



ГЕОЛОГИЯ

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2022. Т. 22, вып. 2. С. 107–116

Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences, 2022, vol. 22, iss. 2, pp. 107–116

<https://geo.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1819-7663-2022-22-2-107-116>

Научная статья

УДК 543.331

Природные условия Попигайского месторождения алмазов (Северо-Западная Якутия)

М. Н. Железняк, М. М. Шац[✉], И. Е. Мисайлов

Институт мерзлотоведения имени П. И. Мельникова СО РАН, Россия, 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, д. 36

Железняк Михаил Николаевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор, fe@mpi.ysn.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4124-6579>

Шац Марк Михайлович, кандидат геологических наук, ведущий научный сотрудник, mmshatz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6693-7424>

Мисайлов Иван Евгеньевич, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, ventura-83@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9778-3918>

Аннотация. В статье освещены особенности алмазодобывающей отрасли Якутии. Прослежена история открытия и изучения Попигайского месторождения импактных алмазов, сформировавшегося в результате проникновения в толщу горных пород огромного одноименного метеорита. Охарактеризованы некоторые особенности попигайских кристаллов и перспективы их использования в разных отраслях народного хозяйства страны.

Ключевые слова: Попигайское месторождение импактных алмазов, проникновение в толщу горных пород огромного метеорита, особенности попигайских кристаллов, перспективы использования технических кристаллов

Для цитирования: Железняк М. Н., Шац М. М., Мисайлов И. Е. Природные условия Попигайского месторождения алмазов (Северо-Западная Якутия) // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2022. Т. 22, вып. 2. С. 107–116. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2022-22-2-107-116>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Natural conditions of the Popigai diamond deposit (North-West Yakutia)

М. N. Zheleznyak, M. M. Shatz[✉], I. E. Misailov

P. I. Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36 Merzlotnaya St., Yakutsk 677010, Russia

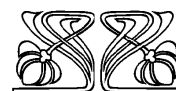
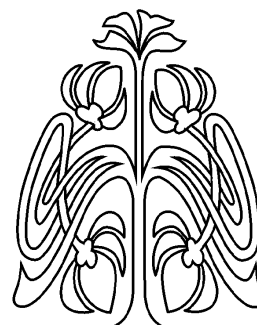
Mikhail N. Zheleznyak, fe@mpi.ysn.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4124-6579>

Mark M. Shatz, mmshatz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6693-7424>

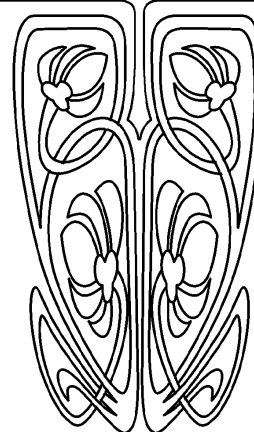
Ivan E. Misailov, ventura-83@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9778-3918>

Abstract. The article highlights the features of the diamond mining industry in Yakutia. The history of the discovery and study of impact diamonds Popigai deposit formed as a result of the penetration of the eponymous huge meteorite into the rock mass are traced. Some features of Popigai crystals and the prospects of their use in various sectors of the national economy of the country are characterized.

Keywords: Popigaikoe deposit of impact diamonds, penetration into the thickness of rocks of a huge meteorite, features of Popigai crystals, prospects for the use of technical crystals



**НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ**





For citation: Zheleznyak M. N., Shatz M. M., Misailov I. E. Natural conditions of the Popigai diamond deposit (North-West Yakutia). *Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences*, 2022, vol. 22, iss. 2, pp. 107–116 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2022-22-2-107-116>

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC0-BY 4.0)

Введение

На территории Республики Саха (Якутия) находятся основная часть запасов (около 80%) и почти половина разведанных мировых ресурсов алмазов. Несмотря на то что большая часть месторождений располагается в экстремальных условиях Крайнего Севера и характеризуется сложными горнотехническими условиями эксплуатации, содержание алмазов в рудах кимберлитовых трубок Якутии обычно выше при сопоставимом их качестве по сравнению с зарубежными месторождениями, что делает их разработку экономически весьма эффективной.

Все месторождения алмазов на территории Республики Саха (Якутия) приурочены к Якутской алмазоносной провинции, в составе которой выделяются: Мало-Ботуобинский, Далдыно-Алаakitский, Анабарский, Средне-Мархинский, Приленский, Муно-Тюнгский, Нижне-Оленекский и Моркокинский алмазоносные районы.

Почти все якутские запасы алмазов (93.1%) сосредоточены в коренных источниках – кимберлитовых трубках, а алмазы из россыпей составляют 6.9% от утвержденных запасов, в то время как прогнозные ресурсы в них – 65% от суммарных прогнозных ресурсов, учитываемых по республике. Содержание алмазов в рудах месторождений республики обычно выше, чем в зарубежных объектах, хотя по качеству алмазы сопоставимы с добываемыми на большинстве аналогичных источниках мира.

