

занцев // Вест. ВГУ. Сер. Геология. – Воронеж, 1997. – № 3. – С. 95-99.

5. Петров, С.В. благородные металлы в железистых кварцитах и возможность их извлечений / С.В. Петров, В.А. Сентимова // Обогащение руд. – 1998. – № 6. – С. 36-40.

6. Лазаренков, В.Г. Месторождения платиновых металлов / В.Г. Лазаренков, С.В. Петров, И.В. Таловина. – СПб. : Недра, 2002. – 298 с.

7. Минералы благородных металлов : справочник / под ред. О.Е. Юшко-Захарова, В.В. Иванов, Л.Н. Соболева и др. – М. : Недра, 1986. – 272 с.

8. Olivo, G.R., M. Gaunter, M. Bardoux // Miner. Mag. – 1994. – V. 58, № 4. – P. 579-587.

9. Чернышов, Н.М. Первые находки минеральных форм элементов платиновой группы в железистых кварцитах КМА (Центральная Россия) / Н.М. Чернышов, В.М. Изюмко, С.В. Петров и др. // Доклады РАН. – 2003. – Т. 391, № 1. – С. 104-107.

УДК 549.221(571.56)

## О ГЕНЕЗИСЕ АЛМАЗОВ V РАЗНОВИДНОСТИ ИЗ МЕСТОРОЖДЕНИЯ им. ЛОМОНОСОВА (АРХАНГЕЛЬСКАЯ АЛМАЗОНОСНАЯ ПРОВИНЦИЯ)

В.П. Афанасьев\*, Н.Н. Зинчук\*\*, П.В. Гриб\*\*\*, А.Л. Рагозин\*,  
Г.М. Рылов\*, А.А. Томиленко\*, А.В. Уханов\*\*\*\*

\*ИМП СО РАН, г. Новосибирск,

\*\*АК «АЛРОСА» (ЗАО), г. Мирный, Респ. Саха (Якутия),

\*\*\*АК «АЛРОСА-Поморье», г. Архангельск,

\*\*\*\*ГЕОХИ СО РАН, г. Москва

На основе комплексного минералогического изучения алмазов V разновидности по классификации Ю.Л. Орлова из месторождения им. Ломоносова (Архангельская алмазоносная провинция), включающего физиографическую характеристику, изучение структурных особенностей, определение изотопного состава углерода, исследование магнитных, геохимических, оптических особенностей, определение состава флюидных включений, выдвинута гипотеза о субдукционном генезисе данных алмазов. Данная гипотеза подтверждается данными по геохимии кимберлитов Золотницкого поля, наличия в кимберлитах большого количества эклогитов группы С, имеющих субдукционный генезис. Ранее субдукционный генезис был предположен для алмазов V-VII разновидности из россыпей северо-востока Сибирской платформы. Сопоставление якутских и архангельских алмазов показывает черты как сходства, так и различия между этими разновидностями алмазов. Сходство отмечается в физиографических особенностях, которые и позволили отнести их к V разновидности в полном соответствии с классификацией Ю.Л. Орлова. Однако по другим признакам имеются отличия, в частности по изотопии углерода, по оптическим и структурным особенностям, по составу флюидной фазы во включениях, по геохимическим особенностям. Возникает вопрос, можно ли относить эти алмазы к одной разновидности в соответствии с классификацией Ю.Л. Орлова и каковы рамки применимости самой классификации. Рассмотрена история появления классификации Ю.Л. Орлова, делается вывод, что ряд разновидностей алмазов, в том числе V и VII, выделены на материале россыпей северо-востока Сибирской платформы и применение классификации в других алмазоносных регионах вызывает затруднения и ошибки, как в описанном случае с алмазами V разновидности из месторождения им. Ломоносова. Архангельские и якутские алмазы, относимые к V-VII разновидности, имеют одинаковый генезис – субдукционный, но связаны с разными субдукционными событиями, в разное время, в разных местах, в разной геологической обстановке, что и обуславливает различия их минералогических особенностей. Предложена новая номенклатура алмазов, в соответствии с которой алмазы делятся на мантийные и субдукционные, показан набор характеристических особенностей каждой из этих категорий алмазов.

В процессе выполнения работы были использованы некоторые уникальные методики исследований; в частности, впервые в мире исследованы магнитные свойства алмазов; определены геохимические особенности алмазов с помощью рентгенофлуоресцентного анализа на синхротронном излучении и с помощью LAM ICP MS (масс-спектрометрия на индуктивно связанной плазме с лазерной абляцией вещества), дана интерпретация полученным данным.

### Введение

Предпосылкой постановки данных исследований было обнаружение алмазов так называемой V разновидности по классификации Ю.Л. Орлова [1] в кимберлитах месторождения Ломоносовское. Сведения об этом были опубликованы [2]. Данное обстоятельство вызвало у нас большое изумление. Ранее нами детально изучена V-VII разновидность алмазов из россыпи реки Эбелях (север Якутской алмазоносной провинции), определен широкий круг характеристических особенностей этих алмазов [3, 4]. Нами обос-

новано происхождение этих алмазов из неизвестного, возможно базитового, типа источников алмазов весьма вероятно докембрийского возраста, предположен субдукционный генезис данных алмазов, а также возможность того, что в коренном источнике (источниках) присутствовали только эти алмазы, т.е. ассоциация алмазов была моногенная; индикаторные минералы, сопровождающие данные алмазы, не выявлены [3, 4]. Совершенно иная ситуация в архангельском месторождении: алмазы V разновидности находятся в среднепалеозойском кимберлите и сопровождаются полигенной смесью других алмазов, а также обычными индикатор-

ными минералами кимберлитов. Данное противоречие весьма настораживает, при недостаточной изученности алмазов из него можно сделать вполне определенные, но недостаточно обоснованные выводы. Первый такой вывод – коренными источниками алмазов V разновидности на севере Якутской алмазоносной провинции могут быть кимберлиты типа архангельских. Второй вывод – по аналогии с севером Якутской алмазоносной провинции на Восточно-Европейской платформе могут быть богатейшие источники алмазов V разновидности. Иначе говоря, обнаружение алмазов V разновидности в архангельских трубках влечет за собой далеко идущие геологоразведочные следствия. Цена вопроса слишком высока, поэтому мы попытались детально изучить алмазы V разновидности из архангельских трубок и сравнить их с алмазами V-VII разновидности из россыпей севера Якутии. Результаты этих исследований приводятся ниже.

### Результаты исследований Физиографические и структурные особенности алмазов V разновидности

Комплекс алмазов месторождения им. Ломоносова характеризуется полигенезом, т.е. в едином парастерезисе находятся алмазы, весьма различающиеся по своим физиографическим и, соответственно, генетическим особенностям. Среди них ярко выделяется разновидность алмаза, которая по физиографической характеристике, приведенной в классификации Ю.Л. Орлова, соответствует V разновидности. Она и послужила объектом изучения и сравнения с якутской V разновидностью алмазов.

Для всех изученных кристаллов V разновидности месторождения Ломоносова чрезвычайно характерно наличие огромного количества черных включений графита разнообразной морфологии, но чаще всего повторяющих форму внутренних микротрещин. Эти включения и дали основание отнести данные алмазы

к V разновидности по классификации Ю.Л. Орлова. В пластинках видно, что алмазы V разновидности бесцветны (рис. 1). Серый до черного цвет им придают микротрещины с графитом, они же определяют и степень прозрачности. Включения (соответственно, микротрещины) распределены в кристаллах различным образом: чаще они концентрируются в периферической зоне, но во многих случаях занимают практически весь объем кристалла. Ориентировка трещин часто соответствует октаэдру. Этим они отличаются от внутренних микротрещин в алмазах V разновидности из северных россыпей Якутии, где ориентировка трещин, как правило, произвольная в связи с «балласовой» внутренней структурой [3], препятствующей закономерной ориентировке микротрещин.

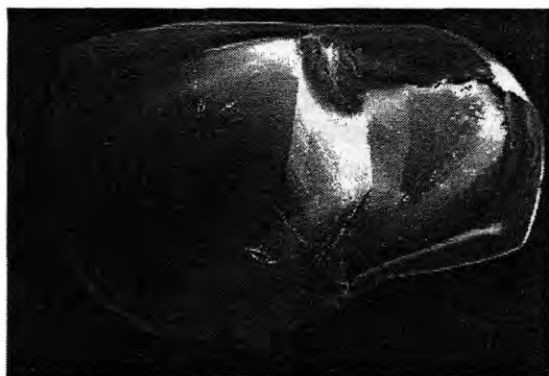
Другая особенность: в пластинках архангельских алмазов пока не удалось наблюдать вакуоли, выполненные флюидом, тогда как в якутских их можно легко наблюдать [3]; поскольку флюидов в архангельских алмазах много, как это будет показано ниже, эти вакуоли, вероятно, просто слишком малы для наблюдения с помощью оптики. Еще одной важнейшей особенностью архангельских алмазов является их способность формировать типичные двойники по шпинелевому закону в форме треугольных табличек, при этом сдвойникованные кристаллы также переполнены микротрещинами с графитом. Якутские же алмазы V разновидности в принципе не в состоянии формировать двойники из-за своей «балласовой» структуры. Следовательно, можно предполагать, что архангельские алмазы V разновидности изначально были значительно лучше окристаллизованы в сравнении с якутскими V разновидности. Внутренняя трещиноватость и графитизация по трещинам является более поздней, эпигенетической, связанной с хрупкой релаксацией внутренних напряжений при декомпрессии и закалке, так же как и у якутских алмазов. Наличие высоких внутренних напряжений свидетельствует о высокодефектном и, вероятно, быстром росте и тех и других, что и привело к сходству по части эпигенетических изменений.

Наряду с двойниками среди архангельских алмазов V разновидности имеется значительная доля их незако-



Рис. 1. Микровключения графита по внутренним трещинам в алмазе «V» разновидности из месторождения им. Ломоносова:

а – 20×, б – 65×



а



б

Рис. 2. Алмаз VII разновидности из месторождения им. Ломоносова:  
а – 9х; б – 45х

номерных сростков, которые в классификации Ю.Л. Орлова определяются как VII разновидность (рис. 2).

Для якутских кристаллов нами доказана полная идентичность V и VII разновидностей, что дало основание характеризовать их вместе как V-VII разновидность [3]. То же и здесь: если строго следовать орловской классификации, то следовало бы выделить и VII разновидность, причем она также представляет собой сростки алмазов V разновидности.

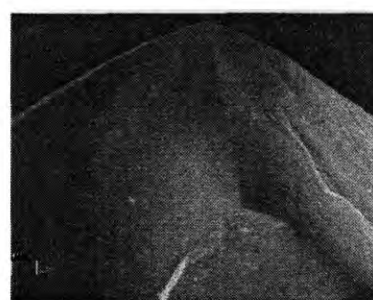
По габитусу архангельские кристаллы V разновидности формируют ряд от октаэдров через комбинационные формы октаэдр+ромбододекаэдроид до кривогранного ромбододекаэдроид. Кристаллы октаэдрического габитуса всегда имеют округленные ребра и вершины и сложно скульптурированную поверхность граней октаэдра, основным элементом которой являются обратнопараллельные треугольные впадины, часто накладывающиеся друг на друга и формирующие сложные

системы. Впадины имеют разный размер, наползают друг на друга, крупные впадины осложнены сериями более мелких, хаотически расположенных.

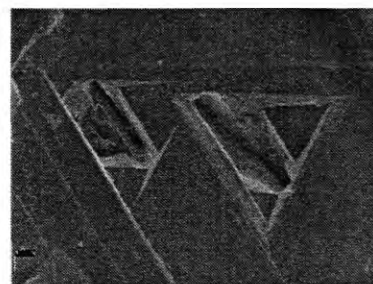
У кристаллов комбинационной морфологии реликты граней октаэдра имеют морфологию, аналогичную описанной выше (рис. 3). Значительное число кристаллов имеют как бы зональное по структуре строение: высокодефектная с контрастным рельефом травления оболочка октаэдра и менее дефектное, с менее контрастным рельефом травления ядро, вскрываемое при преимущественном протравливании ребер и вершин октаэдра. Но такая зональность отмечается не у всех кристаллов, часто искривленные поверхности ромбододекаэдроид также грубо скульптурированы, имеют большое количество шрамов. Это связано с тем, что при растворении кристаллов на поверхность выводятся внутренние графитизированные микротрещины, по которым и развиваются шрамы (рис. 4). Блоки, лиш-



а

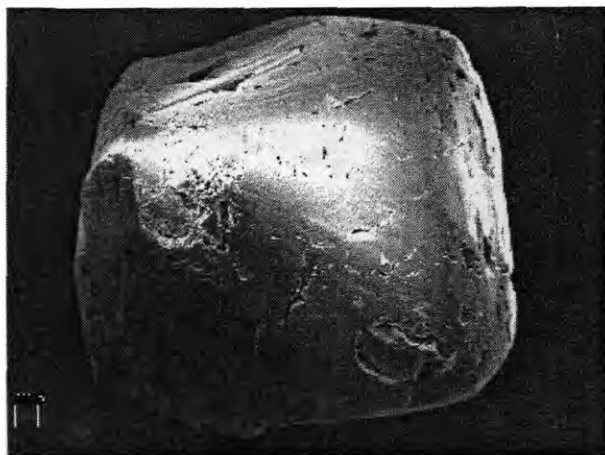


б

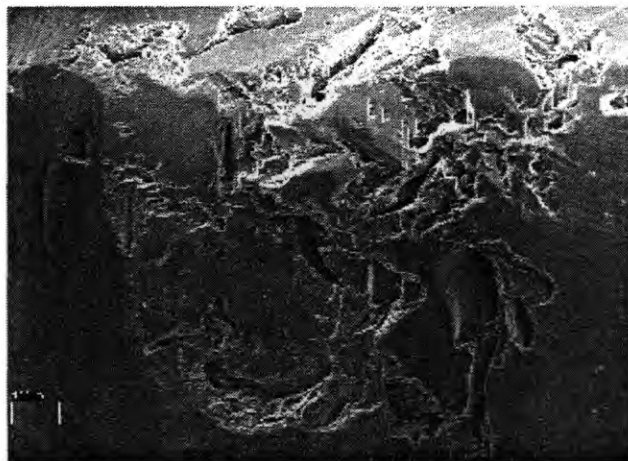


в

Рис. 3. Алмаз V разновидности комбинационной морфологии из месторождения им. Ломоносова:  
а – 9х; б – 81х; в – 34х



а



б

Рис. 4. Алмаз V разновидности из месторождения им. Ломоносова с многочисленными шрамами по трещинам, выведенным на поверхность в процессе магматического растворения:

а – 9х; б – 37х

ные микротрещин или с малым их количеством, растворяются как нормальный кристалл с образованием обратных тригонов и их систем. Фактически морфология поверхности кристаллов определяется сочетанием этих двух элементов рельефа, оба из которых развиваются при растворении кристалла магматическим расплавом. К сожалению, нам не удалось наблюдать ни одного кристалла или фрагмента кристалла, несущих «первичные» морфологические особенности, связанные с периодом роста; все они, как и якутские, несут признаки воздействия магматического расплава, проявленные в той или иной степени.

