ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru




*Научная статья* *Геология*

# Полигенность алмазов из отложений карнийского яруса Булкурской антиклинали северо-востока Сибирской платформы

**А.М.Логвинова**[1]✉, **С.С.Угапьева**[2], **Е.И.Николенко**[3], **А.О.Серебрянников**[1], **В.П.Афанасьев**[1]
[1] *Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия*
[2] *Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия*
[3] *ALROSA (Zimbabwe) Limited, Хараре, Зимбабве*

***Как цитировать эту статью:*** Логвинова А.М., Угапьева С.С., Николенко Е.И., Серебрянников А.О., Афанасьев В.П. Полигенность алмазов из отложений карнийского яруса Булкурской антиклинали северо-востока Сибирской платформы // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 2. С. 3-17. EDN NRMNKP

***Аннотация***
Проведены комплексные исследования алмазов карнийского яруса Булкурской антиклинали северо-востока Сибирского кратона. Выделены два наиболее распространенных на участке Булкур типа алмазов: додекаэдроиды со шрамами и кристаллы V-VII разновидностей по классификации Ю.Л.Орлова. Эти группы характеризуются облегченным изотопным составом углерода $\delta^{13}C$ от –19,6 до –24,7 ‰, различаясь между собой по морфологии, концентрации и формам агрегирования азота, а также составу расплавных включений. Впервые изучены субмикроскопические включения в алмазах этих групп. Такие включения в додекаэдроидах по сравнению с алмазами V-VII разновидностей менее железистые (в среднем 12 и 31 мас.% FeO), а также более обогащены калием (в среднем 5,5 и 1,7 мас.% $K_2O$). Сделан вывод, что изученные додекаэдроиды со шрамами из карнийских отложений Булкурской антиклинали представляют отдельный тип алмазов, характерных для северо-востока Сибирской платформы. Предполагается докембрийский возраст коренных источников и попадание алмазов в триасовые и более молодые россыпи в результате размыва протерозойских прибрежно-морских отложений в пределах выступов докембрия, в частности на Оленекском поднятии.

***Ключевые слова***
алмаз; примесь азота; микровключения; расплав; изотопия; россыпь; карнийский ярус; Сибирский кратон

***Финансирование***
Работа выполнена по Государственному заданию ИГМ СО РАН № 122041400157-9 и ИГАБМ СО РАН FUFG-2024-0007.

***Поступила: 21.08.2024*** ***Принята: 10.04.2025*** ***Онлайн: 30.09.2025*** ***Опубликована: 29.12.2025***

## Введение

Алмазоносность отложений карнийского яруса верхнетриасового возраста в пределах Булкурской антиклинали по левобережью р. Лена в нижнем ее течении обнаружена в 1970-е годы и интенсивно изучалась [1] (рис.1). Алмазоносность карнийского яруса изменяется по латерали. Наиболее высокими концентрациями выделяется нижненленский район, где ураганной алмазоносностью отличаются россыпи Булкурской антиклинали, а на запад и восток от нее их продуктивность падает [2]. Пласт представлен терригенными породами с обильной морской фауной, мощность пласта изменяется от 10 до 100 см. На дневную поверхность пласт выходит торцом и погружается на запад в Предверхоянский прогиб под углом до 30° и более.

Содержания алмазов в пределах пласта колеблются и достигают 13 кар/м$^3$ [3, 4]. Обильно представлены индикаторные минералы кимберлитов без признаков механического износа и гипергенной коррозии, что свидетельствует о близости коренного источника [5, 6]. Среди пиропов присутствуют в незначительном количестве зерна алмазной ассоциации [1]. Это позволило предположить существование близко расположенного кимберлитового тела (тел) с высокой алмазоносностью. Но поисковая обстановка, в первую очередь быстрое погружение пласта в западном направлении под отложения Предверхоянского прогиба, не позволила обнаружить коренной



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

© А.М.Логвинова, С.С.Угапьева, Е.И.Николенко, А.О.Серебрянников, В.П.Афанасьев, 2025

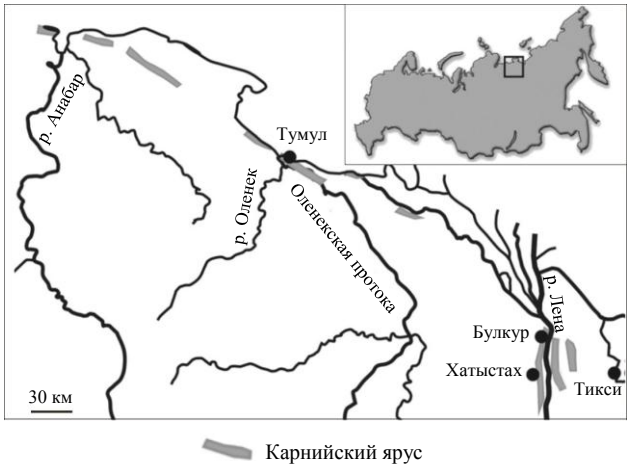



Рис.1. Схематическая карта расположения выхода алмазоносных пород карнийского яруса в пределах северо-востока Сибирского кратона.
Квадрат на врезке – расположение района.
Схема построена по статье [19]

источник алмазов. Поисковые критерии на алмаз по его минералам-спутникам широко используются как в пределах Якутской алмазоносной провинции, так и на других территориях, перспективных на алмазоносность [7, 8].

Большое количество алмазов, найденных на Булкурской антиклинали, было изучено в Амакинской экспедиции АК «АЛРОСА» и описано в работах [9, 10]. Показана необычность ассоциации алмазов, до 80 % которых имеют облегченный изотопный состав углерода, и делается вывод о неизвестном типе коренного источника. Такая ситуация типична для россыпей Прианабарья (Эбеляхской, Маятской и др.), где, как и на Булкуре, с кимберлитовыми минералами ассоциируют алмазы, совершенно не характерные для кимберлитовых тел. Это противоречие рассмотрено авторами в работе [11], где аргументируется полигенез алмазов не только по типоморфизму, но и типам коренных источников. Предполагается, что отложения карнийского яруса являются позднетриасовыми туффитами и с ними связывают алмазоносность [12]. Однако и здесь, и в других местах Сибирской платформы не найдены вулканические источники этих туфов. В результате ситуация с алмазоносностью карнийского яруса остается неясной.

Предпринято дополнительное изучение алмазов карнийского яруса Булкурской антиклинали для определения их происхождения и путей попадания в данные отложения. Важным является применение комплексного подхода к изучению алмаза – минерала с широким комплексом физико-химических, морфологических и других особенностей, которые в совокупности могут определить его типоморфизм. Общепринято, что минеральные включения в природных алмазах, захваченные ими в процессе роста, отражают геохимические особенности состава силикатного субстрата верхней мантии [13-16]. Однако принципиальную генетическую информацию о составе алмазообразующей среды можно получить на основании результатов исследования субмикроскопических и наноразмерных включений, захваченных алмазом на начальном этапе кристаллизации алмаза-матрицы [17, 18].

С целью выяснения особенностей среды кристаллизации и эволюционных изменений в процессе роста алмазов, представленных в отложениях карнийского яруса, в данной работе впервые изучены множественные субмикроскопические полифазные включения в этих алмазах. Такие исследования особенно необходимы для алмазов, в которых видимые в оптическом диапазоне увеличений минеральные включения встречаются редко. Изучен также изотопный состав углерода алмазов, концентрация и формы структурной примеси азота.

**Образцы и методы исследования**

Изучено 97 кристаллов алмаза размером от 1 до 4 мм из отложений карнийского яруса Булкурской антиклинали (низовья р. Лена, участок Булкур) (рис.1). Характерной морфологической особенностью алмазов этого участка является преобладание типичных додекаэдроидов (51,7 %), часто скрытослоистых и со сноповидной штриховкой, реже с шагренью и полосами пластической деформации. На поверхности таких кристаллов, как правило, присутствуют шрамы, заполненные вторичным материалом, являющиеся признаком магматического травления. Из общей совокупности кристаллов 35 % отнесены к V и VII разновидностям по классификации Ю.Л.Орлова [20]. Такие кристаллы имеют серую, до черной, окраску из-за наличия многочисленных флюидных включений с аморфным углеродом на их стенках (рис.2, *к*, *л*) [21, 22]. Ламинарные кристаллы октаэдрического и переходного октаэдр – ромбододекаэдр габитуса встречаются редко (около 13 %) (рис.2, *а-в*). Они обладают размером до 1 мм и представлены остроребериными октаэдрами. Два образца – это осколки кристаллов кубического габитуса желтого цвета (II разновидность по классификации Ю.Л.Орлова).


