Н.К. Алгебраистова, О.Ю. Перфилова, Д.М. Колотушкин, Е.С. Комарова

ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ИМПАКТНЫХ АЛМАЗОВ

Аннотация. Проведены изучение вещественного состава и оценка обогатимости тяжёлой фракции, выделенной из углеродсодержащего материала Попигайской астроблемы. По абразивной способности порошки импактных алмазов превосходят природные и искусственные технические в 1,8–2,4 раза, а полученный на их основе сверхтвёрдый материал и изделия из него не менее чем в 2,0–2,5 раза. Мишенью являлись как породы архейского фундамента Анабарского щита, представленные графитсодержащими кристаллическими сланцами гнейсами и плагиогнейсами (гранатовые, биотит-гранатовые, биотит-пироксеновые, двупироксеновые), так и разнообразные осадочные породы платформенного чехла (кварциты, алевролиты, песчаники, сланцы, углистые аргиллиты, известняки, доломиты, пески и глины). Состав алмазонасных пород Попигайской астроблемы значительно отличается от кимберлитов и лампроитов. В них очень много кварца (более 35%) импактных стекол кислого и среднего состава, полевых шпатов (альбит и КПШ). Кварц устойчив к действию кислот. При выполнении работы использовались технические, математические, флотационный, гравитационный и специальные методы исследований. Была разработана технологическая схема доводки черного концентрата, обеспечивающая полное извлечение ценного компонента.

Ключевые слова: импактные алмазы, Попигайская астроблема, вещественный состав, минералогический состав, структура, технологии извлечения, комбинированные схемы обогащения.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-0-13-19

Введение

Целью данной работы является изучение вещественного состава и оценка обогатимости тяжелой фракции, выделенной из углеродсодержащего материала Попигайской астроблемы.

Россия — обладатель крупнейшего в мире месторождения бесценных алмазов. Свойства этих алмазов уникальны. Ни одно из известных в природе веществ ими не обладает. По абразивной способности порошки импактных алмазов превосходят природные и искусственные технические в 1,8–2,4 раза, а полученный на их основе сверхтвёрдый материал и изделия из него не менее чем в 2,0–2,5 раза. Детали на основе порошка импактных алмазов превосходят по производительности аналогичные

изделия из синтетических алмазов более чем в 2 раза [1]. Импактное сырье новое для современных технологий, их добыча не ведется, имеется мало информации о технологических свойствах.

Попигайская астроблема образовалась около 36 млн лет назад на севере Сибирской платформы на границе Красноярского края и Республики Саха (Якутия) в бассейне реки Попигай в результате удара о Землю астероида размерами 7–8 км [1–6]. Эта структура была известна давно — с 1946 г., но то, что она является астроблемой, впервые удалось убедительно доказать в 1971 г. В.Л. Масайтису [3].

Мишенью являлись как породы архейского фундамента Анабарского щита, представленные графитсодержащими

кристаллическими сланцами гнейсами и плагиогнейсами (гранатовые, биотит-гранатовые, биотит-пироксеновые, двупироксеновые), так и разнообразные осадочные породы платформенного чехла (кварциты, алевролиты, песчаники, сланцы, углистые аргиллиты, известняки, доломиты, пески и глины). В результате удара возникли импактные породы (зювиты и тагамиты). Зювиты представляют собой полимиктовые импактные брекчии, состоящие из различных по размеру (от долей миллиметра до нескольких десятков сантиметров в поперечнике) пород мишени (литокласты), кварца, полевых шпатов и пироксенов (кристаллокласты) и импактного стекла (витрокласты). Цемент представлен более мелкими обломками того же состава и нередко изменен в результате гипергенных процессов. Окраска пород различная, часто пестрая, хотя преобладают различные оттенки серого и серовато-бурого цвета.

Тагамиты возникли в результате застывания импактных расплавов и очень похожи на земные лавы. Состоят из в различной степени девитрифицированного стекла темно-серого, серого, реже — светло-серого и белого цвета. В стекле наблюдаются различные по величине обломки пород мишени (литокласты) и минералов (преимущественно кварца и полевых шпатов) — кристаллокласты. Содержание SiO_2 в стекле варьирует от 56,8% до 66,5%, а по данным рентгенофазового анализа в составе обломков установлены кварц (12,5—37%), альбит (29—65%), микроклин (до 8%), диопсид (до 16%), мусковит (4—25%), титанит, маггемит (до 3%, вероятнее всего образовался при сильном нагреве гетита при ударе), тридимит (до 5%), кристобалит (до 3%), цеолиты — геландит и стелерит (до 12%) [7, 8].

Таким образом, алмазоносные породы Попигайской астроблемы имеют

крайне неоднородный состав и разнообразные структуры и текстуры.

Методы исследования.

Экспериментальная часть

При выполнении работы использовались технологические, математические, флотационный, гравитационный и специальные методы исследований.

Перед исследованиями, алмазоносное сырье сокращалась с соблюдением всех правил опробования и расчета минимальной массы пробы [9].

