

В. Л. МАСАЙТИС (ВСЕГЕИ), В. Т. КИРИЧЕНКО (Полярная ГРЭ, ВСЕГЕИ),
М. С. МАЩАК (Амакинская ГРЭ, ВСЕГЕИ), И. Г. ФЕДОРОВА (ВСЕГЕИ)

КОРЕННЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ И РОССЫПИ ИМПАКТНЫХ АЛМАЗОВ ПОПИГАЙСКОГО РАЙОНА (СЕВЕРНАЯ СИБИРЬ)

Попигайский алмазоносный район на севере Сибирской платформы, открытый в 70–80-х годах прошлого века, приурочен к древнему импактному кратеру диаметром 100 км, возникшему 35,7 млн лет назад. Геологоразведочные работы, геологические и другие исследования, выполненные здесь специалистами Министерства геологии, позволили оценить уникальные запасы технических импактных алмазов – нового, ранее неизвестного вида минерального сырья, а также определить возможности его промышленного использования. Импактные алмазы находятся в виде включений в импактитах, а также в россыпях, образовавшихся при их разрушении. Утвержденные запасы этих алмазов в коренных и россыпных месторождениях во много раз превышают все выявленные запасы алмазных месторождений мира, вместе взятые.

Ключевые слова: *Попигайская астроблема, импактиты, импактные алмазы, россыпные алмазы.*

Popigai diamond-bearing region on the north of Siberian platform, discovered in the 70s and 80s of the previous century, is associated with the ancient impact crater – a 100 km in diameter structure that formed 35.7 Ma ago. Exploration and other geological studies carried out by teams of specialists of the former Ministry of Geology allowed to evaluate, located within the region, unique resources of impact diamonds – a new, earlier unknown, economic mineral, and to establish possibilities for its industrial and scientific application. The impact diamonds occur as inclusions in impactites and as placers that formed due to impactites weathering. The demonstrated reserves of impact diamonds, contained within impactites and in placers, is many times larger than all combined resources of all known diamond deposits throughout world.

Keywords: *Popigai astrobleme, impactites, impact diamonds, placer diamonds.*

Введение. В 70–80-х годах прошлого века на территории СССР впервые в мировой практике выявлены и разведаны весьма крупные запасы ранее неизвестного вида минерального сырья – импактных алмазов, показана возможность освоения месторождений и использования этого сырья. Коренные и россыпные месторождения и проявления импактных алмазов находятся в пределах Попигайского алмазоносного района, открытого на севере Восточной Сибири работами научно-исследовательских и производственных геологических организаций Министерства геологии. Этот район приурочен к впервые диагностированной особой круговой структуре – древнему метеоритному (импактному) кратеру, или астроблеме [6, 7]. Проведенные там геологические исследования и геологоразведочные работы позволили выдвинуть и затем решить ряд важных практических и научных вопросов.

Импактные алмазы произошли в результате твердофазного перехода из графита архейских местных пород в условиях высокого импульсного давления при астероидном ударе, они отличаются от кимберлитовых и лампроитовых алмазов по морфологии, окраске, внутренней структуре, другим различным свойствам, в том числе по твердости, абразивной способности и т. д. Алмазодержащие породы (руды коренных месторождений и проявления) – импактиты (тагамиты и зювиты) возникли за счет графитсодержащих гнейсов и кристаллических сланцев, подвергшихся ударному метаморфизму и плавлению при взрыве ударившего космического тела и образовании гигантского Попигайского кра-

тера. Импактные алмазы – аксессуарные минералы импактитов – содержатся также в ударно-метаморфизованных гнейсах и в некоторых типах импактных брекчий. Алмазы распространены также в различных генетических типах рыхлых отложений, возникших при дезинтеграции и переотложении алмазосодержащих коренных пород.

Общие сведения об изученности алмазоносности района. Поскольку гигантские импактные кратеры ранее были неизвестны на территории нашей страны, как не были известны в мировой практике и находки алмазов в породах этих кратеров, в 1971–1987 гг. и позднее комплексное изучение Попигайской структуры предприняли специалисты ВСЕГЕИ, геологи Котуйской партии и Полярной геологоразведочной экспедиции ПГО «Красноярскгеология» (ПГРЭ) и Амакинской геологоразведочной экспедиции ПГО «Якутскгеология» (АмГРЭ). Отдельные геологические работы выполняли и другие участники. Были проведены поиски с опробованием на алмазы коренных пород, геологическая съемка м-ба 1 : 100 000 с детализацией на отдельных участках м-ба 1 : 50 000 и картировочным бурением. Разведка выявленных месторождений импактных алмазов Ударное и Скальное осуществлялась ПГРЭ при участии ВСЕГЕИ и некоторых других организаций. Разведочные работы производились путем бурения скважин глубиной до 200–500, максимальной до 1,5 км (общий объем бурения около 100 000 пог. м), сопровождавшегося опробованием керна и отбором крупнотоннажных технологических проб. Выполнено петрографическое,

минералогическое, геохимическое и изотопно-геохимическое изучение ударно-метаморфизованных горных пород, их минералов и различных стекол. Впервые получены достоверные данные о составе и свойствах импактных пород, о строении слагаемых ими тел и их соотношениях. Также впервые разработана теоретическая модель генезиса нового типа месторождений алмазов в импактитах, определены его физико-химические параметры.

С 1972 г. и позже многие физические и другие свойства импактных алмазов исследовали в основном специалисты ВСЕГЕИ, ЦНИГРИ (Москва), Института минеральных ресурсов (ИМР, Симферополь) и частично Института ЯкутНИИПРОалмаз (Мирный). Некоторые образцы пород и минералов в конце 90-х годов дополнительно изучены в ряде зарубежных лабораторий.

Геофизическими партиями ПГО «Красноярскгеология» и частично некоторыми другими организациями в 70–80-е годы выполнялись различные геофизические исследования (аэромагнитная и аэрогравиметрическая съемка всей структуры в масштабе 1 : 200 000, электроразведка на отдельных участках). ВСЕГЕИ и ПГРЭ в 1982–2001 гг. проводили, кроме того, геоморфологические исследования, мелкообъемное и шлиховое опробование рыхлых отложений на импактные алмазы и поиски их россыпей.

В процессе большинства видов работ на геологическом объекте нового типа впервые разработаны или усовершенствованы методы диагностики, расчленения и корреляции импактных горных пород, построения карт и разрезов, локальные прогнозные критерии импактной алмазоносности, методы диагностики и оценки нового вида минерального сырья, методы опробования и обработки проб, извлечения из них алмазов, определения достоверности опробования, параметров разведочной сети, кондиций и т. д. Эффективные технологии извлечения алмазов из коренных пород разрабатывались ВСЕГЕИ и ПГРЭ совместно с ИМР, а некоторые методы оценки запасов алмазов вместе с ЦНИГРИ.

