонным объектам; 5) на основе сходства или отличия типоморфных характеристик алмазов из россыпи и известных коренных или россыпных проявлений исследуемого района делается вывод о возможности наличия в этом районе новой еще не выявленной трубки.

Формирование корректной выборки алмазов весьма важно для сравнительного анализа свойств, присущих группам индивидов из россыпей и коренных проявлений, так как многие свойства кристаллов алмаза взаимосвязаны с содержанием структурных дефектов. При формировании выборки рекомендуется учитывать распространенность в исследуемом месторождении морфологических, цветовых разновидностей кристаллов, а также алмазов определенных классов крупности. Практика показала, что минимально допустимая выборка составляет 30 образцов, а оптимальная для получения воспроизводимых параметров распределения, 100 кристаллов. Для получения достоверных результатов и возможности их сопоставления с литературными данными необходимо использовать современные количественные методики определения концентраций структурных дефектов (Хачатрян, 2003).

Первоначальная статистическая обработка данных по структурным дефектам в алмазе позволяет выявить характер распределения алмазов исследуемого объекта по содержанию в них азота в разных формах, плейтлетс и водорода. Проводится опреде-

ление средних и модальных значений, среднеквадратического отклонения, дисперсии выборки, с построением гистограмм и кривых распределения. Эти кривые являются характеристическими для каждого месторождения и позволяют оценить однородность выборки (наличие одной или нескольких популяций кристаллов).

Если алмазы исследуемого объекта представлены преимущественно одной главной популяцией кристаллов, то информативными статистическими параметрами служат модальные и средние по выборке значения концентрации оптически активных центров, а также их среднеквадратические отклонения. При бимодальном и полимодальном распределении алмазов по содержанию в них структурных дефектов в выборке кристаллов необходимо выделить отдельные популяции с последующей оценкой отмеченных статистических параметров для каждой из популяций. Обычно в одной трубке присутствует одна (главная) или две (главная и второстепенная) популяции кристаллов. Доля кристаллов основных популяций в трубке, как правило, составляет 50-75%. Усредненные параметры распределения азота в кристаллах популяций алмаза позволяют определить тип алмазной популяции, который служит обобщенным типоморфным признаком алмаза.

### **Примеры использования комплекса структурных дефектов в кристаллах при решении прогнозно-поисковых задач**

Оценить реальные возможности использования комплекса оптически активных центров в кристаллах алмаза для целей прогноза и поисков коренных месторождений позволяют данные по типоморфизму алмаза, которые были получены автором совместно со специалистами ЯНИГП ЦНИГРИ для кристаллов из трубок и россыпей разных районов Якутии.

В Муно-Тюнгском районе выявлены алмазоносные россыпи и многочисленные кимберлитовые тела – трубки и дайки Верхнемунского кимберлитового поля. Повышенной алмазоносностью обладают трубки месторождения Верхнемунское: Заполярная, Новинка, Деймос и Комсомольская-магнитная, а также трубка Поисковая.

Как отмечалось (Зинчук, Коптиль, 2003), алмазы из трубок Верхнемунского поля, за исключением трубки Поисковая, близки между собой по кристалломорфологическим характеристикам. Это подтверждается данными по распределению азотных центров в кристаллах. Так, в трубке Поисковая доминируют алмазы, относящиеся к популяциям II типа, а в трубке Заполярная – III типа (таблица, рисунок 5). Алмазы из россыпей Средней Муны и Тюнга обнаруживают черты сходства с алмазами трубки Заполярная и существенно отличаются от кристаллов из трубки Поисковая (таблица). Алмазы россыпи среднего течения р. Муна представлены главным образом популяцией типа III, что сближает их с кристаллами трубки Заполярная, расположенной в верховьях р. Муна (таблица). Кристаллы алмаза из россыпи р. Тюнг представлены двумя популяциями: низкоазотной (тип III) и среднеазотной (тип IV). Последняя не встречена среди алмазов в изученных трубках Муно-Тюнгского района (таблица, рисунок 5). Детальное сравнение алмазов из трубки Заполярная и россыпей Средней

Муны и Тюнга по распределению в кристаллах азота в А- и В-формах, плейтлетс и водорода дополнительно подтверждают выявленные черты сходства и отличия алмазов из сопоставляемых объектов.