Флотационный метод: (флотомашина 237 ФЛ) — камера 0,5 л, масса навески 200 г, класс -0,5+0 мм, реагенты: дизельное топливо — 300 г/т, оксаль — 75 г/т, сода — 300 г/т.

Исследование гранулометрической характеристики проводили на стандартном наборе сит 3; 2; 1,5; 1; 0,5 мм.

Кинетика измельчения: отношение Т:Ж:С = 1:0,5:4, масса навески 400 г, крупность — 3+0,5 мм.

Гравитационный метод: концентрационный стол (СКО-0,5П) — поток по твердому — 10,14 кг/ч, расход воды 9,6 л/мин, угол наклона деки стола 5°. Отсадочная машина (ЦНИГРИ Золото) — расход воды 12 л, продолжительность разделения составила 10 мин, поток по твердому 108 кг/ч, крупность -3+0,5. Концентрационный стол (Gemini) — поток по твердому — 4,2 кг/ч, расход воды 9,6 л/мин.

Магнитный метод: электромагнитная сепарация (электромагнитный валковый сепаратор — ЭВС 10/5) — для сильномагнитной фракции — напряженность поля 600 А/м при силе тока 2 А и индукции 0,7 Тл, для слабомагнитной: 1000 А/м, 12 А и 1,9 Тл.

Плита электрическая ЭП-6П фирмы «Abat» температура 100±5°C.

Минералогический анализ показал, что состав исходной пробы (немагнитная и электромагнитная фракции) в целом отвечает приведенному выше составу.

ву тагамитов. В материале пробы резко преобладают обломки кварца (угловатые блестящие и окатанные с матовой поверхностью), импактного стекла и полевых шпатов (в сумме — более 80%).

В подчиненном количестве присутствуют зеленовато-серый диопсид, мусковит, цеолиты, графит и глинистые минералы. Обнаружены единичные обломки розового и оранжево-желтого циркона и титанита. Кварц молочно-белый, розоватый и буроватый полупрозрачный (окрашен тонкодисперсными гидроокислами железа), реже — бесцветный водно-прозрачный. Значительная часть зерен кварца хорошо окатана (вероятно, это обломки из осадочных пород мишен — песчаников и алевролитов).

Обломки импактного стекла обычно окрашены в темные цвета (иногда имеют с поверхности более светлую (светло-серую или почти белую) тонкую оторочку. Текстура плотная или мелкопористая (иногда поры частично выполнены бурыми гидроокислами железа и маггемитом). Обломки с пористой текстурой обычно имеют матовую поверхность в отличие от блестящих обломков стекла с плотной текстурой. Альбит представлен обломками зерен белого, слегка буроватого или светло-серого цвета с хорошо проявленной спайностью. Микроклин (присутствует в резко подчиненном по сравнению с альбитом количестве) отличается светло-розовой или буровато-розовой окраской. В составе магнитной фракции преобладают бурый маггемит и темноокрашенный магнетит.

В тагамитах в 70-е годы XX столетия обнаружены импактные алмазы. Были обнаружены алмазы и в многочисленных россыпях.

На территории астроблемы выявлено два месторождения: «Скалистое» и «Удар-

ное», запасы технических алмазов в которых превышают суммарные запасы всех остальных известных в мире месторождений алмазов [1].

Состав алмазоносных пород Попигайской астроблемы значительно отличается от кимберлитов и лампроитов. В них очень много кварца (более 35%) импактных стекол кислого и среднего состава, полевых шпатов (альбит и КПШ). Кварц устойчив к действию кислот.

За кратерное поле рассеяния импактных алмазов прослежено на расстоянии до 500 км.

Импактные алмазы были обнаружены так же в россыпях обычных алмазов севера Якутии. Исследования показали полную аналогию Попигайских алмазов и якутитов, что позволило интерпретировать якутиты как продукты дальнего кратерного выброса [1].

Минерал, образованный из графита в момент импактного события (удара астероида) является тончайшим агрегатом двух основных фаз, обычного алмаза с кубической структурой и лонсдейлита с гексагональной структурой. Исходный графит был достаточно окристаллизован и в соответствии со своей структурой имел слоистое строение. Поэтому импактный алмаз, представляющий собой параморфозу по графиту, наследует его слоистость и имеет пластичную форму по уплощению, благодаря которой хорошо раскалывается. Лонсдейлит — представляет собой одну из аллотропных модификаций углерода. Элементарная ячейка лонсдейлита содержит четыре атома, а ячейка алмаза восемь [10].

Материал¹ представляет собой тяжелую фракцию отсадочной машины «Джиг». Минеральный состав пробы: гранат, рутил, дистен, моноклинные пироксены,

¹ Проба материала для исследований была предоставлена Красноярским научно-исследовательским институтом геологии и минерального сырья (КНИИГиМС).

Рис. 1. Гранулометрический состав исходного сырья

Fig. 1. Grain size composition of initial feed stock

кварц, сфалерит, тремолит, шпинель, оливин.

Исследован гранулометрический состав исходного сырья для определения количественного распределения зерен по классам крупности. Гранулометрическая характеристика представлена в виде графика (рис. 1).