Ромбододекаэдрониды данного типа алмазов редко имеют гладкую поверхность. Для них можно выделить два типа гранной морфологии: один – грубоскульптурованный, параллельношестоватый, округлоступенчатый со ступенями, ориентированными вдоль длинной диагонали поверхностей ромбододекаэдра, грубоскульптурный вблизи вершины; другой – гладкий, либо со сноподобной штриховкой, либо блоковый рельеф (пологие изометричные холмики), характерный для протравленных внутренних менее дефектных частей кристалла. Вследствие того что внешняя более дефектная зона кристаллов имеет разную и часто переменную мощность, на одном кристалле может наблюдаться сочетание обоих типов рельефа, создающее весьма сложную гранную морфологию. Этим данные кристаллы резко отличаются от ромбододекаэдронидов I разновидности «уральского» или «бразильского» типа, которые имеют значительно более гладкую поверхность и хорошо оформленные вершины, ребра и гранный шов.

Незакономерные сростки алмазов V разновидности (которые можно характеризовать как VII разновидность) имеют, как правило, удлиненную, гантелеобразную форму и в этом отношении похожи на якутские.

Были проведены фотогониометрические исследования. На рис. 5 показана фотограмма кристалла V разновидности октаэдрического габитуса с некоторым притуплением ребер искривленными поверхностями на

месте ромбододекаэдра и для сравнения показана фотограмма кристалла V разновидности из россыпи реки Эбелях (Якутия), которая при тех же основных закономерностях формирования световой картины демонстрирует чрезвычайно хаотичный ее характер, что связано с более высокой дефектностью данной разновидности в сравнении с архангельской V разновидностью.

Установлено полное отсутствие на архангельских алмазах V разновидности, визуально наблюдаемых на поверхности полос пластической деформации и связанных с ними элементов рельефа в форме цепочек обратных тригонов на гранях октаэдра и шагреневых рельефа на поверхностях ромбододекаэдронидов. Аналогичное явление отмечается и для якутских алмазов V разновидности.

Изучение алмазов V разновидности в поляризованном свете показывает наличие у них сильного аномального двупреломления; в пластинках наблюдается сложная интерференционная картина в серых, желтовато-серых тонах. Такая картина интерференции свидетельствует о высокой степени напряженности кристаллической структуры, связанной с собственными внутренними напряжениями, равномерно распределенными в объеме. Однако у якутских алмазов напряженность решетки несколько выше, что видно по более высоким (оранжевым) цветам интерференции.

Для исследования внутреннего строения алмазов V разновидности нами применен метод Лауэ-СИ (съемка лауэграмм на синхротронном излучении), который отличается высокой экспрессностью и повышенной разрешающей способностью для несовершенных кристаллов [5]. По строению дифракционных пятен лауэграмм алмаза V разновидности россыпи реки Эбелях хорошо видно блоковое строение, свидетельствующие о быстром росте в условиях пониженных Р-Т параметров и высокого пересыщения по углероду (рис. 6). Высокая ростовая дефектность дополняется постростовой деформацией (пластической деформацией кристаллической решетки), которая проявляется на лауэ-

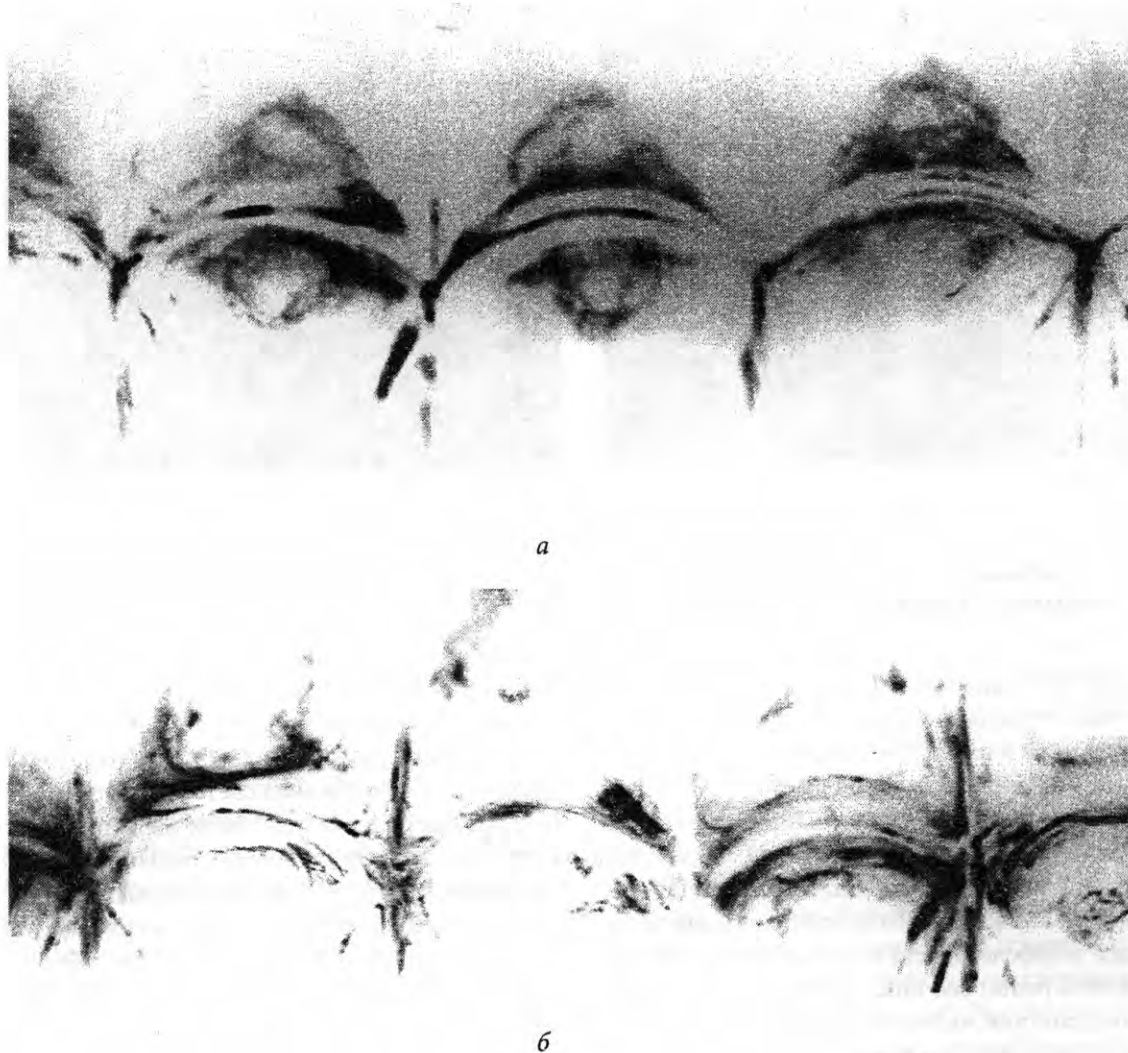


Рис. 5. Фотограмма кристалла V разновидности из месторождения им. Ломоносова (а) и кристалла V разновидности из россыпи реки Эбелях (север Якутии) (б)

граммах в виде фрагментации лауэпятен, астеризма, наличия протяженных тяжей, соединяющих отдельные фрагменты лауэпятен.

У алмазов V разновидности из месторождения им. Ломоносова также наблюдается волокнистое строение, однако волокна тоньше, их разориентация друг отно-

сительно друга меньше (порядка нескольких минут), их Лауэ-СИ-топограммы выглядят, как топограммы хороших кристаллов (рис. 7). Лишь некоторые лауэграммы показывают слабую фрагментацию рефлексов и незначительный астеризм, что свидетельствует о слабой постростовой деформации кристаллов.

Таким образом, рентгеновские исследования на синхротронном излучении подтвердили различия в условиях роста архангельских кристаллов V разновидности и эбеляхских V разновидности: для первых характерен более спокойный, качественный рост.

### Изотопный состав углерода

Изотопный состав углерода алмазов V разновидности из месторождения им. Ломоносова определен в ГЕОХИ РАН (Москва) А.В. Ухановым.

Данные по изотопному анализу углерода 32 алмазов V-VII разновидности из россыпей севера Якутии, наряду с прочими, опубликованы в работе Э.М. Галимова [6] и в диссертации В.И. Коптиля [7]. Диапазон колебаний изотопного состава углерода  $\delta^{13}\text{C}$  составил от  $-24,16\text{‰}$  до  $-19,09\text{‰}$ , среднее  $\delta^{13}\text{C}$  по V разновид-

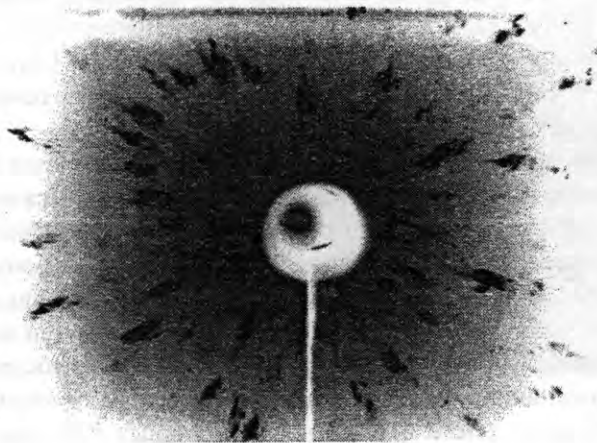
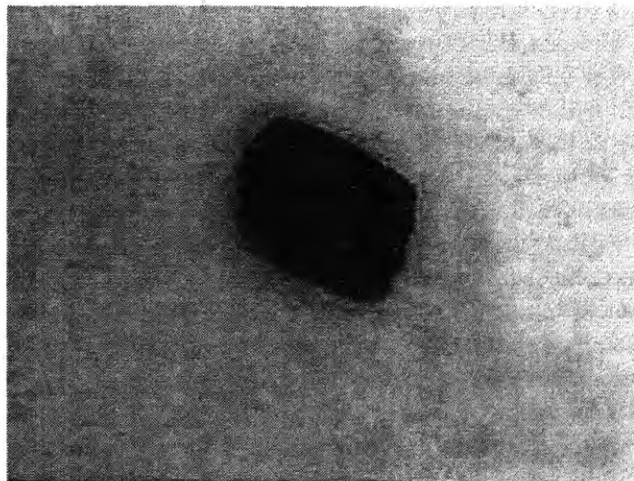


Рис. 6. Лауэ-СИ алмаза V разновидности из россыпи реки Эбелях (север Якутии), видна фрагментация рефлексов за счет деформации кристаллической решетки



а



б

Рис. 7. Лауэ-СИ алмаза V разновидности из месторождения им. Ломоносова. а – полная лауэграмма, видно незначительное расщепление рефлексов вследствие деформации кристаллической решетки; б – отдельный рефлекс, видно волокнистое строение внешней зоны кристалла

ности составляет  $-22,21\%$  (17 кристаллов), по VII разновидности  $-20,88\%$  (15 кристаллов). Следовательно, 1 – изотопный состав углерода V и VII разновидностей алмазов идентичен и колеблется в узких пределах; 2 – углерод алмазов данных разновидностей имеет значительно облегченный состав. В своей классификации алмазов по изотопному составу углерода Э.М. Галимов выделяет алмазы V и VII разновидностей в отдельную группу  $\gamma$ , подчеркивая тем самым ее генетическую специфику [6].

Нами проанализированы четыре типичных представителя V-VII разновидности из месторождения Ломоносовское. Результаты следующие:

Кристалл № 1 –  $\delta^{13}\text{C} = -4,68\%$ .

Кристалл № 8 –  $\delta^{13}\text{C} = -4,47\%$ .

Кристалл № 12 –  $\delta^{13}\text{C} = -4,52\%$ .

Кристалл № 33 –  $\delta^{13}\text{C} = -4,35\%$ .

Налицо резкое отличие по изотопному составу от алмазов V-VII разновидности из северных россыпей Якутии: архангельские алмазы относятся к категории изотопически тяжелых, они в среднем тяжелее среднего состава углерода мантийного резервуара ( $\delta^{13}\text{C} \approx -6\%$ ). Кроме того, произвольно выбранные для анализа кристаллы показали поразительно однообразный изотопный состав, что указывает на генетическое родство изученных алмазов. Данные по изотопному составу архангельских алмазов наиболее контрастно отличают их от алмазов V-VII разновидности из северных россыпей Якутии.

### Оптические исследования кристаллов V разновидности

Оптическими методами изучены две пластинки, вырезанные субпараллельно кубу из двух кристаллов V разновидности из месторождения им. Ломоносова. Исследования проведены А.П. Елисеевым (ОИГТМ СОРАН).

#### Спектры пропускания в УФ-видимой области

Изученные пластинки в основном бесцветные, но с большим количеством включений графита. Оптически они становятся прозрачными от 300 нм; при 80К наблюдается полоса 318 нм, характерная для поглощения азотных центров А. Каких-либо других деталей в диапазоне от УФ до ближнего ИК не наблюдается.

Значительно сложнее выглядят спектры у кристаллов V-VII разновидности из россыпей реки Эбелях (север Якутии). Изученные кристаллы V (7 кристаллов) и VII (22 кристалла) разновидностей оказались идентичными по спектрам пропускания и характеризуются совместно. Поскольку кристаллы практически не окрашены, основные особенности в спектрах пропускания сосредоточены в коротковолновой части спектра. При 300К и особенно при 80К хорошо видна тонкая структура в виде бесфонной линии при 415,2 нм и широкой структурированной полосы с максимумом 380 нм, которая является результатом взаимодействия с фонами (энергии основных из них составляют 93 и 165 мэВ). Интенсивность поглощения составляет около  $1,2 \text{ см}^{-1}$  для 380 нм и  $2,5 \text{ см}^{-1}$  для 415,2 нм при 80 °К. Система хорошо известна для природных алмазов, она обусловлена примесным дефектом из трех атомов азота и одной вакансии (центр В1). Интенсивное поглощение наблюдается при длинах волн короче 350 нм, на фоне монотонного нарастания поглощения регистрируются две узкие (бесфонные) линии при 316,3 нм и 330,6 нм и соответствующими фонами с энергиями 114 и 145 мэВ. По положению эти линии очень близки линиям 315,6 нм (N6) и 329,6 нм (N5), относимым к внутрицентровым переходам в А-центре, представляющим собой пару атомов азота в соседних замещающих позициях в решетке алмаза. Линии N5 и N6 наблюдаются в природных алмазах типа 1aA, соответствуют электронным переходам типа А – Е и  $A_1 - A_2$  соответственно (в обоих случаях в дефектах тригональной сим-

метрии). Фононы с энергиями 114 и 159 см<sup>-1</sup> характерны во многих случаях и для более коротковолновой линии 315,6 нм. Поглощение на 306,5 нм может быть использовано для оценки концентрации азота в форме А. С использованием соотношения  $N_A = 11,6 \cdot 10^{18} \mu_{306,5}$  проведена оценка концентрации азота и получены значения  $2 \cdot 10^{20}$  см<sup>-3</sup> (1200 ppm). Завышенные значения, по сравнению с приведенными ниже данными ИК поглощения, связаны со сложной формой кристаллов и невозможностью точно определить длину оптического пути, тогда как в ИК области есть возможность учесть эту неопределенность, используя метод внутреннего стандарта. В области длин волн более 415 нм какие-либо характерные особенности в спектрах не обнаружены.