В пределах Якутской алмазоносной провинции известно более 1000 кимберлитовых трубок, из них 150 алмазоносных. Наиболее крупными месторождениями алмазов являются кимберлитовые трубки Удачная, Юбилейная, Айхал, Мир, Интернациональная, Ботуобинская, Нюрбинская, россыпи Анабарского и Приленского алмазоносных районов.

В Якутии разведанных запасов по 53 месторождениям алмазов А+В+С1 – 682 674.8 тыс. каратов, кат. С2 – 187 905.1 тыс. каратов [1]. Основными алмазодобывающими предприятиями являются АК «АЛРОСА» (ЗАО) (49.5% всей добычи России), ОАО «АЛРОСА-Нюрба», ОАО «Алмазы Анабара», ОАО «Нижнее-Ленское». Добыча в 2019 г. составила 36 134.8 тыс. карат.

В целом, несмотря на стабильность в обеспечении запасами действующих предприятий, учитывая растянутость сроков ввода новых мощностей с момента открытия месторождений, в перспективе требуются восполнение запасов сырья за счет открытия новых объектов, в первую очередь в пределах Мало-Ботуобинского, Средне-Мархинского и Далдыно-Алаakitского алмазоносных районов, а также увеличение всех видов

геологоразведочных работ, развитие технологии поисков новых перспективных объектов.

Обеспеченность разведанными балансовыми запасами алмазов в целом по республике при нынешнем уровне добычи составляет не менее 25–30 лет и характеризуется как удовлетворительная.

Добыча алмазов является одной из наиболее эколого-емких отраслей народного хозяйства, она связана с активным и масштабным нарушением, а порой и полным преобразованием основных компонентов природной среды, нанося ей значительный ущерб [2]. Поэтому изучение геологических последствий освоения, позволяющее этот ущерб уменьшить, очень актуально.

Основная цель статьи – осветить современные природные с акцентом на геокриологические условия территории Попигайского месторождения импактных алмазов на самом начальном этапе освоения. Это позволит в процессе проектирования и отработки выбрать научно обоснованные геотехнологические, геологические и геокриологические решения. Статья предназначена для специалистов-геологов, мерзлотоведов, работающих в алмазодобывающей отрасли, и будет полезна специалистам при комплексной оценке эффективности разработки объекта.

История открытия и изучения импактных алмазов

Попигайское месторождение импактных алмазов находится в Якутии на границе с Красноярским краем, в районе одноименной астроблемы – стокилометрового метеоритного кратера, образовавшегося в результате удара, что в естественных условиях возможно лишь при падении крупного метеорита. Именно так 37.5 млн лет назад возникла так называемая Попигайская астроблема (рис. 1).

Свое название депрессия, находящаяся в 200 км от Северного Ледовитого океана и почти в полутора тысячах километрах севернее точки падения другого известного небесного тела – «Тунгусского метеорита», – получила по реке Попигай.

Впадина была открыта в 1946 г. Д. В. Кожевинным и в разное время рассматривалась как эрозионная котловина, или как вулканический кратер. И лишь в 1970 г. ученые разобрались с его метеоритным происхождением. Попутно выяснилось, что в котловине в результате космической катастрофы сформировалось уникальное месторождение алмазов, в отличие от кимберлитовых, образовавшихся в результате вулканической деятельности планеты, попигайские кристаллы называют метеоритными или импактными [4, 5].



Рис.1. Положение Попигайской астроблемы на карте района. Контуры кратера показаны красным цветом [3] (цвет online)

Гипотеза о метеоритном происхождении была основана на изучении обнажений породы Пёстрые скалы, где на поверхности видны отложения, подвергшиеся ударному плавлению и дроблению. Тогда же появилось предположение, что здесь возможны залежи алмазов, связанные с преобразованием графита при больших температурах и давлении в очень твердую породу. В начале 1971 г. при исследовании образцов породы из Попигайского кратера была открыта новая вмещающая коренная порода алмазов – импактиты.

Предполагается, что Попигайский метеорит имел гораздо большее значение в истории Земли, чем его знаменитый Тунгусский «собрат». Его падение, вероятно, оказало существенное влияние на так называемое «эоцен-олигоценное вымирание» животных, менее катастрофическое, чем гибель динозавров в результате падения юкатанского метеорита, но, тем не менее, стоившее жизни древним китам археоцетам, родственникам лошадей – палеотериям и многим видам растений [4].

Небесное тело, вошедшее в атмосферу со скоростью 15 км/сек, пробило 1200-метровую толщу осадочных пород и было остановлено базальтовым фундаментом Сибирской платформы. Энергия взрыва при этом столкновении достигла 10^{23} в 23-й степени Джоулей, т. е. в тысячу раз превышала энергию мощного вулканического взрыва.