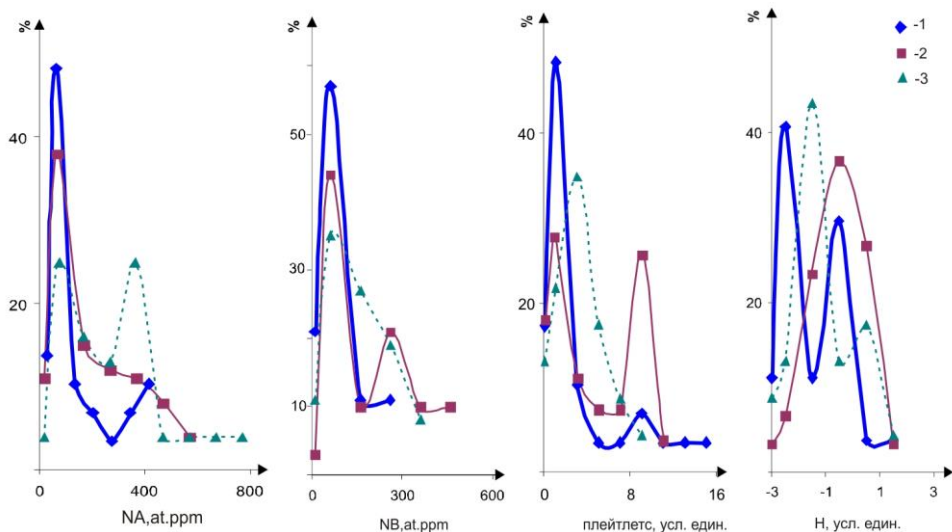


Рисунок 5. Распределение алмазов из трубки Затопляная (1), россыпей Средней Муны (2) и Тюнга (3) по содержанию в них азота в А-и В-формах (NA, NB), плейтлетс и водорода (H).

Таким образом, можно заключить, что трубка Затопляная и подобные ей кимберлитовые тела послужили основным источником алмазов россыпей реки Средняя Муна и одним из источников алмазов реки Тюнг. Другая часть алмазов россыпи р. Тюнг имеет собственный еще не выявленный локальный источник, представляющий собой трубку, содержащую кристаллы популяций IV типа.

В Мирнинском поле Мало-Ботуобинского района Якутии картина более сложная и демонстрирует ограничения метода. Так, в выборках алмаза из россыпей Ирелях, Горный и Солур с одной стороны и трубки Мир с другой преобладают популяции одного и того же типа – IV. При этом большое разнообразие алмазов из разных горизонтов трубки Мир, а также из трубки Спутник по распределению в них структурных дефектов (Блинова и др., 1985; Хачатрян, 2003) не позволяет однозначно судить об источниках алмаза изученных россыпей.

К классическим примерам районов, где коренные источники алмазов до сих пор не выявлены, относятся крупнейшие в мире россыпные районы северо-восточной части Сибирской платформы. Наиболее значительные по запасам и ресурсам россыпи, многие из которых вовлечены в промышленную переработку, сосредоточены в Анабарском районе (Зинчук, Коптиль, 2003; Граханов, 2000). На Севере Якутии алмазы содержатся как в современной аллювии, так и в осадках от карбона до квартала. Особый интерес представляют промышленно значимые россыпи в от-



ложениях карнийского яруса верхнего триаса, в которых алмазы близки по свойствам к алмазам из россыпей Анабарского и некоторых других районов Севера Якутии. Наиболее изучены алмазы верхнетриасовых россыпей в Нижнеленском районе, где предполагается наличие не выявленного коренного источника (Граханов, 2000; Зинчук, Коптиль, Махин, 2001).

В Нижнеленском районе объектами ИК-спектроскопического исследования послужили кристаллы алмаза участков Булкур, Усат-Хая и Ольховый, представленные популяциями VI и V типов в разных соотношениях (рисунок 6, таблица). Такие типы алмазов не встречаются ни в одной трубке Якутии (Мало-Ботуобинский, Далдыно-Алакитский, Муно-Тюнгский, Анабарский и Среднеоленинский районы), но имеют сходство с алмазами из трубок Зимнебережного района Архангельской области: Поморская и Архангельская (V тип) и Первомайская, Кольцовская, Снегурочка (VI тип). Наличие в россыпях Нижнеленского района и других районов Арктической зоны Якутии специфических популяций алмаза, сходных с популяциями алмаза из трубок кимберлит-лампроитового состава Зимнебережного района Архангельской области позволяет прогнозировать аналогичные коренные источники алмазов в районах Якутии.

