

**Особенности микроминерального парагенезиса вулканогенных алмазов как критерий их генезиса**

*Карпов Г.А.<sup>1</sup>, Силаев В.И.<sup>2</sup>, Аникин Л.П.<sup>1</sup>, Вергасова Л.П.<sup>1</sup>, Тарасов К.В.<sup>1</sup>*

**Peculiarities of micromineral paragenesis of volcanogenic diamonds as a criteria for their genesis**

*Karpov G.A.<sup>1</sup>, Silaev V.I.<sup>2</sup>, Anikin L.P.<sup>1</sup>, Vergasova L.P.<sup>1</sup>, Tarasov K.V.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;  
e-mail: karpovga@kscnet.ru*

<sup>2</sup> *Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар*

В публикации приводится обзор фаз микроминерального парагенезиса алмазосодержащих пеплов и аргументация вулканогенного генезиса алмазов толбачинского типа.

За последние 50 лет в эксплозивных продуктах 5 вулканов Камчатско-Курильского региона (Ича, Авача, Толбачик, Ключевской, Корякский, Алаид) выявлены микроалмазы [3, 4]. Микроалмазы обнаружены в пеплах вулкана Эйяфьядлайекюдль в Исландии [1], а также есть сообщения об их находках в гавайских океанических базальтоидах, в офиолитах массива Луобуза, Тибет; в офиолитовых хромититах массива Рай-Из, Полярный Урал, Россия.

Прямым доказательством вулканогенного происхождения камчатских алмазов является факт сростаний этих алмазов с минералами эксплозивной фации.

Толбачинские вулканогенные алмазы, по ряду признаков [3], зародились и начинали расти как октаэдр – основная габитусная форма алмаза, но затем на них появились узкие и быстро увеличивающиеся в размерах грани куба, которые к окончанию ростовой истории стали едва ли не преобладающими. Такая последовательность, судя по экспериментальным опытам, свидетельствует о том, что в ходе образования толбачинских алмазов в среде кристаллизации резко снизилась температура, что привело и к резкому увеличению как степени пересыщения углеродом, так и скорости роста алмазов.

Методом ЛА ИСП-МС в толбачинских алмазах было выявлено около 50 микроэлементов, общая концентрация которых составила  $1589 \pm 1446$  г/т. По элементному составу, порядку величин концентрации микроэлементов и пропорциям между содержанием лантаноидов толбачинские алмазы очень похожи именно на природные алмазы. Согласно классификации элементов по Тейлору-Леннану [7], выявленные в толбачинских алмазах микроэлементы могут быть подразделены на мантийные (центростремительные), корово-мантийные (минимально-центробежные) и коровые (центростремительные). Характерно, что ассоциация микроэлементов в толбачинских алмазах отличается низким уровнем геохимической дифференциации, более низким, чем в кимберлитовых, туффзитовых и россыпных алмазах, близкой к ассоциации микроэлементов в каменных и железных метеоритах.

Для алмазов толбачинского типа весьма характерны тесные сростания (типа примазок) с микроминералами эксплозивного происхождения, статистически характеризующимися малым размером индивидов, не превышающим 100 мкм [3, 4]. Именно эти минералы и можно считать минералами-спутниками вулканогенных алмазов. Они часто наблюдаются как в индивидуализированном виде, так и в углублениях и ямках на гранях толбачинских кристаллов, подразделяясь по составу на Mg-Fe- и Fe-силикатные, Ca-Mg-силикатные, алюмосиликатные, сульфатно-силикатные, сульфатные и силикатно-оксидные и хлоридные фазы [5].

Многие, если не большинство, таких минеральных примесей характеризуются высоким содержанием железа, никеля и меди. Кроме того, в сульфатно-силикатных примазках обнаружены субмикронные вкрапления сплава состава  $Ni_4Cu_3$ , а на

выпуклостях гранного рельефа алмазов иногда наблюдаются выделения самородной меди и природных бронз, варьирующих по составу в пределах  $Cu_{0.68-0.91} Sn_{0.07-0.17} Fe_{0-0.22}$  или  $Cu_{4-10}(Sn_{0.6-1}Fe_{0-1.4})_{1-2}$ . Еще большее разнообразие демонстрируют взрывные минералы, находящиеся в ассоциации с алмазами, но в свободном состоянии (рис. 1, 2, 3).