В результате удара, взрыва и температуры, достигавшей 2 000 °С, расплавилось около 1750 кубических километров горных пород. Мил-

лиарды тонн были перемещены на значительные расстояния, превратились в другие породы, пыль и газ, которые в колоссальном количестве были выброшены в атмосферу и далее в стратосферу. Это на многие годы уменьшило приток солнечного тепла к поверхности Земли и привело к резкому похолоданию на всей планете – ледниковому периоду. Часть флоры и фауны, не выдержав изменений климата, вымерла.

Попигайский импактный кратер (рис. 2) сейчас представляет собой многокольцевую структуру, аналогичную подобным на Луне, Меркурии и других планетах Солнечной системы.

Удар и привел к образованию в центре кратера импактных алмазов, которые, как утверждают сотрудники СО РАН, по показателям абразивной устойчивости вдвое превосходят лучшие синтетические и натуральные алмазные образцы. Закратерное поле рассеяния импактных алмазов прослежено на расстоянии до 500 километров, при этом размеры зерен варьируют от первых микронов до двух сантиметров.

Несколько десятилетий назад были организованы фрагментарные геологоразведочные работы, в результате которых выявлены два месторождения – Ударное и Скальное. Запасы первого оцениваются в 7 миллиардов карат, второго – в 140 миллиардов карат, при этом оба объекта занимают лишь 0.5% от общей площади кратера.

Открытие импактных алмазов непосредственно связано с именем Виктора Людвиговича Масайтиса, участника первой экспедиции на Попигай. Искать сибирские алмазы 23-летний



Рис. 2. Попигайский «лунный» кратер в настоящее время [9] (цвет online)

геолог начал еще в 1950 г. в экспедиции под руководством Ивана Крылова и вместе с Ларисой Попугаевой, которая через несколько лет открыла первую кимберлитовую трубку Мир – подземный «столб» древней лавы с алмазами вулканического происхождения.

Позднее, в феврале 2008 г., В. Масайтис в интервью ИА SakhaNews рассказал, что начиная с 1963 г., он вместе с Муратом Михайловым и Татьяной Селивановской провели анализ некоторых геологических структур неясного происхождения на территории Сибири. В их числе была и так называемая Попигайская котловина на севере Анабарского щита.

В результате той экспедиции выяснилось, что котловина представляет собой импактный кратер, след удара гигантского астероида, имевшего в поперечнике около 7 километров, сформировавшего очень интересные, переплавленные при этом ударе породы. В них были найдены алмазы, однако не такие красивые, как в кимберлитах, несколько другие, выглядевшие довольно невзрачно.

После открытия Попигайского кратера и алмазоносных импактитов была создана Полярная геологоразведочная экспедиция, работавшая 15 лет, а В. Масайтис был назначен ее научным руководителем по геологии. В итоге были выявлены очень большие запасы импактных алмазов и определены закономерности их распространения.

Имя Виктора Масайтиса, 1927 года рождения, доктора геолого-минералогических наук, заслуженного деятеля науки Российской Федерации, обладателя диплома первооткрывателя Попигайского месторождения, не засекречено, так же как и десятки его основополагающих публикаций об импактных алмазах Попигая [4, 5].

Не осталась без внимания еще одна важная проблема: каким образом геологи собираются эти самые импактные алмазы, не являющиеся исходным материалом для ювелирной отрасли, добывать. Как утверждает в упомянутых выше публикациях, кристаллы принадлежат к новому типу технического алмазного сырья, опыт промышленного освоения которого, так же как и индустриального использования, тогда отсутствовал.

В советские годы работы на Попигайском кратере были засекречены. Нельзя было употреблять слова «импактный», «попигайский» алмаз, требовалось называть их «андезитовыми». Редкие публикации попадали в научные журналы, но были чисто минералогическими, а 1986 г. исследования попигайских алмазов и вовсе неожиданно прекратили. Их добычу признали нерентабельной, поскольку себестоимость превышала стоимость алмазов из кимберлитов, при этом цена импактных алмазов была очень низкой, поскольку рыночной цены тогда не существовало.



Но решающим все же был аргумент в пользу строительства заводов по производству синтетических алмазов, конкуренцию последних с импактными сочли излишней. Все материалы сдали в фонды под грифом «секретно», и на долгое время Попигайский кратер был забыт.

Ограничения по режиму были сняты лишь в 2012 г., и в специальной литературе вновь прозвучало название «Попигай».

Еще в начале исследований было обнаружено, что попигайские алмазы обладают исключительной абразивной способностью, т. е. хорошо снимают неровности с поверхностей. Она оказалась в 1.8–2.4 раза больше, чем у обычных алмазов, природных и синтетических, что определяет направление технологического использования минерала.

Это свойство главный научный сотрудник Института геологии и минералогии СО РАН доктор геолого-минералогических наук Валентин Петрович Афанасьев связал со строением минерала – зерна этого композита имеют размеры от первых десятков до первых сотен нанометров и спутаны в волокнистую структуру.