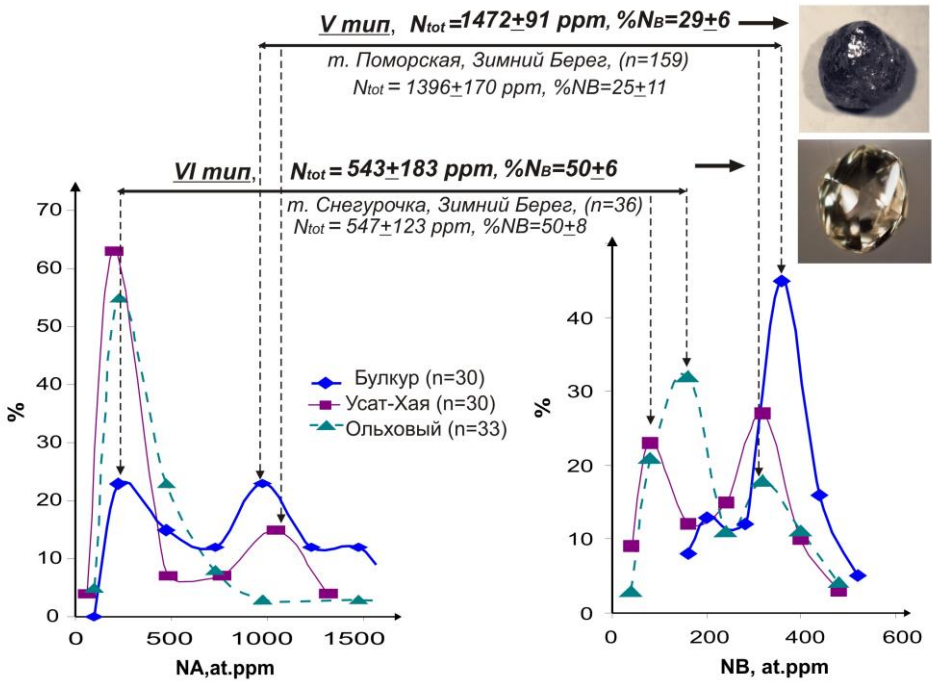


Рисунок 6. Распределение азота в А- и В-формах (NA, NB) в кристаллах и типы популяций алмаза из россыпей Булкур, Усат-Хая и Ольховый Нижнеленского района Якутии. (Для сравнения приведены данные по алмазам из трубок Поморская и Снегурочка Архангельской области)

Этот прогноз согласуется с данными работы Ю.К. Голубева, Н.А. Прусаковой и Л.И. Лукьяновой «Опыт выявления возможных коренных источников алмазных россыпей Арктической зоны Якутии» (Отечественная геология, в печати). Её авторы относят породы щелочно-ультраосновного состава, вскрытые при бурении в Арктической зоне Якутии, к кратерным частям тел кимберлит-лампроитового состава, которые могут рассматриваться как потенциальные источники алмаза вышеупомянутых россыпей.

В правобережье р. Анабар, в россыпях Нижнего Эбеляха распространены популяции V типа, Среднего Маята – V и VI типов, а в верховьях р. Биллях – VI типа (таблица). То есть популяции этих типов, аналогичны алмазам верхнетриасовых россыпей Нижнеленского района и в Анабарском районе являются «фоновыми». Вместе с тем, в россыпях Верхнего Маята обнаружены алмазы «аномальной» для данного района среднеазотной популяции типа IV (см таблицу). Такие же алмазы являются доминирующими в левобережье р. Анабар, в россыпях рек Кычкын и Хас Сарара (таблица).

Таким образом, можно предположить, что в правобережье Анабара в верховьях Маята, а также в левобережье Анабара в верховье реки Хас Сарара или в бассейне рек Хас Сарара и Кычкын имеются еще не выявленные трубки с алмазами популяций IV типа. Подобные алмазы распространены в трубке Малокуонапская Анабарского района и в ряде трубок Мало-Ботуобинского районов Якутии (таблица), которые могут рассматриваться в качестве аналогов прогнозируемых коренных источников россыпей в бассейне Анабара.

В ряде случаев при сравнительном анализе алмазов из россыпей и известных коренных источников исследуемого района оказывается, что кристаллы всех объектов принадлежат к популяциям одного и того же типа. В качестве примера можно привести алмазы из россыпей и трубок района Жуина (Бразилия) и россыпей и пластообразных тел кимберлитов района Гуаниамо (Венесуэла). В подобных ситуациях необходимы дополнительные сравнительные критерии: распределение кристаллов по содержанию в них азота в А- и В-формах, плейтлетс и водорода, а также другие генетически информативные свойства алмаза: изотопия углерода, состав минеральных включений и другие. Такие комплексные исследования южноамериканских алмазов были проведены автором под руководством Ф.В.Каминского (Kaminsky e.a., 2000, 2001<sub>1</sub>, 2009). Они позволили сделать вывод о том, что в изученных россыпях присутствуют алмазы, которые сформировались за счет локальных, еще не выявленных коренных источников.