*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

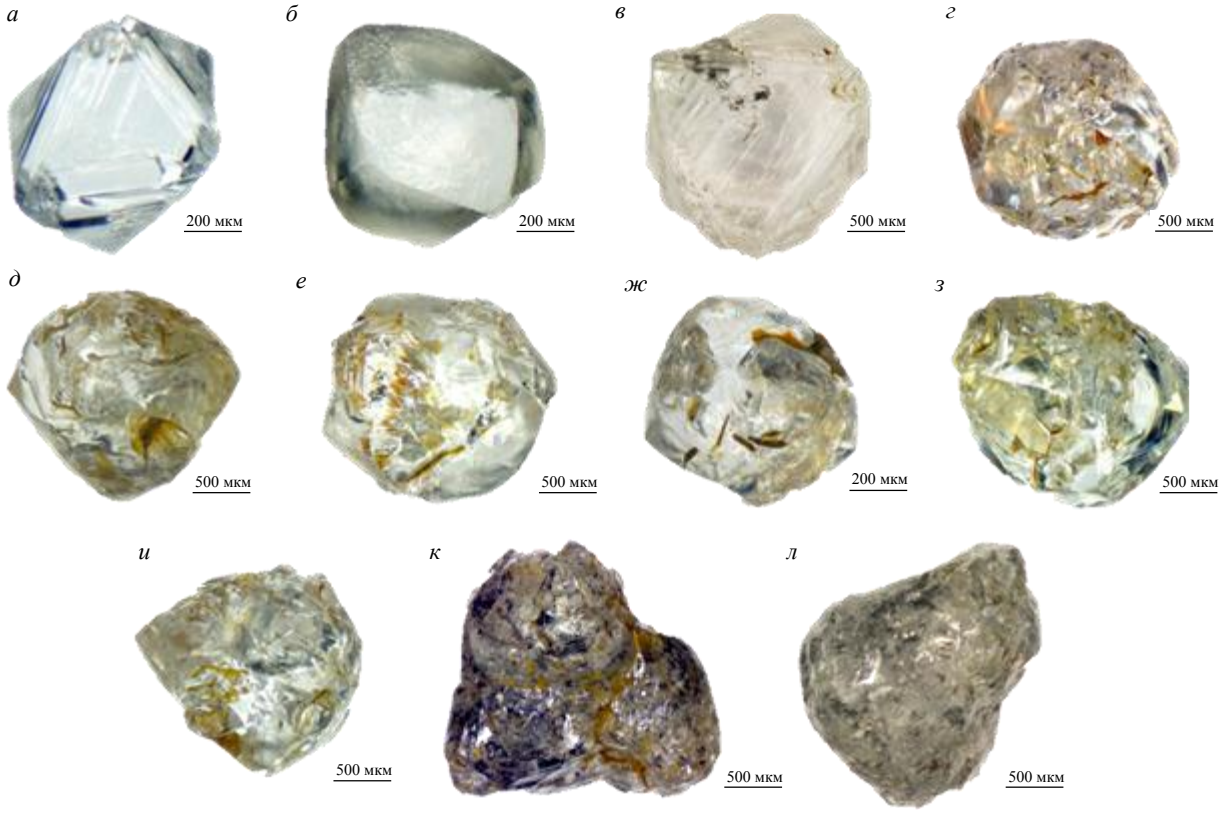



Рис.2. Типичные кристаллы алмазов изученной коллекции
*а-в* – алмазы I разновидности по Ю.Л.Орлову: *а*, *в* – бесцветный октаэдр с полицентрически растущими гранями, *б* – кривогранный додекаэдроид; *г-и* – кривогранный додекаэдроид с глубокими шрамами на поверхности, заполненными продуктами ожелезнения; *к*, *л* – алмазы V-VII разновидностей с множественными черными включениями

Такие кристаллы часто встречаются в алмазоносных россыпях Якутии и Урала [23]. Важной характеристикой изученной коллекции является высокое содержание (более 50 %) целых и в незначительной степени поврежденных кристаллов, но для большинства из них отмечается повышенная трещиноватость с продуктами экзогенного ожелезнения.

В настоящей работе для детальных исследований микровключений подобраны кристаллы наиболее распространенных на участке Булкур типов алмазов: додекаэдроиды со шрамами и многочисленными темноцветными включениями (рис.2, *г-и*), а также алмазы V-VII разновидностей (рис.2, *к*, *л*). Внутреннее строение алмазов и характер распределения структурных примесей в них исследованы на плоскопараллельных пластинках толщиной 90-170 мкм, вырезанных преимущественно по плоскости (110).

Распределение примесей азота и водорода определены по спектрам. Спектры с апертурой 50 мкм регистрировались в диапазоне 750-7500 см$^{-1}$ при разрешении 2 см$^{-1}$ на ИК-Фурье спектрометре (FT-IR) VERTEX 70 (фирма Bruker), оснащенном микроскопом HYPERION 2000. Отдельные зоны роста исследованных алмазов, а также зоны с преимущественным расположением включений выявлены методом катодолюминесценции (КЛ) с использованием сканирующего электронного микроскопа LEO-1430VP с энергодисперсионным рентгеновским спектрометром. Изотопный состав углерода определяли масс-спектрометром Finnigan-MAT Delta в режиме двойного напуска после окисления образца в чистом кислороде по методике [24]. Погрешность измерения отношения изотопов не превышала ±0,02 ‰. Изотопные данные приведены относительно международного стандарта PDB.

Для исследования минеральных включений кристаллы были пришлифованы до выведения включения на поверхность алмаза-матрицы. Идентификация некоторых минеральных фаз проведена методом рамановской спектроскопии на приборе Horiba Jobin-Yvon LabRam HR800. Химический состав включений определялся с помощью сканирующего микроскопа MIRA 3 (TESCAN, Чехия). Фазовый состав наноразмерных полифазных включений изучен методом просвечивающей


*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

электронной микроскопии (ПЭМ) на приборе Philips CM200 ($LaB_6$) при ускоряющем напряжении 200 кВ [25, 26].

Основная часть аналитических работ выполнена в Центре коллективного пользования научным оборудованием для многоэлементных и изотопных исследований СО РАН. Исследования методом просвечивающей электронной микроскопии проведены в Центре наук о Земле им. Гельмгольца (Потсдам, Германия).

**Результаты исследования и обсуждение**

***ИК-спектроскопия.*** Согласно классификации алмазов [27, 28], все изученные образцы относятся к типу 1aAB с примесным азотом в форме A и B1. В ИК-спектрах фиксируются также полосы поглощения с максимумами 1370 и 1430 $см^{-1}$, обусловленные присутствием в алмазах дефекта B2 [29], и часто наблюдается пик 3107 $см^{-1}$, вызванный примесью водорода [30].

По содержанию и распределению структурной примеси азота с учетом морфологии алмазов выделены четыре группы (табл.1). Первую группу изученных алмазов по морфологии кристаллов, диапазону содержания азота и степени его агрегирования с высокой долей вероятности можно отнести к кимберлитовым. Вторая группа, представленная желтым кубоидом, соответствует алмазам II разновидности по классификации Ю.Л.Орлова [20]. В третью группу попадают округлые бесцветные додекаэдроиды со шрамами, заполненными вторичными продуктами. Алмазы этой группы преобладают в рассматриваемой россыпи. Они имеют высокое содержание примеси азота с достаточно высокой степенью агрегирования. Четвертая группа представлена типичными алмазами V-VII разновидностей по классификации Ю.Л.Орлова [20]. Группы значительно различаются между собой как по общему содержанию примеси азота (от 47 до 1956 ppm), так и степени его агрегирования, что, наряду с различиями морфологии, прямо указывает на полигенность алмазов россыпи.

*Таблица 1*

**Дефектно-примесный состав изученных алмазов**

| Номер образца | Зона | N(A), ppm | N(B), ppm | $N_{tot}$, ppm | B, % | Описание алмаза |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Кар-80 | Центр | 64 | 7 | 71 | 10 | Бесцветный додекаэдроид |
| | Край | 45 | 3 | 47 | 5 | |
| Кар-19 | Центр | 290 | 185 | 474 | 39 | Бесцветный октаэдр |
| | Край | 413 | 307 | 720 | 43 | |
| | Край | 503 | 346 | 849 | 41 | |
| | Край | 437 | 272 | 709 | 38 | |
| Кар-21 | Центр | 287 | 312 | 599 | 52 | Бесцветный додекаэдроид |
| | Край | 376 | 541 | 917 | 59 | |
| | Край | 404 | 523 | 928 | 56 | |
| Кар-78 | Край | 239 | 157 | 397 | 40 | Бесцветный октаэдр |
| | Центр | 302 | 235 | 536 | 44 | |
| Кар-101 | Край | 427 | 80 | 507 | 16 | Бесцветный додекаэдроид |
| | Центр | 396 | 94 | 490 | 19 | |
| Кар-16 | Край | 100 | 0 | 100 | 0 | Желтый кубоид |
| | Центр | 96 | 0 | 96 | 0 | |
| | Центр | 106 | 0 | 106 | 0 | |
| Кар-2 | Центр | 866 | 300 | 1167 | 26 | Додекаэдроид со шрамом |
| | Край | 776 | 429 | 1205 | 36 | |
| Кар-15А | Центр | 776 | 398 | 1173 | 34 | Додекаэдроид со шрамом |
| | Край | 809 | 389 | 1197 | 32 | |
| | Край | 766 | 389 | 1155 | 34 | |
| Кар-74 | Край | 771 | 447 | 1218 | 37 | Додекаэдроид со шрамом |
| | Край | 766 | 443 | 1209 | 37 | |
| | Центр | 807 | 355 | 1162 | 31 | |
| Кар-87 | Центр | 825 | 315 | 1140 | 28 | Додекаэдроид со шрамом |
| | Край | 833 | 315 | 1148 | 27 | |
| Кар-88 | Край | 540 | 332 | 871 | 38 | Додекаэдроид со шрамом |
| | Центр | 535 | 337 | 872 | 39 | |
| Кар-34 | Край | 1667 | 286 | 1953 | 15 | V разновидность |
| | Край | 1642 | 315 | 1956 | 16 | |
| | Центр | 1609 | 329 | 1938 | 17 | |
| | Центр | 1543 | 286 | 1829 | 16 | |



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

Окончание табл.1

| Номер образца | Зона | N(A), ppm | N(B), ppm | $N_{tot}$, ppm | B, % | Описание алмаза |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Кар-38 | Край | 1328 | 315 | 1643 | 19 | V разновидность |
| | Край | 1345 | 372 | 1717 | 22 | |
| | Центр | 1180 | 472 | 1652 | 29 | |
| Кар-38а | Край | 1490 | 272 | 1762 | 15 | V разновидность |
| | Край | 1302 | 269 | 1571 | 17 | |
| | Центр | 1289 | 409 | 1698 | 24 | |

Дефекты кристаллической структуры в алмазе являются индикатором кристаллогенеза [31]. В статье [32] изучен дефектно-примесный состав алмазов Булкурской антиклинали, где все описанные додекаэдроиды отнесены к I разновидности по классификации Ю.Л.Орлова [20].