К счастью, остатки концентрата, содержащего эти алмазы, даже во времена режимных ограничений сохранились и в 2010–2011 гг. стали доступны ученым. Первое, что те сделали, попытались количественно воспроизвести эксперимент по выявлению абразивной устойчивости. Было ясно, что для того чтобы добиться внимания к этому месторождению, необходимо, во-первых, продолжить минералогические исследования, во-вторых, на современном уровне провести технологические испытания по пригодности этих алмазов в разных отраслях промышленности и в-третьих разработать метод обогащения коренных пород, поскольку флотация в прежнем ее виде признана непригодной. Особое внимание уделялось необходимости доказать, что эксплуатация месторождения будет рентабельной [3, 7].

В начале 2010-х гг. попигайскими образованиями заинтересовалась компания «Алмазы Анабара», имеющая в районе развитую инфраструктуру, особенно важную если удастся вывести импактные алмазы на рынок. Летом 2013 г. благодаря этой компании ИГМ СО РАН удалось организовать еще одну экспедицию к Попигайскому кратеру.

Перед учеными стояли следующие задачи: во-первых, отобрать материал для продолжения фундаментальных и прикладных научных исследований, во-вторых, подготовить технологическую пробу для отработки современной методики обогащения. Итогом геолого-разведочных работ явилось технико-минералогическое обоснование месторождения на основе подсчетов запасов.

Ранее, еще в советское время, в Государственную комиссию запасов были сданы два месторождения – Ударное и Скальное, в общей

сложности занимающие площадь около 3% площади кратера. Содержание алмазов в первом в среднем 7 карат на тонну руды, во втором, наиболее крупном и подготовленном, до 100 каратов на тонну при среднем содержании 23.23 карата на тонну, а их общий подсчитанный объем составляет 147 миллиардов карат, что намного больше, чем все разведанные запасы обычных алмазов во всем мире.

Эти месторождения готовы к эксплуатации, даже при производстве 10 миллионов каратов в год запасов хватит надолго. Кроме того, есть высокая вероятность обнаружения новых фрагментов Попигайской структуры с высоким содержанием импактных алмазов.

В наше время Россия является монополистом в плане изучения импактных алмазов, отметил директор Института геологии и минералогии (ИГМ) им. В. С. Соболева СО РАН академик Николай Похиленко. Если брать нынешнее потребление технических алмазов за единицу, то прогнозных ресурсов Попигайского месторождения хватит всему миру на 3 тыс лет. Речь идет о триллионах карат, а для сравнения сегодня разведанные запасы кимберлитовых месторождений Якутии оценивают в миллиарды карат.

Разработка Попигайского месторождения импактных алмазов даст мировой промышленности новое сырье, которое будет востребовано в разных отраслях экономики, ежегодный спрос на него может составить до 1 млрд карат.

Но дело до широкой разработки так и не дошло, так как советское руководство в то время сделало ставку на создание сети заводов по производству синтетических алмазов.

Прогнозные ресурсы импактных алмазов были в 1980-е гг. условно оценены в 1.2 трлн карат, но по более поздним оценкам запасы одного только месторождения Скалистое, незначительного участка в кратере, поставлены на баланс в размере 500 млрд карат. Выявлены еще месторождения Ударное и Встречное, а в Стратегии социально-экономического развития до 2030 г. отмечается, что запасы этих трех объектов превышают суммарные запасы всех известных в мире алмазоносных кимберлитовых провинций.

Попигайские кристаллы в значительной мере могут повлиять на рынок технических алмазов в мире. По сути, появился новый продукт, обладающий особыми качествами, способный принести немало полезного для развития передовых технологий. Россия должна рассматривать эти залежи как одно из значимых направлений освоения Арктической зоны в средне- и долгосрочной перспективе, отметил координатор «Деловой России» в Сибирском федеральном округе Виктор Зубарев.

Руководство Российской академии наук уделяет проекту освоения Попигая значительное внимание, к добыче технических алмазов привлечен ряд крупных инвесторов, рассказал в интер-



вью РИА Новости на Восточном экономическом форуме глава РАН Александр Сергеев [8].

Природные условия района Попигайского кратера

Попигайская котловина, со всех сторон окруженная безлесными полярными тундрами и плоскогорьями, представляет настоящий оазис – здесь расположен один из самых северных в мире участков редколесий, представленный лиственницей Гмелина (рис. 3), а также разными кустарниками. Такое изобилие растительности сказывается и на фауне – тут, за 71° северной широты, можно встретить бурых медведей, глухарей, соболя и даже лося. Можно предполагать, что отмеченные различия связаны с особенностями термического состояния недр, обусловленных их происхождением [9].

В то же время следы давней катастрофы, выведшие на поверхность скальные породы, тысячелетиями обрабатываемые сильнейшими северными ветрами, колебаниями температур и влажности воздуха, превратились в невероятно красивые пейзажи с причудливыми останцами [10–12]. В 1991 г. ЮНЕСКО признало Попигайскую котловину памятником природы планетарного масштаба.