Результаты комплексных геолого-геофизических исследований импактитов и импактных алмазов, как и некоторых общих данных об их распространении в Попигайском алмазоносном районе, опубликованы в многочисленных статьях на русском и иностранных языках, издано также несколько монографий [4, 5, 7, 8 и др.]. Однако большой материал, в том числе по месторождениям импактных алмазов и их поискам, содержащийся в ряде технических отчетов организаций, выполнявших те или иные исследовательские и производственные работы, не опубликован из-за существовавшего тогда режима секретности. Настоящая статья, подготовленная коллективом авторов, которые непосредственно участвовали в открытии и изучении алмазоносного района, а также были в числе руководителей работ, имеет целью охарактеризовать основные результаты поисков и разведки алмазов и особенности их коренных и россыпных месторождений.

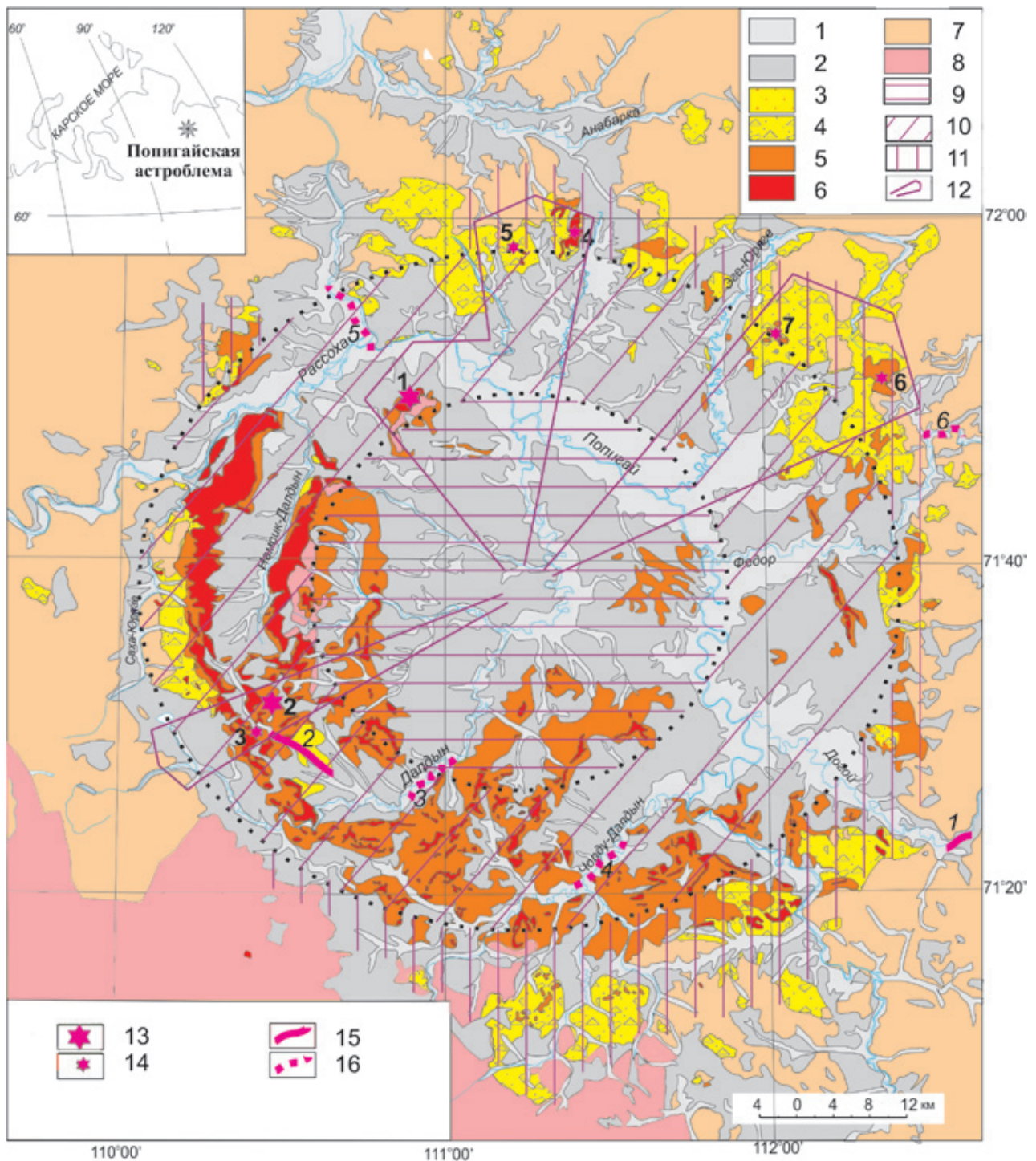
Геологическое строение и происхождение. Попигайский алмазоносный район находится на северо-восточной окраине Анабарского щита Сибирской платформы и охватывает площадь древнего импактного кратера (астроблемы), а также частично прилегающие территории, где распространены

алмазоносные импактиты и россыпи импактных алмазов (рисунок).

Попигайская астроблема диаметром 100 км возникла при ударе астероида около 35,7 млн лет назад [4]. Она является одной из крупнейших на земной суше и отличается незначительной эродированностью. Мишенью стали породы фундамента (различные гнейсы и кристаллические сланцы) и кварциты, известняки, доломиты, песчаники, сланцы и другие породы чехла позднепротерозойского, палеозойского и частично мезозойского возрастов общей мощностью около 1 км. Особенностью внутренней структуры астроблемы является наличие центральной впадины, кольцевого поднятия кристаллического основания и кольцевого желоба, окруженного зоной деформированных пород, особенно четко выраженной в осадочном чехле. Впадина и желоб заполнены различными импактными брекчиями и импактитами, возникшими при ударных преобразованиях и перемещении раздробленных и переплавленных местных пород. Импактные брекчии и импактиты развиты также на небольших участках за пределами кратера, это сохранившиеся от эрозии останцы покрова выбросов. Постимпактные плиоцен-четвертичные отложения (озерные, ледниковые, речные, делювиальные и др.), перекрывающие эти породы, широко распространены, особенно в центральной части астроблемы.

Импактная структура образована ударом обыкновенного хондрита типа L диаметром около 7–8 км. Пиковое давление на стадии сжатия составило свыше 600 ГПа, а общая энергия космического взрыва около $1,5 \cdot 10^{23}$ Дж. Импактиты сформировались при ударном метаморфизме и плавлении гнейсов, а также выбросе и охлаждении возникшего расплава. Судя по характеру преобразования силикатных минералов гнейсов, в которых были найдены одновременно графит и алмаз, полиморфный переход одного в другой имел место при квазигидростатическом сжатии свыше 35 ГПа продолжительностью около 0,5 с и последующей разгрузке. Наиболее эффективное алмазообразование происходило в концентрической зоне, где уровень ударного сжатия составлял 35–60 ГПа. При высоких температурах импактного расплава и его медленном охлаждении алмазы подвергались частичному или полному окислению или же графитизации.