Таким образом, спектры поглощения в ближней УФ-видимой области якутских кристаллов значительно сложнее и в первую очередь показывают наличие не только центра А, как и в архангельских алмазах, но и центра В1, отсутствующего у изученных архангельских алмазов.

#### *ИК-поглощение*

В обоих кристаллах V разновидности месторождения им. Ломоносова характер спектров практически одинаковый: сильное поглощение в однофононной области спектра, обусловленное центрами А практически без влияния других азотных центров.

В кристаллах поглощение настолько сильное, что свет в основной полосе не пробивается (спектр зашкаливает), поэтому оценка содержания азота проводилась по сопутствующим полосам. Получены значения поглощения на 52 и 50 см<sup>-1</sup>; из этих данных содержание азота в форме А составляет соответственно 858 и 825 ppm. Высоким содержанием азота в форме А объясняется практическое отсутствие фотолуминесценции у изученных кристаллов V разновидности месторождения им. Ломоносова.

Наблюдается очень слабое поглощение на 1374-1378 нм, которое может быть отнесено к плейтлетс (дефект В2 – плоские скопления дефектов структуры пока не выясненной природы, ориентированные по кубу), незначительным по размерам. Кроме того, наблюдаются относительно слабые полосы, относящиеся к С-Н колебаниям (3107 и более слабая 1405 см<sup>-1</sup>); поглощение в них составляет 2,3 и 3,6 см<sup>-1</sup>, соответственно.

Спектры пропускания кристаллов якутских кристаллов V и VII разновидностей оказались чрезвычайно близкими между собой и соответствующими природным алмазам типа IaAB с примесным азотом в форме центров А и В1. Доминирующим является центр А с максимумом поглощения 1282 см<sup>-1</sup>, интенсивность поглощения на этой длине волны составляет, как правило, 40-50 см<sup>-1</sup>. Дополнительная более слабая полоса расположена при 1190 см<sup>-1</sup>, она обусловлена наложением полосы 1200 см<sup>-1</sup>, относящейся к А-системе, и полосы 1175 см<sup>-1</sup>, наиболее характерной и интенсивной для В1 центров. Оценка концентрации азота в форме А и В1 центров осуществлена по спектрам, зарегистрированным с пластинки алмаза VII разновидности, толщиной

0,4 мм, для которой спектры удалось записать с максимальной детальностью и получить концентрацию азота в форме А равную 630 ppm. Оценка содержания азота в форме В1 более неопределенная: при использовании соотношения Дэвиса она составляет 230 ppm, по Е.В. Соболеву и В.И. Лисойван – 1200 ppm. Последнее значение является, скорее всего, сильно завышенным. Кроме А и В1 центров в исследованных алмазах наблюдается линия при 1369 см<sup>-1</sup> с интенсивностью от 3 до 8 см<sup>-1</sup>, связываемая обычно с В2 центрами в природных алмазах.

Регистрация спектров по точкам вдоль профилей на Фурье-спектрометре показывает их полную идентичность, т.е. отсутствует зональность, характерная для многих алмазов других разновидностей и обусловленная различиями в окраске, концентрации примесных центров и т.д.

Как видим, оптические исследования убедительно показывают различия между кристаллами V-VII разновидности из северных россыпей Якутии и алмазами V разновидности из месторождения им. Ломоносова.

### *Исследования магнитных свойств и микропримесного состава алмазов*

Предпосылкой обнаружения магнитных свойств природных алмазов послужила попытка создания нами сепаратора на постоянном магните для разделения двух типов гранатов – слабо магнитных пиропов, являющихся индикаторными минералами кимберлитов, и альмандинов, более магнитных из-за повышенного содержания железа и не являющихся индикаторами кимберлитов. Обычно такое разделение производится с помощью электромагнитных сепараторов в лабораторных условиях, однако при поисках месторождений алмазов необходим полевой сепаратор на постоянном магните. Тестирование показало, что постоянный магнит, разработанный в Институте ядерной физики СО РАН (Новосибирск), обладает такой мощностью, что притягивает и пиропы, и альмандины. Дальнейшие исследования показали, что притягиваются все минералы, содержащие то или иное количество железа, независимо от валентности. Далее были опробованы искусственные алмазы ювелирного качества, выращенные методом перекристаллизации в термоградиентном поле. Магнитные свойства синтетических алмазов, выращенных методом спонтанной кристаллизации, известны [8] и обусловлены включениями металла-катализатора (Fe, Ni), но магнитность указанных ювелирных алмазов была установлена впервые, при этом во всем диапазоне оптических увеличений никаких включений металла-катализатора не наблюдалось. Затем пришла очередь природных алмазов. Были испытаны самые разные типы алмазов – от самых дефектных V-VII разновидности из россыпей севера Якутии, из кимберлитов месторождения им. Ломоносова, из трубки Мир (Якутия) до алмазов ювелирного качества из этих же месторождений. Все они при испытаниях на данном магните показали наличие магнитных свойств.

Совершенно очевидно, что обнаружение магнитных свойств природных алмазов произошло благодаря уникальным свойствам магнита, поэтому мы поставились в максимальной мере использовать предоставившуюся возможность для исследований в данном направлении.

В литературе приводится много данных по магнитным свойствам синтетических алмазов, в том числе данные по магнитной восприимчивости синтетических алмазов в зависимости от состава микропримесей, попадающих в алмазы при их изготовлении [8]. По этим данным магнитная восприимчивость синтетических алмазов является величиной положительной, то есть их можно отнести к классу слабых парамагнетиков. Алмазы природного происхождения считаются диамагнетиками, то есть их магнитная восприимчивость величина отрицательная [9, 10].

В ИЯФ СОРАН для изучения свойств слабомагнитных минералов разработана магнитная система на основе постоянных магнитов с магнитной индукцией  $B=10$  кГс. Магнитная система обладает магнитным полем  $12\div30$  кГс и градиентом магнитного поля величиной  $5\div70$  кГс/см в рабочей области.

На основе этой магнитной системы была создана лабораторная установка для измерения магнитных свойств алмазов природного происхождения.

Экспериментальная установка состоит из следующих элементов (рис. 8):

- электронные весы (типа Sartorius с дискретностью измерения  $0,0001$  г);
- рычажный механизм, на одном конце которого крепится измерительная штанга с исследуемым образцом, на другом конце уравновешивающий груз;
- подъемник, управляемый шаговым двигателем, на котором располагается магнитная система;
- источник питания подъемника.

Основным элементом установки является магнитная система с максимальным полем внизу рабочей области  $30$  кГс и градиентом магнитного поля  $70$  кГс/см. Благодаря большому произведению магнитного поля на градиент магнитного поля имеется возможность изучать магнитные свойства слабомагнитных веществ.

Удельная магнитная восприимчивость характеризует магнитные состояния веществ и минералов: диамагнитное, парамагнитное, антиферромагнитное, ферромагнитное [8]. Параметры установки позволяют измерить удельную магнитную восприимчивость  $K$  на уровне  $\sim 10^{-7}$  см<sup>3</sup>/г. Метод основан на измерении магнитной силы, которая действует на образец (алмаз), помещенный в неоднородное магнитное поле [11]:

$$K = \frac{F}{m \cdot B \cdot \text{grad}(B)},$$

где  $F$  – величина магнитной силы,  $m$  – масса образца (алмаза),  $B$  – величина магнитного поля.

Измерения магнитных свойств алмазов были проведены для двух месторождений: якутского (трубка Мир) и архангельского (тр. им.Карпинского) при величинах магнитного поля и градиента магнитного поля  $B=29$  кГс,  $\text{grad}(B)=68,5$  кГс/см для алмазов трубки Мир и при  $B=23,9$  кГс,  $\text{grad}(B)=33,4$  кГс/см для алмазов трубки им. Карпинского.

Относительная погрешность измерений складывается из двух основных величин  $\eta=\eta_1+\eta_2$ :

– погрешность, связанная с определением величины магнитной силы, действующей на образцы алмазов. Она определяется точностью весов и конструкцией рычажной системы и составляет

$$\eta_1 = 100\% \cdot \frac{0.3}{F},$$

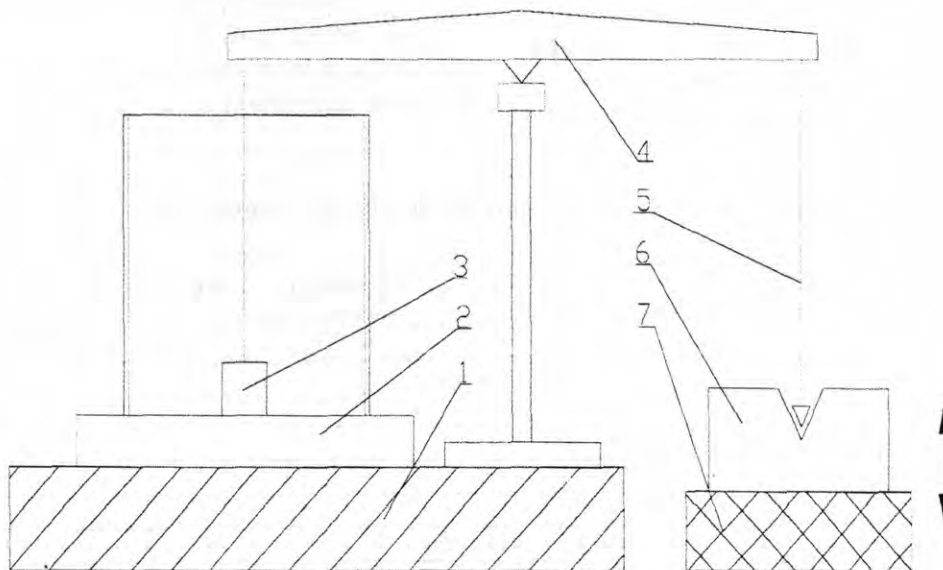


Рис. 8. Установка для измерения магнитных свойств минералов:

1 – измерительная плита, 2 – электронные весы, 3 – уравновешивающий груз, 4 – рычажный механизм, 5 – измерительная штанга, 6 – магнитная система, 7 – подъемный механизм

Таблица 1

## Магнитные свойства алмазов

| № алмаза                                                                      | Масса алмаза $m \cdot 10^{-3}$ , (г) | Магнитная сила F, (дин) | Удельная магнитная восприимчивость $K \cdot 10^{-7}$ , (см <sup>3</sup> /г) | Относительная погрешность измерения $\eta$ , (%) |
|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Алмазы трубки Мир                                                             |                                      |                         |                                                                             |                                                  |
| 871                                                                           | 9,3                                  | 2,5                     | 1,76                                                                        | 62                                               |
| 904                                                                           | 23                                   | 5,5                     | 1,4                                                                         | 56                                               |
| 879                                                                           | 12,1                                 | 3,5                     | 1,67                                                                        | 59                                               |
| 869                                                                           | 7,2                                  | 2,9                     | 2,3                                                                         | 60                                               |
| 866                                                                           | 5,2                                  | 2                       | 2,2                                                                         | 65                                               |
| 898                                                                           | 17                                   | 6                       | 2                                                                           | 55                                               |
| 888                                                                           | 8,6                                  | 2,2                     | 1,5                                                                         | 64                                               |
| 881                                                                           | 10,5                                 | 3                       | 1,6                                                                         | 60                                               |
| Алмазы ювелирного качества из Сибирского минералогического музея (трубка Мир) |                                      |                         |                                                                             |                                                  |
| D                                                                             | 101                                  | 15                      | 1,8                                                                         | 52                                               |
| G                                                                             | 200                                  | 27                      | 1,66                                                                        | 51                                               |
| B                                                                             | 38,3                                 | 6,6                     | 1                                                                           | 55                                               |
| C                                                                             | 174                                  | 26                      | 1,8                                                                         | 51                                               |
| E                                                                             | 37,3                                 | 6,4                     | 1                                                                           | 55                                               |
| Алмазы трубки им. Карпинского                                                 |                                      |                         |                                                                             |                                                  |
| 2                                                                             | 93,5                                 | 10,5                    | 1,4                                                                         | 43                                               |
| 4                                                                             | 122,3                                | 15                      | 1,5                                                                         | 42                                               |
| 5                                                                             | 98,7                                 | 12                      | 1,5                                                                         | 43                                               |
| 13                                                                            | 122,6                                | 15                      | 1,5                                                                         | 42                                               |
| 22                                                                            | 82,5                                 | 7,5                     | 1,1                                                                         | 44                                               |
| 28                                                                            | 61,5                                 | 8                       | 1,6                                                                         | 44                                               |
| 31                                                                            | 86,3                                 | 9,6                     | 1,36                                                                        | 43                                               |

где F – магнитная сила, действующая на образец (дин), 0,3 – точность измерения весов (дин).

– погрешность, связанная с определением произведения магнитного поля на градиент магнитного поля в области алмаза. Она составляет  $\eta_2 \approx 50\%$  для  $B=29$  кГс,  $\text{grad}(B)=68,5$  кГс/см и  $\eta_2 \approx 40\%$  для  $B=23,9$  кГс,  $\text{grad}(B)=33,4$  кГс/см.

В таблице 1 приведены результаты измерений.

Для исключения влияния поверхностных загрязнений алмазов была проведена специальная очистка поверхности четырех высокодефектных алмазов из

трубки им. Карпинского путем травления в расплаве калиевой селитры при 600 °С в течение 10 мин. Результаты измерений до и после очистки представлены в таблице 2.

Как видим, удаление поверхностного слоя алмазов не привело к исчезновению их магнитных свойств.

Результаты измерений показывают, что природные алмазы имеют положительную магнитную восприимчивость и не являются диамагнетиками. Величины удельной магнитной восприимчивости образцов при-

Таблица 2

## Магнитные свойства алмазов после очистки поверхности

| № алмаза      | Масса алмаза $m \cdot 10^{-3}$ , (г) | Магнитная сила F, (дин) | Удельная магнитная восприимчивость $K \cdot 10^{-7}$ , (см <sup>3</sup> /г) | Относительная погрешность измерения $\eta$ , (%) |
|---------------|--------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| До очистки    |                                      |                         |                                                                             |                                                  |
| 4             | 122,3                                | 15                      | 1,5                                                                         | 42                                               |
| 22            | 84                                   | 9                       | 1,45                                                                        | 43                                               |
| 904           | 23,5                                 | 10                      | 2,54                                                                        | 53                                               |
| 881           | 11                                   | 7                       | 3,56                                                                        | 54                                               |
| После очистки |                                      |                         |                                                                             |                                                  |
| 4             | 122,3                                | 15                      | 1,5                                                                         | 42                                               |
| 22            | 82,5                                 | 7,5                     | 1,1                                                                         | 44                                               |
| 904           | 23                                   | 5,5                     | 1,4                                                                         | 56                                               |
| 881           | 10,5                                 | 3                       | 1,6                                                                         | 60                                               |

родных алмазов К при магнитных полях В порядка  $9 \div 25$  кГс находятся в пределах  $(1 \div 2,6) \cdot 10^{-7} \text{ см}^3/\text{г}$ .

Для объяснения магнитных свойств природных алмазов было выдвинуто предположение, что они определяются наличием ферромагнитных микропримесей в алмазах. Для проверки этого предположения был проведен РФА-СИ анализ (рентгенофлюоресцентный анализ на синхротронном излучении) нескольких образцов алмазов, для которых изучены магнитные свойства.