Северо-восточная часть Анабарского массива в районе котловины представлена пологоувалистой равниной с высотными отметками

50–100 м. Геологический разрез представлен кристаллическими породами архея, протерозоя, кембрия, перми и мела.

Геотермические работы Института мерзлотоведения СО РАН были выполнены в 1977 г. и 1979 г. в 7 скважинах. Время их выстойки – периода восстановления нарушенного при бурении естественного режима – от 0.5 до 10 месяцев. Максимальная глубина измерения температуры составила 720 м. Скважины находились в воздушно-сухом состоянии. Во всех без исключения скважинах ко времени измерения естественный температурный режим еще не восстановился, об этом свидетельствуют графики температур, измеренных с интервалом в 10 месяцев (рис. 4).

Однако для расчетов геотермических параметров могут быть использованы лишь данные температур, полученные глубже 500 м [9]. Судя по ним, геотермический градиент в интервале глубин 500–700 м близок к естественному и составляет в среднем 0.75 °С на 100 м. Учитывая, что температурный режим многолетнемерзлой толщи горных пород еще не стабилизировался, мощность зоны отрицательных температур может варьировать на участке довольно в широких пределах и достигать 1200 м и более. Это один из максимальных показателей параметров криолитозоны, зафиксированных в настоящее время.

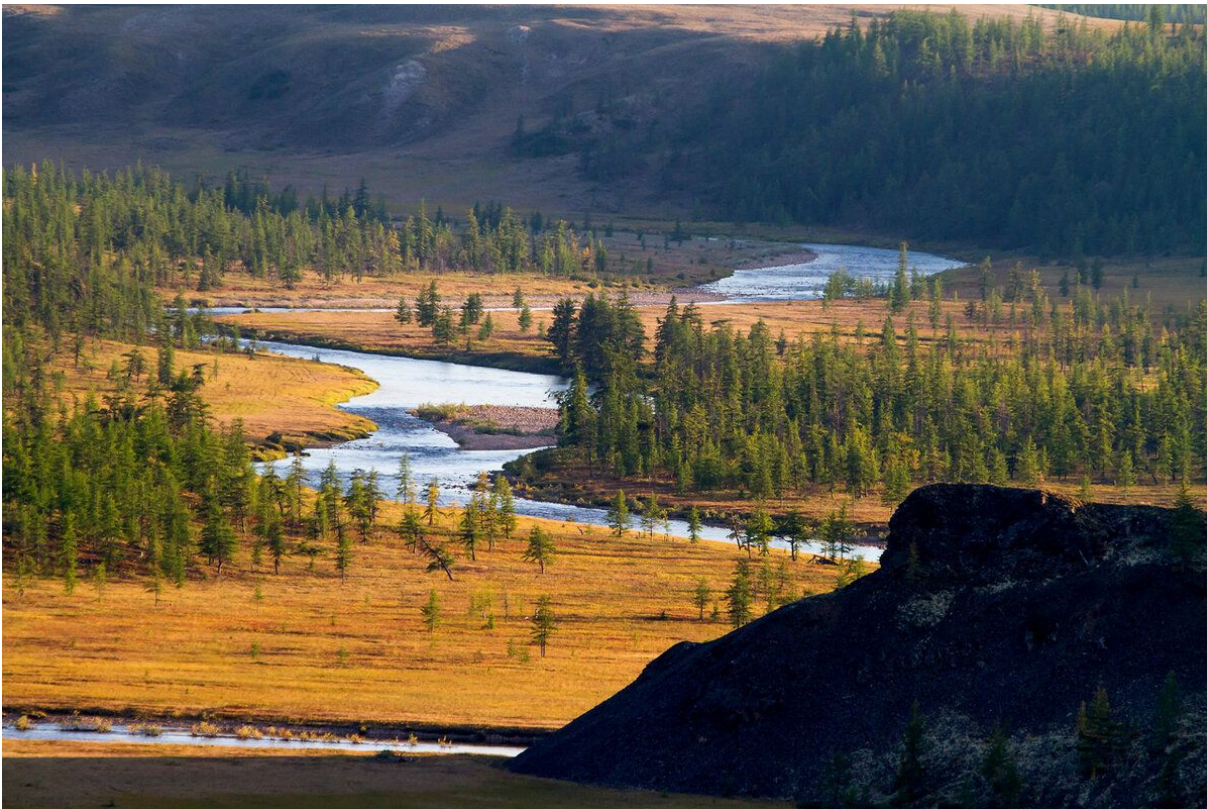


Рис. 3. Оазис древесной растительности в Попигайской котловине [6] (цвет online)

