УДК 549.211:553.81

Посвящается академику РАН Э.М. Галимову

ВНЕМАНТИЙНЫЕ ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ АЛМАЗА И ПЕРСПЕКТИВЫ КАМЧАТСКОЙ АЛМАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ РОССИИ

© 2024 г. В. И. Силаев^{а,} *, Г. А. Карпов^{b,} **, А. Г. Дёмин^с, Л. П. Аникин^b, Л. П. Вергасова^b, В. Н. Филиппов^a, И. В. Смолева^a, Е. А. Васильев^d, А. Е. Сухарев^a, Б. А. Макеев^a, А. Ф. Хазов^a

^аИнститут геологии Коми НЦ УрО РАН, ул. Первомайская, 54, Сыктывкар, 167982 Россия ^bИнститут вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, бульвар Пийпа, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия ^cАО "Сибирский горно-металлургический альянс" (СиГМА), ул. Мишенная, 106, Петропавловск-Камчатский, 683016 Россия ^dСанкт-Петербургский горный университет, Bacильевский остров, 21 Линия, 2, Санкт-Петербург, 199106 Россия *e-mail: silaev@geo.komisc.ru **e-mail: karpovga@kscnet.ru

> Поступила в редакцию 23.07.2023 г. После доработки 27.09.2023 г. Принята к публикации 06.12.2023 г.

Приводятся результаты исследований двух новых генетических типов алмазов, обнаруженных на Камчатке, образовавшихся во внемантийных условиях, на что указывает отсутствие в них признаков посткристаллизационного отжига с образованием агрегированных азотных дефектов. Первый из этих типов определяется нами как вулкано-атмоэлектрогенный, образующийся непосредственно в вулканическом пепло-газовом облаке за счет глубинного метана вследствие атмосферных электрических разрядов. Второй генетический тип алмазов, образовавшийся на глубине в среде магматогенно-пневматолито-гидротермального рудного месторождения, можно определить как эксплозивно-туффизитовый. Промышленная перспективность проявлений этих типов дает основание констатировать открытие в России новой алмазоносной провинции — Камчатской.

Ключевые слова: Камчатка, внемантийные алмазы, новая алмазоносная провинция России

DOI: 10.31857/S0203030624020064, EDN: LGHWTK

ВВЕДЕНИЕ

Алмазы на Камчатке обнаруживаются едва ли не непрерывно уже в течение почти 50 лет. Основные вехи этой замечательной одиссеи связаны с экспедициями и исследованиями геологов, вулканологов и минералогов: Ф.Ш. Кутыева, А.И. Байкова, Б.К. Долматова, М.Г. Патоки, В.С. Шеймовича, Р.Л. Дунин-Барковского, В.А. Селивестрова, Ф.В. Каминского, Л.П. Аникина, Г.А. Карпова, Л.П. Вергасовой, А.Г. Дёмина [Кутыев, Кутыева, 1975; Шило и др., 1979; Каминский и др., 1979; Байков и др., 1995; Дунин-Барковский и др., 2013; Аникин и др., 2015; Гордеев и др., 2019]. В настоящее время известны проявления алмазов в эксплозивных продуктах извержений по меньшей мере шести камчатских вулканов (Ича, Авача, Алмазный, Толбачинский (БТТИ и ТТИ-50), Ключевской (включая новейшее извержение через прорыв Горшкова, Корякский) и одного курильского (Алаид) [Горшков и др., 1995; Гордеев и др., 2014; Силаев и др., 2016; Галимов и др., 2016; Каminsky et al., 2016; Аникин и др., 2018]. Кроме того, алмазы на Камчатке были обнаружены



Рис. 1. Морфология и фоторентгенограмма микрополикристаллических (карбонадообразных) алмазов из продуктов извержения Авачинского вулкана [Kaminsky et al., 2016].

нитовым массивом Филиппа, базальт-ультрабазитовым комплексом Корякско-Камчатского региона, Ольховской золото-платиновой россыпью и в форме "камчатитов" на севере Камчатки [Kamincky et al., 2019].

В 2015 г. алмазы были обнаружены и на Озерновском золоторудном месторождении в северной части Камчатки. Этот объект был открыт в 1971–1973 гг. как крупная магматогенно-гидротермальная палеосистема, сложенная пикробазальтами, андезибазальтами, андезитами, инъецированными более поздними брекчиевидными туфобрекчиями и туффизитоподобными магматитами. На весь этот сложный комплекс были наложены оруденелые аргиллизиты монтмориллонитового, диккитового, пирофиллитового состава с золотом, серебром, самородными теллуром и висмутом, Zn-Fe-Sb блеклыми рудами, Cu-Ag сульфосолями и весьма необычным самородно-карбидным вольфрам-медно-никель-серебряным оруденением [Дёмин, 2015, 2018]. Именно в тесном парагенезисе с последним и были обнаружены алмазы, прогнозные ресурсы которых в настоящее время оцениваются примерно в 10 млн карат¹.

АЛМАЗЫ В ПРОДУКТАХ ВУЛКАНИЗМА

Первые обнадеживающие в практическом смысле результаты на Камчатке были получены

в связи с палеоценовым дунит-клинопироксе- А.И. Горшковым с сотрудниками [Горшков и др., 1995] по микрополикристаллическим карбонадоподобным алмазам, обнаруженным в продуктах извержений Авачинского вулкана (рис. 1). Размеры преимущественно субизометричных частиц карбонадо статистически колеблются в пределах $(150 \pm 35) \times (105 \pm 30)$ мкм. Величина микрокристаллов алмазной фазы в них лежат в пределах 10 ± 6 мкм. Проведенные нами исследования образцов алмазосодержащих авачитов показали, что изотопный состав алмазного углерода в них колеблется в пределах -30...-27‰, что вполне согласуется с изотопной статистикой по углеродным фазам в продуктах камчатского вулканизма [Силаев и др., 2019].

> Наиболее высокая алмазоносность вулканитов в настоящее время выявлена в связи с тефрой Большого трещинного Толбачинского извержения 1975-1976 гг. и Трещинного Толбачинского извержения 2012-2013 гг. [Карпов и др., 2014а, 2014б; Силаев и др., 2015а, 2015б; Гордеев и др., 2019; Галимов и др., 2020; Galimov et al., 2020]. В последнем случае были найдены около 1000 кристаллов, образующих локальные ураганные концентрации.