Образцы алмазов, предварительно прошедшие поверхностную очистку в расплаве  $\text{KNO}_3$ , были упакованы в специальную кассету таким образом, чтобы исследуемая грань алмаза была обращена к пучку СИ непосредственно, без какой-либо разделительной пленки. Анализ выполнялся на станции элементного анализа на ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН.

Режим измерения: энергия первичного монохроматического излучения 23 Кэв, ток накопителя 80 мА.

Количественная обработка результатов измерений была проведена с использованием так называемого «метода внешнего стандарта». В качестве «внешнего стандартного образца» были использованы специально приготовленные композиции на основе порошка препарата «Борная кислота. ОСЧ» и стандартного 1-молярного раствора  $\text{HNO}_3$  с микропримесями КС-1. Борная кислота была выбрана в качестве основы ввиду близости по атомному номеру бора к углероду.

Результаты количественных измерений образцов алмазов приведены в таблице 3 (в мкг/г).

Из таблицы видно, что основной примесью, способной обеспечить магнитные свойства алмаза, является железо.

Обнаружение магнитных свойств природных алмазов любого качества, от весьма дефектных до ювелирных, и установление железа в качестве основной ферромагнитной примеси, способной обеспечить их магнитность, ставит вопрос о формах вхождения последнего в алмазную матрицу. Как известно, другой ферромагнетик – никель – может входить в структуру алмаза в замещающие позиции и характерен для алмазов ультраосновных парагенезисов [12,13], однако концентрация его невелика и структурная примесь никеля вряд ли может обеспечить магнитность алмазов. К тому же в алмазах эолюитовых парагенезисов никель отсутствует [13]. Есть сведения о возможности вхождения в структуру алмазов (на примере синтетических) ферромагнетика кобальта, однако в природных алмазах он не обнаружен. Следовательно, никель и кобальт

не могут обеспечить магнитность алмазов, по крайней мере внести в нее значительный вклад. К тому же среднее содержание никеля и кобальта (кларк) в мантии несопоставимо меньше, чем железа. Однако железо не входит в структуру алмаза. Если железу нет места в кристаллической структуре, и минеральные включения, содержащие железо, видимые в оптическом диапазоне увеличений, в изученных алмазах отсутствуют, остается предполагать наличие включений наномикронного размера. Такие включения существуют, но изучены пока слабо. Главная заслуга в их изучении принадлежит группе исследователей из ИГЕМ (Москва) (см., например, [14-18 и др.]), которые с помощью метода аналитической электронной микроскопии уже на протяжении многих лет изучают такого рода включения. К сожалению, получаемые ими порой достаточно экзотические результаты по диагностике включений вызывают у некоторых исследователей недоверие. Однако наши исследования подтверждают наличие включений такой размерности; что же касается их диагностики, работу в этом направлении следует продолжать без предвзятости. Имеются сведения о возможности вхождения железа в алмазную матрицу в форме кластеров [19]. Однако не обязательно железо должно присутствовать в алмазе в металлической форме; как показано выше, используемый нами магнит притягивает и железосодержащие силикаты, которых в алмазе может быть довольно много и они не будут видимы в силу своей прозрачности и малых размеров. Поэтому актуальной задачей является визуализация в той или иной форме данных включений.

Таким образом, магнитные свойства алмаза указывают на мезоуровень организации его кристаллического вещества, практически не изученный, находящийся между значительно лучше изученными микроуровнем (уровень атомарной организации алмаза) и макроуровнем (морфология кристаллов алмаза, макровключения). Исследования на этом уровне позволят вскрыть новый пласт генетической информации, как это демонстрирует в последнее время изучение наносистем (см., например, [20, 21]).

И измерение магнитных свойств алмазов, и исследования микропримесного состава алмазов с использованием синхротронного излучения являются новыми методами. Пока показана возможность их применения, но совершенно очевидно, что, затрагивая еще не изученные аспекты минералогии алмаза, эти методы обещают дать большую генетическую информацию.

Таблица 3

Микрокомпонентный состав алмазов

| № обр. | Fe        | Ni        | Cu        | Zn        | Sr         | Zr         | Nb         |
|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| 22     | 11,2±0,19 | 1,06±0,08 | 0,76±0,04 | 1,11±0,05 | 0,22±0,015 | 0,52±0,02  | 0,29±0,02  |
| 4      | 6,57±0,26 | 0,9±0,13  | 0,52±0,1  | 0,99±0,1  | 0,19±0,02  | 0,5±0,04   | 0,08±0,03  |
| 888    | 9,42±0,33 | 2,48±0,19 | 0,75±0,11 | 0,58±0,09 | 0,16±0,02  | 0,15±0,03  | 0,08±0,026 |
| 904    | 6,73±0,19 | 1,01±0,1  | 1,06±0,09 | 0,42±0,06 | 0,05±0,015 | 0,07±0,017 | 0,08±0,02  |

## Геохимические особенности алмазов

Сама по себе постановка вопроса об изучении геохимических особенностей алмазов выглядит парадоксально, учитывая стерильность этого минерала. Однако магнитные исследования и определение ферромагнетика в алмазах с помощью РФА-СИ показывают реальность наличия широкого спектра элементов в составе наномикронных включений в алмазах. Соответственно, реальным представляется наличие редкоземельных элементов в составе этих включений.

Изучение геохимических особенностей алмазов производилось нами совместно с И.В. Ащепковым на аппаратуре LAM ICP-MS (масс-спектрометрия на индуктивно-связанной плазме с использованием лазерной абляции минерального вещества). Использован масс-спектрометр «Finnigan Element» с лазерной приставкой UV Laser Probe 266 nm. Метод обладает достаточно высокой чувствительностью, чтобы измерять концентрации на уровне  $10^{-2}$ – $10^{-3}$  относительно хондрита C1, в отдельных удачных съемках уровень чувствительности достигал  $10^{-6}$  по некоторым элементам. Достоверность контролировалась по контрольным образцам с низкими содержаниями REE, включенным в серии исследуемых образцов. Однако надежность анализов для разных выборок различается, что сильно зависит от чувствительности прибора, которая часто меняется от одной съемки к другой.

Поскольку это уникальные исследования, до сих пор в России не проводившиеся, проанализированы не только архангельские алмазы V разновидности, но и для сравнения ряд алмазов из месторождений Якутии. Всего проанализирован 61 алмаз на 40 элементов из кимберлитов и россыпей Якутии и Архангельской алмазоносной провинции (рис. 9, 10).

Обнаружено, что в каждой трубке или кусте трубок, иногда даже кимберлитовом поле, алмазы обладают индивидуальными спектрами редких элементов. Несмотря на некоторые различия спектры редких элементов однотипных алмазов, к примеру мелких октаэдров из

одной трубки, часто конформны или близки. К примеру, три трубки Алакит-Мархинского поля – Айхал, Юбилейная и Комсомольская – содержат алмазы гранулометрического класса –2+1 мм с низкими содержаниями REE и других элементов, однако на нормализованных спектрах алмазы данных трубок отличаются очень высокими пиками Pb. Для алмазов трубки Айхал характерны высокие пики Pb, Ba, Sr и почти не выражены пики U. Минимумы по Y также проявлены слабо, однако заметны минимумы Eu, тем глубже, чем ниже общий уровень содержания редких элементов. Такое поведение характеризует процессы взаимодействия эклогитового материала с примесью сульфидной компоненты и, вероятно, слюдястых перидотитов, с карбонатитовыми расплавами. Самые высокие концентрации определены для алмаза с TRE эклогитового типа и Eu минимумом. Спектр REE алмаза, содержащего видимые включения хромита, резко обогащен LREE и имеет пик по Ta. Для трубок Комсомольская и Юбилейная пики Sr не типичны, однако для алмазов из первой проявлены U максимумы, а для второй – небольшие пики или минимумы Nb, Ta и минимумы по Y, что, вероятнее всего, связано с рутилом.

На порядок более высокие содержания TRE, обнаруженные у нескольких алмазов из трубок Комсомольская и Юбилейная имеют более фракционированный характер редких элементов и совпадают по характеру спектров с алмазами, кристаллизовавшимися из карбонатитовых расплавов [22, 23]. Последовательность спектров с разным содержанием редких элементов близка к линиям смещения карбонатитового и эклогитового или перидотитового субстратов.

Для алмазов из трубок Мирнинского района характерны низкие содержания в TRE с почти плоским спектром REE для перидотитового типа и более низкими в целом, но обогащенными LREE спектрами для эклогитового типа распределений REE. Для алмазов из трубки Интернациональная характерны сравнительно невысокие пики Ba, U, Ta, Pb, Sr, несколько приподнятые содержания Zr-Hf и глубокие минимумы по Y, тем глубже, чем выше содержания TRE в целом.

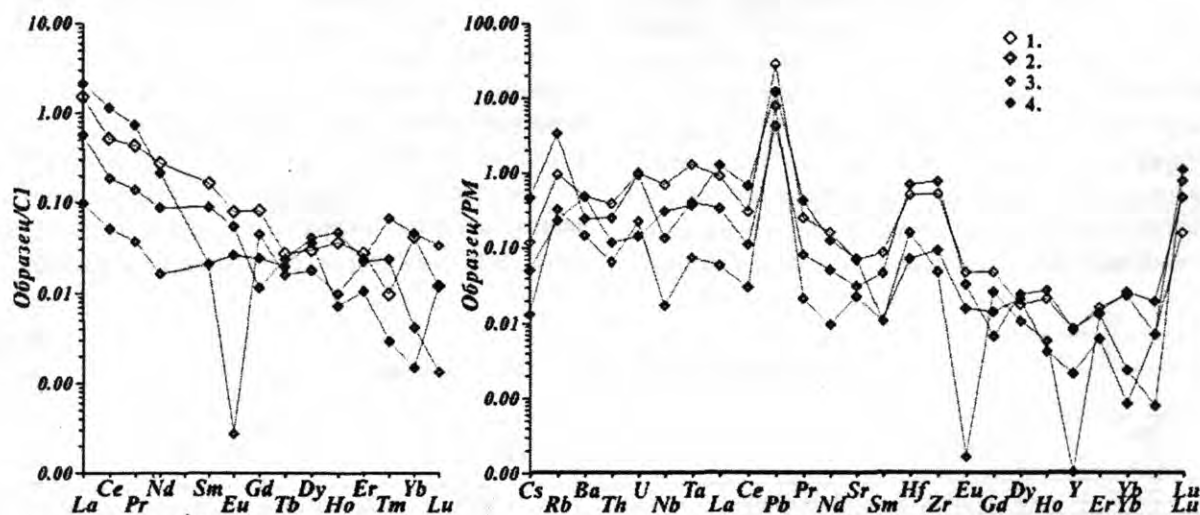


Рис. 9. Графики распределения REE и мультикомпонентные спектры для алмазов V разновидности из месторождения им. Ломоносова Архангельской алмазоносной провинции

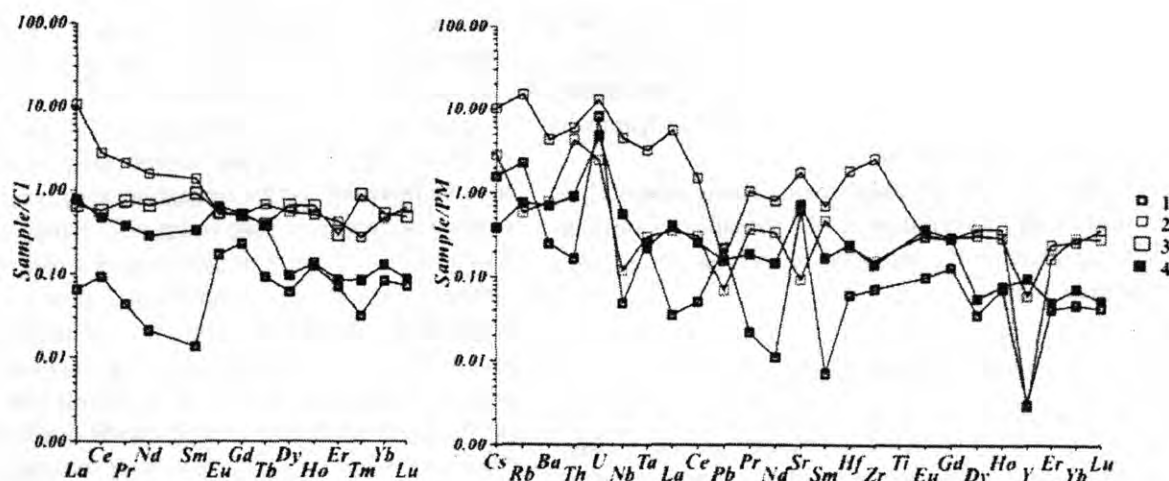


Рис. 10. Графики распределения REE и мультикомпонентные спектры для алмазов из россыпного месторождения Эбелях

Алмазы из трубки Мир также отличаются уплощенными спектрами REE и лишь некоторые имеют повышенные  $\text{La/Yb}_n$  отношения. Спектры с более высокими содержаниями редких элементов не имеют U пика, у них заметны повышенные концентрации Zr-Hf, Ta, LILE, неистощенный Th, в то время как для спектров с низкими концентрациями характерны U пики, минимумы Nb, Ta, Y и несколько пониженные концентрации литофильных элементов, что повторяет закономерности, установленные и для силикатных минералов этой трубки.

Алмазы с самыми высокими концентрациями редких элементов проявляют тенденции, характерные для континентального корового материала – обогащение LILE и Zr-Hf – Th – U, причем оно тем выше, чем выше уровень REE.

Самые высокие концентрации редких элементов в алмазах обнаруживают все признаки спектров силикатных минералов: один – как пироксенитовый клинопироксен, сформированный из расплава почти примитивного типа, другой характерен для пироксенов из кумулатов с высокими концентрациями MREE. Третий имеет вогнутый спектр REE и спайдердиаграмму TRE, которая весьма близка гранату, сформированному из расплава, резко обогащенного LREE.

Форма редкоземельных спектров для алмазов V разновидности из месторождения им. Ломоносова отличается большим наклоном, слегка вогнутая в средней части и с несколько большим наклоном левого крыла спектра, что характерно для плагиоклазосодержащих пород; наличие отрицательных Eu аномалий ( $\text{Eu}^* = 0,45-0,05$ ) подтверждает участие плагиоклаза в протолите, что говорит о субдукционном генезисе породы, причем наибольшие концентрации характерны для кристаллов с низкими содержаниями редких элементов. Наличие пиков  $\text{Pb}^* = 22-307$  и невысоких пиков U часто характерно для субдукционных процессов, однако отсутствие минимумов высокочarged элементов и даже некоторые пики Zr-Hf свидетельствуют скорее, совместно с Rb аномалиями, об участии зрелого

континентального вещества в формировании алмазов. Один из спектров с глубокими аномалиями Eu, Y имеет некоторые характеристики, типичные для экологитов.

Изотопия Pb также подразумевает участие зрелой протерозойской нижней континентальной коры в формировании алмазформирующей среды архангельских месторождений.