***Включения в алмазах.*** Исследованы минеральные и расплавные включения в додекаэдрических алмазах со шрамами и в алмазах V разновидности, выделенных нами в отложениях карнийского яруса. Визуально они представлены в основном графитом, сульфидами или темноцветным материалом. Как правило, такие включения отражают состав алмазообразующего субстрата [33].

*Додекаэдроиды со шрамами.* В центральной ростовой зоне додекаэдрического кристалла алмаза Кар-15 зафиксированы множественные силикатные включения моноклинного пироксена и граната (рис.3, *а*, *б*) в ассоциации с наноразмерными полифазными кристаллофлюидными включениями. Эти включения имеют чрезвычайно мелкие размеры, не превышающие 5 мкм, округлую форму, иногда проявляется кристаллографическая огранка. По химическому составу они представлены моноклинным пироксеном, гранатом, слюдой и полифазными образованиями. Частично они изменены, о чем свидетельствует присутствие хлорита и других недиагностированных фаз (табл.2). Химический состав гранатов и пироксенов варьируется в незначительных пределах. Включения альмандин-пиропового граната относятся к лерцолитовому парагенезису и характеризуются низким содержанием, мас.%: $Cr_2O_3$ 1,5, типичным для этой ассоциации количеством CaO около 4,43, FeO 15,5 и MgO 14,9 [10]. Пироксены по химическому составу разделены на две группы по содержанию $Na_2O$. К первой отнесены пироксены, характеризующиеся относительно высоким содержанием жадеитового минала $Na_2O$ 3,6-4,8 мас.%, повышенным содержанием FeO и устойчивой примесью $Cr_2O_3$ около 1 мас.% (табл.2). В составе второй группы пироксенов содержание $Na_2O$ не превышает 1 мас.%. В ассоциации с гранатом и клинопироксеном идентифицированы ильменит, мас.%: $TiO_2$ 49,1; FeO 42,1; $Cr_2O_3$ 0,98; MnO 4,89; MgO 2,87 и слюда с примесью бария BaO 3,0-4,1. Это является первой находкой слюды в алмазе с высоким содержанием бария. Устойчивое присутствие бария в алмазообразующей среде подтверждается составом полифазных наноразмерных включений, зафиксированных в центральной части этого образца алмаза и исследованных методом ПЭМ (рис.3).

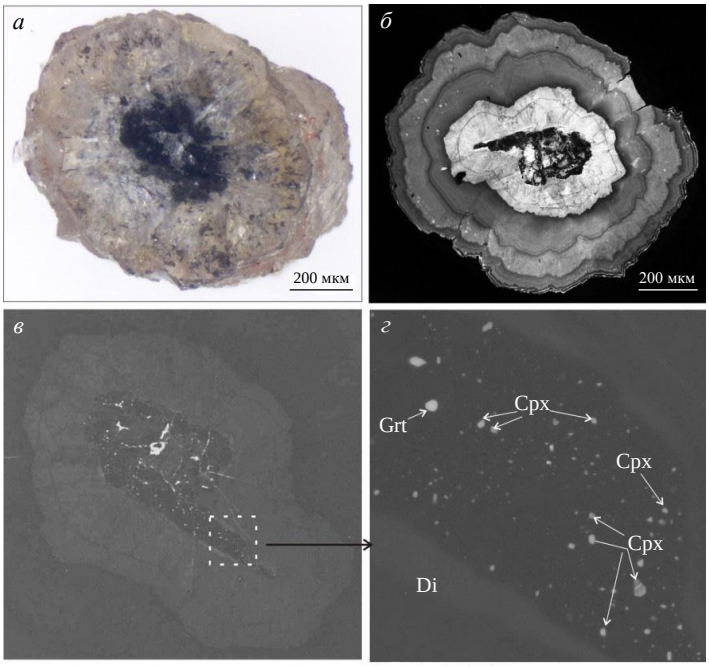



Рис.3. Общий вид (*а*) пришлифованного кристалла алмаза Кар-15 (участок Булкур, низовья р. Лена); изображение в катодолюминесцентном излучении (*б*); изображение центральной части кристалла в излучении обратнорассеянных электронов (*в*); зона концентрации включений (*в*) в увеличенном фрагменте (*г*)

Cpx – клинопироксен; Grt – гранат; Di – алмаз

В девяти образцах додекаэдроидов со шрамами изучен химический состав темноцветного вещества (по-видимому, закристаллизованный расплав), заполняющего многочисленные микротрещины, развитые по всему объему образца (рис.4). Это вещество представляет собой гетерогенный материал, обогащенный глиноземом, железом и калием (табл.3), а также титаном. Идентифицировать отдельные фазы этого изначально гомогенного, вероятно расплавного, вещества в



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

данной работе не представилось возможным. Однако приведенный в табл.3 валовый состав включений в алмазах этой группы позволяет оценить химизм захваченного во время кристаллизации расплава. В целом его можно охарактеризовать как обогащенный железом и калием алюмосиликатный расплав, содержащий воду и летучие компоненты и имеющий следующий средний химический состав, мас.%: $SiO_2$ 48-52; $Al_2O_3$ 27-30; FeO 7-10; MgO около 2, CaO менее 1, $K_2O$ в среднем 5,8-7,0. В образце Кар-4 во всех включениях зафиксировано более 10 мас.% калия (рис.5, табл.3). Присутствие большого количества флюидных включений в додекаэдроидах «северного» типа, особенно в кристаллах алмаза V-VII разновидностей, показано в работах [21, 34].

*Таблица 2*

**Состав микровключений клинопироксена и граната из алмаза Кар-15 участка Булкур, мас.%**

| $SiO_2$ | $TiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Cr_2O_3$ | FeO | MgO | CaO | $Na_2O$ | Сумма | #Mg |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Cpx | | | | | | | | | |
| 50,6 | 0,69 | 3,01 | 1,82 | 8,04 | 14,3 | 20,6 | 0,67 | 99,73 | 75,98 |
| 52,0 | 0,48 | 2,58 | 0,84 | 8,69 | 12,5 | 22,1 | 0,78 | 100 | 72,00 |
| 51,1 | 0,56 | 2,84 | 0,89 | 9,49 | 12,5 | 20,9 | 0,87 | 99,19 | 70,19 |
| 52,1 | 0,48 | 3,08 | 1,78 | 7,61 | 12,7 | 20,9 | 1,02 | 99,56 | 74,82 |
| 55,4 | 0,41 | 8,21 | 1,28 | 6,63 | 8,17 | 16,4 | 2,33 | 98,8 | 68,71 |
| 56,1 | 0,46 | 6,33 | 1,58 | 4,98 | 11,57 | 15,0 | 3,97 | 99,94 | 80,55 |
| 54,7 | 0,47 | 6,70 | 1,54 | 5,19 | 12,7 | 14,1 | 4,7 | 100,01 | 81,35 |
| 55,0 | 0,56 | 5,98 | 1,31 | 5,73 | 12,1 | 15,2 | 4,13 | 100,04 | 79,03 |
| 56,3 | 0,54 | 6,20 | 1,60 | 4,46 | 11,5 | 15,2 | 4,01 | 99,86 | 82,18 |
| 54,2 | 0,36 | 6,82 | 1,44 | 4,86 | 13,9 | 12,9 | 5,48 | 99,99 | 83,55 |
| 54,6 | 0,66 | 5,49 | 1,13 | 6,03 | 12,7 | 15,8 | 3,53 | 99,97 | 78,99 |
| 55,3 | 0,67 | 5,51 | 1,03 | 5,74 | 12,3 | 15,7 | 3,37 | 99,6 | 79,19 |
| 54,6 | 0,36 | 6,93 | 1,13 | 4,79 | 14,1 | 12,7 | 5,77 | 100,3 | 83,96 |
| 54,5 | 0,48 | 6,48 | 1,45 | 5,18 | 12,7 | 14,2 | 4,70 | 99,7 | 81,41 |
| 53,8 | 0,66 | 5,1 | 1,21 | 6,19 | 13,7 | 15,4 | 3,84 | 99,92 | 79,79 |
| 55,1 | 0,61 | 5,56 | 0,97 | 5,82 | 12,7 | 15,6 | 3,64 | 99,91 | 79,52 |
| 54,7 | 0,37 | 7,03 | 1,31 | 4,51 | 13,7 | 12,7 | 5,62 | 100 | 84,41 |
| 54,9 | 0,21 | 6,72 | 1,51 | 5,03 | 12,6 | 14,2 | 4,75 | 99,92 | 81,69 |
| 55,0 | 0,18 | 6,92 | 1,34 | 4,27 | 14,1 | 12,7 | 5,71 | 100,2 | 85,47 |
| 55,1 | 0,51 | 6,37 | 1,42 | 5,23 | 12,1 | 14,5 | 4,48 | 99,68 | 80,41 |
| 54,6 | 0,56 | 5,9 | 1,11 | 5,95 | 13,1 | 14,6 | 4,07 | 99,92 | 79,71 |
| 55,1 | 0,39 | 6,75 | 1,36 | 5,07 | 13,2 | 13,2 | 4,94 | 99,95 | 82,22 |
| 51,6 | 0,52 | 3,94 | 1,54 | 7,87 | 16,7 | 17,1 | 0,72 | 99,99 | 79,07 |
| 51,5 | 0,51 | 3,73 | 1,77 | 7,74 | 15,4 | 18,6 | 0,83 | 100 | 77,99 |
| 51,7 | 0,53 | 3,77 | 1,58 | 7,37 | 15,3 | 19,0 | 0,65 | 99,99 | 78,76 |
| 51,7 | 0,62 | 3,76 | 1,55 | 7,46 | 15,1 | 19,1 | 0,79 | 100 | 78,28 |
| 51,5 | 0,59 | 4,34 | 1,15 | 7,49 | 14,6 | 19,7 | 0,63 | 100 | 77,65 |
| 52,0 | 0,56 | 3,8 | 1,27 | 8,02 | 17,3 | 16,2 | 0,80 | 99,99 | 79,37 |
| 50,5 | 0,45 | 3,08 | 1,46 | 10,7 | 14,7 | 18,1 | 0,95 | 99,99 | 71,08 |
| 51,2 | 0,76 | 3,97 | 1,63 | 7,23 | 15,1 | 19,3 | 0,77 | 99,98 | 78,82 |
| 51,2 | 0,92 | 4,12 | 1,69 | 7,85 | 15,0 | 18,4 | 0,76 | 99,86 | 77,25 |
| 53,3 | 0,41 | 6,12 | 1,22 | 9,26 | 12,0 | 13,4 | 4,23 | 100 | 69,83 |
| 52,0 | 0,33 | 3,69 | 1,63 | 8,23 | 18,4 | 14,9 | 0,78 | 99,99 | 79,90 |
| 51,3 | 0,45 | 3,52 | 1,24 | 9,12 | 15,3 | 18,9 | 0,54 | 100,3 | 74,91 |
| Grt | | | | | | | | | |
| 42,3 | 0,25 | 21,1 | 1,5 | 15,5 | 14,9 | 4,43 | | 99,99 | 63,2 |