### **Заключение**

Выделенные на материале 96 трубок и россыпей разных платформ мира 6 типов алмазных популяций позволили дифференцировать месторождения кимберлитов и лампроитов по распределению азота в алмазах, температурным условиям и составу среды их кристаллизации. Приведенный в диссертации фактический мате-

риал и полученные выводы служат основой для решения важной проблемы минерализации алмаза, а именно происхождения источника алмазообразования, его геологической структуры и позиции в фундаменте платформы. Это наименее разработанная часть проблемы общей схемы формирования месторождений по В.И.Смирнову (1982): источник – пути движения вещества – место локализации полезного ископаемого.

Комплекс минералогических фактов - соотношение азотных, водородных центров с изотопным составом углерода в алмазе, наличие остатков органических соединений внутри кристаллов и другие, обосновывает существенную роль первично экзогенных веществ в формировании кристаллов алмаза. Это составляет существенную часть проблемы источника.

В связи с докимберлитовой природой алмазов в диссертации уделено внимание особенностям структуры глубинной зоны их образования. Установлено, что структурная зона с двух сторон погружается от периферии платформы к центральной ее части. Фактическим материалом для такого вывода служит выявленная латеральная зональность разнотемпературных и разнотемпературных популяций алмаза на Сибирской платформе. Данная зональность детализирует ранее установленную общую минералогическую зональность платформ от кимберлитов в центре к карбонатам и щелочным интрузивам по периферии. Зональное размещение популяций алмаза, которые характеризуются разными температурами и глубиной формирования в мантии, следует учитывать при минералогическом районировании Сибирской платформы. Популяции в будущем могут войти в характеристику типов алмазных месторождений, подобно тому, как в рудных месторождениях выделяются типы по соотношению цветных металлов или по глубине образования (например, золоторудные месторождения).

На основе рассмотрения существующих геодинамических моделей алмазообразования показано, что установленная двусторонняя с элементами концентричности зональность размещения алмазных популяций согласуется с моделью развития алмазоносных толщ фундамента платформ в результате мантийной конвекции. На тектоническую активность структурной зоны при росте кристаллов указывает стресс, приведший к синхронным деформациям кристаллов.

Методические разработки диссертации представлены в двух аспектах.

Первый состоит в создании базы данных по распределению структурных примесей в алмазах (около 5,5 тысяч кристаллов) из трубок и россыпей разных платформ мира. Для того, чтобы обеспечить сопоставимость авторских и литературных данных, разработана унифицированная ИК-спектроскопическая методика оценки содержания структурных примесей азота в кристаллах алмаза.

Второй, наиболее практически важный аспект состоит в разработке методики прогноза и поисков коренных месторождений алмаза. Она базируется на использовании оригинального комплекса типоморфных признаков алмаза, включающих содержания в кристаллах структурной примеси водорода в совокупности с азотом в

А-, В-формах и плейтлетс, а также тип алмазной популяции. Все эти характеристики определяются с помощью метода ИК-спектроскопии, достоинствами которого являются экспрессность, отсутствие пробоподготовки и возможность количественных измерений. Предлагаемый комплекс типоморфных признаков алмаза позволяет идентифицировать алмазы из россыпей и коренных источников и сравнивать их между собой. Если алмазы в россыпях и известных месторождениях района отличаются, то это служит основанием для поиска нового еще не выявленного коренного алмазоносного объекта. При этом разработанная методика позволяет прогнозировать не только наличие, но и тип нового коренного источника алмаза: кимберлитовый, лампроитовый или иной. Так, в верхнетриасовых россыпях Нижнеленского района Якутии установлены популяции алмаза двух типов, не обнаруженные ни в одной из трубок на Сибирской платформе. С другой стороны, алмазные популяции указанных типов выявлены в трубках кимберлит-лампроитового типа Зимнебережного района Архангельской области. Это позволяет прогнозировать аналогичные коренные источники алмазов в районах Якутии.

### **Список опубликованных работ Г.К.Хачатрян (Г.К.Блиновой) по теме диссертации**

#### **Монографии**

1. Каминский Ф.В., Бартошинский З.В., **Блинова Г.К.**, Галимов Э.М., Гуркина Г.А., Красников В.И., Лапушков В.М., Соболев Е.В., Соболев Н.В. Методическое руководство по комплексному исследованию типоморфных свойств алмазов при локальном прогнозировании и поисках коренных месторождений. М.: ЦНИГРИ, 1988, 88 с.
2. Захарченко О.Д., Махин А.И., **Хачатрян Г.К.** Атлас типоморфных свойств алмазов Восточно-Европейской платформы (месторождение им. М.В. Ломоносова). М.: ЦНИГРИ, 2002, 104 с.
3. Захарченко О.Д., **Хачатрян Г.К.**, Гречишников Д.И. Алмазы Тимано-Уральского региона М.: ЦНИГРИ, 2006, 208 с.