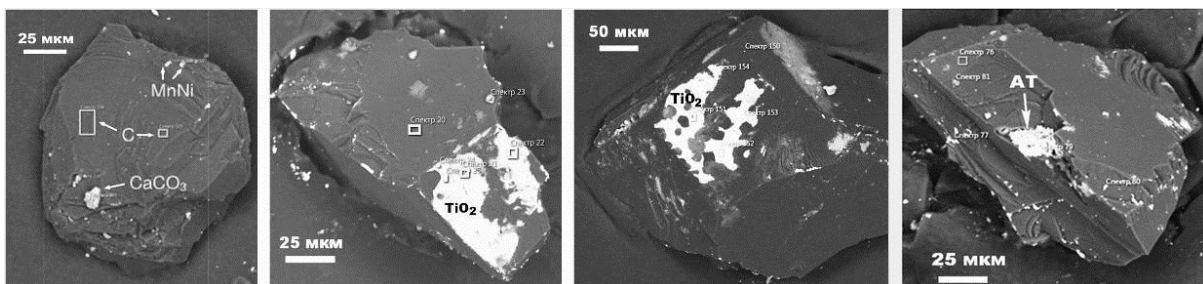


Рис. 1. Примеры тесных сростаний взрывных минералов с вулканогенными алмазами:  $TiO_2$  – рутил, MnNi – металлический сплав, AT – атакамит.

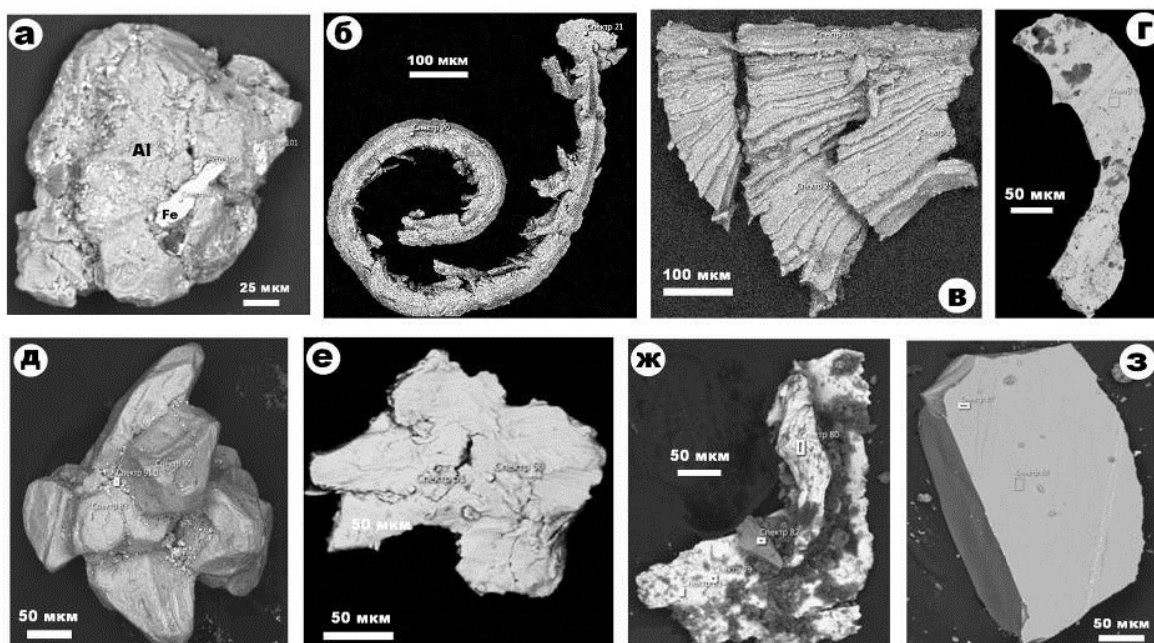


Рис. 2. Примеры индивидов взрывных металлических фаз и сплавов: а – алюминий с микровключением железа; б, в – алюминий; г – никель; д – медь; е – латунь; ж – титан; з – кремний.

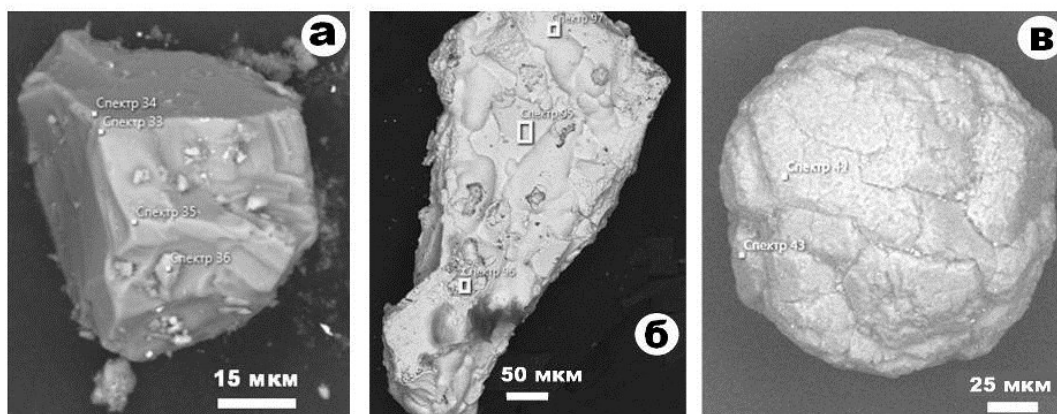


Рис. 3. Примеры индивидов взрывных муассанита (а), карлинита (б) и дельталюмита (в).