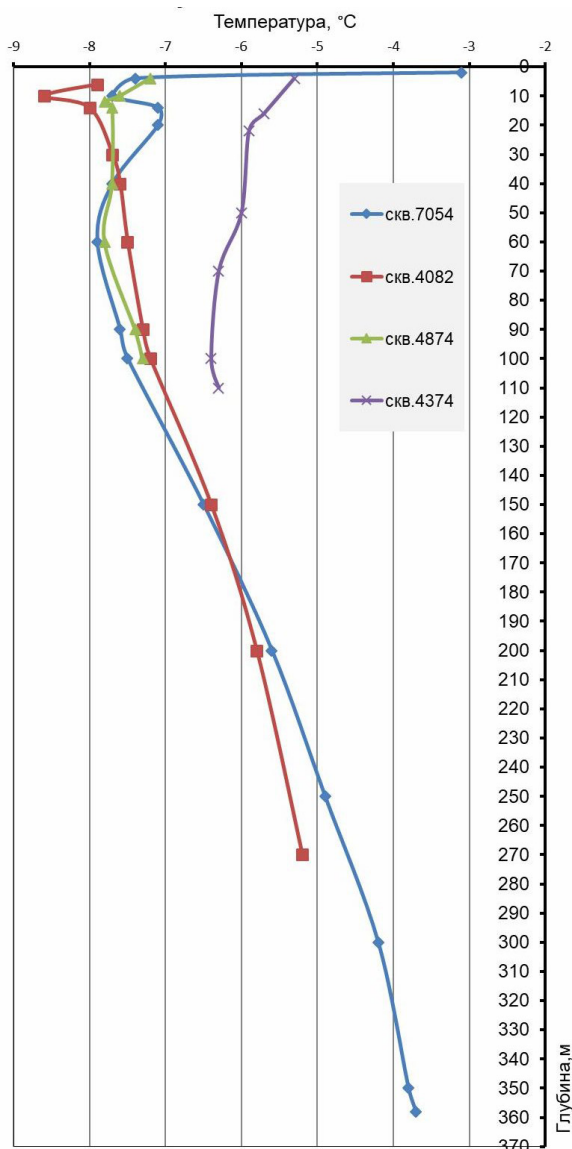


Рис. 4. Температура горных пород на участке Скальный Попигайского месторождения (цвет online)

В качестве маркирующего горизонта при расчете величины теплового потока взята толща гнейсов и диабазов, располагающихся ниже 500 м. Принимая средние значения теплопроводности для гнейсов 2.02 Вт/(м·К) и для диабазов 2.4 Вт/(м·К), величина теплового потока оценивается в пределах 15–18 мВт/м². Температуры в северо-восточной части Анабарского массива на глубинах 0.5, 1, 2 и 3 км на основе полевых измерений и расчетов соответственно равны –5, –1, 6 и 14 С° (табл. 1).

Одним из объектов геотермических исследований 1979 г. стала скважина в центре участка, пробуренная для изучения геологического строения района. Проектная глубина бурения 1000 м, но в связи с техническими трудностями ее проходка была остановлена на глубине 720 м. Ствол скважины полностью осушен и после этого были выполнены геотермические наблюдения (табл. 2).

Температурный режим скважины на момент замеров еще не восстановился, но выполнить повторные наблюдения в последующие годы по ряду объективных причин не удалось.

Таблица 1

Температуры горных пород в северо-восточной части месторождения (по замерам 1979 г.)

Глубина, м	Температура, °С	Глубина, м	Температура, °С
10	–7.78	320	–5.73
20	–7.67	340	–5.63
30	–7.69	360	–5.57
40	–7.47	380	–5.47
50	–7.43	400	–5.39
60	–7.54	420	–5.31
70	–7.51	440	–5.23
80	–7.40	460	–5.11
90	–7.36	480	–4.99
100	–7.38	500	–4.85
120	–6.96	520	–4.72
140	–6.78	540	–4.58
160	–6.59	560	–4.41
180	–6.36	580	–4.25
200	–6.31	600	–4.08
220	–6.21	620	–3.94
240	–6.10	640	–3.76
260	–6.00	660	–3.61
280	–5.89	680	–3.49
300	–5.81	700	–3.31
720	–3.18	–	–

Таблица 2

Градиенты температуры пород в центральной части месторождения (по замерам 1979 г.)

Интервал, м	Градиент, °С/100 м	Интервал, м	Градиент, °С/100 м
120–140	0.90	380–400	0.40
140–160	0.95	400–420	0.40
160–180	1.15	420–440	0.40
180–200	0.25	440–460	0.60
200–220	0.50	460–480	0.60
220–240	0.55	480–500	0.70
240–260	0.50	500–520	0.65
260–280	0.55	520–540	0.70
280–300	0.40	540–560	0.85
300–320	0.40	560–580	0.80
320–340	0.50	580–600	0.85
340–360	0.30	600–620	0.70
360–380	0.50	620–640	0.90
640–660	0.75	660–680	0.60
680–700	0.90	700–720	0.65

При среднем температурном градиенте пород, равным 0.7 С° на 100 м, экстраполированная мощность криолитозоны составляет около



1 200 м. С целью определения теплофизических свойств пород и величины теплового потока в этом районе отобраны образцы керны.

