

## ИННОВАЦИИ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

### ПОПИГАЙСКИЕ ИМПАКТНЫЕ АЛМАЗЫ: НОВОЕ РОССИЙСКОЕ СЫРЬЕ ДЛЯ СУЩЕСТВУЮЩИХ И БУДУЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ

**В.П. Афанасьев**, гл. науч. сотр. Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева  
Сибирского отделения РАН, д-р геол.-минер. наук

**Н.П. Похиленко**, дир. Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева  
Сибирского отделения РАН, д-р геол.-минер. наук, чл. корр. РАН

*Дана краткая характеристика импактных алмазов Попигойской астроблемы как нового вида высокотехнологического сырья, указаны причины его отсутствия на рынке, показаны основные направления дальнейшего изучения импактных алмазов в минералогическом, технологическом, экономическом плане для вывода их на рынок.*

**Ключевые слова:** алмаз, лонсдейлит, астроблема, кратер, импактный алмаз.

**Общие сведения об астроблеме и ее алмазоносности.** Попигойская астроблема (др. названия – метеоритный кратер, ударный кратер) расположена на севере Сибирской платформы на границе Красноярского края и Республики Саха (Якутия) в бассейне реки Попигой (см. рис. 1, 2). Она образовалась примерно 35 млн лет назад в результате столкновения с Землей крупного космического тела и имеет диаметр около 100 км. Удару подверглись очень древние (архейские) гранитогнейсовые породы с высоким содержанием графита. В момент удара, в результате воздействия высокой температуры и давления произошел мгновенный переход графита в сверхтвердое состояние с образованием модификаций углерода, называемых импактными алмазами (от англ. impact – удар), основными из которых являются обычный алмаз с кубической структурой и алмаз с гексагональной структурой (лонсдейлит).

Импактные алмазы (ИА) были диагностированы в кратере В.Л. Масайтисом в 1971 г. во время его работы в составе Полярной геологоразведочной экспедиции [1]. Тогда же было установлено их очень высокое содержание в импактных породах. На территории кратера импактиты во многих местах выходят на поверхность и уходят на глубину до 1,5 км. Их площадь превышает 1750 км<sup>2</sup>.

Эти обстоятельства побудили начать в конце 1970-х гг. рекогносцировочные геологоразведочные работы на территории Попигойского кратера и детальную разведку двух его фрагментов – месторождений Ударное и Скальное. Последнее занимает площадь около 0,3 % от площади кратера и при огромном содержании в нем алмазов (до 100 каратов на тонну) имеет запасы сырья, превышающие все разведанные запасы обычных алмазов в кимберлитах по всему миру. Не исключено, что в кратере имеются участки с еще большими содержаниями ИА. Соответственно, общие запасы алмазов в Попигойском кратере можно считать практически неисчерпаемыми.

Геологоразведочные работы проводились в условиях строгой секретности. Изучение алмазов курировалось ВНИИАлмазом, входившим в структуру Минфина СССР. Проводились минералогические исследования, а также технологические испытания ИА с целью определения возможных сфер их применения. Значительный объем минералогических исследований был проведен в Киеве и Симферополе, а также в Москве и Мирном (Якутия).

Тем не менее, в 1985–1986 гг. работы были резко свернуты, основанием для чего послужило отрицательное заключение ВНИИАлмаза. Суть его заключалась в том, что добыча ИА стоила дороже, чем стоимость самого сырья, при этом стоимость ИА была «назначена» по аналогии с аналогичным сырьем из природных алмазов. Выбор был сделан в пользу строи-



Рис. 1. Местоположение Попигайской астроблемы



Рис. 2. Вид Попигайского кратера из космоса

тельства заводов по производству синтетических алмазов. Все материалы, касающиеся геологоразведки, обогащения, минералогического и технологического изучения алмазов были засекречены и сданы в фонды. Тем самым определилось забвение попигайской тематики на длительный срок.