Алмазоносные импактиты представлены двумя разновидностями — одна из них напоминает застывшую лаву, переполненную фрагментами гнейсов и других пород (тагамиты плотностью 2,4–2,5 г/см³), другая внешне сходна с вулканическими туфами, состоящими из мелких частиц и бомб застывшего импактного расплава, а также обломков метаморфических и осадочных пород (зювиты плотностью 2,2–2,3 г/см³). Импактиты выступают на поверхности на площади около 1140 км² (в том числе тагамиты на 306 и зювиты на 834 км²), общая площадь их развития, в том числе под перекрывающими наносами, около 3500 км², алмазы присутствуют в них повсеместно. По геофизическим данным и данным бурения, а также исходя из геологической модели астроблемы, импактиты и импактные брекчии образуют в целом гигантскую линзу сложной формы и строения диаметром около 70 км, мощностью в центральной части до 2–3 км. Линза неоднородна как по латерали, так и вертикали. Собственно алмазоносные импактиты залегают в виде мощных (до 600 м) и протяженных (до 10–15 км) субгори-



Попига́йский алмазоносный район

1 – позднечетвертичные и современные аллювиальные отложения; 2 – нерасчлененные плиоцен-позднечетвертичные озерно-аллювиальные, ледниковые и другие отложения; 3–6 – позднепалеогеновые импактные брекчи и импактиты Попига́йской астроблемы (3 – мелкообломочные, 4 – крупно- и грубообломочные литические импактные брекчи, 5 – зювиты, 6 – тагамиты); 7 – нерасчлененные позднепротерозойские–позднепалеозойские осадочные породы; 8 – позд-неархейские–раннепротерозойские метаморфические и изверженные породы, в том числе ударно-метаморфизованные и брекчированные в пределах кольцевого поднятия астроблемы; 9–11 – зоны распространения алмазоносных импактитов (9 – Центральная, 10 – Кольцевая, 11 – Периферическая); 12 – секторы распространения высокоалмазоносных импактитов; 13 – месторождения импактных алмазов Ударное (1) и Скальное (2); 14 – крупные коренные проявления импактных алмазов, предварительно оцененные (3 – Сюрюнге, 4 – Встречный, 5 – Таас, 6 – Тонгулах, 7 – Эге-Юряге); 15 – перспективные россыпи импактных алмазов, предварительно оцененные (1 – Догой, 2 – Балаган-Юряге); 16 – участки речных долин с установленными перспективными россыпепроявлениями импактных алмазов (3 – Верхнедалдынский, 4 – Чорду-Далдынский, 5 – Усть-Рассохинский, 6 – Верхнефедоровский)

горизонтальных пластовых и линзовидных тел, встречаются также более мелкие неправильные тела мощностью в десятки метров.

Рыхлые плиоцен-нижнечетвертичные и средне-позднечетвертичные отложения широко развиты, особенно в центральной части структуры. Они служат промежуточными коллекторами, за их счет формировались современные отложения речных русел и пойменных террас, которые содержат повышенные концентрации алмазов и на отдельных участках долин представляют собой россыпные месторождения.

Алмазы в импактиках. Основным методом при поисках алмазов на площади структуры являлось точечное опробование (вес проб 2–4 кг). Эффективность его подтверждается сравнением средних содержаний алмазов на месторождениях Ударное и Скальное по поисковым работам и результатам последующих геологоразведочных работ [10]. Из импактитов (и частично из других пород) отобрано и проанализировано 2590 проб, в том числе из тагамитов 1610, из зювитов 980. Средняя плотность опробования по тагамитам 5,9–5,2, по зювитам 4,8–1,0 пробы на км². Высокоалмазные импактиты занимают площадь 46 (тагамиты) и 38 км² (зювиты), умеренно- и низкоалмазные 260 и 796 км². Учет доли площадей с высоким содержанием алмазов позволяет оценить фоновое содержание (или среднее содержание по структуре в низкоалмазных импактиках): 2,6 к/т в тагамитах и 2,3 к/т в зювитах. Среднее содержание алмазов в высокоалмазных импактиках (14,6 к/т в тагамитах и 10,2 к/т в зювитах) превышает фоновое в 3–7 раз, умеренноалмазных в 1,5–2 раза.

Для высокоалмазных площадей района распределение алмазов аппроксимируется гауссовой кривой с модой, превышающей значения фона в три раза и более. Для площадей, где развиты умеренно- и низкоалмазные импактиты, кривая распределения асимметрична с максимумом в области фоновых значений концентраций алмазов, иногда бимодальна со вторым небольшим максимумом, превышающим фон.

Пробоподготовка поисковых проб (а также керновых проб при разведке месторождений) включала дробление материала до 0,5 мм и квартование с последующими термохимическим разложением навески в бифториде аммония, сплавлением со щелочами и растворением в кислотах. Алмазы извлекались из оставшейся нерастворимой части. Впоследствии была принята более совершенная схема анализа, при которой раздробленный материал предварительно разделялся в тяжелой жидкости, затем она обрабатывалась по методу, описанному выше. Следует отметить, что потери алмазов при пробоподготовке могли достигать 25%. На начальной стадии крупнообъемные технологические пробы руд обрабатывались на обогатительных фабриках в г. Мирный по схемам, близким к схемам для кимберлитов. Затем обогащение производилось на специально построенной фабрике в пос. Хатанга, где находилась и база ПГРЭ.

В пробах руд из месторождений, как и в массе поисковых проб, алмазы крупностью более 0,5 мм по количеству составляют всего 4,0, а по весу почти 43%. На алмазы крупностью более 1 мм по весу приходится 9,1%, хотя по количеству они занимают лишь 0,16% от общего числа алмазов. На долю

мелкого класса (–0,2 + 0,1 мм) приходится 42,4% от общего количества алмазов и 10,8% от их веса. По результатам взвешивания нескольких тысяч зерен средний вес алмазов, извлеченных из проб импактитов, составляет 0,01 мг. Помимо алмазов фракции –0,5 + 0,1 мм – основной массы алмазов коренных проявлений и месторождений, в импактиках содержится большое количество алмазов фракции –0,07 мм (шламовой), которая по весу составляет до 30–40% от общего веса извлеченных зерен более крупных классов и не учитывалась при подсчете запасов. Однако, как показали специальные исследования, есть возможность извлечения алмазов фракции –0,07 мм, а также использования этого материала в промышленности для получения абразивных паст, спеков и т. д.

Гранулометрия алмазов, извлеченных из импактитов при поисковом опробовании и разведке, не отражает, конечно, их природной размерности, об этом имеются лишь ограниченные данные. Так, разложение нескольких десятков крупных штучков импактитов показало, что в весовом отношении фракция –0,25 + 0,05 мм составляет 19, фракция –0,5+0,25 – 25, а фракция +0,5, где изредка встречаются зерна более 1 мм, 56%. Россыпные алмазы характеризуются гранулометрией, более близкой к природной (см. ниже), однако она также искажена из-за вымывания мелких фракций, частичного окатывания зерен и пр.