Для россыпных алмазов севера Якутии (россыпь реки Эбелях) характерны довольно высокий уровень содержания редких элементов с раздельным поведением LREE и HREE ветвей (см. рис. 10). Такие спектры встречаются у минералов некоторых перидотитовых массивов, где проявлены масштабные процессы просачивания расплавов, например Ронда по типу AFC. Как обычно, для спектров с низкими концентрациями типичны U и Sr максимумы (и в меньшей мере Pb), связанные с субдукционными процессами. Однако никаких Eu экстремумов не проявлено, что можно связать с прямой субдукцией океанической плиты без участия континентальной коры.

Как видим, интерпретация спектров REE показывает субдукционный характер и архангельских алмазов V разновидности, и эбеляхских V-VII разновидности, но они имеют разный протолит: архангельские связаны с субдукцией фрагмента континентальной коры, эбеляхские – океанической.

Для алмазов Урала с низкими концентрациями REE явно характерны субдукционные характеристики с положительными и отрицательными Eu аномалиями. Более высокие спектры с двумя ветвями и перегибом на Gd имеют признаки частичного плавления с селективным поведением граната и клинопироксена, либо эти спектры отражают S-образные спектры мелких гранатов Gr9-10, что менее вероятно. Для них также характерны глубокие минимумы Zr-Hf, а также Y. Заметны также небольшие пики Ta и Pb.

Подводя итог, нужно отметить, что за все время исследований алмазов не были установлены признаки вхождения редких земель в их структуру. Поэтому можно предположить, что носителями элементов, не свойст-

венных алмазной структуре, служат наномикронные минеральные включения. Об этом свидетельствуют и спектры TRE, весьма напоминающие спектры некоторых мантийных минералов. Данное предположение полностью согласуется с интерпретацией результатов магнитных измерений алмазов.

Анализы на ICP MS выполнены Николаевой И.В., Палесским С.В., Кучкиным А.М., разработка методики – Сапрыкин А.И., расчеты спектров проведены Ащепковым И.В.

## Газовая хроматография

Состав газов из алмазов изучался и ранее, однако не нашел широкого распространения для решения генетических задач из-за малого количества определений и вызывавших сомнение результатов, не позволявших дать их определенную генетическую интерпретацию. К настоящему времени методика определений достаточно отработана, учтены факторы, способные исказить результаты хроматографии.

Если в целом оценивать всю совокупность известных на сегодняшний день алмазов, то наиболее благоприятными для изучения первичных флюидов, связанных со средой кристаллизации алмазов, будут наиболее дефектные кристаллы с высокой внутренней пористостью, в частности алмазы кубического габитуса с фибриллярным ростом, поликристаллические сростки (борт, карбонадо), балласы и кристаллы с балласовой структурой (в частности V-VII разновидности по Ю.Л. Орлову), алмазы в оболочках (их высокодефектная оболочка). В более совершенных кристаллах флюиды во включениях, в частности наномикронного размера, могут, вероятно, присутствовать, однако в количествах ниже предела обнаружения на имеющейся аппаратуре.

Ранее нами изучены флюидные включения в алмазах V-VII разновидности из россыпей Анабарского района методом криометрии [3]. Криометрические исследования показали, что во всех флюидных включениях законсервирована высокоплотная жидкость, представленная углекислотой, азотом и углеводородами невыясненного состава.

Прямые исследования флюидного состава включений методом газовой хроматографии позволяют получить не только качественный, но и количественный состав летучих из минералов и горных пород и широко используются для решения петрологических задач. Хроматографический анализ газов из алмазов выполнялся на хроматографической установке для одновременного определения  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и других углеводородов, для которых экспериментально установлены следующие пределы обнаружения (в нанogramмах):  $\text{CO}_2$  – 0,06,  $\text{H}_2\text{O}$  – 0,4,  $\text{H}_2$  – 0,13,  $\text{N}_2$  – 0,03,  $\text{CO}$  – 0,5,  $\text{CH}_4$  – 0,03,  $\text{C}_2\text{H}_2$  – 0,05,  $\text{C}_2\text{H}_4 + \text{C}_2\text{H}_6$  – 0,04,  $\text{C}_3\text{H}_8$  – 0,05,  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  – 0,09,  $\text{C}_5\text{H}_{12}$  – 0,08,  $\text{C}_6\text{H}_{14}$  – 0,1. Установка собрана на базе трех серийных хроматографов ЛХМ-80, имеет оригинальные устройства для

термического и механического извлечения газов. Одно из них используется для исследования летучих из минералов и пород в процессе термической дегазации порошкообразных образцов и состоит из U-образной кварцевой кюветы и системы термической дегазации образцов. Другое предназначено для вскрытия флюидных включений путем механического разрушения образца в постоянном токе гелия при температуре 150 °С. Каждое из устройств подключается к рабочему каналу хроматографического комплекса. Газовая линия от устройств до хроматографических колонок термостатируется (70 °С). Перед проведением анализа U-образная кювета с образцом продувается гелием при температуре 90 °С. Устройство для вскрытия флюидных включений в минералах в снаряженном состоянии (с образцом) прогревается до 150 °С в токе гелия для удаления адсорбированных поверхностью воды и газов в течение времени, пока они не перестают фиксироваться хроматографом (проведенные ранее опытно-методические исследования показали оптимальность этой температуры для удаления адсорбированной воды). После прогрева алмаз дробится воздействием специального пробойника. При этом флюидная фаза практически мгновенно высвобождается из алмаза и, захваченная током гелия, поступает на хроматографический анализ. В первом хроматографе на колонке с Porapak-Q происходит отделение низкокипящих газов ( $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2 + \text{Ar}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ) от  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{C}_2 - \text{C}_n$ , при этом детектором теплопроводности определяются  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . На выходе хроматографа 1 поток газа-носителя раздваивается. Часть пробы поступает на хроматограф 2, где на колонке с цеолитами NaX смесь газов ( $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2 + \text{Ar}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}$ ) делится на составляющие ее компоненты и анализируется с помощью детектора теплопроводности. Другая часть пробы поступает на хроматограф 3, где пламенно-ионизационным детектором регистрируются углеводороды. Таким образом, данная установка позволяет из одного кристалла алмаза определить одновременно все доступные для измерения газы. Калибровка хроматографической установки, осуществленная путем введения известных количеств чистых газовых компонентов, позволила установить погрешность измерений:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{C}_2 - \text{C}_n$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$  – 2 отн. %,  $\text{H}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  – 10 отн. %

Описанным методом нами изучены кристаллы V-VII разновидности из россыпей Анабарского района (из той же коллекции, которая использовалась для криометрических исследований) и для сравнения алмазы V разновидности из месторождения им. Ломоносова. Следует отметить, что серия измерений флюидного состава включений в анабарских алмазах была проведена ранее А.А. Томиленко и данные измерения должны были подтвердить воспроизводимость результатов и добавить их в статистическом плане. Результаты исследований представлены в таблице 4.

Результаты исследований эбеляхских алмазов полностью подтвердили ранее полученные данные, что подтверждает надежность методики в смысле воспроизводимости результатов. Кроме того, видна отчетливая разница между двумя группами алмазов: эбелях-

Таблица 4

Результаты хроматографического анализа газов из алмазов V разновидности из месторождения им. Ломоносова (№ 11, 28, 31, 35, 37), россыпи реки Эбелях (Э-1, Э-2, Э-3, Э-6, Э-7, Э-12, Э-17, Э-23), алмазов кубического габитуса из кимберлитов (2217, 2219, 2223)

| № обр.                          | 11  | 28  | 31  | 35   | 37   | Э-1 | Э-2  | Э-3  | Э-7  | Э-23 | Э-17 | Э-6 | 2217 | 2219 | 2223 |
|---------------------------------|-----|-----|-----|------|------|-----|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|
| CO <sub>2</sub>                 | 0,0 | 2,0 | 2,0 | Сл.  | 0,0  | 4,0 | 6,0  | 0,5  | 6,0  | 2,0  | 8,0  | 4,0 | 3,0  | 5,0  | 3,0  |
| H <sub>2</sub> O                | 120 | 70  | 110 | 80   | 140  | 230 | 150  | 30   | 20   | 110  | 220  | 50  | 40,0 | 90   | 110  |
| H <sub>2</sub>                  | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0  | 0,0  | 0,0 | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0 | 0,0  | 0,0  | 0,0  |
| N <sub>2</sub>                  | Сл. | 0,0 | Сл. | 0,0  | 0,0  | 1,0 | 2,0  | 0,5  | 2,0  | 0,5  | 2,0  | 1,0 | 0,0  | 0,0  | 0,0  |
| CO                              | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0  | 0,0  | 0,0 | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0 | 0,0  | 0,0  | 0,0  |
| CH <sub>4</sub>                 | 0,1 | 1,0 | 0,1 | 0,06 | 0,04 | Сл. | 0,0  | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,0 | 0,2  | 0,3  | 0,1  |
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>   | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0  | 0,0  | 0,0 | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0 | 0,0  | 0,0  | 0,0  |
| C <sub>2</sub> H <sub>4,6</sub> | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0  | 0,0  | 0,0 | 0,01 | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0 | 0,0  | 0,0  | 0,0  |
| C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>   | 0,0 | 0,2 | 0,0 | 0,0  | 0,0  | 0,0 | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,1  | 0,0  | 0,0 | 0,0  | 0,0  | 0,0  |
| C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>  | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0  | 0,0  | 0,0 | 0,0  | 0,1  | 0,0  | 0,1  | 0,0  | 0,0 | 0,0  | 0,0  | 0,0  |
| C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>  | 0,0 | 0,5 | 0,2 | 0,5  | 0,2  | 0,4 | 0,3  | 0,0  | 0,2  | 0,0  | 0,0  | 0,0 | 0,0  | 0,1  | 0,0  |
| C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>  | 0,0 | Сл. | Сл. | 0,1  | 0,0  | 0,0 | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0 | 0,0  | 0,0  | 0,0  |

ские в сравнении с архангельскими содержат больше воды (она является основным компонентом флюида в обоих разновидностях алмазов); архангельские практически не содержат азот во включениях, хотя в качестве структурной примеси в форме А он присутствует в значительном количестве, тогда как в эбеляхских азот присутствует и во включениях, и в структурной примеси, также главным образом в форме А. Полученные данные свидетельствуют, наряду с другими признаками, о различиях среды кристаллизации сравниваемых групп алмазов. Видны также очевидные преимущества данного метода исследования флюидных включений в сравнении с криометрическим.

Исследование данных алмазов позволило выдвинуть важное предположение, которое в будущем следует проверить. Ранее нами было показано при изучении флюидных включений в алмазах V-VII разновидности из эбеляхской россыпи, что на стенках вакуолей с флюидом выделяется графит, благодаря чему эти вакуоли легко обнаружить в данных алмазах. В архангельских алмазах также много графитовых включений, но исследования пластинок в оптическом диапазоне увеличений не позволили выявить связанные с ними вакуоли. Тем не менее, при дроблении они выделяют примерно то же количество флюидов, что говорит об очень малых размерах вакуолей. Можно предположить, что и в том, и в другом случае графит своим появлением обязан флюиду и является индикатором наличия флюидных включений, независимо от их размера. Подчеркнем, что речь не идет о графитовых «розетках» вокруг минеральных включений, хотя и розетки различаются: вокруг силикатных включений они, как правило, чистые, бесцветные, тогда как вокруг сульфидных – черные (графит? возможно, за счет флюида, связанного с сульфидом?).

Как видим, метод хроматографии весьма информативен в генетическом плане, особенно для перечисленных выше разновидностей алмазов, отличающихся повышенной дефектностью. Кроме того, он технологичнее и экспресснее в сравнении с криометрией и

вполне может быть использован уже сейчас для решения как генетических задач, так и геологоразведочных, в частности для разделения визуально схожих групп алмазов при идентификации коренных источников.

Подводя итог результатам исследований, можно констатировать, что изученные алмазы V (более широко V-VII разновидности, с учетом сростков кристаллов V разновидности) месторождения им. Ломоносова Архангельской алмазоносной провинции имеют как черты сходства, так и различия с алмазами V-VII разновидности из россыпей севера Якутии, источники которых еще не установлены. Сходство касается главным образом физиографических особенностей (высокая дефектность, наличие массы хлопьевидных включений графита), которые и позволили отнести их к V разновидности по классификации Ю.Л. Орлова. Однако уже на физиографическом уровне отмечаются отличия от алмазов V-VII разновидности из северных россыпей Якутии, а комплекс дополнительных признаков (структурные особенности, характер примесных азотных центров, состав флюидов, геохимические особенности, изотопия углерода) однозначно показывают их различия. Нами предпринята попытка разобраться на генетическом уровне в признаках как сходства, так и различия этих алмазов.

## Обсуждение результатов исследований

Осмысление полученных результатов проведено нами на основе гипотезы о субдукционном генезисе некоторых специфических разновидностей алмазов в их общей природной популяции; эта гипотеза в общих чертах сформулирована нами ранее [4]. Поскольку это новый подход к проблеме генезиса алмазов, остановимся на общей характеристике субдукции и субдукционного генезиса алмазов.

По определению Ч.Б. Борукаева [24] субдукция представляет собой «подвиг литосферной плиты с океанской корой под край другой плиты на границе

их схождения, происходящая под воздействием силы, которая возникает вследствие твердофазного перехода (эклогитизации) в опускающейся плите и за счет силы трения в результате тепловых гравитационных течений в астеносфере под океаном» (рис. 11). Процессы субдукции активно реализуются на длительном промежутке истории Земли, начиная с позднего архея, когда в достаточной мере консолидировалась земная кора. Особенно активно субдукционные процессы происходили в протерозое, продолжают они и в настоящее время. В эволюционном плане следует отметить, что в протерозое углы субдукции (угол, под которым океаническая плита поддвигается под континент) были меньшими, чем теперь, т.к. мощность консолидированной литосферы была меньше, соответственно, погружающаяся плита могла далеко уходить под континент. С начала фанерозоя мощность литосферы значительно возросла, в связи с чем слэбы (погружающиеся блоки океанической коры) уходят в мантию под более крутыми углами. По оценкам А.С. Мониной, средние скорости наращивания океанической коры за счет осадкообразования составляют 3 см/1000 лет; при такой скорости осадкообразования за 4 млрд лет сформировалась бы кора из осадочных пород толщиной 120 км, тогда как вся кора, состоящая из осадочных, изверженных и метаморфических пород, имеет среднюю толщину 33 км [25]. Следовательно, должны быть эффективные механизмы превращения осадочных пород в метаморфические и магматические и ухода их в мантию, т.е. рециклирование вещества литосферы. Субдукция и является таким механизмом.

Процесс субдукции сопровождается тепловым возмущением мантийного клина с внешней стороны погружающейся плиты, магматизмом и метаморфизмом мантийного и корового материала. Здесь происходит транспорт корового вещества в мантию, что меняет вещественный состав и изотопные характеристики вещества мантийного клина и в целом литосферы. Кроме того, при погружении океанической коры в мантию выделя-

ется значительное количество летучих, несомых ею, что формирует здесь специфические условия для плавления, фазовых и реологических изменений вещества как мантии, так и субдуцированной океанической литосферы.