В настоящее время гриф секретности с этих материалов снят и появилась возможность переоценки ИА на современном уровне. В новых условиях основная задача – оценить реальную рыночную стоимость ИА с учетом спроса на них. Для оценки спроса необходимо на современном уровне изучить технологические свойства ИА, как связанные с уникальными абразивными свойствами, так и с другими еще не выявленными минералогическими особенностями. Задача статьи – вызвать интерес к ИА как новому перспективному сырью для новых технологий.

**Минералогические свойства импактных алмазов.** Минерал, образовавшийся из графита в момент импактного события (удара астероида), является тончайшим агрегатом двух основных фаз – обычного алмаза с кубической структурой и лонсдейлита с гексагональной структурой [2]. Агрегатное строение хорошо видно на дифракционных картинах (лауэграмма), на которых вместо точечных рефлексов, соответствующих монокристаллу, видны кольца, указывающие на агрегатное строение с разориентировкой субиндивидов. Размеры субиндивидов, оцененные рентгеновскими методами, составляют первые десятки нанометров, т. е. минерал представляет собой наноразмерный композит, по преобладающим фазам кратко именуемый импактным алмазом.

Исходный графит был достаточно хорошо окристаллизован и в соответствии со своей структурой имел слоистое строение. Поэтому ИА, представляющий собой параморфозу по графиту, наследует его слоистость и выделения ИА имеют пластинчатую форму с хорошей отдельностью по уплощению, благодаря которой они легко раскалываются по этой отдельности (см. рис. 3).

Размер выделений графита, по которым образовались ИА, очень разнообразен – от долей миллиметра до сантиметра и более. Соответственно и сами алмазы различаются по размеру. Но необходимо учитывать способ добычи алмазов. Если добыча идет из твердых коренных пород, то порода дробится до мелких фракций для более полного извлечения ИА, которые

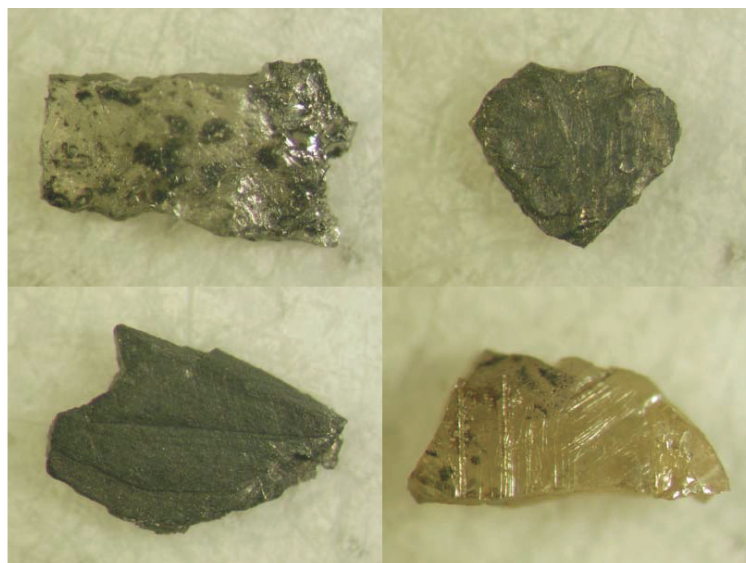


Рис. 3. Типичные формы импактных алмазов (размер зерен около 1 мм)

благодаря хрупкости колются вместе с породой и в конечном продукте имеются главным образом мелкие осколки и обломки уплощенной формы (от первых микрон до сотен микрон). Если добыча идет из россыпи, в которую алмазы попадают за счет естественного выветривания горных пород, то размер ИА близок к реальному. Благодаря тому, что ранее исследовались ИА, полученные при обогащении коренных пород, бытует ошибочное мнение, что все ИА имеют очень мелкие размеры.