Как неоднократно указывалось, импактные алмазы представляют собой сложные текстурированные микрокристаллические агрегаты кубической и гексагональной (лонсдейлит) фаз, иногда с участием графита и реже некоторых других аллотропных форм углерода, кроме того, алмазы отличаются высокой плотностью линейно-плоскостных дефектов кристаллической структуры [4, 5]. Светлоокрашенные алмазы характеризуются незначительным присутствием лонсдейлита, в бесцветных зернах его вообще нет. Эти алмазы в целом лучшего качества, в частности, они обладают более высокой абразивной способностью, чем темноокрашенные. Соотношение светло- и темноокрашенных алмазов от 9 : 1 в тагамитах до 3 : 2 в зювитах, оно различно также на разных участках структуры.

Результаты опробования, проведенного на всей площади развития импактитов, показали, что в пределах района могут быть выделены три концентрические зоны – Центральная радиусом 20, Кольцевая 30–45 и Периферическая 45–60 км. Установлен более низкий уровень содержания алмазов в импактиках Центральной зоны и рост концентраций по отдельным лучевым направлениям от центра структуры во всех зонах, особенно в Кольцевой и Периферической, при этом концентрации алмазов в зювитах и тагамитах изменяются синбатно. Перспективные участки и месторождения высокоалмазных импактитов расположены в лучах, радиально расходящихся от центра кратера [4]. Так, в пределах северного луча находятся месторождение Ударное и участки Встречный и Таас, в пределах северо-восточного – участки Тонгулах и Эге-Юряге, однако наиболее четко выражен юго-западный луч, где располагается самое крупное и богатое месторождение Скальное, вытянутое полосой на юго-запад, и примыкающий к нему участок Сюрюнге (рисунок). Лучи импактитов с повышенными содержаниями алмазов связаны с неравномерным распределением графита в гнейсах и выбросом воз-

никого за их счет в разной степени алмазоносного расплава по разным радиусам.

Коренные месторождения импактных алмазов.

Они образованы совокупностью тел тагамитов и зювитов (или частей таких тел), где содержание алмазов в 3–10 раз и более превосходит фоновое. Руды месторождений представлены отдельными петрографическими разновидностями пород, различающимися как по текстурно-структурным особенностям, так и по содержанию алмазов. Различные литические импактные брекчии обычно отличаются низкой алмазоносностью, поскольку в основном состоят из обломков и глыб различных осадочных и кристаллических пород, алмазоносность импактных брекчий определяется главным образом количеством присутствующего в них импактного стекла, содержащего алмазы. Эти брекчии обычно подстилают и перекрывают тела импактитов. Мелкообломочная слабосцементированная и низкоалмазоносная разновидность литических импактных брекчий (псаммито-алевритовая брекчия, или коптокластит) малоустойчива и приурочена к верхнему горизонту заполняющих кратер пород, сохранившемуся от эрозии в центре структуры. Возможно, эти породы были источником части алмазов в россыпях.

Разведка месторождений Ударное и Скальное проводилась вертикальными колонковыми скважинами. Сеть их первоначально составляла 1600×400 или 800×400 , затем она сгущалась до 400×400 и доводилась до 400×200 и 200×200 м. Места сгущения сети определялись по результатам текущего опробования с целью детализации наиболее высокоалмазоносных участков, а на завершающей стадии работ на месторождении Скальное с учетом выбора места заложения карьера первоочередной отработки. Продуктивная толща пересечена скважинами, как правило, на полную мощность с углублением на 20–30 м в низкоалмазоносные подстилающие породы. Опробование керн производилось секционно в зависимости от его петрографического состава. Длина секции от 0,5 до 2–2,5, обычно 2,0 м. В монотонных по составу породах она увеличивалась до 4,0 м при условии, что мощность слоя превышала 20 м.

Выявленные месторождения относятся к третьей группе по классификации ГКЗ (месторождения с неясными границами, контуры которых определяются исходя из бортовых содержаний и принятой разведочной сети). Большая мощность продуктивных импактитов позволила произвести подсчет запасов месторождений методом параллельных сечений. Вместе с тем, большая площадь их развития и относительная простота геологического строения месторождений допускают и применение метода геологических блоков, который использовался как контрольный при подсчете запасов. Оконтуривание рудных тел по разведочным линиям производилось на геологических разрезах. Блок подсчета запасов в общем случае опирается на два смежных разведочных профиля. Экстраполированный блок подвешивался к крайнему разведочному профилю в пределах предполагаемой площади развития импактных пород в форме призмы.

Месторождение Ударное находится в северо-западном секторе Попигайской структуры в пределах возвышенности Маячика-Керикете (рисунк). Площадь его 8,3 км², протяженности с юго-запада на

северо-восток 6, ширина от 0,8 до 2,2 км. Оно приурочено к внешнему склону выступающего здесь кольцевого поднятия, сложенного биотит-гранатовыми и другими гнейсами и кристаллическими сланцами, подвергшимися ударному метаморфизму низких ступеней. Эти породы перекрыты различными импактными брекчиями и импактитами, погружающимися к северо-западу и юго-востоку, единая толща импактитов на поверхности разделена пережимами или эрозией на отдельные части.

Тагамиты образуют пластообразные тела мощностью от первых десятков до 100 м и более, реже более мелкие каплевидные, линзовидные тела в зювитах и тела неправильной формы в аллогенной мономиктовой брекчии кристаллических пород. Наиболее крупное пластообразное субгоризонтально залегающее тело тагамитов имеет длину более 3,8, ширину от 0,25 до 1,25 км. Мощность тагамитов наиболее значительна в центральной части. Распространены массивные тагамиты, атакситовые и пористые встречаются реже. Зювиты слагают одно мощное пластовое тело, перекрытое тагамитами. Мощность его (максимальная 264, средняя 63 м) возрастает с юга на север, где на отдельных участках зювиты сменяются аллогенной полимиктовой мелкообломочной брекчией. В разрезе этого тела сверху вниз витрокластические зювиты сменяются лито- и витролитокластическими, обычно связанными между собой переходами. Полимиктовая аллогенная брекчия, в том числе мелкообломочная (максимальная ее мощность 315 м), перекрывает толщу импактитов, а мономиктовая глыбовая брекчия кристаллических пород (мегабрекчия) подстилает ее. Мелкообломочная брекчия развита на поверхности в понижениях рельефа в центральной части, а также на северном и восточном флангах месторождения.

Разведанная площадь продуктивной толщи импактитов 7,66 км², мощность ее до 368,9, в средней части месторождения 97,7 м, возрастает с юго-востока на северо-запад. В составе ее выделяются три рудных горизонта, различающихся по вещественному составу и алмазоносности: верхний тагамитовый, зювитовый и нижний тагамитовый. Залегающий на коренных породах алмазоносный элювиально-делювиальный слой отнесен к тому рудному горизонту, который он непосредственно перекрывает.

Подавляющая часть объема верхнего тагамитового горизонта сложена массивными тагамитами, максимальная их мощность 110,9 м, незначительный объем (4%) приходится на зювиты. Зювитовый горизонт при отсутствии нижнего тагамитового горизонта залегаet непосредственно на гнейсах или аллогенной мономиктовой мегабрекчии. Средняя мощность его 60 м возрастает к северо-западу. В виде небольших линз встречаются тагамиты. Нижний тагамитовый горизонт не обнажается на дневной поверхности. Наиболее крупное образующее его тело тагамитов имеет протяженность 3, ширину 0,3–0,7 км и мощность до 166,8 м. Незначительный объем горизонта средней мощностью 52 м составляют зювиты и крупные глыбы ударно-метаморфизованных гнейсов.