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

© А.М.Логвинова, С.С.Угапьева, Е.И.Николенко, А.О.Серебрянников, В.П.Афанасьев, 2025

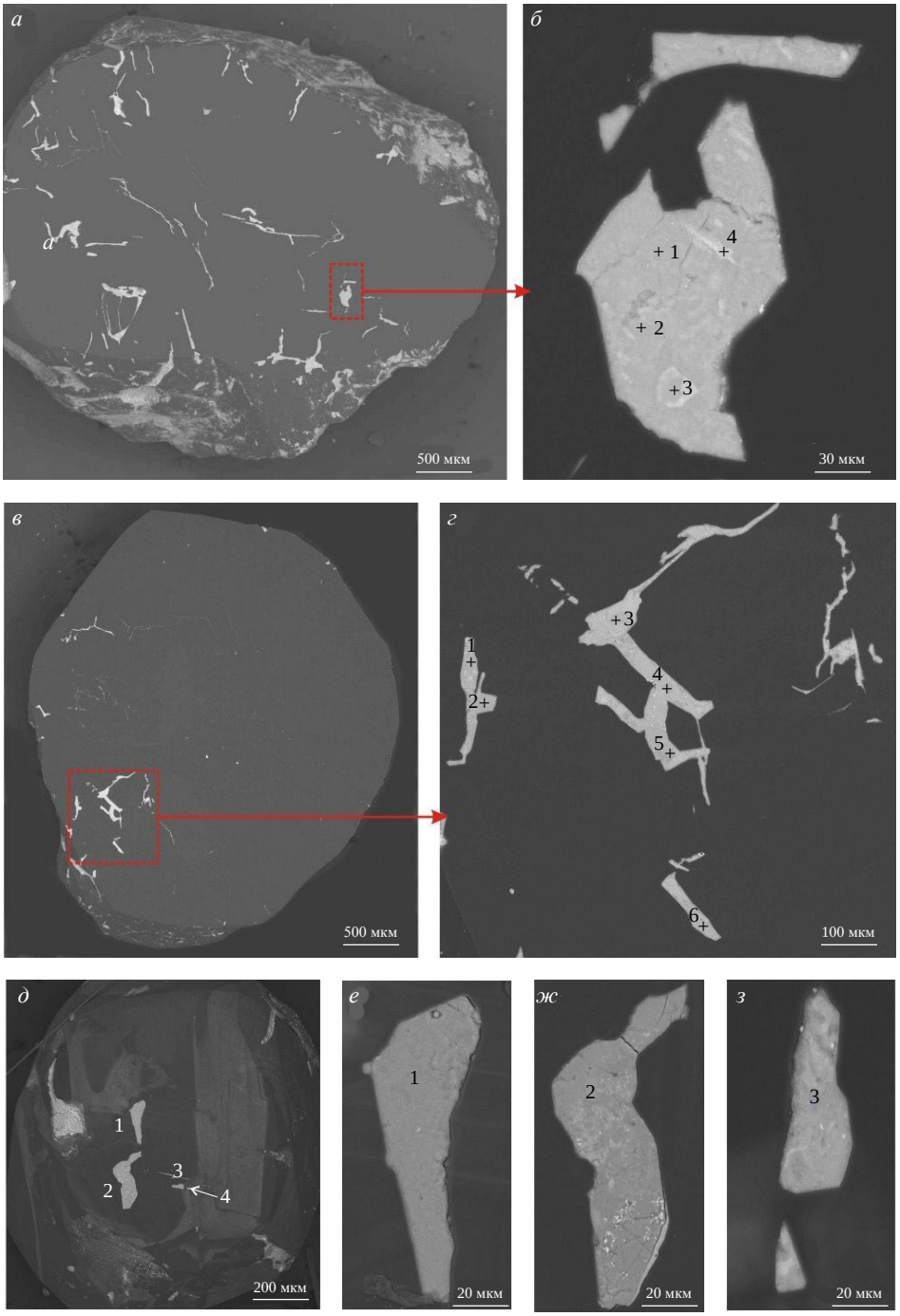



Рис.4. Микрофотографии кристаллов алмаза додекаэдрического габитуса со шрамами и включениями частично раскристаллизованного расплава: образец Кар-34 в излучении обратнорассеянных электронов (*а*), увеличенный фрагмент включения (*б*); образец Кар-30 в излучении обратнорассеянных электронов (*в*), увеличенный фрагмент включений (*г*); образец Кар-11 в катодолюминесцентном излучении (*д*); увеличенные фрагменты включений образца Кар-11 (*е-з*). Цифрами обозначены соответствующие точкам химические анализы в табл.3

В условиях понижения температуры из расплава выделяются фазы разного состава. В образце Кар-111 отчетливо фиксируются множественные обособления Ti-содержащих фаз, включая рутил (рис.5, табл.3). Также выявлена неоднородность в образце Кар-30. В табл.3 показаны две группы составов. В первом случае (точки 2, 5, 6) состав обогащен $SiO_2$, $Al_2O_3$ и $K_2O$; во втором (1, 3, 4) наблюдается уменьшение содержания $SiO_2$, $Al_2O_3$ и $K_2O$ при существенном возрастании железа.


*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 2. С. 3-17

© А.М.Логвинова, С.С.Угальева, Е.И.Николенко, А.О.Серебрянников, В.П.Афанасьев, 2025

*Таблица 3*

**Химический состав расплавного вещества в округлых алмазах со шрамами участка Булкур, мас.%**

| Компоненты | Кар-34 | | | | Кар-30 | | | | | | Кар-11 | | | | | | | Кар-17-5 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 2 | 5 | 6 | 1 | 3 | 4 | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| $SiO_2$ | 48,7 | 47,8 | 47,8 | 43,6 | 44,7 | 49,1 | 47,0 | 35,7 | 36,5 | 36,4 | 48,2 | 47,8 | 50,6 | 48,9 | 49,9 | 52,5 | 50,3 | 48,1 | 49,6 | 49,3 | 48,7 |
| $TiO_2$ | 0,15 | 0,03 | 0,01 | 0,03 | 1,16 | 0,70 | 2,51 | 0,92 | 12,3 | 0,31 | 0,10 | н/о | н/о | н/о | 0,38 | 0,23 | н/о | н/о | н/о | н/о | н/о |
| $Al_2O_3$ | 27,1 | 28,2 | 27,4 | 26,5 | 27,7 | 29,4 | 28,0 | 23,1 | 23,0 | 24,0 | 29,2 | 28,9 | 29,8 | 29,1 | 28,3 | 30,3 | 29,8 | 27,9 | 29,2 | 28,7 | 28,8 |
| FeO | 8,8 | 10,5 | 11,4 | 15,7 | 17,8 | 10,6 | 12,6 | 23,4 | 22,0 | 25,5 | 9,72 | 10,6 | 6,38 | 9,36 | 6,88 | 6,30 | 7,26 | 10,7 | 7,70 | 13,5 | 14,3 |
| MgO | 4,05 | 2,36 | 2,36 | 2,27 | 2,53 | 2,04 | 2,50 | 2,61 | 2,55 | 3,23 | 2,14 | 2,08 | 2,1 | 2,34 | 3,94 | 3,86 | 1,98 | 2,44 | 2,13 | 2,63 | 2,58 |
| CaO | 0,9 | 0,81 | 0,81 | 0,78 | 0,53 | 0,61 | 0,46 | 0,60 | 0,62 | 0,55 | 0,84 | 0,93 | 0,87 | 0,77 | 1,08 | 1,00 | 0,78 | 0,21 | 0,24 | 0,32 | 0,35 |
| $K_2O$ | 5,84 | 5,83 | 5,61 | 5,19 | 5,38 | 5,93 | 6,68 | 3,64 | 3,00 | 3,09 | 5,12 | 4,85 | 5,81 | 5,1 | 5,02 | 5,61 | 5,43 | 6,31 | 6,86 | 5,48 | 5,33 |
| Сумма | 95,54 | 95,5 | 95,38 | 94,04 | 99,8 | 98,38 | 99,8 | 89,97 | 99,97 | 93,08 | 95,22 | 95,16 | 95,56 | 95,57 | 95,5 | 99,8 | 95,55 | 95,45 | 95,49 | 99,93 | 100,1 |