Есть еще один важный аспект минералогии ИА. В момент импактного события, имевшего взрывной характер, часть ИА была выброшена за пределы кратера и рассеяна на огромном расстоянии от него [3]. Эти ИА встречаются в россыпях в смеси с обычными алмазами на расстоянии более 500 км от кратера [3]. Случилось так, что эти ИА были обнаружены в россыпях обычных алмазов севера Якутии еще в 1968 году и впервые описаны З.В. Бартошинским в газете «Советская Якутия» в 1969 году под названием «якутит». Ю.Л. Орлов, опубликовавший знаменитую книгу «Минералогия алмаза», переведенную на английский язык [4], при переиздании этой книги в 1984 году ввел якутит как самостоятельную разновидность алмаза (XI разновидность) с невыясненным типом коренного источника [5]. Лишь после обнаружения ИА в Попигайском кратере и их изучения обнаружилась полная аналогия попигайских ИА и якутитов, что позволило интерпретировать якутиты как продукты дальнего закратерного выброса ИА [3]. Якутиты рассматривались как минералогический феномен и добыча их не велась, хотя местами в россыпях они образуют достаточно высокие скопления и могли бы добываться попутно с обычными алмазами. Пока якутиты имеются лишь в коллекции АК АЛРОСА. Но мы полагаем, что они заслуживают значительно большего внимания. Дело в том, что, будучи выброшенными за пределы кратера, якутиты были закалены и сохранили исходные структурные особенности, тогда как внутрикратерные ИА отжигались довольно долго в расплаве, образовавшемся после импактного события и структура их была изменена; в частности могли измениться соотношения слагающих их минеральных фаз, измениться их структурные взаимоотношения. А это неизбежно должно отразиться как на минералогических, так и на технологических особенностях; в частности, якутиты, возможно, будут более привлекательны как абразивный материал.

**Технологические свойства импактных алмазов.** В 1978 г. при проведении тестовых испытаний абразивной способности порошков ИА по ГОСТовской методике в Институте сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля в Киеве было установлено, что их абразивная устойчивость в среднем в полтора раза выше, чем у аналогичных порошков природных и синтетических алмазов. Этим определилось основное направление технологических испытаний. Изготавливались различные инструменты и шлифовальные порошки, все они показали свойства, превосходящие аналогичные изделия с природными и синтетическими алмазами.

К сожалению, прекращение работ по изучению Попигайского кратера и его алмазов, засекречивание результатов работ и передача их в фонды обусловило забвение этой тематики. Однако исследователи, работавшие с попигайскими алмазами, по-прежнему проявляли к ним интерес. В 1999 г. вышла статья украинских исследователей [6], посвященная технологическим свойствам импактных алмазов. В статье отмечено: «Импактные алмазы по прочности зерен соответствуют высококачественным синтетическим. По абразивной способности порошки импактных алмазов превосходят природные и искусственные технические в 1,5–2,0 раза, а полученный на их основе сверхтвердый материал и изделия из него не менее чем в 2,0–2,5 раза». Сверла на основе порошка импактных алмазов превзошли по производительности аналогичные сверла из синтетических алмазов более чем в два раза. Кольцевые сверла из импактных алмазов, имитирующие работу буровых коронок, показали аналогичные результаты.

В 80-е годы прошлого века авторам статьи довелось участвовать в изучении попигайских алмазов, и нам были известны сведения об их высоких технологических свойствах. В настоящее время мы располагаем представительным количеством импактных алмазов, доста-

точным для технологического изучения, поэтому считаем необходимым возобновить их исследование, но на современном уровне.

Нами проведены повторные испытания абразивных свойств импактных алмазов в Институте сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля в Киеве. По заключению экспертов абразивная способность исследованных образцов (порошки, темная и светлая фракции) превышает абразивную способность аналогичных порошков природных технических и синтетических образцов в 1,8–2,4 раза. При этом наряду с высокой абразивной устойчивостью импактные алмазы обеспечивают полирующий эффект благодаря уплощенной форме частиц, тогда как частицы природных и синтетических алмазов имеют остроугольную изометричную форму и царапают поверхность. Поэтому импактные алмазы предпочтительнее использовать при изготовлении ответственных деталей типа лопаток турбин, в моторостроении, космических технологиях, военной технике благодаря обеспечению высокой точности и чистоты обработки поверхности. Эти алмазы послужат хорошей присадкой в моторные масла также благодаря полирующему эффекту.