#### **Авторские свидетельства**

4. **Блинова Г.К.**, Каминский Ф.В., Соболев Е.В. Способ поисков коренных месторождений алмазов. Авторское свидетельство СССР № 1254890 от 01.05.1984.
5. Лапушков В.М., Каминский Ф.В., Красников В.И., **Блинова Г.К.** Способ поисков месторождений алмазов. Авторское свидетельство СССР № 1264736 от 15.06.1986.
6. Соболев Е.В., Аксенов В.К., **Блинова Г.К.**, Медведева М.С. Способ поисков коренных месторождений алмазов. Авторское свидетельство СССР № 1419348 от 22.10.1986.

## Статьи в журналах по Перечню рецензируемых научных изданий и Scopus

7. Каминский Ф.В., **Блинова Г.К.**, Галимов Э.М., Г.А. Гуркина, Ю.А.Клюев, Л.А.Кодина, Коптиль В. И., Кривонос В.Ф., Фролова Л.Н., Хренов А.Я. Поликристаллические агрегаты алмаза с лонсдейлитом из россыпей Якутии // Минералогический журнал, 1985, т.7, №1, С. 27-36.

8. **Блинова Г.К.**, Гуркина Г.А., Фролова Л.Н. Исследование поликристаллических агрегатов алмаза с лонсдейлитом методами рентгенографии и ИК-спектроскопии // Минерал. Сборник Львовского ун-та, 1985, №39. вып. 2 С. 18-21.

9. **Блинова. Г.К.**, Боткунов А.И., Каминский Ф.В., Кошуг Д.Г., Фролова Л.Н. Особенности распределения азотных центров в алмазах из парных кимберлитовых трубок Якутии // Геология и геофизика, 1985, в. 26, №3, С. 111-114.

10. Ваганов В.И., **Блинова Г.К.**, Гуркина Г.А., Тарасов С.Л. Стекла взрывных кольцевых структур // Изв. АН СССР, серия геол., 1985, №8.С. 74-81.

11. **Блинова Г.К.** Структурные примеси как индикаторы механизма роста природных кристаллов алмаза // Доклады АН СССР, 1987, т.294, №4, С. 868-871.

12. **Блинова Г.К.**, Симаков С.К., Гуркина Г.А., Фролова Л.Н. Некоторые особенности химизма среды кристаллизации природных алмазов // Доклады АН СССР, 1988, т.300, №4, С. 950-952.

13. **Блинова Г.К.** Распределение структурных примесей в алмазах различного генезиса // Доклады АН СССР, 1989, т.304, №1, С. 184-186.

14. **Блинова Г.К.**, Вержак В.В., Захарченко О.Д., Соболев Е.В., Медведева М.С. Примесные центры в алмазах из двух трубок Архангельской алмазоносной провинции // Геология и геофизика, 1989, №8, С. 130-134.

15. **Блинова Г.К.**, Илупин И.П., Гуркина Г.А., Фролова Л.Н. Примесные центры в алмазах двух районов Сибирской кимберлитовой провинции // Геология и геофизика, 1991, №8, С. 95-98.

16. **Хачатрян Г.К.**, Зинчук Н.Н., Коптиль В.И., Гуркина Г.А., Харрасов М.К. Исследование оптически активных центров в алмазах из россыпей Урала в связи проблемой выявления их коренных источников // Геология и геофизика, 2004, т.45, №2, С. 244-252.

17. **Хачатрян Г.К.**, Веричев Е.М., Гаранин В.К., Гаранин К.В., Кудрявцева Г.П., Палажченко О.В. Распределение структурных дефектов в алмазах из трубки им. В.П.Гриба (Архангельская алмазоносная провинция) // Вестник МГУ, 2006, сер.4, №6, С. 29-37.

18. **Хачатрян Г.К.**, Палажченко О.В., Гаранин В.К., Иванников П.Ф., Веричев Е.М. Генезис «неравновесных» кристаллов алмаза из кимберлитовой трубки им. Карпинского-1 по данным катодной люминесценции и ИК-спектроскопии // Вестник МГУ, 2008, сер. 4, № 2, С. 38-45.

19. **Хачатрян Г.К.**, Копчиков М.Б., Гаранин В.К., Чукичев М.В., Веричев Е.М., Головин Н.Н. Новые данные о типоморфизме алмаза из россыпей Северного Тимана // Вестник МГУ, 2009, т. 64, №2, С. 102-110.