| Компоненты | Кар-4 | | | | Кар-111 | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | К-содержащие силикатные фазы | | | | | | | | | | Рутил | | Fe, Ti-оксиды | | | | |
| | 18 | 22 | 23 | 24 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| $SiO_2$ | 50,1 | 47,1 | 42,6 | 44,6 | 52,9 | 51,0 | 50,5 | 50,1 | 50,3 | 51,4 | 53,4 | 52,6 | 49,2 | 48,7 | 1,33 | 1,67 | 3,92 | 1,93 | 5,15 | 7,68 | 6,91 |
| $TiO_2$ | 1,12 | 0,67 | 2,31 | 1,80 | 0,10 | 0,41 | 0,27 | 0,10 | 0,95 | 0,25 | 0,12 | 0,10 | 1,52 | 0,91 | 92,9 | 91,6 | 89,3 | 89,0 | 75,5 | 68,9 | 60,7 |
| $Al_2O_3$ | 28,0 | 26,4 | 23,4 | 25,6 | 28,7 | 27,1 | 27,6 | 27,3 | 27,1 | 27,8 | 28,1 | 27,3 | 27,8 | 27,2 | 1,84 | 1,76 | 3,16 | 1,84 | 4,19 | 5,62 | 5,16 |
| FeO | 6,70 | 11,6 | 14,2 | 11,5 | 9,09 | 6,63 | 7,97 | 8,46 | 8,43 | 8,34 | 8,70 | 8,82 | 6,53 | 9,05 | 2,65 | 3,21 | 1,82 | 5,28 | 13,4 | 20,3 | 24,8 |
| MgO | 1,53 | 1,32 | 5,41 | 3,44 | 1,86 | 2,73 | 1,93 | 2,31 | 2,40 | 2,38 | 1,79 | 3,68 | 1,67 | 2,23 | – | – | – | – | – | – | – |
| CaO | 1,92 | 2,08 | 1,49 | 1,84 | 0,78 | 0,73 | 0,73 | 0,94 | 0,90 | 0,92 | 0,96 | 0,69 | 0,66 | 0,86 | 0,46 | 0,45 | 0,49 | 0,45 | 0,69 | 0,85 | 0,65 |
| $K_2O$ | 10,4 | 10,3 | 10,7 | 11,2 | 6,55 | 6,16 | 6,30 | 6,36 | 6,02 | 6,41 | 7,04 | 6,42 | 6,78 | 5,78 | 0,10 | 0,15 | 0,66 | 0,17 | 0,69 | 1,02 | 0,76 |
| Сумма | 99,72 | 99,47 | 100,1 | 99,98 | 99,88 | 94,8 | 95,3 | 95,47 | 96,1 | 97,5 | 100,1 | 99,51 | 94,2 | 94,7 | 99,18 | 98,85 | 99,35 | 98,67 | 99,62 | 104,4 | 99,0 |

© А.М.Логвинова, С.С.Угапьева, Е.И.Николенко, А.О.Серебрянников, В.П.Афанасьев, 2025

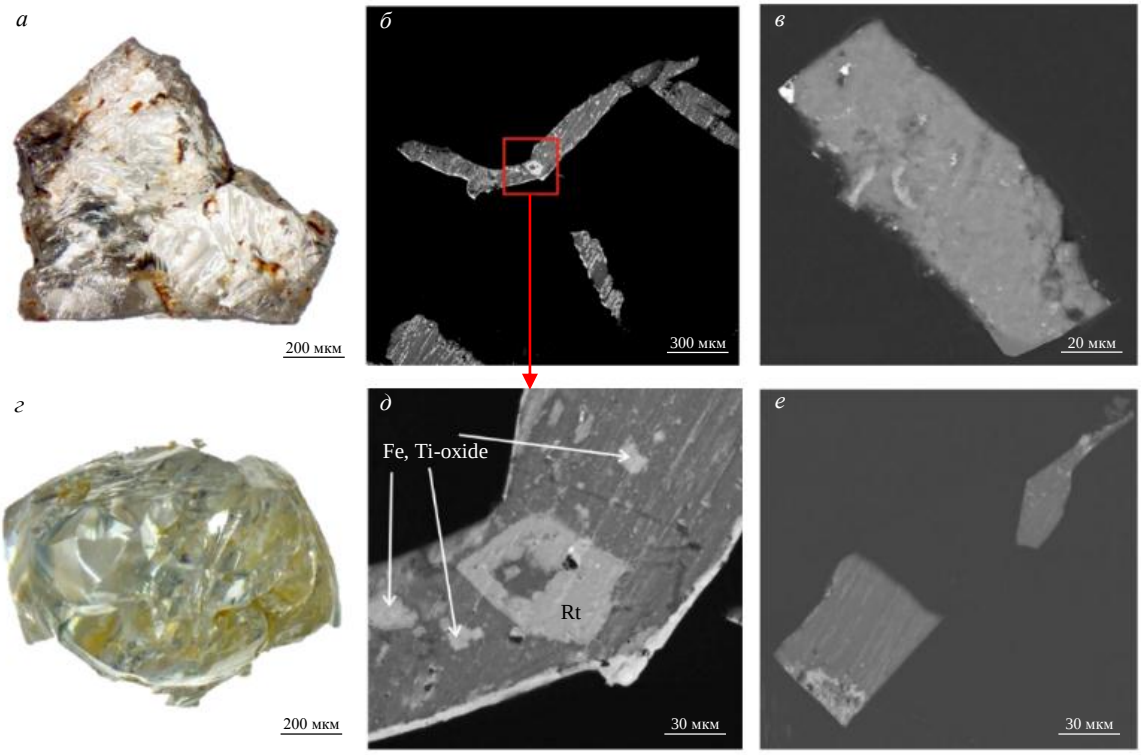



Рис.5. Микрофотографии округлых алмазов, содержащих включения частично раскристаллизованного расплава, обогащенного титаном, железом и алюминием: *а* – общий вид образца Кар-111; *б, в* – изображения включений в излучении обратнорассеянных электронов; *г, е* – общий вид образца Кар-4 и включения расплава в нем; *д* – увеличенный фрагмент включения *б*; Rt – рутил; Fe, Ti-oxide – оксиды железа и титана. Составы отдельных фаз представлены в табл.3

Наиболее четко процесс преобразования алюмосиликатного расплава показан на примере двух типов алмазов: додекаэдроида со шрамами Кар-10-17 и алмазов V разновидности Кар-81 и Кар-82 (рис.6). Все выделившиеся фазы в излучении обратнорассеянных электронов отличаются по цвету (более светлые и темные). В первом случае образовавшиеся фазы по химическому составу подразделяются на три группы. Темная часть в приведенных включениях имеет однотипный химический состав, мас.%: $SiO_2$ 42,0-44,1; $Al_2O_3$ 26-27,1; FeO 14,2-16,9; MgO 2,15-2,54; $K_2O$ 4,73-5,46. Светлые зоны характеризуются средним 2,03-2,17 мас.% и низким 0,50-0,87 мас.% содержаниями $K_2O$. В них наблюдается резкое увеличение FeO, в среднем до 40 мас.% (табл.4).

*Алмазы V-VII по классификации Ю.Л.Орлова*. Расплавные включения в алмазах V-VII разновидности (рис.6, *г, д*) характеризуются невысоким содержанием калия, не превышающим 2 мас.% $K_2O$, и большим обогащением железа от 25,2 до 34,6 мас.% FeO (табл.4). Отличительной чертой их состава является устойчивое присутствие сульфатов и хлора (возможно, хлоридов). Основные различия в химическом составе расплавных включений рассматриваемых типов алмазов показаны на рис.7. Расплавные включения в алмазах додекаэдрического габитуса со шрамами более обогащены калием, кремнеземом и алюминием, а в алмазах V-VII разновидностей такие включения отличаются большим содержанием железа в составе.

В алмазе V-VII разновидностей Кар-2 методом ПЭМ зафиксированы карбонатитовые полифазные наноразмерные включения низкомагнезиального состава, представленные фазами $SiO_2$, апатита, Ba, Sr-карбоната, Mg, Fe, K-силиката (не диагностирован) и множественными вакуолями флюида. В этом образце также отмечен аморфный кремнезем. Подобные включения в аллювиальных алмазах этого типа северо-востока Сибирского кратона описаны в статье [34].

Источником таких низкомагнезиальных карбонатитовых расплавов-растворов могли быть субдуцированные породы океанической и частично континентальной земной коры. Обогащение таких включений некогерентными элементами может свидетельствовать о просачивании солевых флюидов, обогащенных Ba, Sr, P, Ti, K, Cl, через карбонатизированные эклогиты.


Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© А.М.Логвинова, С.С.Угапьева, Е.И.Николенко, А.О.Серебрянников, В.П.Афанасьев, 2025

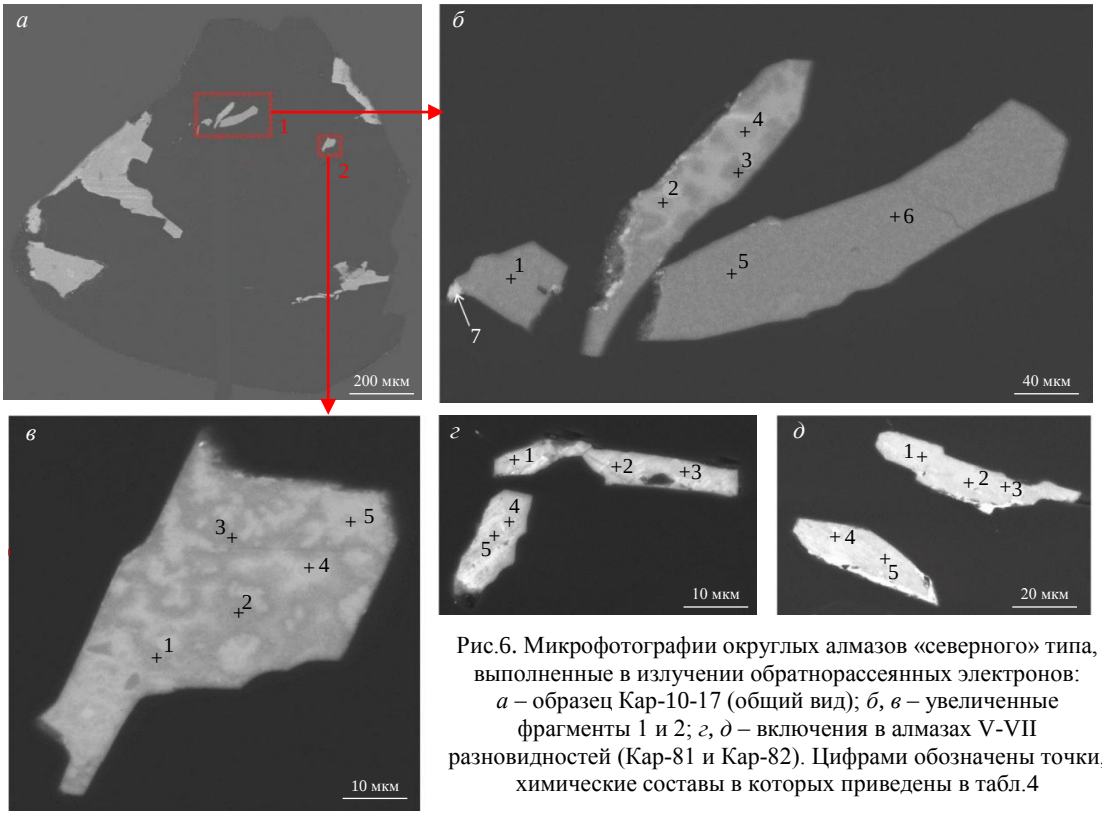



Рис.6. Микрофотографии округлых алмазов «северного» типа, выполненные в излучении обратнорассеянных электронов: *а* – образец Кар-10-17 (общий вид); *б*, *в* – увеличенные фрагменты 1 и 2; *г*, *д* – включения в алмазах V-VII разновидностей (Кар-81 и Кар-82). Цифрами обозначены точки, химические составы в которых приведены в табл.4