К настоящему времени остается мало сомнений в том, что алмазы в природе кристаллизуются в поле своей стабильности по температуре и давлению в среде ультраосновного или эклогитового состава [26, 27, 28]. Коровое вещество, содержащее помимо прочего большое количество углеродсодержащих элементов (морские карбонаты и органическое вещество, в протерозое развивавшееся главным образом на основе хемосинтеза), в зоне субдукции может погружаться на глубину 600-700 км, поэтому вполне вероятно, что коровый углерод в составе органического и карбонатного вещества мог быть реализован в алмаз при достижении соответствующих параметров. В силу значительной вещественной, структурной, термической неоднородности системы «слэб – мантия» в зоне субдукции активно происходят процессы, направленные на снижение этой неоднородности, поэтому физико-химические условия формирования алмазов здесь являются и необычными, и очень разнообразными, что неизбежно должно сказываться на форме, размерах, изотопии и других характеристиках алмазов. В частности, можно предполагать быструю кристаллизацию и высокую дефектность кристаллов при Р-Т параметрах вблизи линии равновесия «графит-алмаз», волокнистый рост, формирование кристаллов кубического габитуса, массовое зародышеобразование и рост большого количества мелких кристаллов, развитие моногенных (близких по типоморфным особенностям) комплексов алмазов в относительно локальных очагах алмазообразования и при этом неизбежные различия между очагами алмазообразования, преимущественно эклогитовый парагенезис формирующихся алмазов в соответствии с составом субдуцирующих пород коры и многие другие особенности, которые расцениваются у алмазов как аномальные.

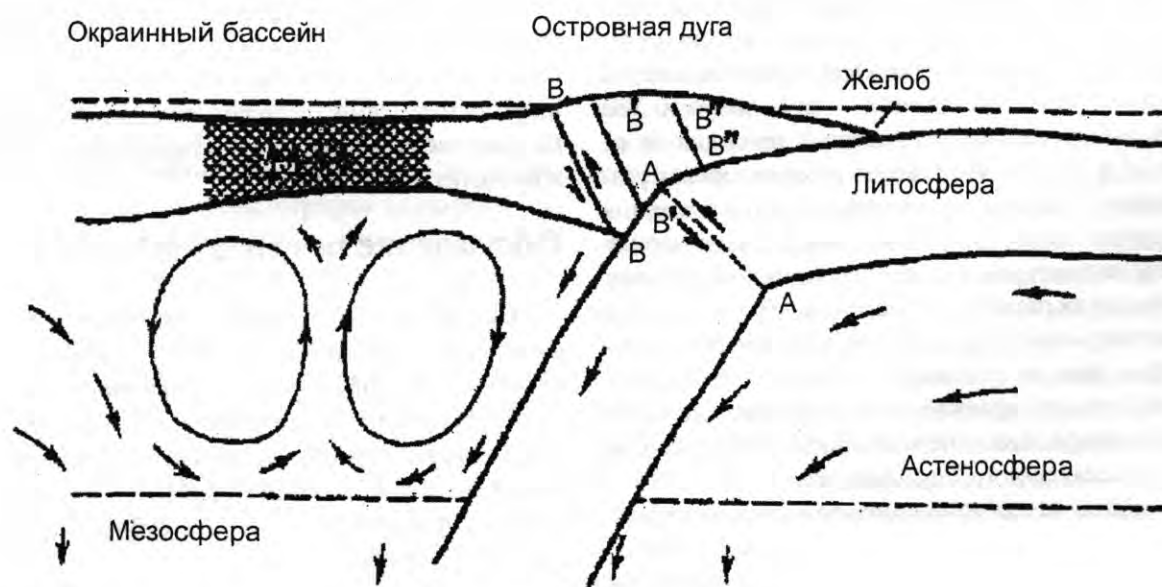


Рис. 11. Схема субдукции (по: Борукаев Ч.Б., 1999)

Важно отметить, что оторвавшийся слэб по завершении процесса субдукции становится элементом мантийной литосферы вместе с алмазами, сформированными в нем, поэтому его материал участвует в более поздних процессах кимберлитового и лампроитового магматизма.

Следующий актуальный аспект проблемы заключается в механизмах и путях доставки сохранившихся в литосфере алмазов на дневную поверхность.

Наиболее распространенным механизмом является вынос алмазов магмой. Если вынос идет с больших глубин, что характерно для литосферы кратонов, то это, как правило, магмы кимберлитового или лампроитового состава. Однако непонятно, какие условия обеспечивают глубинный магматизм в центральных частях кратонов с их мощной холодной литосферой. Для образования таких магм необходимы специфические условия, прежде всего появление под кратонами горячего мантийного вещества, способного инициировать плавление на глубине около 200 км. Между тем, субдукция рассматривается некоторыми исследователями как возможный спусковой механизм генерирования глубинных магм под кратонами [29]. В то же время субдукция в процессе развития создает благоприятные условия для генерирования магм в объеме слэба и мантийного клина и выноса ими «субдукционных» алмазов, если таковые уже сформированы. Толщина литосферы островных дуг и древних континентальных активных окраин почти вдвое меньше, чем у кратонов, поэтому формирование магматических очагов здесь может быть обусловлено простым декомпрессионным плавлением вещества с температурой 1100–1300 °С, поднявшегося на уровень глубин в 100 км. Такой подъем астеносферного вещества может обеспечить восходящий поток тепловой конвекции или прибывший сюда плюм [30, 31]. Очевидно, что эти магмы могут иметь весьма необычный для алмазоносных пород состав, содержать необычные алмазы и появляться в необычной структурно-тектонической обстановке. Возможно, этим объясняются находки алмазов, чаще всего мелких, в некоторых магматических породах складчатых областей, например в шонкинитах и лампрофирах на территории Западного и Южного Узбекистана, являющейся частью Южно-Тяньшаньской складчатой системы мезозойского возраста (диатрема Карашаха и др. [32]), в «углеродистых перидотитах» Восточного Саяна [33] и др. Алмазодержащая магма таких типов изливается в условиях тектонической и магматической активности, как правило, при орогенезе, поскольку области с утоненной до 100 км континентальной литосферой представляют собой обычно складчатые пояса, окружающие жесткие микроплиты. Эти пояса являются «литосферными» ловушками для «горячей мантии» и ослабленными в реологическом отношении участками континентов, поэтому неоднократно испытывают активизацию в процессе своей истории.

Другой путь перемещения глубинного алмазоносного материала на поверхность Земли возможно связан с тектоническими процессами. Этими процессами

можно объяснить появление таких алмазоносных объектов, как Кокчетавский массив [34–38], алмазоносные гранулиты Норвегии [39] и ряд других метаморфических комплексов с признаками ультравысоких давлений [40]. Иностранные авторы связывают появление сверхвысоких давлений и формирование алмазов с процессами субдукции, однако в отечественной литературе фигурируют и другие точки зрения, предполагающие коровый генезис алмазов [37, 38], что на наш взгляд мало вероятно. В некоторых объектах обнаружены параморфозы графита по алмазу, в частности в перидотитовых массивах Бени-Бушера в Марокко и Рондо в Испании [41, 42 и др.], представляющих собой фрагменты высокоалмазоносной мантии, тектонически внедренные в земную кору в процессе альпийского орогенеза [42], Максютковский комплекс эклогитовых гнейсов [40].

Одной из важнейших характеристик субдукционных алмазов является изотопный состав их углерода. Измеренные значения  $\delta^{13}\text{C}$  углерода алмазов в целом выходят далеко в обе стороны от значения  $\delta^{13}\text{C}$  мантийного резервуара (в «тяжелую» и «легкую» стороны,  $\delta^{13}\text{C}$  от +1,5 ‰ до –34,5 ‰) по отношению к изотопному составу углерода мантийного резервуара  $\delta^{13}\text{C} \sim 5$  ‰ [6] (рис. 12). При этом существует четкая связь изотопного состава углерода с парагенезисом алмазов: перидотитовые алмазы (Р-тип) имеют  $\delta^{13}\text{C}$  в рамках

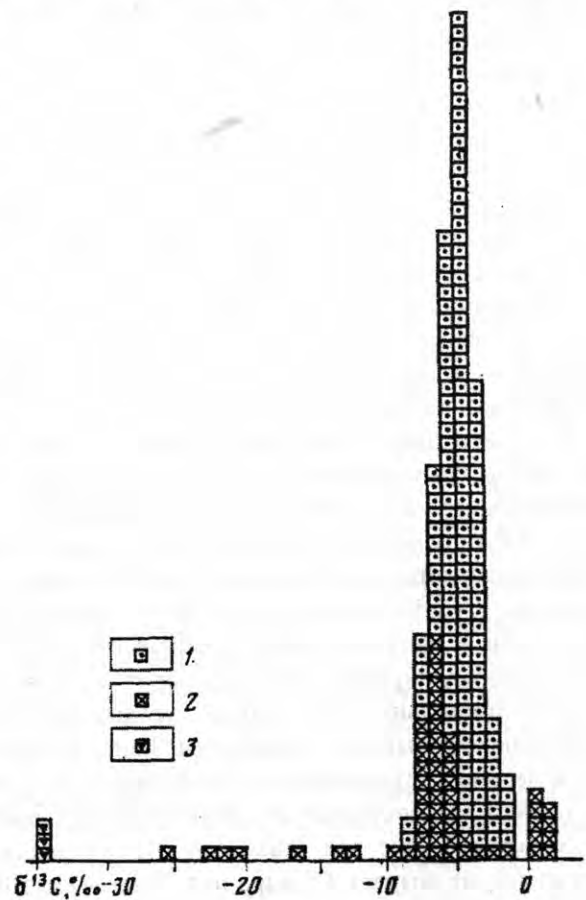


Рис. 12. Общий характер распределения изотопного состава углерода алмазов (по: Галимов, 1984): 1 – перидотитовые алмазы; 2 – эклогитовые алмазы; 3 – пироксенитовые алмазы

–2 ÷ –9 ‰, в среднем около –5 ‰, что соответствует мантийному резервуару углерода, тогда как эклогитовые (а также близкие к ним пироксенитовые) (Е-тип) охватывают весь указанный выше диапазон  $\delta^{13}\text{C}$ . Причины этого оживленно дискутируются. Вопрос упирается в источник углерода для формирования алмазов и в конечном счете, в зависимости от решения этого вопроса, в генезис алмазов.

Следует отметить, что существует несколько гипотез, объясняющих различия изотопии углерода алмазов. Так, Э.М. Галимов ищет пути объяснения этих различий через фракционирование изотопов в процессе кристаллизации алмазов за счет мантийного резервуара углерода ([43] и ряд других работ); но, к сожалению, экспериментальные исследования не дают убедительных подтверждений теоретических представлений и не показывают пути реализации наблюдаемого диапазона вариаций  $\delta^{13}\text{C}$ .

Другая гипотеза опирается на данные по изотопии углерода метеоритов (хондритов) и предполагает изначальную, со времени аккреции, гетерогенность углерода в мантии, вследствие чего с разных уровней мантии выносятся изотопически различные алмазы.

Весьма интересная и смелая гипотеза изложена в работе [44]; в соответствии с нею поток корового вещества, несомый меторными водами, в зонах рифтов на стадии растяжения может достигать глубин мантии и обогащать формирующиеся кимберлитовые расплавы широким комплексом коровых компонентов, в том числе углеродом с «коровыми» изотопными характеристиками.

Однако если рассматривать не одну лишь изотопию углерода, а весь комплекс связанных с ней минералогических особенностей алмазов, любая из этих гипотез не в состоянии объяснить этот комплекс в целом. В настоящее время наиболее популярна четвертая гипотеза, предполагающая источником углерода изотопически аномальных алмазов углерод блоков земной коры, субдуцированных в мантию. В рамках этой гипотезы можно, на наш взгляд, найти объяснение всем перечисленным аномальным минералогическим особенностям алмазов Е-типа.

В соответствии с этим мы разделяем все природное сообщество алмазов на два типа – мантийные и субдукционные. Мантийные относятся преимущественно к Р-типу, кристаллизовались в мантии за счет углерода мантийного резервуара и являются наиболее древними. Субдукционные кристаллизовались при погружении в мантию блоков океанической коры за счет корового углерода. Коровый углерод представляет собой ювенильный (мантийный) углерод, глубоко фракционированный на поверхности Земли на тяжелую и легкую составляющие в пропорции примерно 1:4, причем это соотношение сформировалось рано: оно характерно уже для отложений Исуа (Гренландия), имеющих возраст 3,6 млрд лет. Тяжелый изотоп накапливается преимущественно в карбонатах, легкий связан с органическим веществом. Процессы субдукции наиболее активно проявились преимущественно с конца архея и в протерозое, поэтому субдуцирующие

блоки океанической коры несли в мантию углерод, глубоко дифференцированный на тяжелую и легкую составляющие. По мнению МакКандлеса и Дж. Герни [45] источником легкой (органогенной) составляющей углерода океанической коры были хемосинтезирующие микроорганизмы типа современных гипертермофильных метаногенных археобактерий, связанных с гидротермальными флюидами, циркулирующими сквозь базальтовые породы главным образом в зонах срединно-океанических хребтов. В офиолитах Утокумпу (Финляндия) углистые сланцы с возрастом 2 млрд лет интерпретируются как продукты хемосинтезирующих организмов, развивавшихся вблизи гидротермальных систем и имеют значения  $\delta^{13}\text{C}$  от –15 до –30 ‰. Сланцы, подобные этим, являются наиболее очевидным источником углерода для «облегченных» алмазов. Пик продуктивности хемосинтезирующей биоты приходится на протерозой; в архее ее вклад в общее количество углерода был невелик, и по мнению авторов [45] алмазы в процессе субдукции могли образовываться лишь за счет собственного углерода базальтов MORB, имеющего мантийный изотопный состав. Поэтому эклогитовые алмазы архейского возраста имеют мантийный изотопный состав, а содержание их в эклогитах значительно ниже, чем в протерозойских эклогитах, в которых присутствует уже значительный вклад органогенного углерода.

Принятие субдукционной гипотезы позволяет объяснить не только изотопию алмазов Е-типа, но и другие характерные их особенности. Так, при погружении слэба кристаллизация алмазов может начаться при минимальных Р-Т параметрах, при которых стабильна алмазная решетка. Однако каковы они в действительности? Поставив этот вопрос, мы должны признать, что не знаем минимальные Р-Т параметры, при которых может начинаться кристаллизация алмазов в природе. Во всяком случае, эти параметры ниже тех, которые обычно указывают экспериментаторы (40–45 кбар, 1200 °С). При низких Р-Т параметрах можно предполагать высокую степень пересыщения в отношении углерода и массовое зародышеобразование, быстрый дефектный рост, в том числе фибриллярный, повышенное количество кубоидов. Однако кроме соответствующих Р-Т параметров для начала кристаллизации алмазов необходимо еще одно важное условие – резко восстановительный характер среды, позволяющий железу быть в свободном (металлическом) состоянии, поскольку его наличие обеспечивает высокую растворимость и диффузионную подвижность углерода, необходимые для кристаллизации алмаза. В противном случае кристаллизация алмазов может задержаться и начаться позднее, на более глубоких уровнях мантии при более высоких Р-Т параметрах. Соответственно, условия кристаллизации на удалении от линии равновесия графит-алмаз будут иными, качество кристаллизующихся алмазов будет более высоким, поэтому алмазы Е-типа имеют очень широкий диапазон как по размерам, так и по качеству и среди них могут быть высокосоввершенные алмазы ювелирного качества, как, например, в трубке

Премьер, где около 60 % алмазов относятся к Е-типу и имеют облегченный изотопный состав [4]. Роль металла в кристаллизации природных алмазов признается не всеми, т.к. макровключения металла как элемента среды кристаллизации редки в алмазах. Однако можно полагать, что быстрый дефектный рост алмазов способствует захвату и консервации подобных микровключений, и это находит подтверждение. Так, сотрудниками ИГЕМ проведены исследования нашего алмаза VII разновидности по Ю.Л. Орлову из россыпи реки Эбелях (крайне дефектный кристалл со структурой типа балласа, обладающий всеми атрибутами субдукционного алмаза) с использованием аналитической электронной микроскопии. По устному сообщению С.В. Титкова, одного из авторов исследования, в кристалле обнаружено огромное количество микровключений металлического железа. Наши исследования магнитных свойств алмазов также подтверждают это. По-видимому, необходимы специальные исследования на микроуровне для решения вопроса о роли металла в кристаллизации алмазов. Количество металла в материнской породе может быть небольшим, достаточно пленки в межзерновом пространстве для обеспечения диффузионной подвижности углерода; при повышении окислительного потенциала металл войдет в решетку силикатов и окислов и следы его свободного состояния пропадут, отчего обнаружение металла вызывает большие сложности.