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.** Типизация алмазов из кимберлитов и лампроитов по распределению азотных центров в кристаллах // Руды и металлы, 2010, №2, С. 46-60.

22. Уханов А.В., **Хачатрян Г.К.** Алмаз из кимберлитовых трубок Поисковая, Заполярная, Ленинград (Северная Якутия): корреляция изотопного состава углерода и содержания азота как признак флюидного алмазообразования // Записки Российского минералогического общества, 2010, ч. 139, вып. 6, С. 70-81.

23. **Хачатрян Г.К.**, Щербаклова Т.Е., Колесникова Т.И. Методика исследования минералов-спутников алмаза с применением ИК-Фурье спектроскопии // Отечественная геология, 2011, №4, с.76-85.

24. **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.

25. Барышев А.Н., **Хачатрян Г.К.** Влияние тектонического поля напряжений на механизм роста, структуру кристаллов алмаза в связи с общей геодинамикой алмазообразования // Отечественная геология, 2015, №1, С. 41-53.

26. Анашкина Н.Е., **Хачатрян Г.К.** Применение метода ИК-Фурье спектроскопии для оценки технологических свойств и качества алмазного сырья // Руды и металлы, 2015, №3, С.70-76.

27. Kaminsky F.V., Zakharchenko O.D, Griffin W.L., Channer D.M. DeR., **Khachatryan-Blinova G.K.** Diamonds from Guaniamo area, Venezuela // Canadian Mineralogist, 2000, v.38, P. 1347-1370.

28. Kaminsky F.V., Zakharchenko O.D, Davies R., Griffin W.L., **Khachatryan-Blinova G.K.**, Shiryayev A.A. Super-deep diamonds from the Juina area, Mato Grosso State, Brazil // Contr. Mineral. Petrol.-2001, v. 140. P. 734-753.

29. Kaminsky F.V., **Khachatryan G.K.** Characteristics of nitrogen and other impurities in diamond, as revealed by infrared absorption data // Canadian Mineralogist, 2001, v. 39, P. 1733-1745.

30. Kaminsky F.V., Zakharchenko, **Khachatryan G.K.**, Shiryayev A.A. Diamonds from the Coromandel area, Minas Gerais // Revista Brasileira de Geo., 2001, v. 31, No4, p.p.583-596.

31. **Khachatryan G.K.**, Kaminsky F.V. "Equilibrium" and "non-equilibrium" diamonds crystals from deposits in the east European platform, as revealed by infrared absorption data // Canadian Mineralogist-2003, v. 41, P. 171-184.

32. Kaminsky F.V., **Khachatryan G.K.** The relationship between the distribution of nitrogen impurity centers in diamond crystals and their internal structure and mechanism of growth // *Lithos*, 2004, v. 77, No 1-4, P. 255-271.

33. Kaminsky F.V., Zakharchenko, **Khachatryan G.K.**, Diamond from the Los Coqitos area, Bolivar state, Venezuela // *Canadian Mineralogist*, 2006, v. 44, P. 323-340.

34. Kaminsky F.V., **Khachatryan G.K.**, Andreatza P, Araujo D., Griffin W.L. Super-deep diamonds from kimberlites in the Juina area, Mato Grosso State, Brazil // *Lithos*, 2009, v. 112S (2), P. 833-842.

35. Kopylova M., Navon O., Dubrovinsky L., **Khachatryan G.** Carbonatitic mineralogy of natural diamond-forming fluids // *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, v.291, ##1-4, P. 126-137.

36. Mainkar D., Gupta T., Patel S.C., Lehmann B., Diwan P., Kaminsky F.V., **Khachatryan G.K.** Diamonds from the Behradich kimberlite pipe , Bastar craton, India: a reconnaissance study // *The Journal of Geological Society of India. Special Issue*), 2012, P. 309-316.

37. Ravi S., Sufija M.V., Patel S.C., Sheikh J.M., Sridhar M., Kaminsky F.V., **Khachatryan G.K.**, Nayak S.S., Bhaskara Rao K.S. Diamond potential of the Eastern Dharwar craton, southern India and a reconnaissance study of physical and infrared characteristics of the diamonds // *The Journal of Geological Society of India. Special Issue*), 2012, P. 335-348.

#### Статьи в иных изданиях

38. **Блинова Г.К.** Распределение азотных центров в морфологических разновидностях алмаза по данным ИК-спектроскопии - В кн.: Физические методы исследования в прикладной и генетической минералогии, Киев, 1985, Препринт ИГФМ АН УССР под редакцией А.Н. Платонова, С. 36-39.