*Таблица 4*

**Химический состав расплавного вещества в округлом алмазе со шрамами и алмазах V-VII разновидностей участка Булкур, мас.%**

| Компоненты | Кар-10-17 (округлый алмаз со шрамами) | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Включение (фрагмент) 1 | | | | | | | Включение (фрагмент) 2 | | | | |
| | Темная часть | | | | Светлая часть | | | Темная часть | | | Светлая часть | |
| | 1 | 3 | 5 | 6 | 2 | 4 | 7 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| $SiO_2$ | 42,3 | 42,0 | 42,8 | 44,1 | 27,5 | 26,6 | 20,1 | 42,9 | 42,2 | 51,8 | 32,2 | 34,2 |
| $Al_2O_3$ | 26,0 | 26,2 | 26,9 | 27,1 | 19,5 | 19,3 | 11,3 | 26,4 | 26,7 | 21,5 | 23,1 | 23,6 |
| FeO | 16,8 | 16,9 | 15,7 | 14,2 | 36,7 | 37,7 | 63,6 | 16,3 | 16,6 | 16,2 | 31,8 | 29,2 |
| MgO | 2,54 | 2,45 | 2,28 | 2,15 | 3,14 | 3,19 | н/о | 2,32 | 2,39 | 1,86 | 3,26 | 3,49 |
| CaO | 0,33 | 0,34 | 0,32 | 0,30 | 0,31 | 0,38 | н/о | 0,42 | 0,43 | н/о | 0,31 | 0,35 |
| $K_2O$ | 4,95 | 4,91 | 5,02 | 5,46 | 0,87 | 0,50 | 2,11 | 4,83 | 4,73 | 8,62 | 2,03 | 2,17 |
| $ZrO_2$ | н/о | н/о | н/о | н/о | н/о | н/о | 2,95 | н/о | н/о | н/о | н/о | н/о |
| Сумма | 92,9 | 92,8 | 93,02 | 93,31 | 88,02 | 87,67 | 100,1 | 93,2 | 93,05 | 99,98 | 92,7 | 93,01 |

| Компоненты | Алмазы V-VII разновидностей | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Кар-81 | | | | | Кар-82 | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| $SiO_2$ | 37,3 | 37,5 | 39,2 | 37,9 | 40,9 | 32,7 | 30,9 | 30,3 | 34,9 | 37,3 | 40,0 |
| $Al_2O_3$ | 23,2 | 24,4 | 24,6 | 24,0 | 25,7 | 21,5 | 20,6 | 21,5 | 22,0 | 23,2 | 25,2 |
| FeO | 34,8 | 33,1 | 31,4 | 31,4 | 27,9 | 25,2 | 23,8 | 28,7 | 31,4 | 34,6 | 29,1 |
| MgO | 2,39 | 2,71 | 2,81 | 2,23 | 3,03 | 4,51 | 4,84 | 4,44 | 2,23 | 2,39 | 3,03 |
| CaO | – | – | – | – | – | 0,85 | 2,67 | 0,62 | – | – | 0,19 |
| $K_2O$ | 1,85 | 1,50 | 1,10 | 1,84 | 2,07 | 2,00 | 1,93 | 1,79 | 1,84 | 1,85 | 1,47 |
| $SO_3$ | 0,61 | 0,70 | 0,70 | 0,54 | 0,41 | 0,44 | 0,91 | 0,27 | 0,54 | 0,61 | 0,92 |
| Cl | 0,10 | 0,09 | 0,08 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,08 | 0,10 | 0,09 | 0,11 | 0,08 |
| Сумма | 100,25 | 100 | 99,81 | 98,0 | 100,1 | 87,2 | 85,8 | 87,72 | 93,0 | 100,06 | 99,91 |


*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

© А.М.Логвинова, С.С.Угапьева, Е.И.Николенко, А.О.Серебрянников, В.П.Афанасьев, 2025

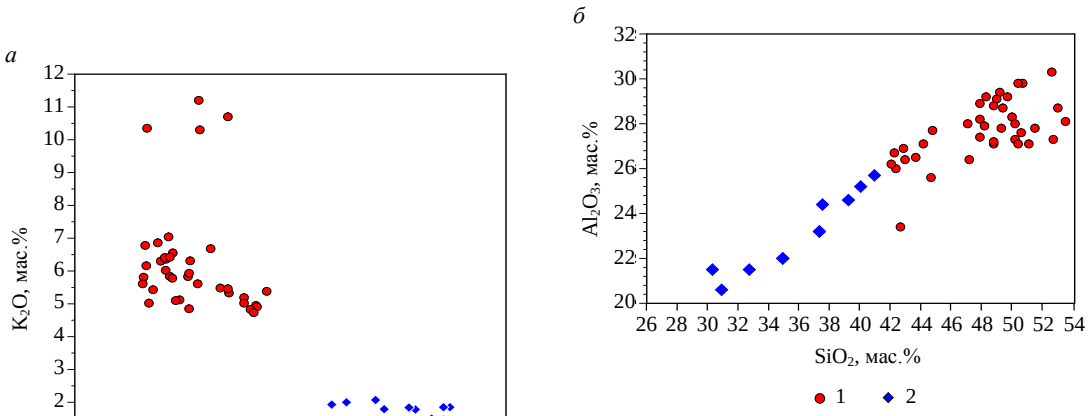



Рис.7. Химический состав расплавных включений в алмазах карнийского яруса разных типов:
*а* – $K_2O$-FeO; *б* – $Al_2O_3$-$SiO_2$
1 – додекаэдроиды со шрамами; 2 – алмазы V-VII разновидностей

***Изотопный состав углерода алмазов.*** Изучен изотопный состав углерода десяти алмазов: семи округлых додекаэдроидов со шрамами и трех кристаллов кимберлитового типа – двух октаэдров и одного кристалла переходной формы от октаэдра к додекаэдру с ламинарным строением граней. Все додекаэдроиды со шрамами показали легкий изотопный состав углерода, тогда как три последних – тяжелый изотопный состав (табл.5). Это свидетельствует о различиях источников углерода для формирования алмазов и, следовательно, о различных условиях образования.

*Таблица 5*

**Изотопный состав углерода алмазов из отложений карнийского яруса**

| Номер образца | Форма кристалла | Цвет | $\delta^{13}C$, ‰ |
|---|---|---|---|
| Кар-72 | Округлый додекаэдроид (шрамы) | Бесцветный | –19,55 |
| Кар-85 | Округлый додекаэдроид (шрамы) | Бесцветный | –20,36 |
| Кар-86 | Округлый додекаэдроид (шрамы) | Бесцветный | –21,93 |
| Кар-87 | Округлый додекаэдроид (шрамы) | Бесцветный | –22,33 |
| Кар-88 | Округлый додекаэдроид (шрамы) | Бесцветный | –24,65 |
| Кар-96 | Округлый додекаэдроид (шрамы) | Бесцветный | –23,25 |
| Кар-100 | Округлый додекаэдроид (шрамы) | Бесцветный | –21,27 |
| Кар-78 | Октаэдр | Бесцветный | –2,34 |
| Кар-6А | Переходная форма | Бесцветный | –8,82 |
| Кар-40 | Октаэдроид | Бесцветный | –10,21 |

**Обсуждение результатов исследования**

Изученные алмазы (97 кристаллов) представляют полигенную смесь, в целом характерную для северо-востока Сибирской платформы [11]. Среди изученных алмазов выделяются: алмазы кимберлитового типа; округлые додекаэдоиды со шрамами; кубоиды II разновидности: алмазы V-VII разновидностей.

Додекаэдроиды со шрамами имеют отличия от других групп алмазов. Если алмазы V-VII и II разновидностей типичны для всего северо-востока платформы и распространены на площади до 400 тыс. км$^2$ [11], то описанные округлые додекаэдроиды в карнийских отложениях Булкура отличаются от додекаэдроидов остальной территории. В первую очередь это касается высокой дефектности булкурских кристаллов, наличия внутренних трещин, выполненных недиагностируемым материалом, возможно эпигенетическим. В процессе вскрытия этих трещин при растворении по ним образуются шрамы. Аналогичные включения и шрамы отмечаются на алмазах V-VII разновидностей, близок и перечень микровключений в них (см. табл.2). Изучение изотопного состава углерода рассматриваемых алмазов показал облегченный изотопный состав углерода $\delta^{13}C$ от –19,6 до –24,7 ‰.