> Обнаруженные в тефре алмазы варьируются по размеру в статистических пределах $(456 \pm 75) \times (414 \pm 78) \times (387 \pm 103)$ мкм, характеризуясь плоскогранно-кубооктаэдрическим габитусом (рис. 2) с акцессорными гранями ромбододекаэдра {110}, тетрагонтриоктаэдра {311}, тригонтриоктаэдра {332}. Установлена довольно частая встречаемость шпинелевых двойников, в которых на ребрах между гранями (100) и (111) выявляются узкие грани (311)

¹ Корр. ТАСС Елена Верещака: "До 10 млн карат алмазов может содержаться в рудах Озерновского рудного поля на севере Камчатки". Об этом сообщила в среду пресс-служба компании "Сибирский горно-металлургический альянс" (СиГМА), которая занимается разработкой месторождения. Петропавловск-Камчатский, 02.09.2015 г.



Рис. 2. Внешний вид (слева) и габитус (справа) толбачинских алмазов.



Рис. 3. Спектроскопия толбачинских алмазов.

а – ИК-поглощение, б – комбинационное рассеяние (рамановская), в – фотолюминесценция.

и (311) тетрагонтриоктаэдра. Часть кристаллов представлена обломками. По окраске алмазы изменяются от бесцветных до желтых и желтовато-зеленых. Методом катодолюминесценции в монокристаллах выявлена зональная анатомия с октаэдрическим зародышем в центре и кубооктаэдрической оболочкой, чего не наблюдалось в синтетических алмазах. На гранях встречаются пирамидальные ямки с индукционными поверхностями совместного роста.

Таким образом, на толбачинских алмазах господствуют наиболее плотные F-грани – октаэдрические и кубические [Hartman, Perdok, 1955a, 1955b], на фоне которых спорадически проявляются ромбододекаэдрическая S-грань и тетрагон- и тригонтриоктаэдрические K-грани. Такой габитус типичен для алмазов, образовавшимися в сильно неравновесных термодинамических условиях при значительном пересыщении по углероду [Бескрованов, 2012] на так называемой стадии выключения [Ракин, Пискунова, 2012].

Фазовая диагностика исследуемых зерен осуществлялась рентгеноструктурным, КР-спектроскопическим и термическим методами. Вычисленный по рентгенограмме параметр элементарной ячейки составил 0.3556 (3) нм. Рамановские спектры были получены при комнатной температуре и температуре –196°С с использованием КР-спектрометра Renishaw in Via (лазеры 785 и 514.5 нм (спектральное разрешение составило соответственно 1.6 и 1.2 см⁻¹, локальность анализа – 1 мкм)) и термостолика Linkam TMS 600. При исследовании с лазером 785 нм в КР-спектре на фоне широкой полосы люминесценции проявилась сильная линия 1332 см⁻¹ с FWHN = 5–7 см⁻¹, соответствуюшая алмазу (рис. 3). В спектре ИК-поглощения в однофононной области зарегистрированы две линии 1130 и 1345 см⁻¹, отвечающие точечным азотным С-центрам и линия 1332 см⁻¹,



Рис. 4. Толбачинские алмазы с примазками вулканогенных микроминералов на поверхности (светлое) (а, в) и участки рентгеноспектрального микрозондирования (б, г). СЭМ-изображения в режиме упруго-отраженных электронов.



Рис. 5. Частица природного дюралюминия с микровключениями алмазов из эксплозивных продуктов извержения Ключевского вулкана (а) и типичный габитус кристаллов в шпинелевом двойнике (б).

обусловленная С-дефектами, образованными ионами азота в положительном зарядовом состоянии. ИКС-линий, указывающих на присутствие азотных А и В1-дефектов, не обнаружено. Валовая концентрация структурного азота при расчете методом С.Р. Бойда составила в изученных кристаллах для С-дефектов 150-500 ppm, для С-дефектов в форме N⁺, которые появляются в алмазах только при быстром снижении температуры кристаллизации [Бабич, 2006], концентрация оценивается в 1-30 ppm. Именно точечный – неагрегированный тип азотных дефектов и отвечает за желтую окраску толбачинских алмазов, а их зеленая окраска может указывать на присутствие парамагнитных центров Ni-N-Н [Минеева и др., 1994; Третьякова, 2016].

Исследованные кристаллы проявили желто-зеленую люминесценцию. В спектрах фотолюминесценции зафиксировались полосы безфононных колебаний с максимумами при 575 и 638 нм, которые приписываются простейшему азот-вакансионному (NV) центру – непосредственному производному С-дефектов соответственно в нейтральном и заряженном состояниях. Полосу с максимумом при 690–700 нм можно приписать никелевым центрам.

На поверхности кристаллов имеются микропленки и примазки (рис. 4), сложенные фазами и минералами эксплозивного происхождения, безусловно доказывающими вулканогенное происхождение толбачинских алмазов [Силаев и др., 2015а, 2015б; Карпов и др., 2017; Галимов и др., 2020; Силаев и др., 2023а]: стеклофаза андезибазальт-андезитового состава; оливин $(Mg_{1.82-1.86}Fe_{0.14-0.18})_2[SiO_4];$ халькокианит (Cu_{0.86-1} Zn_{0-0.02}Ca_{0-0.09}Fe_{0-0.01}K_{0-0.01})[SO_4]; тенорит CuO; бунзенит (Ni_{0 83-0 88}Cu_{0-0 13}Mn_{0 04-0 11}Fe_{0-0 04})O; никелевый купорос Ni[SO₄]; Fe-Cu-Ni манганит (Mn_{0.52}Ni_{0.23}Cu_{0.16}Fe_{0.13})O; паратакамит $(Cu_{1.92-1.95}Zn_{0.05-0.08})_2Cl_{1.02-1.24}Br_{0-0.05}[SO_4]_{0.03-0.13}$ (OH)_{178-2 84}; виллиманинит CuS₂; силициды состава (Mn,Ni)₄Si-(Mn,Ni)₅Si₂ и Mn₄Si-Mn₅Si₂; самородный алюминий и ассоциация металлических сплавов Fe-Ni-Cu-W-Al. Внутри кристаллов выявлены субмикронные включения карбидов Fe, W, Si.

Второй пример вулканогенной алмазоносности — эксплозивные продукты базальт-андезибазальтового состава извержения 1988 г. вулкана Ключевского [Силаев и др., 2016]. В этом случае алмазы были обнаружены в частицах природного дюралюминия размером (220–300) × × (65–120) мкм (рис. 5). В таких частицах алмазы



Рис. 6. Пример атмоэлектрической разрядки в формирующийся эруптивный пепло-газовый столб (а) и схема строения зрелого пепло-газового облака – природного химического реактора (б). Области на схеме: 1 - квазиламинарного истече-

ния пепло-газовых струй; 2 – разрушения квазиламинарного течения; 3 - преимущественно горизонтального растекания пепло-газовой тучи; 4, 5 – осаждения соответственно крупной и мелкой фракций пирокластического материала.