39. Лапушков В.М., Каминский Ф.В., **Блинова Г.К.**, Красников В.И. Возможности прогнозирования и поисков коренных месторождений алмазов // *Труды ЦНИГРИ*, 1987, вып. 218. С. 45-52.

40. **Хачатрян Г.К.** Усовершенствованная методика оценки концентраций азота в алмазе и ее практическое применение – В кн. Геологические аспекты минерально-сырьевой базы АК «АЛРОСА», Мирный, 2003, С. 319-321.

41. **Хачатрян Г.К.** Типоморфизм алмазов Якутии по данным ИК-спектроскопии там же, С. 322-326.

42. **Хачатрян Г.К.**, Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Структурные дефекты в алмазах северо-востока Сибирской платформы и их типоморфное значение - В кн. Геология алмазов - настоящее и будущее, Изд. Воронеж. Ун-та, 2005, С. 1607-1615.

43. Веричев Е.М., Вержак В.В., Посухова Т.В., Криулина Г.Ю., Палажченко О.В., Кудрявцева Г.П., Гаранин В.К., Гаранин К.В., **Хачатрян Г.К.** Минералогия алмаза из месторождений Архангельской алмазоносной провинции, там же С. 965-981.

44. Марфунин А.С., Кононов О.В., Тарасевич Б.Н., **Хачатрян Г.К.** Природа азотных дефектов и методы расчета концентрации азота в микрокристаллах алмаза // Известия секции наук о Земле РАЕН, 2006, вып. 14, С. 53-67

45. **Хачатрян Г.К.** Сравнительная характеристика алмазов из трубок Золотицкого и Верховитинского полей по данным ИК-спектроскопии - В сб. Прогнозирование и поиски коренных и россыпных алмазных месторождений. -Киев: Изд. УкрГГГРИ, 2006, С. 299-304.

46. **Хачатрян Г.К.**, Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Оценка качества алмазного сырья по распределению структурных примесей в кристаллах алмаза - В сб. Прогнозирование и поиски коренных и россыпных алмазных месторождений. -Киев: Изд. УкрГГГРИ, 2006, С. 294-298.

47. **Хачатрян Г.К.**, Зинчук Н.Н., Коптиль В.И., Ковальчук О.Е. Типизация коренных источников алмаза северо-востока Сибирской платформы по распределению структурных дефектов в кристаллах. - В сб. «Проблемы прогнозирования и поисков месторождений алмазов на закрытых территориях», Материалы конференции, посвященной 40-летию ЯНИГП ЦНИГРИ АК АЛРОСА, Якутск: Изд. ЯНЦ СО РАН, 2008, С. 314-325

48. Kaminsky F.V., Zakharchenko, **Khachatryan G.K.**, Channer D.M. DeR., Griffin W.L., Diamond from the Los Coqitos area, Bolivar state, Venezuela // Applied Mineralogy /ed. Pecchio M. e.a., 2004, São Paulo, P. 563-566.

### Тезисы

49. Каминский Ф.В., **Блинова Г.К.**, Гуркина Г.А. и др. Исследование комплекса типоморфных признаков алмазов // Самородное элементообразование в эндогенных процессах: Тез. Докл. Всесоюзн. Конференции, Якутск, 1985, ч. III. С. 26-28.

50. Гуркина Г.А., Амосов Р.А., **Блинова Г.К.**, Фролова Л.Н. Эволюция формы алмазов в природных условиях, там же, С. 34-35.

51. **Блинова Г.К.** Азот в мелких алмазах некимберлитовых пород по данным ИК-спектроскопии // Задачи прогнозирования, поисков, оценки и освоения месторождений полезных ископаемых. Тез. Докл. VI Республиканской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов-геологов, Алма-Ата, 1986. С.142-143.

52. **Блинова Г.К.**, Гуркина Г.А. Генетическая информативность структурной примеси водорода в алмазах // Тез. Докл. II Всесоюзного совещания по геохимии углерода, Москва. 1986. С. 110.

53. **Блинова Г.К.** Структурная примесь водорода-типоморфный признак алмаза- «Основные проблемы и пути совершенствования технологии обогащения природных алмазов на основе использования их физических свойств (Тез. доклада к Всесоюзному научно-техническому совещанию). М., 1987. С. 30-31.



54. Захарченко О.В., **Блинова Г.К.**, Ботова М.М. и др. Алмазы из кимберлитовых трубок Архангельской алмазоносной области // В сб. Основные направления повышения эффективности и качества геологоразведочных работ на алмазы. Материалы VI Межведомственного совещания по геологии алмазных месторождений. Тез. Докл. Иркутск, 1990. С. 282-284.