Содержание алмазов в продуктивной толще по отдельным скважинам от 2,20 до 21,64 и по блокам подсчета запасов от 2,63 до 13,62 к/т. Среднее содержание по месторождению в контуре подсчета запасов равно 7,6, из них в тагамитах 9,5, а в зювитах

6,6 к/т. Содержание их в витрокластических зювитах в 1,56 раза выше, чем в литовитрокластических, а в последних в 1,76 раза выше, чем в витролитокластических. Покров элювиально-делювиальных отложений мощностью в среднем 3,8, иногда до 17,8 м, отличается высоким содержанием алмазов — 8,43 к/т. Интенсивно ударно-метаморфизованные гнейсы, содержащие более 10% импактного стекла в виде линз и прожилков, в 2,3 раза превышают по среднему содержанию алмазов такие же образования, но без импактных стекол. В верхнем и нижнем тагамитовых горизонтах прикровлевые и приподошвенные части местами до 2–3 раз обогащены алмазами по сравнению с центральной частью. В зювитовом горизонте содержание алмазов вниз по разрезу снижается. Алмазоносность аллогенной глыбовой мономиктовой брекчии с импактным стеклом, подстилающей продуктивную толщу, неравномерна, она составляет от десятых долей до 12,5 к/т и зависит от количества присутствующего импактного стекла. Алмазы месторождения — примерно на 90% светлоокрашенные разновидности.

Всего на месторождении Ударное пробурено 226 скважин общей протяженностью 23 318 м, в том числе по продуктивной толще 12 666, по вмещающим породам 10 652 м. Месторождение разбурено до глубины 395 м. Горные работы проведены в незначительном объеме с целью отбора технологических проб и для контроля за опробованием керна скважин.

Для подсчета запасов по месторождению Ударное приняты следующие кондиции, учитывающие его геологические особенности: минимальное промышленное содержание алмазов в подсчитанном блоке 5,5 к/т, минимальная мощность рудного тела и максимальная мощность пустых пород, включаемых в подсчет запасов, 4 м. Пустые породы мощностью более 4 м исключались из подсчета с применением коэффициента рудоносности. Подсчет запасов основан на анализе 3600 керновых проб суммарной длиной 9671 м, отобранных из 104 скважин.

Месторождение Скальное расположено в юго-западном секторе кратера, в верховьях р. Балаган-Юряге (рисунок), занимает участок размером 13 × 6,5 км, вытянутый в ЮЗ-СВ направлении, и площадью около 85 км². Оно охватывает юго-западный склон кольцевого поднятия, но в основном находится в пределах кольцевого желоба. В осевой части поднятия на дневной поверхности обнажаются ударно-метаморфизованные и катаклазированные гнейсы аутигенной брекчии. Неровная поверхность их погружается под углом около 30° в юго-западном направлении и вскрыта некоторыми скважинами на глубине 750–900 м. Скважины в крайней юго-западной части месторождения гнейсовое основание желоба не вскрывают. Здесь оно перекрывается мощными линзами различных аллогенных брекчий: полимиктовыми глыбовыми брекчиями, переходящими в верхней части в брекчии, цементированные зювитами, а выше тагамитами. Мощность этих брекчий превышает 1 км. Брекчия с тагамитовым цементом мономиктовая и сложена глыбами кристаллических пород, она повсеместно подстилает импактиты месторождения, в сокращенной мощности (несколько десятков, до 100 м) она выступает из-под них на склоне кольцевого поднятия в северо-восточной части месторождения. Выше прослежено мощное (до 600 м в осевой части, в среднем около 300 м) сложное пластовое горизон-

тально залегающее тело тагамитов, к которому приурочены наиболее высокие содержания алмазов. Это тело в виде скальных обнажений выходит на дневную поверхность в верховьях р. Балаган-Юряге и вскрывается практически всеми скважинами месторождения, выклинивается на юго-западном фланге и сокращается в мощности на северо-запад и юго-восток за пределами месторождения. В зоне кровли в западной части этого тела среди тагамитов отмечаются пласты и линзы зювитов мощностью до 100–150 м, которые несколько усложняют общую геологическую картину.

На восточном фланге месторождения тагамиты, местами перекрытые зювитами, с которыми они связаны постепенными переходами через атакситовые разновидности, резко сменяются мелкообломочной полимиктовой брекчией (коптокластитамитами), характерной для вышележащей части общего разреза заполнения кратера, что позволяет предполагать наличие здесь резкого погружения тагамитового тела, возможно, вызванного сбросом северо-восточного простирания. Подошва пластового тела в целом пологоволнистая, образованной серией субгоризонтальных простых тел из двух разновидностей тагамитов, отличающихся рядом петрографических признаков, а также некоторыми магнитными свойствами. Эти две разновидности, рассматриваемые как продукты застывания более высокотемпературного и относительно низкотемпературного расплава, различаются по присутствию свежего полиминерального стекла в первых из них, а также по содержаниям алмазов, которыми богаче вторые. Геологические соотношения этих разновидностей указывают на различную вязкость образовавших их расплава и их неполное перемешивание во время выброса с возникновением сложных такситовых текстур [4].

В зювитах верхнего горизонта мощностью в среднем 50–60 м (максимальная 130 м) две разновидности этих пород: витрокластические, обогащенные обломками кристаллических пород, и витролитокластические, преимущественно содержащие обломки осадочных пород. На северном фланге месторождения, а также в центральной и южной его частях на зювитах залегают мелкообломочная полимиктовая импактная брекчия (коптокластит) средней мощностью 30 м (максимальная 97 м), иногда она встречается в виде линз мощностью 10–20 м среди зювитов.

Содержание алмазов в импактитах различно в разных частях месторождения как по латерали, так и на глубину. По данным поверхностного опробования, тагамиты в среднем содержат 17,3, а зювиты 11,5 к/т. Опробование керна скважин показало, что соответствующие оценки для главных типов импактитов 19,7 и 13,7 к/т. Соотношение содержаний алмазов в разновидностях тагамитов, почти лишенных стекла и обогащенных им, 2 : 1, а спекшиевые витрокластические зювиты по содержанию алмазов превышают витрогранокластические в три раза.