образуют вкрапленность хорошо ограненных кристаллов кубоктаэдрического габитуса размером $(2.5-4) \times (2-3)$ мкм, иногда сдвойникованных. Фазовая диагностика алмазов производилась рентгеновским и КР-спектроскопическим методами. На фоторентгенограмме были зарегистрированы три основных отражения для алмазов (Å): 2.05 (111); 1.26 (220); 1.08 (311). Параметр элементарной ячейки составил 3.57 Å. По ИК-спектроскопическим и фотолюминесцентным свойствам ключевские алмазы тождественны толбачинским.

Следует отметить, что описанные микроалмазы – уже не единственное алмазопроявление на Ключевском вулкане. Недавно в пепловых продуктах его извержения 2021 г. (Прорыв Горшкова) нами были обнаружены два кристалла размером около 500 мкм – зеленоватого цвета, кубоктаэдрического габитуса – фазово диагностированные фоторентгеноструктурным методом.

Обобобщение полученных данных приводит к выводу о том, что все алмазы в вулканических эксплозиях по своим кристалломорфологическим и спектроскопическим свойствам практически тождественны, принципиально отличаясь при этом от кимберлитовых алмазов мантийного происхождения. Последнее располагает нас к отнесению такого рода алмазов к особенному генетическому типу [Карпов, 2018; Силаев и др., 2015а]. Нахождение охарактеризованных алмазов в рыхлых эксплозивных продуктах извержений вулканов в явной связи с вулканическими

минерализациями приводит к выводу о том, что они являются результатом шок-стимулированной кристаллизации непосредственно в вулканическом пеплогазовом облаке вследствие атмосферных электрических разрядов (рис. 6). На этом основании такого рода алмазы могут быть определены по происхождению как вулкано-эруптивные или вулкано-атмоэлектрогенные².

Следует подчеркнуть, что эффект атмоэлектрогенного образования углеродных фаз в природе вовсе не ограничивается толбачинскими алмазами и парагенетичными им графитом и углеродными минералоидами. Так, в начале 1990-х гг. в США была обнаружена широкая серия фуллеренов от C₄₆ до C₇₀, образовавшихся в результате удара молний в кварцевый латит – вулканическую породу среднего состава [Daly et al., 1993], что в настоящее время тоже рассматривается как весьма научно-перспективный геологический, минералогический и кристаллографический феномен [Войтеховский, Степенщиков, 2002].

АЛМАЗЫ В ОЗЕРНОВСКОМ W-Cu-Ag-ЗОЛОТОРУДНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ

Озерновское алмазосодержащее вольфрам-медно-серебряно-золоторудное месторождение, не имеющее в настоящее время аналогов нигде в мире, представляет собой гидротермально-измененную андезибазальтовую вулканическую постройку, инъецированную ветвящимися трубообразными телами туффизитов и оруденелых туфобрекчий, на которые наложены актинолит-эпидот-хлоритовые пропилиты и аргиллизиты монтмориллонитового, кремнисто-диккит-монтмориллонитового, диккит-каолинитового состава.

В геолого-структурном отношении месторождение характеризуется трехэтажным строением. Верхний структурный этаж (0-300 м) сложен апоандезибазальтовыми смектитовыми аргиллизитами с продуктивными и высокопродуктивными на золото теллуро-селено-висмутовой,

82

 $^{^2}$ В 2016 г. в Международную академию авторов научных открытий и изобретений при РАН была подана заявка на научное открытие: Л.П. Аникин, Г.А. Карпов, В.И. Силаев, В.А. Петровский "Внемантийный вулкано-эруптивный (толбачинский) тип алмазообразования, генетически связанный с базальтоидным вулканизмом и обусловленный воздействием электрических разрядов на углеводородосодержащие вулканические газы, выделяющиеся при извержении".



Рис. 7. ЭД-спектры, полученные от микроминералов, ассоциированных с алмазами в Озерновском месторождении.

а – каолинит, б – джирит-спионкопит, в-д – металлические сплавы (в – медно-вольфрамовый, г – медно-серебряный, д – серебряно-никель-медный).

селено-теллурато-висмутовой и висмут-теллуро-железооксидной минерализациями. Валовые содержания золота - до 200 г/т, селена – до 1.28 кг/т, теллура – до 10 кг/т. Средний структурный этаж (300-400 м) образован монтмориллонит-диккит-опал-кварцевыми метасоматитами с прожилково-вкрапленными продуктивными на золото сульфидно-селено-медными, теллуро-селенидо-висмутовыми, медно-мышьяково-сурьмяно-сульфидными минерализациями. В составе нижнего структурного этажа (400-500 м) выделяются уплощенно-трубчатые эруптивные тела апоандезибазальтовых нонтронит-монтмориллонитовых аргиллизитов с рассеянно-вкрапленной кварцево-железо-сульфидной минерализацией и стяжениями ("бобовинами") по составу – никель-медно-серебряно-вольфрамовыми с алмазами. В алмазосодержащих "бобовинах", кроме алмаза, рентгеновским и рентгеноспектральным методами диагностированы кварц, квансонгит, пирит и каолинит.

Квансонгит (d, Å): 2.84 (001); 2.52 (100); 1.883 (101); 1.453 (110); 1.419 (002); 1.293 (111); 1.258 (200); 1.230 (102); 1.151 (201); 1.015 (112); 0.951 (210); 0.946 (003); 0.942 (202); 0.902 (211). Параметры э. я. (Å): a_o (Å) = 2.9062 ± 0.0001; c_o = 2.8878 ± 0.0002 Å. Состав – $W_{1-1.1}$ С. Следует напомнить, что квансонгит как минеральный вид был открыт сравнительно недавно и именно в ассоциации с алмазом [Fang et al., 2009]. В нашем случае в срастании с квансонгитом выявлен не только алмаз, но и графит.



Рис. 8. Срастания алмазов (1) с квансонгитом и поликомпонентными металлическими сплавами (2) в "бобовинах" из Озерновского месторождения.

Пирит: 3.12 (111); 2.71 (200); 2.42 (210); 2.21 (211); 2.21 (211); 1.914 (220); 1.633 (311).