Температурный режим в скважине не восстановился, но можно отметить соответствие определенных закономерностей сходным с другими скважинами этого района: низкотемпературный разрез, малые величины градиентов, мощная толща криолитозоны, близкая к максимальным значениям, известным в геокриологии.

К сожалению, за все прошедшее с 1979 г. время в связи с труднодоступностью объекта и временной утратой интереса к ценному минералу новые мерзлотные исследования не проводились. Однако, учитывая особую значимость геокриологической информации в выборе стратегии и методики освоения месторождения, целесообразность таких работ несомненна, и Институт мерзлотоведения СО РАН готов их провести.

Некоторые особенности попигайских кристаллов

Раньше единственным коренным источником алмазов считались только кимберлитовые породы. Но открытие и изучение Попигайского метеоритного кратера выявило новые источники – коренные алмазосодержащие породы – лампроиты и импактиты. Импактиты образовались за счет переправления кристаллических пород при ударном столкновении с космическими телами. Пока

Попигайское месторождение импактных алмазов считается единственным в мире, хотя на Земле известны и другие импактные кратеры.

Импактиты на территории Попигайской котловины во многих местах выходят на поверхность (рис. 5), а в глубину уходят до 1.5 км. Их площадь превышает 1750 км². Алмазы рассеяны по всей котловине и встречаются почти везде, как в породах, так и в россыпях. Они образовались при ударном сжатии пород, когда графит переходит непосредственно в алмаз. Общие запасы алмазов Попигайского месторождения, по подсчетам исследователей, превышают все известные залежи алмазов кимберлитовых провинций мира.

Один из непосредственных исследователей импактных алмазов главный научный сотрудник ИГМ СО РАН, доктор геолого-минералогических наук Валентин Афанасьев отметил еще одну их особенность – уникальную абразивную способность, более высокую, чем у природных и синтетических технических кристаллов. Когда в 2011 г. новосибирские специалисты побывали на международной конференции в американском г. Хьюстоне, то там представители нефтегазовой сервисной компании «Бейкер Хьюз» заявили, что если абразивную способность их буров увеличить на 20%, это будет уже переворот. К разработке также проявила интерес компа-



Рис. 5. Выход импактидов на поверхность [6] (цвет online)



ния «Шестой элемент», входящая в корпорацию «Де Бирс».

Импактные алмазы невозможно использовать для дизайна или изготовления ювелирных изделий, но они незаменимы при применении в высокотехнологичных устройствах. По мнению академика Н. Похиленко, в алмазах из Попигайского кратера обнаружена еще одна молекулярная форма углерода, и это придает им превосходные качества для промышленного применения. Данное открытие может совершить революцию во многих отраслях, но не затронет глобальный алмазный рынок, поскольку он регулируется наличием алмазов и бриллиантов, которые могут быть использованы для дизайна и изготовления ювелирных изделий. Академик также пояснил, что непревзойденная твердость алмазов, вероятно, объясняется чрезвычайно высокой температурой и очень высоким давлением, которые воздействовали на молекулы углерода во время взрыва при падении метеорита. Он сказал, что его институт совместно с российской алмазодобывающей компанией «АЛРОСА», контролируемой государством, планирует направить группу геологоразведчиков на это месторождение.

Заключение

В настоящее время мировая промышленность в качестве абразивных материалов использует природные технические и искусственные алмазы, основной объем которых производится в Китае. Ежегодно в мире производят 15–16 млрд карат. По оценкам ученых, импактные алмазы обладают совершенно уникальными технологическими характеристиками и способны заменить эти материалы. Например, скорость, с которой они обрабатывают поверхности, в 2–2.5 раза выше, чем у синтетических или природных технических алмазов, износостойкость выше в 3–6 раз, а термоустойчивость – на 250°.

Это позволяет использовать попигайские алмазы во многих современных высокотехнологичных направлениях, в том числе в обработке сверхтвердых материалов, сверхточной обработке мелких и оптических изделий, в электронике, оборонной промышленности, нефтедобыче, ракетостроении, машиностроении и медицине [13].

По словам академика Н. Похиленко, период адаптации промышленности к этому сырью после вывода на рынок может составить примерно пять лет, а спрос составит 350–400 млн карат. Где-то через 10 лет активное потребление этого сырья может возрасти до 1 млрд карат в год.

Однако широкомасштабное освоение месторождения пока не проводится, сегодня этому препятствуют несколько факторов. Первый из них – отсутствие приемлемой технологии обогащения. Как известно, флотация – это дорогостоящий метод, связанный со значительными экологическими рисками по воздействию хвостохранилищ, которые организуются на месте

переработки, на большинство компонентов природной среды. Для того чтобы наработать хотя бы 20–30 тыс. карат для технологических испытаний, необходимо профинансировать, создать и отладить новую технологию и построить пилотную фабрику.