Различная алмазоносность импактитов на месторождении Скальное определяется рядом факторов [4]. Первично струйное или лучевое обогащение алмазами полосы северо-восточного простирания шириной около 2,5 км, по оси которой содержания алмазов в тагамитах местами максимальны и достигают 25–30 к/т (при средних значениях 14–15 к/т) с уменьшением содержаний на флангах в среднем до 7–8 к/т и менее. В отдельных керновых пробах

содержания составляли 40–110 к/т. К первичным относятся и различия в содержаниях алмазов в высокотемпературных (среднее 8,7 к/т) и низкотемпературных тагамитах (среднее 17,4 к/т), что связано с неустойчивостью алмазов при высоких температурах и их выгоранием. Объем захваченных импактным расплавом обломков неалмазоносных пород и разубоживание импактитов могут также рассматриваться как первичный фактор. Вторичным следует считать скорость охлаждения импактного расплава. Как указывалось, при длительном сохранении высокой температуры часть алмазов выгорает. Поэтому алмазами обычно обогащены застывшие краевые части пластовых тел тагамитов, т. е. прикровельная (где содержание по разведочным блокам доходит до 24,5 к/т) и в меньшей мере приподошвенная зоны. Мощность прикровельной зоны сложного тела тагамитов на месторождении 50–250 м, она залегает вблизи дневной поверхности, поэтому наиболее богатые руды доступны для открытой разработки. Около 85% составляют светлоокрашенные алмазы.

Всего на месторождении более 250 скважин, самая глубокая, расположенная в желобе, достигла 1520 м, но в основном скважины разбурены на глубину 400–450 м. Примерно треть скважин находится за контурами подсчетных блоков. Выделены два продуктивных горизонта – верхний зювитовый и нижний тагамитовый. Продуктивные горизонты (особенно нижний, обогащенный алмазами) на участках сгущения сети скважин не всегда переобуривались на полную мощность, запасы подсчитывались по разным вариантам до разных глубин. Как и на месторождении Ударное, при подсчете запасов использовались результаты обработки нескольких тысяч ядерных проб.

Участки распространения высокоалмазоносных импактитов выявлены в отдельных секторах Попигайской астроблемы (рисунок). На этих участках тагамиты и (или) зювиты образуют залегающие на поверхности (частично на небольшой глубине под наносами) пластовые тела площадью около 5–10 км² и более или их эрозионные останцы мощностью несколько десятков метров. Они обычно подстилаются полимиктовыми импактными брекчиями в пределах Периферической зоны кратера или зювитами и гнейсами в Кольцевой зоне. На этих участках была сгущена сеть поискового опробования, а на некоторых из них (Сюрюнге, Встречный, Таас, Тонгулах, Эге-Юряге), кроме того, пробурены и опробованы скважины глубиной до 100 м. Содержание алмазов в импактитах на этих участках по результатам анализа нескольких десятков проб от 8 до 20 к/т в целом превышает фоновое содержание в 3–7 раз, отмечается хорошая сходимость результатов опробования керна и поверхности.

Россыши импактных алмазов. Импактные алмазы в рыхлых плиоцен-четвертичных отложениях установлены в составе различных их генетических типов практически на всей площади Попигайской астроблемы и в непосредственной близости к ней. Эти отложения сформировались за счет эрозии алмазоносных коренных пород, а также пород нормального геологического разреза и поступления больших объемов продуктов их разрушения в древнюю и современную речную сеть. Преимущества россыпей перед коренными месторождениями заключаются в повышенном содержании в них крупных фракций

алмазов, в более высокой прочности последних в силу «облагораживающего» влияния обработки при водном переносе, а также в более дешевой технологии их извлечения из природных источников, исключая стадию дробления [4, 8].

Первые данные о находках россыпных импактных алмазов непосредственно на площади Попигайской структуры получены ВСЕГЕИ и АмГРЭ еще в 1971–1973 гг. при выборочном опробовании рыхлых отложений. Выполненная в последующие, в том числе в 90-е годы оценка перспектив россыпной алмазоносности и условий образования россыпей, содержащих импактные алмазы крупных классов, была основана на изучении геоморфологии Попигайской котловины и литологии плиоцен-четвертичных отложений, осуществлявшихся ВСЕГЕИ [9] и сопровождавшихся мелкообъемным и шлиховым опробованием и на поисково-разведочных работах ПГРЭ на отдельных объектах. Следует заметить, что еще до открытия алмазоносных импактитов необычные «сланцеватые» алмазы (их ошибочно в то время относили к карбонадо) установлены АмГРЭ в качестве примеси в россыпях кимберлитовых алмазов восточнее басс. р. Анабар, на удалении около 150 км от Попигайской астроблемы, а впоследствии отдельные находки импактных алмазов были сделаны также на обширной территории к северо-востоку вплоть до низовьев р. Оленек [2, 3]. Этот ореол рассеяния может быть связан с размывом дальних выбросов алмазосодержащих пород и стекол при образовании Попигайского кратера.

Алмазоносность аллювиальных отложений на площади Попигайской котловины установлена практически для аллювия всех речных систем (ср. содержание 0,45 к/м³), алмазоносны также флювиогляциальные (ср. содержание 0,108 к/м³), озерно-аллювиальные (ср. содержание 0,1375 к/м³) и элювиально-делювиальные образования (ср. содержание 0,078 к/м³). Наряду с импактными алмазами в мелко- и крупнообъемных пробах из аллювия, иногда встречаются кимберлитовые алмазы. Импактные алмазы обнаружены более чем в 150 мелкообъемных пробах из русловых песков и галечников, в том числе в крупных классах –4 + 2 и –2 + 1 мм, причем вес их составляет около 75% общего веса алмазов всех классов. Русловое отложение максимально обогащено минералами тяжелой фракции, что связано с их формированием в основном за счет многократного переотложения всех более древних наносов. Среднее содержание алмазов по всем пробам из аллювиальных отложений, отмеченное выше, значительно колеблется для разных участков, но везде превышает 0,1, а в отдельных пробах доходит до 3–5 к/м³. Средний вес одного зерна из россыпей 1,5 мг.

Наиболее высокие концентрации импактных алмазов в элювиально-делювиальных отложениях (в отдельных пробах от 26 до 166 к/м³) выявлены на площади коренных месторождений Ударное и Скальные, они отмечены также в средне-верхнечетвертичных озерно-аллювиальных отложениях района возвышенности Усук-Таас-Кыстыга (1,026 к/м³), где был найден крупный алмаз весом 162,9 мг [8].

Поисковыми и разведочными работами ПГРЭ в аллювии среднего течения р. Догой, правого притока р. Попигай, а также по р. Балаган-Юряге правого притока р. Далдын выявлены повышенные концентрации импактных алмазов крупных классов (рисунок). На Догойской россыпи пройдены

глубокие (до 20 м) шурфы и ряд скважин. Методика работ, параметры сети выработки заимствованы из опыта разведки россыпи кимберлитовых алмазов басс. р. Эбелях, расположенной в 100 км к востоку [3]. Ширина русла р. Догой с поймой и первой надпойменной террасой от 0,5 до 1,5 км, мощность русловых галечников до 10–15 м, протяженность более 2 км. В пробах из этих отложений (общий объем 129 м³) найдено несколько крупных алмазов размером 8–10 мм и весом более 2 карат, средние содержания составляют 1–2, но колеблются от 0,03 до 3 кг/м³. Следует отметить, что наряду с импактными в россыпи встречены и кимберлитовые алмазы высокого качества. Их содержание составляет 3–5% от общего количества алмазов.