55. Ф.В., Бартошинский З.В., **Блинова Г.К.** и др. Типоморфизм физико-химических свойств алмаза как основа прямых поисков коренных месторождений // В сб. Основные направления повышения эффективности и качества геологоразведочных работ на алмазы. Материалы VI Межведомственного совещания по геологии алмазных месторождений. Тез. Докл. Иркутск, 1990. С. 306-307.

56. **Хачатрян Г.К.** Особенности ИК-спектроскопического определения концентраций оптически-активных центров в алмазах и их типоморфное значение // Традиционные и новые направления в минералогических исследованиях. Тез. Докл. Годичной сессии Московского отделения минералогического общества, М., ИГЕМ РАН, ВИМС МПР РФ, 2001. С. 160-161.

57. Zakharchenko O.D., Galimov E.M., **Khachatryan G.K.** Diamonds from kimberlites pipes of Arkhangelsk region // 29<sup>th</sup> Intern. Geol. Congr. Abstracts.-Kyoto, 1992. Vol.3, p. 704.

58. Zakharchenko O.D., Botova M.M., **Khachatryan G.K.** Diamonds from Lomonosov Mine of Arkhangelsk region // 6-th Internationale Kimberlite Conference, Novosibirsk, Rus., 1995. P. 680.

59. Kaminsky F.V., Zakharchenko O.D, Channer D.M. DeR., **Blinova G.K.**, Bulanova G.P. Diamonds from Guaniamo area, Bolivar State, Venezuela // VIII Congreso geologico Venezolano, Porlamar, Venezolano, 1997, t.1, P. 427-430.

60. Kaminsky F.V., Zakharchenko O.D, Channer D.M. DeR., **Blinova G.K.**, Maltsev K.A. Diamonds from Guaniamo area, Venezuela // 7-th Internationale Kimberlite Conference, Cape Town, S.R., 1998, P. 395-398.

61. **Khachatryan G.K.**, Kaminsky F.V. The relationship between the distribution of nitrogen impurity centers in diamond crystals and their internal structure and mechanism of growth // 8-th Intern. Kimberlite Conf., 2003, Victoria, Canada, Long Abstract, # 0002.

62. Ukhanov A.V., **Khachatryan G.K.** Carbon isotope and IR evidence in favor of fluid origin of natural diamonds from kimberlite pipes in Yakutian province // 9-th Intern. Kimberlite Conf., Frankfurt, 2008, Extended Abstract, No 9IKC-A00412.

63. Kaminsky F.V., **Khachatryan G.K.**, Andrezza P, Araujo D., Griffin W.L. Super-deep diamonds from kimberlites in the Juina area, Mato Grosso State, Brazil // 9-th Intern. Kimberlite Conf., Frankfurt, 2008, Extended Abstract, No 9IKC-A00005.

64. Palazhenko O.V., **Khachatryan G.K.**, Garanin V.K. Two diamond generations from Arkhangelsk region deposits // 9-th Intern. Kimberlite Conf., Frankfurt, 2008, Extended Abstract, No 9IKC-A00035.

65. Kopylova M., Navon O., Dubrovinsky L., **Khachatryan G.** Mineralogy of natural diamond-forming fluids. // 9-th Intern. Kimberlite Conf., Frankfurt, 2008, Extended Abstract, No 9IKC-A00190.

66. **Khachatryan G.K.**, Kaminsky F.V., Anashkina N.E. FTIR microanalysis of diamond and indicator minerals as a new tool in prospecting for diamond deposits // 10<sup>th</sup> International Kimberlite Conference, Bangalore, 2012, 10 IKC-50.

67. Mainkar D., Gupta T., Patel S.C., Lehmann B., Diwan P., Kaminsky F.V., **Khachatryan G.K.** Physical and infrared characteristics of diamond from Behradich kimberlite, Bastar craton, India. // 10<sup>th</sup> International Kimberlite Conference, Bangalore, 2012, 10 IKC-52.

68. Ravi S., Sufija M.V., Patel S.C., Gupta T., Sridhar M., Kaminsky F.V., **Khachatryan G.K.**, Netravali S.V. Diamonds from the Eastern Dharwar craton, India: their physical and infrared characteristics // 10<sup>th</sup> International Kimberlite Conference, Bangalore, 2012, 10 IKC-346.



Подписано в печать 20.12.2016 г.  
Формат бумаги 31x30 1/2  
Тираж 99 экз.  
Полиграфическая база ФГУП ЦНИГРИ  
117545, Москва, Варшавское шоссе, д. 129, корп. 1