*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

Изотопный состав углерода алмазов является одним из важнейших показателей источника вещества в генетических вопросах алмазообразования [35]. Для большинства кимберлитовых алмазов $\delta^{13}C$ составляет от –4 до –8 ‰. Считается, что перидотитовые алмазы и близкие к ним по изотопному составу эклогитовые образовались при участии мантийного углерода [36]. Облегченный изотопный состав углерода свидетельствует о более сложных субдукционных процессах. Отметим, что алмазы из офиолитов также обогащены легким изотопом углерода. Изотопный состав углерода характеризовался величинами $\delta^{13}C$ от –18,8 до –28,4 ‰ [37].

В россыпях процент алмазов, обогащенных легким изотопом углерода, значительно выше. Аллювиальные алмазы V-VII разновидностей характеризуются $\delta^{13}C_{сред}$ от –20 до –24 ‰ [38]. Можно было бы предположить, что додекаэдроиды со шрамами представляют собой результат глубокого растворения алмазов V-VII разновидностей, тем более по изотопному составу углерода они полностью схожи (табл.5) [39]. Однако по концентрации и формам агрегирования азота они различаются (см. табл.1). Этот тип отличается и по химическому составу заключенных в алмазе расплавных включений. Такие включения в додекаэдроидах по сравнению с алмазами V-VII разновидности менее железистые (в среднем 12 и 31 мас.% FeO), а также более обогащены калием (в среднем 5,5 и 1,7 мас.% $K_2O$). Кроме того, додекаэдроиды лучше окристаллизованы, у них отмечаются двойниковые вростки, чего не может быть у алмазов V-VII разновидностей, характеризующихся балласовым строением [40]. Катодолюминесцентная микроскопия позволяет выявить зональные неоднородности в природных кристаллах алмаза и получить информацию об условиях роста и постростовых изменениях [41, 42]. Картина катодолюминесценции на рис.3 показывает ростовую зональность кристалла, конформную его поверхности, что свидетельствует о низкой степени растворения. Поэтому додекаэдрическая форма, вероятно, близка к ростовой и формируется в процессе быстрого дефектного роста. Мы полагаем, что изученные додекаэдроиды со шрамами из карнийских отложений Булкурской антиклинали представляют отдельный тип алмазов, характерных для северо-востока платформы. Этот тип алмазов наиболее близок к алмазам V-VII разновидностей, отличаясь несколько более качественной структурой. В генетическом плане обе разновидности близки и связаны наиболее вероятно с субдукцией. Додекаэдроиды в других россыпях данного региона имеют более совершенное строение. Так, додекаэдроиды из россыпи р. Куойка (левый приток р. Оленек) характеризуются ювелирным качеством [10].

Для алмазов из россыпей северо-востока Сибирской платформы авторы настоящей статьи разработали схему деления на группы по типам коренных источников [11]: алмазы из кимберлитов фанерозойского возраста; округлые додекаэдроиды из источников докембрийского возраста (предположительно, лампроитов); желто-оранжевые кубоиды II разновидности из источников докембрийского возраста неизвестного типа; алмазы V-VII разновидностей из докембрийских источников неизвестного типа; «якутиты» – алмазы Попигайской астроблемы, присутствующие в неоген-четвертичных россыпях. Только алмазы из кимберлитов фанерозойского возраста сопровождаются индикаторными минералами, алмазы из докембрийских источников индикаторами не сопровождаются, по крайней мере они надежно не диагностированы, потому затруднительно определение типов их коренных источников. Тот же подход мы применяем для характеристики алмазов из карния Булкурской антеклизы. Из общей совокупности алмазов около 13 % соответствуют кимберлитовым, 51 % – додекаэдроиды со шрамами, около 35 % – алмазы V-VII разновидностей, остальное – кубоиды. Кимберлитовые алмазы, судя по характеру сопровождающих их индикаторных минералов кимберлитов, происходят наиболее вероятно из кимберлитов раннетриасового возраста [11, 43]. Для остальных алмазов авторы настоящей статьи предполагают происхождение из коренных источников неизвестного типа докембрийского возраста.

Кимберлиты, судя по полному отсутствию механического износа индикаторных минералов, разнообразной гранулометрии и их изобилию в карнийских отложениях, располагаются в непосредственной близости от изученной площади [11]. Но найти их крайне сложно из-за погружения карнийского пласта в западных румбах. Попадание докембрийских алмазов объясняется геологическим развитием региона. С конца перми началось активное развитие Оленекского поднятия, вследствие чего обнажились и активно эродировались в его пределах докембрийские отложения, в частности обломочные отложения венда, которые являются наиболее реальным промежуточным


*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

коллектором для докембрийских алмазов по всей Сибирской платформе [11]. На тот период еще не существовал Предверхоянский прогиб и осуществлялся прямой снос обломочного материала, включая алмазы, с Оленекского поднятия на район Булкурской антиклинали [7]. В пределах Оленекского поднятия алмазы из рэтских отложений верхнего триаса, по проведенным нами исследованиям, аналогичны булкурским [3]. Геологическая перестройка региона началась в конце мезозоя с формированием Верхоянской складчатой системы, вследствие чего район Булкура был отделен от Оленекского поднятия Предверхоянским прогибом. Вероятно, в районе Булкура существовала геоморфологическаая ловушка, благодаря которой именно здесь накопилось большое количество алмазов, тогда как на продолжении карния в обе стороны от Булкура количество алмазов уменьшается.

По мнению некоторых исследователей [4], источником алмазов карнийского яруса являются триасовые кимберлиты. Триасовые датировки получены для цирконов кимберлитового типа [44], но этот факт не несет каких-либо доказательств алмазоносности кимберлитов. В настоящей статье предполагается докембрийский возраст коренных источников и попадание их в триасовые и более молодые россыпи в результате размыва протерозойских прибрежно-морских отложений в пределах выступов докембрия, в частности на Оленекском поднятии [11]. Предложенная интерпретация алмазоносности карнийского яруса в пределах Булкурской антиклинали полностью вписывается в общую картину алмазоносности Сибирской платформы [11]. В практическом плане в районе Булкурской антиклинали реальна как россыпная алмазоносность незначительного масштаба, так и коренная. Но ее реализация крайне осложнена характером поисковой обстановки, обусловленным погружением продуктивного пласта в западных румбах.

**Заключение**

Для алмазов карнийского яруса предложена полигенность по типоморфизму и типам коренных источников. Выделен тип кимберлитовых алмазов, которые связываются с фанерозойскими кимберлитовыми телами, и три типа алмазов, не характерных для кимберлитовых тел и связанных с докембрийскими источниками неизвестного типа. Тип источников установить не удается, поскольку алмазы не сопровождаются соответствующими индикаторными минералами и выводы можно делать только по самим алмазам. Большинство из них имеет легкий изотопный состав углерода, что указывает на возможность связи их коренных источников с процессами субдукции.

На основе комплексных исследований алмазов из карнийских отложений Булкурской антиклинали выделен новый тип – округлые додекаэдроиды со шрамами, которые отличаются от додекаэдроидов остальной территории проявления россыпной алмазоносности. Этот отдельный тип аллювиальных алмазов, вероятно, характерен для северо-востока Сибирского кратона.

Предполагается, что коренные источники изученных алмазов додекаэдрического габитуса имели докембрийский возраст, а их попадание в триасовые и более молодые россыпи можно объяснить как результат размыва протерозойских прибрежно-морских отложений в пределах выступов докембрия, в частности на Оленекском поднятии. Такая интерпретация алмазоносности карнийского яруса в пределах Булкурской антиклинали не противоречит общим представлениям об алмазоносности Сибирской платформы [11].

*Авторы выражают глубокую благодарность д-ру Рихарду Вирту (Центр наук о Земле им. Гельмгольца, Потсдам, Германия) за проведенные исследования.*

**ЛИТЕРАТУРА**

1. *Селиванова В.В.* Типоморфизм алмаза и его минералов-спутников из прибрежно-морских триасовых россыпей северного Верхоянья: Автореф. дис. … канд. геол.-минерал. наук. М.: Московский ордена Трудового Красного Знамени геологоразведочный институт им. С.Орджоникидзе, 1991. 20 с.

2. *Граханов С.А., Голобурдина М.Н., Иванов А.С., Ащепков И.В.* Минералого-петрографическая характеристика алмазоносных образований Булкурской антиклинали, Республика Саха (Якутия) // Региональная геология и металлогения. 2024. № 98. С. 41-63. DOI: 10.52349/0869-7892_2024_98_41-63

3. *Граханов С.А., Коптиль В.И.* Триасовые палеороссыпи алмазов северо-востока Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 11. С. 1191-1201.

4. *Граханов С.А., Голобурдина М.Н.* Древние россыпи алмазов Российской Федерации // Региональная геология и металлогения. 2024. № 99. С. 68-106. DOI: 10.52349/0869-7892_2024_96_68-106

5. *Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н., Похиленко Н.П.* Поисковая минералогия алмаза. Новосибирск: Гео, 2010. 650 с.



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

6. *Голобурдина М.Н., Граханов С.А., Проскурнин В.Ф.* Особенности петрографического состава алмазоносных карнийских образований Булкурской антиклинали северо-востока Сибирской платформы // Литосфера. 2023. Т. 23. № 4. С. 654-671. DOI: 10.24930/1681-9004-2023-23-4-654-671

7. *Соболев Н.В.* О минералогических критериях алмазоносности кимберлитов // Геология и геофизика. 1971. № 3. С. 70-80.

8. *Устинов В.Н., Микоев И.И., Пивень Г.Ф.* Поисковые модели коренных месторождений алмазов севера Восточно-Европейской платформы // Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 299-318. DOI: 10.31897/PMI.2022.49

9. *Зинчук Н.Н., Коптиль В.И.* Типоморфизм алмазов Сибирской платформы. М.: Недра, 2003. 603 с.