Работами ПГРЭ на площади месторождения Скальное выявлена крупная остаточная россыпь в элювиально-делювиальных образованиях, представленных щебнистыми глинами и супесями. Их мощность неравномерна и составляет 1–2, местами до 10 м. Среднее содержание алмазов по результатам опробования 220 скважин 5,6 кг/т, в отдельных пробах значительно выше. Алмазы содержатся в мелкозем в свободном состоянии, концентрация их до 20 кг/т. В аллювиальных отложениях водотоков на площади коренного месторождения по единичным пробам установлено содержание алмазов до 30 кг/м³. Максимальный размер найденного в аллювии алмаза 9 × 5,5 мм, в элювиально-делювиальных отложениях встречаются алмазы класса –5 + 3 мм [8]. Богатая аллювиальная россыпь приурочена к руслу р. Балаган-Юряге, дренирующей площадь месторождения Скальное, ее протяженность свыше 6 км при ширине русла с поймой до нескольких сот метров. Некоторые пробы обнаруживают содержания алмазов более 1,5 кг/м³. В Верхнедалдынской русловой россыпи (протяженность ее около 10 км при ширине до 0,4 км и мощности аллювия русла и поймы от 5 до 8–10 м) отдельные пробы содержат до 1,6, а в одной из скважин даже 5 кг/м³, причем при ее проходке плотик не был достигнут. Примечательно, что 61% вес. содержания алмазов здесь составляют алмазы класса –4 + 2 мм. Верхнедалдынская россыпь связана с переотложением материала высокоалмазоносных импактитов месторождения Скальное в устье р. Балаган-Юряге, размывающей их выше по течению. Положительные результаты опробования получены также при поисках в среднем течении р. Чорду-Далдын, на р. Попигай, в устье р. Рассохи, в верхнем течении р. Федор и т. д. [8] (М. И. Плотникова и др.).

Анализ закономерностей россыпной алмазности Попигайского района показал, что основными коренными источниками импактных алмазов в россыпях ближнего и недалекого сноса являются алмазодержащие зювиты. Тагамиты, несмотря на более высокое содержание в них алмазов, вследствие своих физико-механических свойств в меньшей мере подвергаются разрушению и выщелачиванию из них алмазов. Наиболее перспективен современный галечный и валунно-галечный аллювий русел и поймы речных долин в пределах приподнятых участков с омоложенным рельефом, где энергия водных потоков наиболее высока. Это в первую очередь верхнее течение р. Далдын, а также среднее и верхнее течение р. Чорду-Далдын. Возможно нахождение других обогащенных алмазами россыпей там, где размываются высокоалмазонос-

ные импактиты или развиты грубообломочные русловые наносы, аккумуляровавшиеся при неоднократном переотложении материала продуктивных толщ. Такие обогащенные алмазами аллювиальные россыпи прогнозируются в Периферической и Кольцевой зонах Попигайской структуры. Весьма перспективной может также рассматриваться остаточная элювиально-делювиальная россыпь на месторождении Скальное.

Наряду с поисками и оценкой россыпей, в ПГРЭ, ИМР и ЦНИГРИ проведены исследования по выбору рациональных технологических схем обработки проб из россыпей и извлечению импактных алмазов повышенной крупности. Разработаны также технико-экономические обоснования промышленного освоения россыпей рек Догой и Балаган-Юряге.

Общая оценка запасов импактных алмазов и их прогнозных ресурсов. Запасы алмазов на площади месторождения Ударное подсчитаны по категориям В + С₁ + С₂ и составляют в сумме более 12 млрд карат при соотношении В : С₁ : С₂ примерно как 1 : 2 : 3. По результатам разведочных работ на площади месторождения Скальное промышленные запасы высоких категорий составляют около 150 млрд карат и могут быть существенно увеличены за счет доразведки флангов месторождения. С учетом практически неограниченных запасов на первый план выходит качество сырья. С этой точки зрения на месторождении актуален выбор площадки заложения карьера первоочередной отработки с содержанием алмазов в руде 23,23 кг/т, что практически в три раза выше, чем на месторождении Ударное. Развитые на перспективных участках Попигайского района тела высокоалмазоносных импактитов общей площадью около 42 км² (участки Сюрюнге, Встречный, Тонгулах и др.) включают помимо этого прогнозных ресурсы Р₁, суммарно оцениваемые в 50 млрд карат (при коэффициенте достоверности 0,75), они, вероятно, могут быть увеличены на площадях, которые расположены в Кольцевой зоне кратера.

Таким образом, достоверные запасы и прогнозных ресурсы импактных алмазов в коренных высокоалмазоносных породах на общей площади около 120 км² в Попигайском районе составляют до 212 млрд карат [10]. Оценка общего количества алмазов в слое импактитов мощностью 50 м на остальной площади (около 1020 км²), помимо площадей месторождений и перспективных участков, составляет около 150 млрд карат (при коэффициенте достоверности 0,5).

Весьма значительны запасы и ресурсы россыпных импактных алмазов. По Догойской аллювиальной россыпи запасы по кат. С₂ и прогнозных ресурсы кат. Р₁ оценены в сумму первые десятки млн карат, позволяющие рассматривать ее как крупное россыпное месторождение импактных алмазов. Близкая оценка получена для Балаган-Юрягской россыпи. Ряд других россыпных проявлений в русловых и пойменных отложениях долин (россыпи Верхнедалдынская, Чорду-Далдынская, Усть-Рассохинская, Верхнефедоровская и др.), а также в элювиально-делювиальных отложениях на высокопродуктивных импактитах (например, весьма богатая россыпь на месторождении Скальное) обладают прогнозными ресурсами, которые могут быть предварительно суммарно оценены в

1,5 млрд карат. Учитывая, что эродированный после образования кратера слой продуктивных пород имел мощность в первые сотни метров, следует считать, что количество алмазов, первоначально поступивших в россыпи, составляло величину в несколько раз большую. Выявленные и оцененные запасы россыпных импактных алмазов — лишь незначительная их часть.

Использование импактных алмазов. Испытания технических свойств импактных алмазов (абразивной способности, прочности, электрических и термических свойств и др.), проводившиеся в 70–80-е годы прошлого века в лабораториях ВНИИАлмаз, ЯкутНИИПРОАлмаз, ИМР, ВНИИТС, ВИТР, ИСМ, III спецотдела Минфина СССР, Кабардино-Балкарского завода алмазных инструментов (БЗАИ), СКТБ «Кристалл», ИНДМАШ, ИЦ «Алмаз», а также на опытных производственных полигонах ГМК «Печенганикель», ГМК «Норильский никель», Норильской КГРЭ и других организаций, выявили ряд специфических свойств, позволяющих говорить о возможностях их промышленного использования в первую очередь как абразивных материалов [1, 5]. Различным видам испытаний подверглось несколько партий сырья общим весом в несколько десятков тысяч карат, в том числе извлеченных из 15 000 т руды месторождения Скальное на обогатительной фабрике в пос. Хатанга. Алмазы были разделены на несколько сортов в зависимости от цвета, формы зерен, их размеров и пр. Изучался материал, полученный как из коренных пород — импактитов, так и из россыпей, результаты проведенных испытаний частично опубликованы [1].