Это потребует привлечения частных компаний, а им нужно представить уже полный пакет документов, в которых будет указан срок окупаемости в зависимости от объемов добычи.

Вторая проблема – попигайские алмазы не представлены на рынке и, соответственно, у них нет рыночной стоимости. Пока ученые ориентируются на самые низкосортные алмазы из северных россыпей – в пределах двух долларов за карат. Исследователи уверены, что необходимо выделить те сферы, в которых импактный алмаз будет наиболее востребованным, а затем уже поднимать цену, ведь пилить камни и бетон может и инструмент, сделанный на основе синтетических алмазов.

Неблагоприятны для освоения месторождения также его логистические, природные, в том числе геокриологические, и экономические условия в целом. Но учитывая основное технологическое преимущество, заключающееся в том, что даже в условиях низких цен на алмазное сырье его добыча, безусловно, рентабельна.

Весной 2021 г. ученые СО РАН обсуждали с властями Красноярского края и Якутии вопросы освоения Попигайского и Томторского редкоземельного месторождений. Академия намерена вскоре организовать две экспедиции для их оценки и доразведки.

В перспективе – расширение налогооблагаемой базы, что, безусловно, очень важно для экономического и социального развития арктических территорий. Экспедиции проводятся в рамках комплексных проектов в сфере инвестиционной политики с южными и восточными регионами Сибири и укрепления межрегиональных связей с крупнейшими территориями регионов на востоке России.

Министр промышленности и геологии Якутии Максим Терещенко сообщил, что республика планирует активизировать освоение ресурсов в северо-западной части региона, граничащей с Попигайским месторождением. Важно учитывать особый интерес инвесторов к редкоземельным и благородным металлам на мировом рынке. Развитие альтернативной энергетики, цифровых технологий формирует спрос на продукцию с этих месторождений на долгие годы вперед. Разработка Попигайского месторождения может стать хорошим примером сотрудничества промышленных компаний, ученых и органов власти при выработке экономически эффективного решения.

Необходимо отметить, что в соответствии со стратегией социально-экономического разви-



тия Якутии освоение месторождений импактных алмазов возможно уже в ближайшее десятилетие.

Библиографический список

1. Справка о состоянии и перспективах использования минерально-сырьевой базы Республики Саха (Якутия) на 15.03.2021 г. URL: <https://www.rosnedra.gov.ru/data/Fast/Files/202104/feb154b18af6584ca00ae9931b9a34d1.pdf> (дата обращения: 11.05.2021).
2. Возрождая реки и озера Якутии. URL: <https://sakhapress.ru/archives/179741> (дата обращения: 23.05.2018).
3. Падение метеорита дало России триллионы каратов алмазов. URL: <https://www.rough-polished.com/ru/expertise/96143.html> (дата обращения: 18.06.2015).
4. Алмазоносные импактиты Попигайской астроблемы / В. Л. Масайтис, М. С. Мацак, А. И. Райхлин [и др.]. Санкт-Петербург : ВСЕГЕИ, 1998. 169 с.
5. Масайтис В. Л., Кириченко В. Т., Машак М. С., Федорова И. Г. Коренные месторождения и россыпи импактных алмазов Попигайского района (Северная Сибирь) // Региональная геология и металлогения. 2013. № 54. С. 89–98.
6. Найденных возле Якутии алмазов хватит минимум на тысячу лет. URL: <https://www.1sn.ru/260628.html> (дата обращения: 03.04.2021).
7. Попигайский кратер – прошлое и настоящее. URL: <https://news.ykt.ru/article/126035> (дата обращения: 22.04.2020).
8. Глава РАН рассказал о месторождении «космических» алмазов в Якутии. URL: <https://news.ykt.ru/article/126035> (дата обращения: 23.08.2021).
9. Балобаев В. Т. Геотермия мерзлой зоны литосферы севера Азии. Новосибирск : Наука. Сибирское отделение, 1991. 193 с.
10. Васильев И. С. Пространственно-временные закономерности формирования деятельного слоя в ландшафтах Западной Якутии. Новосибирск : Наука. Сибирское отделение, 2005. 228 с.
11. Геокриология СССР. Средняя Сибирь / под редакцией Э. Д. Ершова. Москва : Недра, 1989. 414 с.
12. Мерзлые ландшафты Якутии : пояснительная записка к Мерзлотно-Ландшафтной карте Якутской АССР масштаба 1 : 2 500 000. Новосибирск : ГУГК, 1989. 170 с.
13. Попигай (кратер). URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Попигай_\(кратер\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Попигай_(кратер)) (дата обращения: 23.07.2020).

Поступила в редакцию 31.12.2021; одобрена после рецензирования 02.02.2022; принята к публикации 01.03.2022
The article was submitted 31.12.2021; approved after reviewing 02.02.2022; accepted for publication 01.03.2022