Каолинит: 7.14–7.18 (001); 3.58–3.59 (002). Состав – $(Al_{3.29-3.67}Fe_{0.07-0.12} Mg_{0.21-0.59})_{3.95-4}[Si_4O_{10}]$ (OH)_{6.82–6.97} (рис. 7а).

Кроме этих минералов в составе туфобрекчий методом рентгеноспектрального микрозондового анализа установлены медно-халькозиновые твердые растворы состава (0.95–0.98) $Cu_2S + (0.02-0.05)Cu$ (см. рис. 76); вольфраматы состава ($Cu_{0.55-0.66}Ni_{0.23-0.45}Ag_{0-0.11}$)[WO₄]; поликомпонентные металлические сплавы: медновольфрамовые – $W_{0.98-1}Cu_{0-0.02}$, вольфрам-медносеребряные – $Ag_{0.83-0.9}W_{0-0.11}Cu_{0-0.14}$, вольфрам-никель-медные – $Cu_{0.72-0.78}Ni_{0.22-0.27}Ag_{0-0.02}W_{0-0.01}$ (см. рис. 7в, 7г, 7д).

Алмазы в Озерновском месторождении находятся в тесных срастаниях непосредственно с квансонгитом и вышеупомянутыми металлическим сплавами (рис. 8). Представлены желтовато-зеленоватыми и зелеными плоскогранными кристаллами кубоктаэдрического габитуса с массой ямок и каверн разного



Рис. 9. Габитус алмазных кристаллов в Озерновском месторождении.

тоже может указывать на присутствие в них никелевых парамагнитых центров (полоса ФЛ с максимумом при 700–715 нм).

На поверхности озерновских алмазов выявлены многочисленные примазки минералов (рис. 12, 13), характерных для вмещающей вольфрамовой руды: квансонгит; самородный вольфрам; сульфиды системы халькозин–аргентит – джирит Cu_{1.65}S; джарлеит серебросодержащий (Cu_{1.93}Ag_{0.02})_{1.95}S; джирит серебросодержащий (Cu_{1.57-1.58} Ag_{0.03-0.05})_{1.6-1.63}S; джирит-спионкопит серебросодержащий (Cu_{1.26-1.93}Ag_{0-0.15})_{1.41-1.95}S;



Рис. 10. Фоторентгенограмма алмаза из Озерновского месторождения. Зарегистрированы основные отражения в структуре алмаза (d, Å): 2.051–2.052 (111); 1.255–1.26 (220); 1.073 (311); параметр э. я. ао = 3.5592 ± 0.0002 Å.

происхождения — ростового, механического, результат локального растворения (рис. 9). По размеру они в 2–2.5 раза крупнее толбачинских: $(952 \pm 381) \times (911 \pm 365) \times (867 \pm 357)$ мкм.

Фазовая диагностика озерновских алмазов осуществлялась фоторентгеновским (рис. 10) и КР-спектроскопическим методами. В рамановских спектрах была зарегистрирована узкая интенсивная "алмазная" линия при 1332 см⁻¹. В спектрах ИК-поглощения (рис. 11а) в однофононной области наблюдаются две линии от С-центров – более интенсивная при 1130 и значительно менее интенсивная при 1344 см⁻¹. Зарегистрирована также линия при 1288 см⁻¹, отвечающая ионам азота в положительном зарядовом состоянии, и две линии при 3107 и 3237 см⁻¹, которые приписываются водородным дефектам. Линий, соответствующих азотным В1-дефектам не обнаружено. Валовая концентрация структурного азота в форме С-дефектов оценивается в 100 ррт, кроме того, выявлена незначительная (до 5 ррт) концентрация А-дефектов. В спектрах фотолюминесценции (см. рис. 11б) зарегистрированы полосы центров NV⁻. Зеленая окраска озерновских алмазов



Рис. 11. Спектры ИК-поглощения (а) и фотолюминесценции (б) алмазов в Озерновском месторождении.

минералы ряда джарлеит-аргентит



Рис. 12. Включения алмазов с ксеноминеральными пленками на поверхности (светлое) в квансонгит-самороднометаллической массе. СЭМ-изображения в режимах вторичных (а, в, д) и упруго-отраженных (б, г, е) электронов.

в самой руде выявлены три вида сплавов — медно-вольфрамовый, вольфрам-медно-серебряный и вольфрам-никель-медный, то в составе поверхностных пленок к этим трем добавляются еще два вида — медно-серебряно-вольфрамовый и медно-титано-вольфрамовый.

Обобщение полученных данных приводит к выводу, что алмазы в Озерновском месторождении тоже могут быть выделены в особый генетический тип — эксплозивно-туффизитовый, с которым мы уже имели дело на Енисейском кряже [Силаев и др., 2017].

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ АЛМАЗНОГО УГЛЕРОДА И ЕГО ПЕРВОИСТОЧНИКИ

Один из фундаментальных критериев происхождения алмазов — изотопный состав в них углерода. Современные данные приводят к выводу о том, что первоисточником углерода в природных алмазах являются, прежде всего, углеродсодержащие газы — метан с наиболее изотопно-легким углеродом, угарный газ с изотопно-промежуточным и углекислый газ с наиболее изотопно-тяжелым углеродом. В соответствии с этим по предложению академика Э.М. Галимова [1984] алмазы и парагенетич-



Рис. 13. Монокристаллы озерновских алмазов с ксеноминеральными пленками (светлое) на поверхности. СЭМ-изображения в режимах вторичных (а, в) и упруго-отраженных (б, г) электронов.

ребряные — $Ag_{0.57-0.72}W_{0.04-0.26}Cu_{0.07-0.32}S_{0-0.01};$ вольфрам-никель-медные — $Cu_{0.81-0.82}W_{0.02-0.12}$ $Ag_{0-0.06}Ni_{0.01-0.21}S_{0-0.02}.$

Сравнительный анализ показал, что выявленные на поверхности озерновских алмазов ксеноминеральные пленки по фазовому составу в принципе тождественны вмещающей алмазы вольфрамовой руде, несколько отличаясь от нее лишь более сложным составом минералов. Это особенно видно на примере поликомпонентных металлических сплавов (рис. 14). Так, если

ВУЛКАНОЛОГИЯ И СЕЙСМОЛОГИЯ № 2 2024

ные им углеродные вещества подразделяются на три изотопных типа — "метановый", "угарногазовый" и "углекислогазовый".