Проведенные повторные испытания абразивных свойств ИА, подтвердившие их уникальные качества, дают уверенность в перспективности технологического использования ИА.

Основным направлением технологического использования ИА представляется замещение ими синтетических и природных технических алмазов в соответствующих технологиях. Главными потребителями технических алмазов являются производители компьютерных чипов, строительство, машиностроение, компании, оказывающие услуги по бурению при разведке твердых полезных ископаемых, нефти и газа, фирмы, занимающиеся резкой и полировкой камней, системы транспортировки. Для резки камней, строительства и ремонта автомагистралей расходуется большая часть выпускаемых технических алмазов. Кроме того, к высокотехнологичным областям применения технических алмазов относятся прецизионная механическая обработка с малыми допусками керамических деталей для аэрокосмической промышленности, радиаторов-теплосъемников для электронных цепей, линз для лазерного излучающего оборудования; полировка кремниевых пластин и дисководов, а также ряд операций в компьютерной промышленности. Порошки, изготовленные из синтетических алмазов, применяются в основном для шлифования режущих инструментов, драгоценных камней, оправ для ювелирных изделий, оптических поверхностей, кремниевых пластин и волок для протягивания проволоки для компьютерных чипов. Сотни видов другой продукции, изготавливаемой из керамики, стекла, металлов и пластика, тоже полируются алмазными порошками. Во всех этих технологиях ИА успешно заменяют обычные технические алмазы, но с предпочтением высоких технологий, поскольку в технологиях, требующих использования большого количества алмазов, проще использовать синтетические алмазы (изготовление пил большого диаметра для резки каменных массивов, бетона при строительстве автодорог и т. д.). В то же время при бурении, особенно глубоких сложных скважин, ИА имеют явное преимущество, поскольку за счет более длительной работы и высокой производительности обеспечат значительную экономию средств и времени на спуско-подъемных операциях. Для буровых коронок, а также правящих карандашей, сверл и ряда других инструментов при высоких температуре и давлении изготавливаются спеки заданной формы и размера и использование ИА позволит существенно (в 2,0–2,5 раза) повысить эффективность этих инструментов.

Пока не исследованы иные сферы технологического применения ИА. В частности, ИА могут оказаться весьма эффективными при производстве катализаторов благодаря чрезвычайно развитой поверхности (импактные алмазы представляют собой наноразмерный композит и при глубокой химической очистке поверхности с целью удаления посторонних минеральных фаз дают высокую удельную поверхность). Возможно, будут найдены иные технологические применения, в частности в электронике. Однако это требует постановки широких исследований, поскольку уровень знаний об этих алмазах определяется 1970–1980 гг.

**Экономические аспекты внедрения импактных алмазов.** В настоящее время ИА как новое сырье для современных технологий никак не представлены на рынке, их добыча не ведется, очень мало информации о технологических свойствах. Отсутствует рыночная цена на них. Причина этого во вне рыночных факторах (прекращение разведки месторождения, секретность материалов, забвение объекта при его уникальности, отсутствие конкурентных объектов). Вместе с тем приведенные выше материалы показывают чрезвычайную привлекательность и эффективность использования ИА в современных технологиях. Поэтому главная задача в настоящее время – определить сферы и способы применения ИА и дать им экономическую оценку. Основным направлением использования, по имеющимся на сегодняшний день сведениям, представляется замещение импактными алмазами природных технических и синтетических алмазов в соответствующих технологиях, что обеспечит значительное повышение эффективности последних. При этом предпочтительнее их использование в ответственных технологиях, связанных с высоким качеством, устойчивостью и производительностью инструмента (например, буровых коронок для глубокого и сложного бурения) и высоким качеством изделий (в военном деле, машиностроении, аэрокосмической промышленности и т. д.). Исходя из ориентировочной цены на ИА (она будет различаться в зависимости от технологии и требований к качеству ИА), а также потенциального спроса на них, можно будет спрогнозировать стоимость добычи ИА, и, опираясь на нее, организовывать добычу. Пока же мы не располагаем никакими экономическими параметрами для этого. Чтобы определить эти параметры необходимо скорейшее развертывание поисковых научно-исследовательских работ по комплексному изучению свойств ИА.