К настоящему времени в составе микропарагенезиса в пеплах камчатских и курильских вулканов установлено около 100 минеральных видов и некристаллических фаз [5]. В состав микропарагенезиса входят представители всех минеральных типов – от самородных элементов и простых веществ до кислородных солей.

Достигнутый к настоящему времени уровень минералогической изученности эксплозивной фации вулканитов и результаты соответствующих расчетов по методике [6] приводят к выводу о сильной аномальности исследованных вулканических эксплозий базальтоидов по характеру распределения минералов как по кристаллохимическим типам, так и по кристаллографическим сингониям. Эта аномальность обусловлена многократным обогащением алмазонасного эксплозивного микроминерального парагенезиса относительно всех топосов-эталонов простыми веществами (самородными фазами, силицидами, нитридами) и, напротив, многократным обеднением кислородными минералами, особенно силикатами и кислородными солями.

Источником энергии для процесса вулканогенного алмазообразования служат вулканическая теплота и давление в газовой-пепловом облаке (соответственно, до 1000 °С и нескольких Кбар), а также атмосферные электрические разряды, выступающие непосредственным стимулятором для углеродного фазообразования, включая и алмаз. Такого рода газовой-электрогенный механизм образования алмазов был открыт экспериментально еще в первой половине 1960-х гг. с получением во Франции соответствующего патента [2]. В настоящее время можно утверждать, что вулканогенные алмазы толбачинского типа по термодинамическим условиям образования близки к синтетическим CVD-алмазам, также образующимся в газовой среде при относительно низких РТ-параметрах (рис. 4).

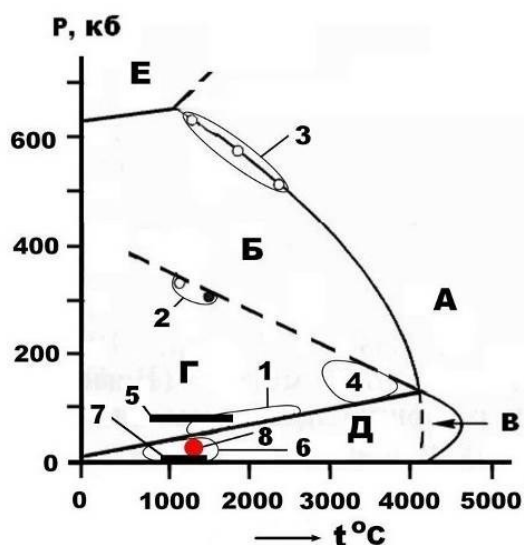


Рис. 4. Диаграмма фазового состояния углерода по Ф.П. Банди. Области фазовых состояний углерода: А – расплав, Б – стабильный алмаз, В – стабильный графит, Г – сосуществование стабильного алмаза и неустойчивого графита, Д – сосуществование стабильного графита и неустойчивого алмаза, Е – металлический 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 – эксплозивно-атмосферногенные (толбачинские) алмазы.

Кроме того, выявленный нами факт аномально низкой степени геохимической дифференцированности исследованного алмазосодержащего микроминерального парагенезиса указывает на мантийное происхождение основной части его вещества.

### Список литературы

1. Батурин Г.Н., Дубинчук В.Т., Зайцева А.В. Графит, алмазы и благородные металлы в вулканических пеплах // Геохимия литогенеза: Материалы российского совещания с международным участием. Сыктывкар: Геопринт. 2014. С. 76-79.
2. Дерягин Б.В., Федосеев Д.В. Рост алмазов и графита из газовой фазы. М.: Наука, 1977. 116 с.
3. Карпов Г.А., Силаев В.И., Аникин Л.П. и др. Алмазы и сопутствующие минералы в продуктах трещинного Толбачинского извержения 2012-2013 гг. // Вулканология и сейсмология. 2014. № 6. С. 3-20.
4. Силаев В.И., Карпов Г.А., Аникин Л.П. и др. Минералого-фазовый парагенезис в эксплозивных продуктах современных извержений вулканов и Курил. Часть 1. Алмазы, углеродные фазы, конденсированные органоиды // Вулканология и сейсмология. 2019. № 5. С. 54-67. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0203-03062019554-67>
5. Силаев В.И., Карпов Г.А., Аникин Л.П. и др. Минерально-фазовый парагенезис в эксплозивных продуктах современных извержений вулканов Камчатки и Курил. Ч. 2. Минералы-спутники алмазов толбачинского типа // Вулканология и сейсмология. 2019. № 6. С. 36-49. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0203-03062019636-49>
6. Силаев В.И., Юшкин Н.П. Проблемы топоминералогических исследований районов с гидротермальной минерализацией // Минералогический сборник Львовского госуниверситета. 1985. № 39. Вып. 1. С. 6-14.
7. Тейлор С.Р., Леннан С.М. Континентальная кора, ее состав и эволюция. М.: Мир, 1988. 344 с.