Полученные нами данные [Силаев и др., 2015а, 2019; Галимов и др., 2016] (рис. 15) показывают, что вулкано-атмоэлектрогенные алмазы по изотопному составу углерода практически тождественны разнообразному по формам проявления аутигенному углеродному веществу в эксплозивных продуктах вулканизма. Во всех этих формах, включая вулканогенные алмазы,



Рис. 14. Тетраэдрическая развертка составов поликомпонентных металлических сплавов в интерстициях (красные поля) и на поверхности озерновских алмазов.

Сплавы: I – медно-вольфрамовые, II – медно-серебряно-вольфрамовые, III – медно-титан-вольфрамовые, IV – вольфрам-медно-серебряные, V – вольфрам-никель-медные.

значения изотопного коэффициента $\delta^{13}C_{PDB}$ варьируются в пределах от -33 до -22%, образуя статистическую моду в интервале -26...-24%. Следовательно, изученные нами вулканогенные алмазы по первоисточнику углерода могут быть отнесены практически нацело к "метановым". Изотопный коэффициент примесного азота в этих же алмазах колеблется в пределах $\delta^{15}N_{Air} = -2.58...-2.32\%$ [Галимов и др., 2020], что вполне соответствует природным алмазам [Cartygny, 2005; Силаев и др., 2012].

Озерновские алмазы по результатам анализа четырех кристаллов подразделяются на две углерод-изотопные популяции: 1) относительно изотопно-легкую – "угарногазовую" с $\delta^{13}C_{PDB} = -23...-20\%$; 2) относительно изотопно-тяжелую – "углекислогазовую" с $\delta^{13}C_{PDB} = -12...-7\%$. Последние значения хорошо согласуются с результатом локального анализа единичного озерновского алмаза, проведенного С.Н. Шилобреевой в лаборатории П. Картиньи в Институте физики земного шара (Франция) – $\delta^{13}C_{PDB} = -6.56 \pm 1.43\%$ (см. рис. 15, врезка)³.



Рис. 15. Изотопный состав углерода в алмазах и других углеродных фазах вулканогенного происхождения.

1-8 — эксплозивные продукты извержений камчатских вулканов: углеродное вещество (УВ), дисперсно-рассеянное в вулканитах (1), частицы шунгитоподобного УВ (2), парафиноподобное УВ (3), частицы самородного алюминия с включениями УВ (4), вулкано-атмоэлектрогенные алмазы (5), диуглеродные глобулы (6), карбиды (7), УВ в фумароле "Ядовитой" на вулкане Толбачинском (8); 9, 10 — озерновские алмазы, соответственно, данные авторов и лаборатории П. Картиньи (на врезке).

ПРОИСХОЖДЕНИЕ АЛМАЗОВ И *РТ*-УСЛОВИЯ ИХ ОБРАЗОВАНИЯ

Полученные результаты комплексных минералого-геохимических исследований приводят к выводу о том, что камчатские алмазы, отнесенные нами к вулкано-эруптивному (вулкано-атмоэлектрогенному) и эксплозивно-туффизитовому генетическим типам, кристалломорфологически и спектроскопически тождественны. Они характеризуются "немантийным" кубоктаэдрическим габитусом, немалой валовой азотностью (100–150 ppm), но при этом совершенно не агрегированным состоянием азотных дефектов, что принципиально отличает камчатские алмазы от собственно мантийных аналогов (рис. 16).

В рамках международной физической классификации такие алмазы относят к типу Ib, встречаемость которого среди природных алмазов оценивается в первые %. Тем не менее, к настоящему времени аналогичные камчатским по кристалломорфологии и степени агрегации азотных дефектов алмазы установлены во многих неархонных геологических объектах: в Кумдыкольском "метаморфогенном"

³ Получение этих данных обеспечила С.Н. Шилобреева (Институт геохимии и аналитической химии РАН).



Рис. 16. Генеральная диаграмма азотных дефектов в природных алмазах, отражающая корреляцию степени агрегации в них азотных структурных дефектов с температурой посткристаллизационного отжига.

1-8 – алмазы, претерпевшие мантийный отжиг:
1 – кимберлитовые, Южная Африка (1), 2, 3 – бразильские монокристальные и микрополикристаллические (карбонадо) провинции, соответственно Минас-Жерайс (2) и Жуина (3), 4, 5 – туффизитовые, соответственно тиманские (4) и североуральские (5), 6 – кимберлитовые, Восточная Сибирь (Якутия), 7 – кимберлитовые, Украина, 8 – кимберлитовые, Архангельская субпровинция; 9–13 – алмазы без признаков мантийного отжига: 9 – из Кумдыкольского месторождения, Северный Казахстан, 10 – камчатские вулкано-атмоэлектрогенные, 11 – из хромититов офиолитового массива Луобуза, Южный Тибет, 12 – из Енисейского кряжа, 13 – камчатские из Озерновского месторождения.



Рис. 17. Диаграмма термической устойчивости – "Лестница сгорания" [Силаев и др., 2009] – природных углеродных веществ, на фото – результат выгорания алмаза в рудах Озерновского месторождения.

месторождении [Лаврова и др., 1999], офиолитах [Howell et al., 2015; Геворькян, 2013;

ВУЛКАНОЛОГИЯ И СЕЙСМОЛОГИЯ № 2 2024



Рис. 18. Диаграмма фазовых состояний углерода, по Ф.П. Банди [Bundy et al., 1963].

Области фазовых состояний углерода: А – расплав, Б – стабильный алмаз, В – стабильный графит, Г – сосуществование стабильного алмаза и неустойчивого графита, Д – сосуществование стабильного графита и неустойчивого алмаза, Е – металлический углерод. Области синтеза алмазов: 1 – в металлических расплавах, 2 – в результате прямого перехода графита в алмаз при воздействии ударных волн, 3 – за счет углерода карбонатов, 4 – в результате гидролиза галогенидов щелочных металлов, 5 – за счет углеродных наночастиц, 6 – CVD-алмазы и алмазные пленки на алмазных затравках, 7 – алмазы, получаемые путем химического напыления, 8 – вулкано-атмоэлектрогенные алмазы; 9 – алмазы эксплозивно-туффизитового генетического типа из месторождения Озерновского.

Dobrzhinetskaya et al., 2022], коматиитах [Гаранин, 2017], в туффизитоподобных породах на Енисейском Кряже [Силаев и др., 2017] и др. Все это указывает на достаточно устойчивое воспроизводство в природе не только мантийных, но и внемантийных алмазов.