**Направления изучения импактных алмазов.** Авторами проведено широкое обсуждение всего комплекса вопросов, связанных с добычей и использованием ИА, как с потенциальными потребителями, так и с исследовательскими организациями. Ниже показаны основные направления исследований, реализация которых необходима в первую очередь.

**I. Минералогические исследования.** Необходимо проведение на современном инструментальном и методическом уровне комплексных минералогических исследований импактных алмазов с целью:

а) выявления фундаментальных минералогических свойств, характеризующих импактные алмазы как специфический природный объект;

б) выявления специфических типоморфных особенностей импактных алмазов, актуальных в различных аспектах технологических применений (поверхностные свойства импактных алмазов как потенциальной подложки для катализаторов, физические свойства, актуальные для электроники, выявление причины уникальной абразивной способности импактных алмазов, оценка возможностей синтеза лонсдейлита и др.).

Также необходимы сравнительные исследования характеристик алмазов из коренных пород Попигайского кратера и продуктов дальнего закратерного выброса («якутитов»), присутствующих в россыпях на расстоянии до 500 км вокруг кратера, в том числе в промышленных россыпях, при разработке которых они не извлекаются из породы в процессе обогащения и уходят в отходы.

**II. Технологические исследования (проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию продукции из импактных алмазов Попигайского месторождения).** Предусматривается комплекс исследований для определения возможных областей технологического применения импактных алмазов Попигайской астроблемы.

1. Разработка методов переработки алмазного сырья для получения шлиф-, микро- и субмикророшков (в том числе и наночастиц) для использования в шлифовальном, полировальном и режущем инструменте.

2. Определение свойств этих порошков и сравнение их со свойствами различных марок синтетических и природных алмазных абразивов.

3. Исследование характеристик порошков после дробления и измельчения сырья импактных алмазов, определение требований для очистки и классификации по прочности и зернистости, разработка опытных технологических процессов получения стандартных зернистостей шлифпорошков и сырья для микропорошков.

4. Выпуск опытных партий шлифпорошков зернистостью 630/500–50/40 мкм общим объемом 1000–1200 каратов для испытания в инструменте и спекания поликристаллов.

5. Выпуск опытных партий микро- и субмикропорошков зернистостью  $60/40 \div \leq 1/0$  мкм общим объемом 1000–1200 каратов и определение возможности получения нанопорошков.

6. Проведение испытаний микро- и субмикропорошков в полировальном инструменте и пастах.

7. Исследование компактирования поликристаллов при высоких давлениях и температурах, оптимизация составов и условий спекания для получения опытных партий поликристаллов диаметром 5–20 мм в количестве 100–200 штук и определения пригодности использования в режущем лезвийном и буровом инструменте.

8. Выпуск опытных партий режущего и полировального инструмента различной номенклатуры в количестве 100–200 штук и проведение испытаний.

9. Выпуск опытных партий буровых коронок и долот в количестве 10–20 штук и проведение испытаний.

### **III. Экономические исследования.**

1. Изучение и оценка рынка технических природных и синтетических алмазов в России и в мире (ключевые поставщики сырья на рынок, конкурентная среда, особенности рынка, динамика спроса и предложения, динамика цены).

2. Изучение, описание и оценка реальных и предполагаемых сфер применения импактных алмазов в промышленности исходя из понимания потенциального замещения ими синтетических и природных алмазов в тех же технологиях.

3. Обоснование и расчет модели прогнозируемого замещения импактными алмазами синтетических и природных алмазов и стоимостная оценка сегмента импактных алмазов.

4. Определение структуры себестоимости производства технических алмазов (синтетических и природных) и возможной себестоимости добычи импактных алмазов.

5. Определение и описание уровня технической конкурентоспособности (возможность интеграции в технологические цепочки выпуска продукции) импактных алмазов и эксплуатационной конкурентоспособности (экономическая сравнительная оценка свойств импактных алмазов и технических природных и синтетических).