Получены данные о высокой эффективности использования ряда абразивных инструментов, изготовленных на основе импактных алмазов. Установлено, что импактные алмазы устойчивы к химическому, термическому и радиационному воздействию. Некоторые выявленные их электрические свойства показали пригодность алмазов для изготовления резисторов. Импактные алмазы можно применять для изготовления термоизоляторов и теплоотводов, детекторов ионизирующего излучения, детекторов температуры, быстродействующих интегральных схем для вычислительной техники и т. д. [1].

Заключение. Месторождения алмазов в импактитах, впервые в мировой практике открытые и изученные на территории России, представляют собой уникальные по генезису, условиям залегания, а также по свойствам, содержанию полезного компонента и особенно по запасам и ресурсам скопления нового типа природного сверхтвердого минерального сырья, нигде в таких количествах не встречающегося. Рудные тела с высокими содержаниями алмазов залегают среди огромного массива одновременно с ними возникших низко- и умеренноалмазоносных пород, которые представляют собой гигантский первичный источник россыпей. Эти россыпи в русловых и пойменных отложениях широко распространены и отличаются большей чем в импактитах крупностью алмазов и более высоким их качеством.

Алмазоносный район, в котором находятся коренные месторождения и россыпи, приурочен к древней импактной структуре — Попигайской астроблеме. Запасы импактных технических алма-

зов в коренных месторождениях оценены по промышленным категориям и утверждены ГКЗ, весьма высоки также оценки прогнозных ресурсов россыпей. Импактные алмазы представляют собой новый тип технического алмазного сырья, которое еще не использовалось в промышленности, но применение его, учитывая проведенные испытания, имеет определенные перспективы.

Россия — единственная страна, располагающая неисчерпаемыми запасами технических импактных алмазов. Хотя импактные алмазы найдены в некоторых других древних импактных кратерах на территории России, Украины, Германии, Финляндии, Канады, масштабы алмазоносности этих объектов несопоставимы с геологическими запасами импактных алмазов в Попигайской астроблеме, превышающими, как неоднократно отмечалось, запасы алмазов всех алмазоносных провинций мира, вместе взятых.

Коренные и россыпные источники импактных алмазов Попигайского, особого по своему генезису минерогенического района могут стать объектом разработки, а соответствующее ценное минеральное сырье может быть вовлечено в промышленное использование. Вместе с тем необходимы дополнительные исследования по совершенствованию схем обогащения и извлечения импактных алмазов, а также по их применению, особенно при современных технологиях. Пока еще отсутствует широкий опыт использования этого нового вида сырья, нет маркетинговой проработки спроса на него. Экономические показатели освоения коренных месторождений и россыпей, которые находятся в отдаленном, труднодоступном, лишенном дорог и источников энергии районе Заполярья, могут быть удовлетворительными только в случае достаточно высокой цены на это новое минеральное сырье, поскольку затраты на добычу и извлечение алмазов из концентратов в указанных условиях весьма высоки. Оценки импактных алмазов значительно колеблются — от менее чем 1 до 20–30 дол. за карат (последняя оценка относится к алмазам из россыпей), что определяется не только качеством различных фракций алмазов, различающихся по гранулометрии, цвету и пр., но также и возможностями использования их в инструментах разного назначения [1].

При освоении месторождений безусловно могут возникнуть многочисленные горно-технические проблемы, в том числе экологические. Следует учитывать и уникальный характер такого геологического образования, как Попигайский импактный кратер в целом. Он включен в список ЮНЕСКО памятников геологического наследия, поскольку среди других импактных структур на Земле является выдающимся объектом по своему размеру, степени сохранности от эрозии, широкому спектру разнообразных подвергшихся ударным преобразованиям пород, в составе которых находятся и алмазы. Большое значение для такой оценки имеет также высокая степень геологической изученности структуры, в том числе бурением и геофизическими методами. Попигайский кратер — национальное достояние, он имеет значительный потенциал для изучения многих недостаточно понятных феноменов, связанных с образованием гигантских импактных структур как на Земле, так и на других планетах, а также обусловленных этими процессами глобальных биотических, климатических и других изменений.

1. Гончаров М.М., Чернокнижников В.В. Импактные алмазы Таймырского автономного округа и их промышленное использование // Очерки по истории открытий минеральных богатств Таймыра / А.Г. Самойлов (гл. ред). – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. – С. 337–339.
2. Граханов С.А. Алмазы импактного генезиса в россыпях северо-востока Сибирской платформы // Вестник Воронежского гос. ун-та. 2001. № 12. – С. 236–238.
3. Граханов С.А., Шаталов В.И., Штыров В.А. и др. Россыпи алмазов России. – Новосибирск: ГЕО, 2007. – 454 с.
4. Масайтис В.Л., Мащак М.С., Райхлин А.И. и др. Алмазные импациты Попигайской астроблемы. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1998. – 178 с.
5. Масайтис В.Л., Симонов О.Н. Уникальные месторождения технических алмазов Попигайского района // Минеральные ресурсы Таймырского автономного округа и перспективы их освоения: Материалы конф. 25–27 окт. 2004 г., Санкт-Петербург. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. – С. 156–161.
6. Масайтис В.Л., Футергендлер С.И., Гневушев М.А. Алмазы в импацитах Попигайского метеоритного кратера // Записки ВМО. 1972. Ч. 101. Вып. 1. – С. 108–112.
7. Масайтис В.Л., Михайлов М.В., Селивановская Т.В. Попигайский метеоритный кратер // Сов. геология. 1971. № 6. – С. 143–147 (Geological Review. 1972. 14. N 4).
8. Науменко Н.Г. Перспективы россыпной алмазности Попигайского района // Минеральные ресурсы Таймырского автономного округа и перспективы их освоения: Материалы конф. 25–27 окт. 2004 г., Санкт-Петербург. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. – С. 178–181.
9. Плотникова М.И. Очерк послеолигоценовой истории Попигайской импактной морфоструктуры // Метеоритика. 1990. Вып. 49. – С. 154–164.
10. Симонов О.Н., Масайтис В.Л., Мащак М.С., Гончаров М.М. Эффективность прогнозирования и поисков импактных алмазов в Попигайской астроблеме: ретроспективный взгляд // Эффективность прогнозирования и поисков месторождений алмазов: прошлое, настоящее и будущее: Материалы науч.-практич. конф., посвященной 50-летию открытия первой алмазносной кимберлитовой трубки «Зарница». – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. – С. 323–326.

Масайтис Виктор Львович – доктор геол.-минер. наук, гл. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ. <victor_masaitis@vsegei.ru>.
Кириченко Валерий Тихонович – канд. геол.-минер. наук, вед. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ. <Valery_Kirichenko@vsegei.ru>.
Мащак Михаил Степанович – канд. геол.-минер. наук, вед. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ.
Федорова Ирина Георгиевна – вед. инженер, ВСЕГЕИ. <Irina_Fedorova@vsegei.ru>.