Определяя камчатские алмазы по происхождению как внемантийные, следует, хотя бы гипотетически, оценить *PT*-условия их образования. В отношении вулкано-атмоэлектрогенных алмазов необходимые *PT*-условия могут быть обеспечены термодинамикой электрического разряда: P = 2-3 ГПа, T = 900-1000°C [Земцов и др., 1976; Руленко и др., 1978]. Приведенные данные хорошо согласуются с данными по температуре выгорания толбачинских алмазов, которое начинается при 750–800°С, а заканчивается при 900–950°С (рис. 17). В случае



Рис. 19. Алмазоносные провинции России.

1–3 – Восточно-Европейская с Архангельской (1), Тиманской (2) и Северо-Уральской (3) субпровинциями мантийных кимберлитовых и туффизитовых алмазов; 4 – Восточно-Сибирская (Якутская) мантийных кимберлитовых алмазов; 5 – ранее неизвестная Камчатская провинция внемантийных вулкано-атмоэлектрогенных и эксплозивно-туффизитовых алмазов.

озерновских алмазов начало выгорания приходится на температуру примерно 700°С, а заканчивается при температуре ниже 900°С. Из этого следует, что озерновские алмазы несколько уступают по температуре образования вулкано-атмоэлектрогенным алмазам, что подтверждается выявленными в алмазосодержащих вольфрамовых рудах псевдоморфозами выгорания алмазов (см. рис. 17, фото), образовавшимися, по оценкам геологов, при температуре около 1000°С. Что касается давления, то для озерновских алмазов его можно оценить по эффекту микроударных волн, возникающих при кавитации (идея академика Э.М. Галимова), в примерно 5 ГПа.

Приведенные выше оценки РТ-условий образования камчатских алмазов позволяют определить их положение на РТ-диаграмме фазовых состояний углерода. Согласно диаграмме на рис. 18, камчатские алмазы вулкано-атмоэлектрогенного генетического типа по гипотетическим РТ-параметрам кристаллизации отвечают области сосуществования метастабильного алмаза и стабильного графита, сближаясь с CVD-алмазам, образующимися в результате химического осаждения из газовой фазы. Следует отметить, что такой механизм для образования камчатских вулканогенных алмазов уже выдвигался [Kaminsky et al., 2019]. Алмазы эксплозивно-туффизитового типа в Озерновском месторождении по гипотетическим РТ-параметрам кристаллизации

соответствуют области сосуществования стабильного алмаза и метастабильного графита, сближаясь с алмазами, образующимися за счет углеродных наночастиц.

Сделанное заключение о вероятности образования в условиях вулкано-атмоэлектрогенного и эксплозивно-туффизитового минералообразования как минимум биполиморфного (алмаз + графит) углеродного парагенезиса в рассмотренных продуктах вполне согласуется с экспериментальными данными. Так, установлено, что в области стабильного алмаза в условиях умеренных давлений и температурах ниже 1500°С практически неизбежно образуются обе модификации [Корсаков, Шацкий, 2004].

Завершая эту тему, следует напомнить, что к настоящему времени запатентовано как минимум четыре способа получения алмазов в условиях, примерно соответствующих предполагаемым условиям образования внемантийных генетических типов камчатских алмазов. К числу соответствующих патентов относятся следующие: 1) патент Франции № 1367388 (1964 г.): способ получения "алмазной сыпучки" путем сильного электрического разряда в смесь углеродных газов [Дерягин, Федосеев, 1977]; 2) патент РФ № 2042614 (1995 г.): способ синтеза алмазов путем воздействия на неалмазные модификации углерода давлений и температур, соответствующих области метастабильного существования алмаза (В.С. Ларин,

Л.Е. Николаева, С.А. Чурин); 3) *патент* $P\Phi$ № 2068391 (1996 г.): способ синтеза алмаза путем воздействия на графит импульса лазерного излучения при давлении 40 ГПа и температуре около 600° С (В.Н. Ванин); 4) *патент Р*Ф № 2371384 (2009 г.): способ синтеза алмазов путем воздействия импульсом лазерного излучения на нефтяную пленку (О.Б. Котова, А.П. Петраков, Е.М. Тропников); 5) патент РФ № 2586140 (2015 г.): химический способ получения искусственных алмазов (Л.А. Елшина, Р.В. Мурадымов, А.Н. Елшин). То есть можно констатировать, что в рассматриваемом случае мы имеем дело с редчайшей ситуацией, когда сначала были изобретены и реализованы практически методы получения внемантийных алмазов и только потом такие алмазы были обнаружены непосредственно в природе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования привели к выявлению на Камчатке двух новых генетических типов алмазов, образовавшихся во внемантийных условиях, на что указывают, прежде всего, кубоктаэдрический габитус их кристаллов и отсутствие в них признаков мантийного посткристаллизационного отжига с образованием агрегированных азотных дефектов [Силаев и др., 2023б]. Первый из этих типов определяется нами как вулкано-атмоэлектрогенный, образующийся непосредственно в вулканическом пепло-газовом облаке за счет глубинного метана в результате атмосферных электрических разрядов. Второй генетический тип алмазов, образовавшийся в среде магматогенно-пневматолито-гидротермального рудного месторождения, мы предлагаем назвать эксплозивно-туффизитовым.

Открытие на Камчатке новых генетических типов алмазов подтверждает вывод В.К. Гаранина [2017] о полигенности и дискретности природного алмазообразования. Очевидно, что новые факты и новые идеи сулят нам новые открытия. В частности, уже в настоящее время можно констатировать обнаружение в России ранее неизвестной Камчатской промышленно-перспективной алмазоносной провинции (рис. 19), перспективы которой с учетом оцененных ресурсов Озерновского месторождения и благодаря многочисленности практически непрерывно возобновляющихся вулканических источников можно оценивать достаточно высоко.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Светлану Юрьевну Янсон (зам. директора Междисциплинарного образовательного ресурсного центра микроскопии и микроанализа при Санкт-Петербургском университете) за предоставление образцов для исследований и кандидата геол.- мин. наук С.Н. Шилобрееву (ГЕОХИ РАН) — за помощь в исследованиях.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена за счет НИР ИВиС ДВО РАН по теме № 0282-2019-0008.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аникин Л.П., Силаев В.И., Чубаров В.М. и др. Алмаз и другие акцессорные минералы в продуктах извержения 2008–2009 г. Корякского вулкана (Камчатка) // Вестник Коми НЦ УрО РАН. 2018. № 2. С. 18–27.

Аникин Л.П., Чубаров В.М., Еремина Т.С. и др. Акцессорные минералы и новая находка алмазов в базальтах вулкана Плоский Толбачик, Камчатка // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога: "Вулканизм и связанные с ним процессы". Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2015. С. 214–222.