Как отмечалось выше, субдукционные алмазы можно обнаружить в очень разнообразных породах. Субдуцирующий слэб несет с собой большое количество флюидов, в том числе морской воды (здесь мы полностью солидарны с авторами [44], и переводит мантию в возбужденное состояние, что вызывает активный магматизм. Сам слэб порождает выплавки преимущественно основного состава, однако с учетом влияния мантийного клина, находящегося над ним, состав магматических пород, в том числе несущих субдукционные алмазы, на поверхности Земли может быть очень разнообразным. На этом пути, на наш взгляд, необходимо искать причины алмазности некимберлитовых пород. Кроме того, такого типа алмазоносные породы могут находиться в различной структурно-тектонической обстановке, а не только на древних платформах с архейским периодом кратонизации.

Кимберлиты и лампроиты как наиболее глубинные породы дренируют не только перидотитовую алмазоносную мантию, но и все, что лежит выше, в том числе алмазоносное вещество слэбов, впаянных в мантию. Поэтому кимберлиты и лампроиты часто содержат и мантийные, и субдукционные алмазы, причем пропорции их очень различны. Так, среднепалеозойские кимберлиты Якутии содержат более 90 % перидотитовых алмазов, тогда как в кимберлитах Венесуэлы (район Гуаньямо) практически все алмазы эклогитовые [46]; эклогитовые алмазы преобладают в лампроитовой трубке Аргайл и в ряде других трубок.

Таким образом, проведенный анализ проблемы алмазности в ряду «алмаз (свойства алмаза) – ал-

мазоносная порода – геосфера – геодинамика» показывает возможность выделения двух типов алмазов – мантийных, кристаллизовавшихся в древней мантии за счет ювенильного углерода, и субдукционных, формировавшихся в процессе субдукционных событий за счет фракционированного углерода земной коры (табл. 5). Данный подход, по нашему мнению, является путем к упорядочению огромного количества не связанных пока между собой фактов и к более реалистичному пониманию проблемы алмазообразования и алмазности различных пород. Ниже представлены в табличной форме основные типовые характеристики алмазов обоих типов – «мантийных» и «субдукционных».

После обзора субдукционных алмазов и условий их генезиса вернемся к алмазам V-VII разновидности из кимберлитов месторождения Ломоносовское. Ряд типоморфных особенностей свидетельствуют в пользу их субдукционного генезиса: высокодефектная структура, указывающая на аномально быстрый рост; высокое содержание флюидной фазы и высокие внутренние напряжения, хрупкая релаксация которых привела к образованию огромного количества внутренних микротрещин и графитизации по их стенкам; формирование шрамов под действием магматического расплава как следствие напряженного состояния поверхности и блокового строения кристаллов. Данная группа признаков не соответствует условиям формирования «мантийных» алмазов. Однако «тяжелый» изотопный состав ( $\delta^{13}\text{C}$  около  $-4,5\%$ ) хотя и не противоречит напрямую субдукционному генезису алмазов, но требует вариантов объяснения. Все четыре проанализированных алмаза показали практически одинаковый изотопный состав, что свидетельствует об однородности резервуара углерода, из которого кристаллизовались алмазы. Вряд ли это ювенильный углерод, т.к. он рассеян и трудно представить себе условия его высокой концентрации и пересыщения, которое показывают алмазы своими признаками аномально быстрого дефектного роста. К тому же изотопный состав алмазов смещен в тяжелую область в сравнении со средним составом ювенильного углерода. Мы полагаем, что данный изотопный состав можно интерпретировать как результат частичного рециклирования (обратного смешения «тяжелого» углерода морских карбонатов ( $\delta^{13}\text{C} \approx 0\%$ ) с «легким» органическим углеродом). Парагенезис изученных алмазов пока надежно определить не удалось, т.к. минеральные включения в них не изучены, а по изотопному составу можно лишь констатировать, что он не противоречит Е-типу алмазов. Нами в двух алмазах V разновидности обнаружены включения оранжевого цвета, возможно граната или рутила, однако при попытке вывести их на поверхность путем шлифовки алмазов одно включение выпало и было утеряно, второе не удалось вывести на поверхность. Однако алогичное включение в алмазе VII разновидности из россыпи реки Эбелях (север Якутии) было выведено шлифовкой на поверхность и проанализировано; оно оказалось рутилом с незначительной примесью железа и глинозема, которые свидетельствуют об эклогитовой принадлежности

## Характеристические особенности основных генетических типов алмазов

| Изотопный состав углерода                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Мантийные                                                                           | Субдукционные                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| $\delta^{13}\text{C} -2\text{‰} \div -9\text{‰}$                                    | $-2\text{‰} < \delta^{13}\text{C} < -9\text{‰}$                                                                                                                                                                                                                               |
| Парагенезисы                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Ультраосновные, проблематично эклогитовые                                           | Эклогитовые, пироксенитовые                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Кристаллическая структура, механизм роста                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Преимущественно высокое качество, преимущественно послойный рост                    | Характерна дефектная структура, волокнистый, радиально-лучистый рост, микро- мелкозернистые агрегаты; могут быть высококачественные алмазы                                                                                                                                    |
| Размер кристаллов                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Преимущественно макрокристаллы (крупнее 0,25 мм)                                    | Характерны микрокристаллы (менее 0,25 мм) наряду с макрокристаллами                                                                                                                                                                                                           |
| Содержание алмазов в породе                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Чаще единичные кристаллы                                                            | Характерны многочисленные кристаллы, иногда породообразующие                                                                                                                                                                                                                  |
| Морфология алмазов                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Преимущественно ламинарные кристаллы ряда «октаэдр-переходная форма-ромбододекаэдр» | Весь известный морфологический спектр (ламинарные кристаллы ряда «октаэдр-переходная форма-ромбододекаэдр», кубоиды, комбинация куб-октаэдр-ромбододекаэдр, скрытоламинарные октаэдронды и додекаэдронды, экзотические разновидности (баллас, карбонадо, разновидности борта) |
| Характеристическая структурная примесь Ni                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Присутствует в различных формах (S2, S3, 523 нм и др.)                              | Не установлена                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Возраст алмазов                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Преимущественно архейский                                                           | Преимущественно моложе архейского, чаще протерозойский                                                                                                                                                                                                                        |
| Вмещающие породы                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Кимберлиты, лампроиты                                                               | Кимберлиты, лампроиты, разнообразные магматические породы основного и ультраосновного состава; метаморфические породы                                                                                                                                                         |
| Структурно-тектоническая позиция коренных источников алмазов                        |                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Преимущественно подчиняется правилу Клиффорда                                       | В разнообразной позиции, в т.ч. в протерозойских и фанерозойских складчатых системах                                                                                                                                                                                          |

данного алмаза. Важнейшие свидетельства субдукционного происхождения алмазов V разновидности получены из геохимических данных, показавших коровый протолит алмазов.

Таким образом, по комплексу признаков можно предполагать, что алмазы V-VII разновидности из месторождения Лосоновское имеют субдукционный генезис. По всей видимости, под кимберлитовым полем имеется впаянный в литосферу слэб с такими алмазами, которые были захвачены формирующимися кимберлитами. Аналогичным образом попадают субдукционные алмазы в трубки Мир, Удачная, Премьер, Аргайл и многие другие.

Нами была предпринята попытка найти дополнительные признаки, указывающие на их субдукционный генезис.

Одним из таких признаков служит наличие большого количества ксенолитов эклогитов группы С в трубке Гриба, которые могут интерпретироваться как фрагменты древней океанической коры, поддвинутой под материковую плиту [47].

Кроме того, кимберлиты Золотицкого поля (месторождение им. Ломоносова) обладают специфическими геохимическими особенностями, которые объясняются выплавлением расплавов из литосферы, предварительно метасоматизированной под влиянием флюидов, поступивших из зоны субдукции [48].

Таким образом, имеются петрологические и геохимические признаки существования субдуктированного блока земной коры под Архангельской алмазоносной провинцией.

Теперь сопоставим архангельские алмазы «V-VII» разновидности с алмазами этой разновидности из северных россыпей Якутии. И те, и другие показывают признаки быстрого роста в условиях высокого переизбытка по углероду. Но архангельские алмазы относительно лучше окристаллизованы, более «монокристаллически» и в состоянии формировать двойники по шпинелевому закону, что в принципе запрещено для якутских, имеющих структуру балласа. Налицо резкая разница в изотопном составе углерода; если легкий изотопный состав якутских алмазов однозначно указывает на органический углерод, то изотопный состав ар-

хангельских алмазов интерпретируется сложнее, хотя и вписывается в коровый углерод. Мы предполагаем, что якутские алмазы происходят из докембрийских источников неизвестного, возможно базитового, состава, и их возраст видимо близок к субдукционному событию или совпадает с ним, тогда как архангельские алмазы длительное время были «законсервированы» в оторвавшемся и впаянном в литосферу слэбе и были вынесены на поверхность кимберлитом лишь в среднем палеозое. По характеру и количеству микропримесей, определенных методом РФА СИ, архангельские и якутские алмазы данного типа существенно не различаются, что является, вероятно, отражением особенностей их генезиса.

Таким образом, алмазы V-VII разновидности из якутских россыпей и архангельских кимберлитов имеют, вероятно, один и тот же генезис – субдукционный, но различаются по типоморфным особенностям, что естественно, т.к. они кристаллизовались в разное время, в разных местах, в связи с разными субдукционными событиями.

Остается принципиально важный вопрос – можно ли характеризовать архангельские алмазы как алмазы V-VII разновидности. Если следовать очень краткой характеристике разновидностей алмазов, приведенной в «Минералогии алмаза» Ю.Л. Орлова [1], то архангельские алмазы вполне подходят под описание V-VII разновидности. Но, как мы видим, эти алмазы отличаются от алмазов V-VII разновидности из россыпей севера Якутии, кристаллизовались в другом месте, возможно в другое время, в связи с другим субдукционным событием. В таком случае, каков содержательный смысл использования данной номенклатуры? Для выяснения этого следует обратиться к истокам классификации Ю.Л. Орлова.

В монографии Ю.Л. Орлова «Морфология алмаза» [49] еще отсутствуют какие-либо попытки классификации алмазов. Отсутствуют и описания некоторых их экзотических разновидностей, в том числе позднее выделенных V и VII. Классификация в полном виде впервые была опубликована в 1965 г. в сборнике «Новые данные о минералах СССР» (Труды минералогического музея им. А.Е. Ферсмана) [50], причем в следующей статье этого сборника (в соавторстве с Б.И. Прокопчуком) [51] эта классификация уже применена на практике для характеристики коллекции из 7000 кристаллов алмазов из россыпи реки Моторчуна на севере Якутской алмазоносной провинции.

Касаясь своей классификации, Ю.Л. Орлов отмечает, что «...среди алмазов встречаются визуально хорошо различимые между собой разновидности кристаллов, которые отличаются формой роста, внутренним строением (текстурой) и характером примесных центров, обуславливающих определенный комплекс свойств» [1, 52]. Поэтому можно полагать, что толчком к разработке классификации послужило изучение алмазов реки Моторчуна, среди которых он увидел «визуально хорошо различимые разновидности», в частности II, V, VII. Добавление к ним разновидностей алмазов, характерных для кимберлитов, а также извест-

ных в других регионах (карбонадо, балласы) позволило ему практически исчерпать известное на то время разнообразие алмазов. Позднее была добавлена еще лишь одна разновидность – XI, обнаруженная в 1969 г. в россыпях севера Якутии и названная «якутитом». Эта разновидность надежно идентифицируется с алмазами Попигайской астроблемы и представляет собой продукты дальнего закратерного выброса в момент импактного события [53].

Как видно из характеристики разновидностей [1, 50, 52], в основу их выделения положены главным образом визуальные признаки. Распространенность разновидностей описана крайне скупо, не указан материал, на основе которого они выделены. Фактически для разделения полигенных ассоциаций алмазов на разновидности требуется огромный опыт работы, на основе которого минералог интуитивно начинает различать однородные группы алмазов. Опираясь лишь на описания по Ю.Л. Орлову выделить их весьма затруднительно. Кроме того, некоторые разновидности являются полигенными; в первую очередь это касается I разновидности, в которую входят алмазы и эклогитовых, и ультраосновных парагенезисов, имеющие широкие вариации изотопного состава углерода, различающиеся по концентрации и набору примесных центров и т.д.

Учитывая уровень знаний 1965 года об алмазах, можно допустить, что Ю.Л. Орлов предполагал глобальную распространенность каждой разновидности алмаза, т.е. универсальность своей классификации. К сожалению, он сам стал жертвой этого заблуждения. Выделив алмазы V-VII разновидности в реке Моторчуна, он по какой-то причине для исследования изотопного состава алмаза V разновидности взял кристалл из Уральских россыпей, вероятно похожий на описанные им для якутских россыпей, и в результате получил тяжелый изотопный состав углерода [54], тогда как якутские алмазы V разновидности имеют легкий состав. На сегодняшний день ясно, что разновидности алмазов не имеют глобального распространения. Карбонадо (X разновидность) распространены в Бразилии и Центральной Африке, которые в рамках Гондваны занимали единую площадь, поэтому их можно считать эндемичными. Всякие упоминания о единичных находках карбонадо где бы то ни было требуют серьезного обоснования их идентичности типичным карбонадо, что обычно не делается. Якутиты (XI разновидность) своим происхождением связаны с Попигайским импактным событием (импактные алмазы) и разбросаны в радиусе примерно 500 км вокруг него [53]; импактные алмазы других астроблем имеют другие свойства, например, алмазы Карской астроблемы, сформировавшиеся по пермским углям, достаточно мягкие и способны окатываться, поэтому это другие алмазы, назвать их XI разновидностью – значит идентифицировать с попигайскими и впасть в заблуждение. Алмазы V-VII разновидности, выделенные Ю.Л. Орловым в россыпи реки Моторчуна, имеются и в других северных россыпях, но в целом характерны только для севера Якутской алмазоносной провинции и их полные аналоги

больше нигде не встречены; мы обосновываем их эндемичный характер [4]. Таким образом, в классификации Ю.Л. Орлова «выловлены» некоторые специфические разновидности алмазов, имеющие эндемичный характер, и поскольку классификация создана главным образом на якутском материале, целесообразно использовать ее именно в Якутии; и действительно, применение данной классификации в Якутии дает наилучшие результаты. Попытки же экстраполировать эту классификацию за пределы Якутии приводят к противоречиям типа того, с которым мы столкнулись в данном случае, когда по одним признакам алмазы соответствуют V-VII разновидности, по другим нет, и совершенно неясно, можно ли называть архангельские алмазы V-VII разновидностью. Учитывая специфику субдукционного алмазогенеза, можно допустить, что подобные ситуации будут возникать систематически при применении классификации Ю.Л. Орлова. Поэтому, на наш взгляд, нужно разрабатывать новую систематику алмазов, основанную на выделении двух основных генетических типов алмазов – мантийных и субдукционных с детализацией внутри типов. Это будет действительно генетический подход к классификации алмазов.