10. *Зинчук Н.Н., Коптиль В.И.* Особенности алмазов из древних осадочных толщ на площадях влияния кристаллических массивов // Отечественная геология. 2020. № 3. С. 75-88. DOI: 10.24411/0869-7175-2020-10017

11. *Afanasiev V.P., Pokhilenko N.P.* Approaches to the diamond potential of the Siberian craton: A new paradigm // Ore Geology Reviews. 2022. Vol. 147. № 104980. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2022.104980

12. *Граханов С.А., Проскурнин В.Ф., Петров О.В., Соболев Н.В.* Алмазоносные туфогенно-осадочные породы триаса арктической зоны Сибири // Геология и геофизика. 2022. Т. 63. № 4. С. 550-578. DOI: 10.15372/GiG2021195

13. *Harris J.W., Smit K.V., Fedortchouk Y., Moore M.* Morphology of Monocrystalline Diamond and its Inclusions // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2022. Vol. 88. P. 119-166. DOI: 10.2138/rmg.2022.88.02

14. *Walter M.J., Kohn S.C., Araujo D. et al.* Deep Mantle Cycling of Oceanic Crust: Evidence from Diamonds and Their Mineral Inclusions // Science. 2011. Vol. 334. Iss. 6052. P. 54-57. DOI: 10.1126/science.1209300

15. *Stachel T., Harris J.W.* The origin of cratonic diamonds – Constraints from mineral inclusions // Ore Geology Reviews. 2008. Vol. 34. Iss. 1-2. P. 5-32. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2007.05.002

16. *Stachel T., Luth R.W.* Diamond formation – Where, when and how? // Lithos. 2015. Vol. 220-223. P. 200-220. DOI: 10.1016/j.lithos.2015.01.028

17. *Klein-BenDavid O., Izraeli E.S., Hauri E., Navon O.* Mantle fluid evolution – a tale of one diamond // Lithos. 2004. Vol. 77. Iss. 1-4. P. 243-253. DOI: 10.1016/j.lithos.2004.04.003

18. *Klein-BenDavid O., Izraeli E.S., Hauri E., Navon O.* Fluid inclusions in diamonds from the Diavik mine, Canada and the evolution of diamond-forming fluids // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2007. Vol. 71. Iss. 3. P. 723-744. DOI: 10.1016/j.gca.2006.10.008

19. *Летникова Е.Ф., Лобанов С.С., Похиленко Н.П. и др.* Источники поступления обломочного материала в карнийский алмазоносный горизонт северо-востока Сибирской платформы // Доклады Академии наук. 2013. Т. 451. № 2. С. 193-196. DOI: 10.7868/S0869565213200218

20. *Орлов Ю.Л.* Минералогия алмаза. М.: Наука, 1984. 170 с.

21. *Smith E.M., Kopylova M.G., Frezzotti M.L., Afanasiev V.P.* Fluid inclusions in Ebelyakh diamonds: Evidence of $CO_2$ liberation in eclogite and the effect of $H_2O$ on diamond habit // Lithos. 2015. Vol. 216-217. P. 106-117. DOI: 10.1016/j.lithos.2014.12.010

22. *Stachel T., Aulbach S., Harris J.W.* Mineral Inclusions in Lithospheric Diamonds // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2022. Vol. 88. P. 307-391. DOI: 10.2138/rmg.2022.88.06

23. *Губанов Н.В., Зедгенизов Д.А., Васильев Е.А., Наумов В.А.* Новые данные о составе среды кристаллизации волокнистых алмазов из россыпей Западного Урала // Записки Горного института. 2023. Т. 263. С. 645-656.

24. *Reutsky V.N., Borzdov Yu.M., Palyanov Yu.N.* Effect of diamond growth rate on carbon isotope fractionation in Fe–Ni–C system // Diamond and Related Materials. 2012. Vol. 21. P. 7-10. DOI: 10.1016/j.diamond.2011.10.001

25. *Wirth R.* Focused Ion Beam (FIB): A novel technology for advanced application of micro- and nanoanalysis in geosciences and applied mineralogy // European Journal of Mineralogy. 2004. Vol. 16. № 6. P. 863-876. DOI: 10.1127/0935-1221/2004/0016-0863

26. *Wirth R.* Focused Ion Beam (FIB) combined with SEM and TEM: Advanced analytical tools for studies of chemical composition, microstructure and crystal structure in geomaterials on a nanometre scale // Chemical Geology. 2009. Vol. 261. Iss. 3-4. P. 217-229. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2008.05.019

27. *Green B.L., Collins A.T., Breeding C.M.* Diamond Spectroscopy, Defect Centers, Color, and Treatments // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2022. Vol. 88. P. 637-688. DOI: 10.2138/rmg.2022.88.12

28. *Ashfold M.N.R., Goss J.P., Green B.L. et al.* Nitrogen in Diamond // Chemical Reviews. 2020. Vol. 120. Iss. 12. P. 5745-5794. DOI: 10.1021/acs.chemrev.9b00518

29. *Speich L., Kohn S.C., Bulanova G.P., Smith C.B.* The behaviour of platelets in natural diamonds and the development of a new mantle thermometer // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2018. Vol. 173. Iss. 5. № 39. DOI: 10.1007/s00410-018-1463-4

30. *Goss J.P., Briddon P.R., Hill V. et al.* Identification of the structure of the 3107 $cm^{-1}$ H-related defect in diamond // Journal of Physics: Condensed Matter. 2014. Vol. 26. № 14. № 145801. DOI: 10.1088/0953-8984/26/14/145801

31. *Васильев Е.А.* Дефекты кристаллической структуры в алмазе как индикатор кристаллогенеза // Записки Горного института. 2021. Т. 250. С. 481-491. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.1

32. *Молотков А.Е., Павлушин А.Д., Смелов А.П. и др.* Дефектно-примесный состав кристаллов алмаза из отложений карнийското яруса северо-востока сибирской платформы // Отечественная геология. 2014. № 5. С. 74-79.

33. *Weiss Y., Czas J., Navon O.* Fluid Inclusions in Fibrous Diamonds // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2022. Vol. 88. P. 475-532. DOI: 10.2138/rmg.2022.88.09

34. *Логвинова А.М., Вирт Р., Томиленко А.А. и др.* Особенности фазового состава наноразмерных кристаллофлюидных включений в аллювиальных алмазах северо-востока Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 11. С. 1634-1648.

35. *Galimov E.M.* Isotope fractionation related to kimbelite magmatism and diamond formation // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1991. Vol. 55. N 6. P. 1706-1708. DOI: 10.1016/0016-7037(91)90140-Z

36. *Kan Li, Long Li, Pearson D.G., Stachel T.* Diamond isotope compositions indicate altered igneous oceanic crust dominates deep carbon recycling // Earth and Planetary Science Letters. 2019. Vol. 516. P. 190-201. DOI: 10.1016/j.epsl.2019.03.041

37. *Weiwei Wu, Jingsui Yang, Wirth R. et al.* Carbon and nitrogen isotopes and mineral inclusions in diamonds from chromitites of the Mirdita ophiolite (Albania) demonstrate recycling of oceanic crust into the mantle // American Mineralogist. 2019. Vol. 104. Iss. 4. P. 485-500. DOI: 10.2138/am-2019-6751



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

38. *Рагозин А.Л., Шацкий В.С., Зедгенизов Д.А.* Новые данные о составе среды кристаллизации алмазов V разновидности из россыпей северо-востока Сибирской платформы // Доклады Академии наук. 2009. Т. 425. № 4. С. 527-531.

39. *Ragozin A.L., Zedgenizov D.A., Kuper K.E., Shatsky V.S.* Radial mosaic internal structure of rounded diamond crystals from alluvial placers of Siberian platform // Mineralogy and Petrology. 2016. Vol. 110. Iss. 6. P. 861-875. DOI: 10.1007/s00710-016-0456-0

40. *Pavlushin A., Zedgenizov D., Vasilev E., Kuper K.* Morphology and Genesis of Ballas and Ballas-Like Diamonds // Crystals. 2021. Vol. 11. Iss. 1. № 17. DOI: 10.3390/cryst11010017

41. *Wiggers de Vries D.F., Drury M.R., de Winter D.A.M. et al.* Three-dimensional cathodoluminescence imaging and electron backscatter diffraction: tools for studying the genetic nature of diamond inclusions // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2011. Vol. 161. Iss. 4. P. 565-579. DOI: 10.1007/s00410-010-0550-y

42. *Vasilev E., Zedgenizov D., Zamyatin D. et al.* Cathodoluminescence of Diamond: Features of Visualization // Crystals. 2021. Vol. 11. Iss. 12. № 1522. DOI: 10.3390/cryst11121522

43. *Николенко Е.И., Логвинова А.М., Изох А.Э. и др.* Ассоциация хромшпинелидов из верхнетриасовых гравелитов северо-востока Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 10. С. 1680-1700. DOI: 10.15372/GiG20181011

44. *Agashev A.M., Chervyakovskaya M.V., Serov I.V. et al.* Source rejuvenation vs. re-heating: Constraints on Siberian kimberlite origin from U–Pb and Lu–Hf isotope compositions and geochemistry of mantle zircons // Lithos. 2020. Vol. 364-365. № 105508. DOI: 10.1016/j.lithos.2020.105508

***Авторы*: Алла Михайловна Логвинова,** *канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник* (*Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия*), *logv@igm.nsc.ru*, *https://orcid.org/0000-0003-3343-6540*, **Саргылана Семеновна Угапьева,** *канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник* (*Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия*), *https://orcid.org/0000-0002-3999-0270*, **Евгений Игоревич Николенко,** *канд. геол.-минерал. наук, главный геолог* (*ALROSA* (*Zimbabwe*) *Limited, Хараре, Зимбабве*), *https://orcid.org/0000-0003-1556-6026*, **Алексей Олегович Серебрянников,** *младший научный сотрудник* (*Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия*), *https://orcid.org/0000-0002-7723-2366*, **Валентин Петрович Афанасьев,** *д-р геол.-минерал. наук, главный научный сотрудник* (*Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия*), *https://orcid.org/0000-0002-9768-4685*.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*