Бабич Ю.В. Особенности объемного распределения азотных дефектов в синтетических монокристаллах алмаза, полученных при низкотермических условиях роста // Вестник Отделения наук о Земле РАН. 2006. № 1. С. 1–2.

Байков А.И., Аникин Л.П. Дунин-Барковский Р.Л. Находки карбонадо в вулканах Камчатки // Докл. РАН. 1995. Т. 343. № 1. С. 72–74.

Бескрованов В.В. Онтогения алмаза // Наука и техника в Якутии. 2012. № 1(22). С. 89–92.

Войтеховский Ю.Л., Степенщиков Д.Г. Фуллерены C20–C60: каталог комбинаторных типов и точечных групп симметрии. Апатиты: Изд-во ЗАО "КаэМ", 2002. 55 с. Галимов Э.М. Вариации изотопного состава алмазов и связь их с условиями алмазообразования // Геохимия. 1984. № 8. С. 1091–1117.

Галимов Э.М., Каминский Ф.В., Карпов Г.А. и др. Об особенностях состава и о природе вулканогенных алмазов // Геология и геофизика. 2020. Т. 66. № 10. С. 1303–1315.

Галимов Э.М., Карпов Г.А, Севастьянов В.С. и др. Алмазы в продуктах извержения вулкана Толбачик (Камчатка 2012–2013 гг.) и механизм их образования // Геохимия. 2016. № 10. С. 868–872.

Гаранин В.К. Полигенность и дискретность — фундаментальные основы генезиса природного алмаза // Проблемы минерагении, экономической геологии и минеральных ресурсов: Смирновский сборник — 2017. М.: Макс-Пресс, 2017. С. 88–129.

Геворькян М.Р. Ювелирные камни-самоцветы Присеванского офиолитового пояса // J. Sib. Fed. University. Engineering and Technologies. 2013. № 7. Р. 761–768.

Гордеев Е.И., Карпов Г.А., Аникин Л.П. и др. Алмазы в лавах Трещинного Толбачинского извержения на Камчатке // Докл. РАН. 2014. Т. 454. № 2. С. 204–206.

Гордеев Е.И., Силаев В.И., Карпов Г.А. и др. Об открытии и природе алмазов в вулканогенных породах Камчатки // Вестник Пермского гос. университета. Геология. 2019. Т. 18. № 4. С. 307–331.

Горшков А.И., Селиверстов В.А., Байков А.И. и др. Кристаллохимия и генезис карбонадо из меланократовых базальтоидов вулкана Авача на Камчатке // Геология рудных месторождений. 1995. Т. 37. № 1. С. 54–66.

Дёмин А.Г. Озерновское месторождение как новый перспективный рудный объект Центральной Камчатки с комплексными рудами на золото, вольфрам, серебро и медь (своеобразие геологического строения, рудный потенциал, стратегия и методика изучения) // Золото и технологии. 2015. № 1. С. 100–106.

Дёмин А.Г. Особенности рудообразования с активным участием вулканического (первичного) и регенерированного газов и разнообразие минерально-сырьевого потенциала ряда молодых вулканогенно-гидротермальных месторождений активных вулканических поясов (на примере Озерновского золоторудного месторождений) // Региональное освоение недр. 2018. № 6. С. 20–42.

Дерягин Б.В., Федосеев Д.В. Рост алмазов и графита из газовой фазы. М.: Наука, 1977. 116 с.

Дунин-Барковский Р.Л., Аникин Л.П., Васильев Г.Ф. Алмазы Камчатки // Горный вестник Камчатки. 2013. № 26. С. 57–61.

Земцов А.Н., Тронь А.А., Мархинин Е.К. Об электрических разрядах в пепловых тучах, возникающих

при вулканических извержениях // Бюлл. вулканол. станций. 1976. № 52. С. 19–23.

Каминский Ф.В., Патока М.Г., Шеймович В.С. О геолого-тектоническом положении алмазоносных базальтов Камчатки // Докл. АН СССР. 1979. Т. 246. № 3. С. 679–682.

Карпов Г.А. Открытие на Камчатке нового типа вулканогенного алмазообразования // Материалы XXXIV Крашенинниковских чтений: "Всеобщее богатство человеческих познаний". Петропавловск-Камчатский: Минкультуры Камчатского края, 2018. С. 283–284.

Карпов Г.А., Аникин Л.П., Флеров Г.Б. и др. Минералого-петрографические особенности алмазсодержащих продуктов Толбачинского трещинного извержения 2013–2013 гг. // Материалы ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога: "Вулканизм и связанные с ним процессы". Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014а. С. 283–288.

Карпов Г.А., Силаев В.И., Аникин Л.П. и др. Эксплозивная минерализация ТТИ—50 // Толбачинское трещинное извержение 2012—2013 гг. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. С. 241—255.

Карпов Г.А., Силаев В.И., Аникин Л.П. и др. Алмазы и сопутствующие минералы в продуктах Толбачинского трещинного извержения 2012–2013 гг. // Вулканология и сейсмология. 20146. № 6. С. 3–20.

Корсаков А.В., Шацкий В.С. Механизм образования алмазов в графитовых "рубашках" в метаморфических породах сверхвысоких давлений // Докл. РАН. 2004. Т. 399. № 2. С. 232–235.

Кутыев Ф.Ш., Кутыева Г.В. Алмазы в базальтоидах Камчатки // Докл. АН СССР. 1975. Т. 221. № 1. С. 183–186.

Лаврова Л.Д., Печников А.М., Плешаков А.М. и др. Новый генетический тип алмазных месторождений. М.: Научный мир, 1999. 221 с.

Минеева Р.М., Сперанский А.В., Титков С.В., Бершов Л.В. Новый парамагнитный центр в аомазах // Докл. РАН. 1994. Т. 334. № 6. С. 755–758.

Ракин В.И., Пискунова Н.Н. Морфология искусственных алмазов // Известия Коми НЦ УрО РАН. 2012. Вып. 3(11). С. 61–67.

Руленко О.П., Токарев П.И. Атмосферно-электрические эффекты Большого трещинного Толбачинского извержения в июне-сентябре 1975 года // Бюлл. вулканол. станций. 1978. № 56. С. 96–102.

Силаев В.И., Аникин Л.П., Карпов Г.А., Хазов А.Ф. Толбачинские алмазы (ТТИ-50, Камчатка) — новое доказательство вулканогенной природы // Вестник геонаук. 2023а. № 2. С. 17. Силаев В.И., Вергасова Л.П., Васильев Е.А. и др. Микропарагенезис алмаза и самородного алюминия в продуктах современного вулканизма // Вулканология и сейсмология. 2016. № 6. С. 71–77.