Если принять локальность применимости классификации Ю.Л. Орлова, то вопрос, относятся ли изученные алмазы из месторождения Ломоносовское к V-VII разновидности, отпадает сам собой. Их можно охарактеризовать как субдукционные, кристаллизовавшиеся при низких P-T параметрах, чем они схожи с якутскими V-VII разновидности, но это другие алмазы и также, вероятно эндемичные, поскольку субдукционные процессы создают огромное разнообразие локальных обстановок кристаллизации алмазов, которые вряд ли повторяются в деталях в разных регионах. На наш взгляд, для каждого месторождения целесообразно выделять основные генетические типы алмазов, по возможности разделяя их на мантийные и субдукционные, с детализацией по условиям кристаллизации и посткристаллизационным изменениям.

## Заключение

Как видно из данной работы, субдукционная гипотеза алмазообразования и деление алмазов на «мантийные» и «субдукционные» позволяет непротиворечиво объяснить многие известные факты из алмазной геологии и минералогии, затянутые пока в тугой узел противоречий. Она может служить основой для новой номенклатуры алмазов, действительно основанной на генетическом подходе. Предложенная концептуальная матрица интересна не только для алмазной геологии и минералогии, но и для геодинамики, поскольку алмаз как крайне консервативная структура в комплексе своих свойств (изотопия, геохимические особенности, парагенезис и др.) несет не искаженную постумными процессами информацию о древних субдукционных событиях.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ, гранты 03-05-65083 и 04-05-64948.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Орлов, Ю.Л. Минералогия алмаза / Ю.Л. Орлов. – М. : Наука, 1973. – С. 223.
2. Зинчук, Н.Н. Об основных типоморфных особенностях алмазов в краевых частях Восточно-Европейской и Сибирской платформ / Н.Н. Зинчук, В.И. Коптиль, А.И. Махин // Изв. вуз, геол. и разведка. – 2001. – № 4. – С. 22-35.
3. Афанасьев, В.П. Минералогия и некоторые вопросы генезиса алмазов V и VII разновидностей (по классификации Ю.Л. Орлова) / В.П. Афанасьев, А.П. Елисеев, В.А. Надолинный и др. // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Геол. – 2000. – Вып. 10(5). – С. 79-97.
4. Афанасьев, В.П. Проблема докембрийской алмазоносности Сибирской платформы / В.П. Афанасьев, Н.Н. Зинчук, С.А. Тычков // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. – 2002. – № 1. – С. 19-35.
5. Rylov, G.M., Yefimova E.S., Sobolev N.V., et al. // NIMA. – 2000. – P.182.
6. Галимов, Э.М. Вариации изотопного состава алмазов и связь их с условиями алмазообразования / Э.М. Галимов // Геохимия. – 1984. – № 8. – С. 1091-1118.
7. Коптиль, В.И. Типоморфизм алмазов северо-востока Сибирской платформы в связи с проблемой прогнозирования и поисков алмазных месторождений : автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук / В.И. Коптиль. – Новосибирск : ОИГГиМ СО РАН, 1994. – 34 с.
8. Физические свойства алмаза : справочник / ред. Н.В. Новиков. – Киев : Наукова Думка, 1987.
9. Физические величины : справочник / ред. И.С. Григорьев, Е.З. Мейлихов. – М. : Энергоатомиздат, 1991.
10. Физический энциклопедический словарь / ред. Б.А. Введенский. – Т. 1. – М. : Советская энциклопедия, 1960.
11. Магнитные измерения / ред. В.И. Чечерников. – М. : Изд-во Моск. гос. ун-та, 1963.
12. Yeliseyev, A.P. New paramagnetic centres, including nickel, in diamonds / A.P. Yeliseyev, V.A. Nadolinny // Doklady RAS (Reports of Russian Acad. Sci.). – V. 326, № 3 (1992). – P. 524. (in Russian).
13. Надолинный, В.А. О возможности диагностики парагенезиса алмазов по оптическим характеристикам / В.А. Надолинный, В.П. Афанасьев, Н.П. Похилenko и др. // Докл. РАН. – 1995. – Т. 341, № 4. – С. 516-518.
14. Горшков, А.И. Первые находки самородных металлов Cr, Ni и  $\alpha$ -Fe в карбонадо из алмазных месторождений Якутии / А.И. Горшков, С.В. Титков, А.В. Сивцов и др. // Геохимия. – 1995. – № 4. – С. 588-591.
15. Горшков, А.И. Включения самородных металлов и других минеральных фаз в карбонадо из области Убанги (Центральная Африка) / А.И. Горшков, С.В. Титков, А.М. Плешаков и др. // Геология рудных месторождений. – 1996. – Т. 38, № 2. – С. 131-136.
16. Горшков, А.И. Особенности состава минеральных включений и образования поликристаллических агрегатов алмаза – борта – из кимберлитовой трубки Шенли (Китай) / А.И. Горшков, Я.Н. Бао, С.В. Титков и др. // Геохимия. – 2000. – № 7. – С. 769-776.
17. Горшков, А.И. Включения самородных металлов и других минеральных фаз в алмазах из кимберлитовой трубки № 50 провинции Ляонин (Китай) / А.И. Горшков, Я.Н. Бао, Л.В. Бершов и др. // Геохимия. – 1997. – № 8. – С. 794-804.
18. Горшков, А.И. Новые данные по особенностям минеральных включений в кристаллах алмаза кубического габитуса / А.И. Горшков, С.В. Титков, Л.О. Магазина и др. //

Новые идеи в науках о Земле : тез. докл. конф. – М. : МГТА, 2001. – С. 20.

19. Meng, Y. Fe and Ni impurities in synthetic diamond / Y. Meng, M. Newville, S. Sutton, et al. // *Am. Miner.* – V. 88. – 2003. – P. 1555-1559.

20. Микро- и нанодисперсные структуры минерального вещества / ред. Н.П. Юшкин, В.И. Ракин. – Сыктывкар : Геопринт, 1999. – 212 с.

21. Ультрадисперсное состояние минерального вещества / ред. Н.П. Юшкин, В.И. Ракин. – Сыктывкар : Геопринт, 2000. – 232 с.

22. Rege, S. Trace element analysis of diamond by LAM ICP MS / S. Rege, R.M. Davies, W.L. Griffin, et al. // Preliminary results. 8 th International Kimberlite Conference, 2002. – Long Abstract. – FLA 0355.

23. Dobosi, G. Trace element abundances in garnets and clinopyroxenes from diamondites – a signature of carbonatitic fluids / G. Dobosi, G. Kurat // *Mineralogy and Petrology.* – V. 76, № 1-2. – 2003. – P. 21-38.

24. Борукаев, Ч.Б. Словарь-справочник по современной тектонической терминологии / Ч.Б. Борукаев. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 1999. – 70 с.

25. Монин, А.С. История Земли / А.С. Монин. – Ленинград : Наука, 1977. – 228 с.

26. Boyd, F.R. Evidence for a 150-200 km thick Archean lithosphere from diamond inclusion thermobarometry / F.R. Boyd, J.J. Gurney, S.H. Richardson // *Nature.* – 1985. – 315. – P. 387-389.

27. Haggerty, S.E. Diamond genesis in a multiply constrained model / S.E. Haggerty // *Nature*, 1986. – 320. – P. 34-38.

28. Ringwood, A.E. Origin of kimberlites and relates magmas / A.E. Ringwood, S.E. Kesson, W. Hibberson, et al. // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 1992. – 113. – P. 521-538.

29. McCandless. Kimberlites: mantle expressions of deep-seated subduction / McCandless // *Proceedings of the VIIth Int. Kimberlite Conf.* – Cape Town, 1999. – P. 545-549.

30. Тычков, С.А. Взаимодействие плюма и тепловой конвекции в верхней мантии под континентом / С.А. Тычков, Е.В. Рычкова, А.Н. Василевский // *Геология и геофизика.* – 1998. – Т. 37, № 4. – С. 419-431.

31. Тычков, С.А. Тепловая конвекция в верхней мантии Земли под литосферой переменной мощности / С.А. Тычков, Е.В. Рычкова, А.Н. Василевский // *Физика Земли.* – 1999. – № 9. – С. 38-51.

32. Головкин, А.В. Алмазоносность шонкинитовых и лампрофировых трубок взрыва Узбекистана / А.В. Головкин, Н.А. Ахмедов, Н.Е. Яковенко // Тез. докл. Всероссийский Съезд геологов. – СПб, 2000. – С. 249-250.

33. Куликов, Ю.И. Алмазоносность Восточного Саяна / Ю.И. Куликов // Методы прогноза и поисков алмазов на юге Восточной Сибири : тез. докл. – Иркутск, 1990. – С. 17-18.

34. Соболев, Н.В. Включения минералов углерода в гранатах метаморфических пород / Н.В. Соболев, В.С. Шацкий // *Геол. и геофиз.* – 1987. – № 7. – С. 77-80.

35. Шацкий, В.С. Некоторые аспекты генезиса алмазов в метаморфических породах / В.С. Шацкий, Н.В. Соболев // *Докл. АН*, 1993. – Т. 331, № 2. – С. 217-219.

36. Shatsky, V.S. Diamond-bearing metamorphic rocks of the Kokchetav massif (Northern Kazakhstan) / V.S. Shatsky, N.V. Sobolev // Coleman R.G. and Wang X. Eds., «Ultrahigh-pressure metamorphism». – New-York : Cambridge University Press, 1995. – P. – 437-455.

37. Екимова, Т.Е. Условия образования алмазного месторождения Кумдыколь (Северный Казахстан) / Т.Е. Екимова, Л.Д. Лаврова, Е.Д. Надеждина и др. // *Геол. рудных месторожд.* – 1994. – Т. 36, № 5. – С. 455-465.

38. Воробьев, Е.И. Об экссоллюционной природе алмазов в метаморфических породах Кокчетавского массива / Е.И. Воробьев // *Отч. геология.* – 2001. – № 2. – С. 52-56.

39. Larsen R.B., Eide E.A., Burke E.A.J. Evolution of metamorphic volatiles during exhumation of microdiamond-bearing granulites in the Western Gneiss Region, Norway. – *Contrib. Mineral. Petrol.* – 1998. – 133. – P. 106-121.

40. Ernst, W.G. Comparative petroctectonic study of five Eurasian ultrahigh- pressure metamorphic complexes / W.G. Ernst, J.G. Lion, R.G. Coleman // *Int. Geol. Rev.* – 1995. – 37. – P. 191-211.

41. Слодкевич, В.В. Параморфозы графита по алмазу / В.В. Слодкевич. Записки Всесоюз. Минер. об-ва. – 1982. – Ч. CXI, вып. 1. – С. 13-32.

42. Pearson, D.G. Graphitized diamonds from a peridotite massif in Morocco and implications for anomalous diamond okkurences / D.G. Pearson, G.R. Davies, P.H. Nixon, et al. // *Nature.* – 1989. – 338. – № 2. – P. 60-62.

43. Галимов, Э.М. Зональность изотопного состава углерода графита в расслоенном магматическом плутоне / Э.М. Галимов, В.В. Слодкевич // *Геохимия.* – 1988. – № 8. – С. 1178-1186.

44. Зинчук, Н.Н. Тектоника и алмазоносный магматизм / Н.Н. Зинчук, А.Д. Савко, Л.Т. Шевырев. – Воронеж : ВГУ, 2004. – 282 с.

45. МакКандлес, Т.Е. Алмазоносные эклогиты: сравнение с углистыми хондритами, углистыми сланцами и базальтами MORB, содержащими органогенный углерод / Т.Е. МакКандлес, Дж.Дж. Герни // *Геология и геофизика.* – 1997. – Т. 38, № 2. – С. 371-381.

46. Sobolev, N.V. Unusual upper mantle beneath Guianamo, Guyana shield, Venezuela: evidence from diamond inclusions / N.V. Sobolev, E.S. Yefimova, D.M. DeR. Channer, et al. // *Geology.* – November 1998. – 26. – № 11. – P. 971-974.

47. Саблукова, Л.И. Петрография и химия минералов мантийных ксенолитов и ксенокристов из кимберлитов трубки им. Гриба, Зимний Берег, Россия / Л.И. Саблукова, С.М. Саблуков, Е.М. Веричев и др. // Плюмы и проблема глубинных источников щелочного магматизма : тр. III Междунар. семинара. – Иркутск-Хабаровск, 2003. – С. 36.

48. Богатилов, О.А. Источники, геодинамическая обстановка образования и перспективы алмазоносности кимберлитов северной окраины Русской плиты: Sr-Nd изотопия и ICP-MS геохимия / О.А. Богатилов, В.А. Кононова, В.А. Первов и др. // *Петрология.* – 2001. – Т. 9, № 3. – С. 227-241.

49. Орлов, Ю.Л. Морфология алмаза / Ю.Л. Орлов. – Изд-во АН СССР. – 1963. – 236 с.

50. Орлов, Ю.Л. Разновидности кристаллов и поликристаллических сростков алмазов / Ю.Л. Орлов // Новые данные о минералах СССР : тр. Минер. музея им. А.Е. Ферсмана. – 1965. – Вып. 16. – С. 141-154.

51. Орлов, Ю.Л. Алмазы из русловых отложений реки Моторчун (Приленская алмазоносная область) / Ю.Л. Орлов, Б.И. Прокопчук // Новые данные о минералах СССР : тр. Минер. музея им. А.Е. Ферсмана. – 1965. – Вып. 16. – С. 155-165.

52. Орлов, Ю.Л. Минералогия алмаза / Ю.Л. Орлов. – 2-е изд. – М. : Наука, 1984. – 264 с.

53. Вишневский, С.А. Импактные алмазы – их особенности, происхождение и значение / С.А. Вишневский, В.П. Афанасьев, К.П. Аргунов и др. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 1997. – 53 с. (рус., англ.).

54. Орлов, Ю.Л. Отличие изотопного состава углерода в разновидностях кристаллов алмаза / Ю.Л. Орлов, Ю.П. Солодова, А.И. Кравцов и др. // Новые данные о минералах СССР : тр. Минер. музея им. А.Е. Ферсмана, 1979. – Вып. 28. – С. 99-101.