6. Определение равновесной для рынка прогнозной цены карата импактных алмазов (в зависимости от физико-химических, морфологических и гранулометрических характеристик) и оценка потенциальной стоимости разведанных запасов объекта – pre-feasibility study коренных и россыпных месторождений (предварительная геолого-экономическая оценка).

Данные направления исследований определены в сотрудничестве с Институтом сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, который по данному направлению был и остается ведущим центром компетенции на постсоветском пространстве, с Институтом экономики СО РАН (г. Новосибирск), АК «АЛРОСА» – крупнейшей российской компанией по объему добычи природных алмазов. Большой интерес к попигайским алмазам проявляют иностранные компании, в частности Baker Hughes – один из крупнейших в мире операторов по бурению, Element Six – мировой лидер по разработке и изготовлению синтетических алмазов, высокотехнологичного алмазного инструмента и технологий с использованием алмазов.

**Заключение.** Попигайские импактные алмазы являют собой редкий пример того, как высокотехнологичное сырье в силу ряда причин оказалось совершенно не представленным на рынке. В настоящее время имеются возможности широкого внедрения его в современные

технологии, для чего требуется дополнительное изучение импактных алмазов в указанных аспектах, чтобы можно было представить их потенциальным потребителям.

Однако к проблеме попигайских алмазов необходим и государственный интерес. На сегодняшний день на Земле достоверно выявлено более 200 крупных (размерами от 20 до 300 км) астроблем, 20 из них находится на территории России. Но уникальность Попигайского кратера состоит в том, что в нем находится единственное в мире месторождение импактных алмазов с практически неисчерпаемыми запасами, что делает Россию монопольным обладателем этого вида сырья. Этим монопольным положением необходимо разумно воспользоваться, учитывая, что развитие геологической отрасли происходит в условиях интенсификации процессов глобализации и обострения конкуренции на международных рынках минерального сырья и сервисных услуг в области геолого-разведочного производства.

Есть еще один важнейший аспект – геополитический. Попигайский кратер находится в Арктической зоне, освоение которой является приоритетной государственной задачей. Кроме того, примерно в ста пятидесяти километрах к востоку от Попигайского кратера находится другое уникальное месторождение – Томторское месторождение редкоземельных элементов, способное обеспечить не только внутренний спрос на это сырье, но и экспорт его в больших количествах. Редкоземельные элементы являются основой современных технологий в электронике, металлургии и др. После прекращения Китаем экспорта редкоземельных элементов на мировом рынке возник резкий дефицит этого сырья, и разработка данного месторождения позволила бы также занять лидирующие позиции в области экспорта редкоземельных элементов. В Арктической зоне интенсивно ведутся геологоразведочные работы нефти и газа. Комплексный подход к освоению всех этих ресурсов позволил бы резко ускорить экономическое развитие Арктической зоны.

Комплексное освоение Томторского и Попигайского месторождений – один из национальных проектов, реализация которых может обеспечить скорейший переход России на инновационный путь экономического развития и восстановление ее статуса ведущей мировой державы.

### *Список литературы*

1. Масайгис В.Л., Футергендлер С.И., Гневушев М.А. Алмазы в импактиках Попигайского кратера // Записки Всесоюзного минералогического общества. 1972. Ч. 101, вып. 1.
2. Вальтер А.А., Еременко Г.К., Квасница В.Н., Полканов Ю.А. Ударно-метаморфогенные минералы углерода. Киев: Наук, думка. 1992.
3. Вишневский С.А., Афанасьев В.П., Аргунов К.П., Пальчик Н.А. Импактные алмазы: их особенности, происхождение и значение / Тр. ОИГГМ СО РАН. Вып. 385. Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1997.
4. Орлов Ю.Л. Минералогия алмаза. М.: Наука, 1973.
5. Орлов Ю.Л. Минералогия алмаза. 2-е изд. М., Наука, 1984.
6. Бочко А.В., Вальтер А.А., Гурский Д.С., Еременко Г.К. Технологические свойства импактных алмазов // Минералогический журнал. 1999. Т. 21. № 2–3.