Силаев В.И., Карпов Г.А., Аникин Л.П. и др. Минерально-фазовый парагенезис в эксплозивных продуктах современных извержений вулканов Камчатки и Курил. Часть І. Алмазы, углеродные фазы, конденсированные органоиды // Вулканология и сейсмология. 2019. № 5. С. 54–67.

Силаев В.И., Карпов Г.А., Аникин Л.П. и др. Внемантийные генетические типы алмаза и перспективы камчатской алмазоносной провинции России // Материалы XVI Международной научно-практической конференции: "Новые идеи в науках о Земле". М.: Изд-во "Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе", 20236. Т. 2. С. 159–162.

Силаев В.И., Карпов Г.А., Петровский В.А. и др. Толбачинский углеродно-алмазный феномен и проблемы некимберлитовой алмазоносности // Труды XX Международной научно-технической конференции: "Высокие технологии России". М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015а. С. 87–102.

Силаев В.И., Карпов Г.А., Ракин В.И. и др. Алмазы в продуктах Трещинного Толбачинского извержения 2012—2013, Камчатка // Вестник Пермского университета. Геология. 2015б. № 1. С. 6—27.

Силаев В.И., Кузьмин И.А., Колямкин В.М. и др. Туффизитовые алмазы на Енисейском Кряже // Вестник Пермского университета. Геология. 2017. Т. 16. № 4. С. 304–329.

Силаев В.И., Ковалева О.В., Меньшикова Е.А., Петровский В.А. "Лестница сгорания" Шарля Жерара, или шкала термической устойчивости углеродистых веществ // Материалы III Российского совещания по органической минералогии. Сыктывкар: Геопринт, 2009. С. 42–47.

Силаев В.И., Смолева И.В., Антошкина А.И., Чайковский И.И. Опыт сопряженного анализа изотопного состава углерода и азота в углеродистых веществах разного происхождения // Материалы Научных чтений памяти П.Н. Чирвинского: "Проблемы минералогии, петрографии и металлогении". Вып. 15. Пермь: Пермский университет, 2012. С. 342–366. *Третьякова Л.И.* Примесно-дефектные центры и включения в алмазах как свидетельства космогенно-импактнометаморфогенно-метасоматической истории их генезиса // Материалы минералогического семинара с международным участием (Юшкинские чтения – 2016): "Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии". Сыктывкар: Геопринт, 2016. С. 119–111.

Шило Н.А., Каминский Ф.В., Лаврова Л.Д. и др. Первая находка алмазов в ультрамафитах Камчатки // Докл. АН СССР. 1979. Т. 248. № 5. С. 1211–1214.

Bundy F.P. Direct conversion of graphite to diamond in static pressure apparatus // J. of Chemical Physics. 1963. V. 38. № 3. P. 618–623.

Cartygny P. Stable Isotopes and the Origin of Diamond // Elemenths. 2005. V. 1. P. 79–84.

Daly T.K., Buseck P.R., Williams P., Lewis Ch.F. Fullerenes from a fulgurite // Science. 1993. V. 259. P. 1599–1601.

Dobrzhinetskaya L.F., O'Barnon E., Sumino H. Noncratonic Diamonds from UHP Metamorphic Terranes, Ophiolites and Volcanic Sources // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2022. V. 88(1). P. 191–255.

Fang Q., Bai W., Yang J. et al. Qusongite (WC): a new mineral // Amer. Mineral. 2009. V. 94. P. 387–390.

Galimov E.M., Kaminsky F.V., Shilobreeva S.N. et al. Enigmatic diamonds the Tolbachic Volcano, Kamchatka // Amer. Mineral. 2020. V. 105. № 4. P. 498–609.

Hartman P., Perdok W.G. On the relation between Structure and morphology of crystal. I // Acta Crystallography. 1955a. V. 8. P. 49–52.

Hartman P., Perdok W.G. On the relation between Structure and morphology of crystal. II // Acta Crystallography. 1955b. V. 8. P. 525–529.

Howell D., Griffin W.L., Yang J. et al. Diamonds in ophiolites or a New diamond growth environment? // Earth and Planet. Sci. Lett. 2015. V. 430. P. 284–295.

Kaminsky F.V., Wirth R., Anikin L.P., Moralis L., Schreiber A. Carbonade-like diamond from the Avacha active volcano in Kamchatka, Russia // Litos. 2016. V. 265. P. 222–236.

Kaminsky F.V., Wirth R., Anikin L.P., Schreiber A. "Kamchatite" diamond aggregate from northern Kamchatka, Russia: New find of diamond formed by gas phase condensation or chemical vapor deposition // Amer. Mineral. 2019. V. 104. N_{2} 1. P. 140–149.

СИЛАЕВ и др.

Extra-mantle Genetic Types of Diamond and Prospects for the Kamchatka Diamond-bearing Province of Russia

V. I. Silaev^{1,} *, G. A. Karpov^{2,} **, A. G. Demin³, L. P. Anikin²,
L. P. Vergasova², V. N. Filippov¹, I. V. Smoleva¹, E. A. Vasiliev⁴,
A. E. Sukharev¹, B. A. Makeev¹, A. F. Khazov¹

¹Institute of Geology, Komi Scientific Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Pervomayskaya str., 54, Syktyvkar, 167982 Russia
²Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, bul'var Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia
³JSC Siberian Mining and Metallurgical Alliance (SiGMA), Mishennaya str., 106, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683016 Russia
⁴St.-Petersburg Mining University, Vasilyevsky Island, 21 Line, 2, St.-Petersburg, 199106 Russia
*e-mail: silaev@geo.komisc.ru

**e-mail: karpovga@kscnet.ru

The results of studies of two new genetic types of diamonds discovered in Kamchatka and formed in extra-mantle conditions are presented, as evidenced by the absence of signs of post-crystallization annealing with the formation of aggregated nitrogen defects in them. The first of these types is defined by us as volcanic-atmoelectrogenic, formed directly in a volcanic ash-gas cloud due to deep-seated methane due to atmospheric electrical discharges. The second genetic type of diamonds, formed at a depth in the medium of a magmatic-pneumatolithic-hydrothermal ore deposit, can be defined as explosive-tuffizite. The industrial prospects of manifestations of these types give grounds to state the discovery in Russia of a new diamond-bearing province – Kamchatka.

Keywords: Kamchatka, extra-mantle diamonds, new diam ndiferous province of Russia