Характеристика суммарного выхода по плюсу имеет «выпуклый» вид, что со-

ответствует малому количеству мелких классов и преобладанию крупных;

Класс крупности $(-2+1,5)$, имеет выход 65,49%; содержание класса $(-0,5+0) \sim 3\%$. На основании этих данных рекомендуется не вводить в технологическую схему операцию предварительного грохочения на сите 0,5 мм перед операцией измельчения. Разработанная схема включает предварительную концентра-

Рис. 2. Технологическая схема

Fig. 2. Technological scheme

Результаты исследований
Research result

№	Продукты	Выход		Количество зерен, шт.	Размер зерен, мм
		г	%		
1	Концентрат 1 (-4+2, предварительный концентрат, не магнитная фракция)	305	3,05	1; 5; 1	0,1; 0,2; 0,4
2	Концентрат 2 (не магнитная фракция концентрата Gemeni (-2+0))	1377	13,77	3; 1; 3; 5; 1; 0; 4	1,3; 1,4; 0,1; 0,4; 0,3; 0; 0,3; 0,1
3	Концентрат 3 (липкостная сепарация)	1,5	0,02	2	0,1
4	Магнитная фракция	388	3,88	н/о	—
5	Хвосты	7928,5	79,28	0	—
	Итого	10 000	100	24	0,1–1,4

цию на столе «Gemeni». Выбор данного оборудования обусловлен тем, что аппарат обеспечивает высокую степень концентрации. Концентрат сепарации направляется на операцию грохочения по классу 2 мм. Класс -2+0 мм направляется на операцию электромагнитной сепарации, для удаления магнитной фракции.

Операция магнитной сепарации введена в технологическую схему на основании результатов минералогических исследований, которые показали значительное содержание минералов, обладающих магнитными свойствами (~22%). Количественное распределение минералов по магнитным свойствам свидетельствует о преобладании слабомагнитных минералов, этим объясняется использование электромагнитного сепаратора (см. рис. 2).

Операция измельчения помимо раскрытия сростков, осуществляет и механическую обтирку поверхностей минералов для создания благоприятных условий при жировой сепарации. Липкостная сепарация позволяет снизить

потери ценного компонента с хвостами. Полученные результаты представлены в таблице.

Заключение

Была разработана технологическая схема доводки черного концентрата, обеспечивающая, согласно анализу хвостов, полное извлечение ценного компонента.

Импактные алмазы Попигайской астроблемы еще достаточно не изучены, однако сформировавшееся представление о возможности использования импаكتитов в горнодобывающей индустрии, изготовление деталей в сфере оптики [11–13], и что более важно в военной и компьютерной технике, позволяет говорить о данном сырье как об актуальном и необходимом, тем более в условиях импортозамещения и, как следствие, роста экономики, наращивания темпа производства. Благодаря запасам Попигайского месторождения можно обеспечить не только внутренний рынок, но и наладить экспорт в необходимых объемах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев В. П. Похиленко Н. П. Попигайские импактные алмазы: новое российское сырье для существующих и будущих технологий // Инноватика и экспертиза. — 2013. — № 1 (10). — С. 8–15.

2. Бочко А. В., Вальтер А. А., Гурский Д. С., Еременко Г. К. Технологические свойства импактных алмазов // Минералогический журнал — 1999. — Т. 21. — № 2—3. — С. 16—22.
3. Масайтис В. Л., Футергендлер С. И., Гневушев М. А. Алмазы в импактиках Попигайского метеоритного кратера // Записки ВМО. — 1972. — Ч. 101. — Вып. 1. — С. 108—112.
4. Масайтис В. Л., Михайлов М. В., Селивановская Т. В. Попигайский метеоритный кратер // Советская геология. — 1971. — № 6. — С. 143—147.
5. Масайтис В. Л., Машак М. С., Райхлин А. И. Алмазоносные импактиты Попигайской астроблемы. — СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1998. — 178 с.
6. Масайтис В. Л., Симонов О. Н. Уникальные месторождения технических алмазов Попигайского района / Минеральные ресурсы Таймырского автономного округа и перспективы их освоения. — СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. — С. 156—161.
7. Сильянов С. А., Савчик Д. М. Тагамиты Попигайкой астроблемы // Мельниковские чтения — 2016: сборник докладов Международной молодежной научной конференции. — Благовещенск: ФГБОУ ВПО АмГУ, 2016. — С. 104—107.
8. 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. — № 64. — С. 89—98.
9. ГОСТ Р 53198-2008 Руды и концентраты цветных металлов. Введ. 25.12.2008. — М.: Стандартинформ, 2009. — 23 с.
10. Чернокужников В. В., Гончаров М. М. Импактные алмазы Таймырского автономного округа и их промышленное использование. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. — С. 337—339.
11. Yelisseyev A., Meng G. S., Afanasyev V., Pokhilenko N., Pustovarov V., Isakova A., Lin Z. S., Lin H. Q. Optical properties of impact diamonds from the Popigai astrobleme // Elsevier Science, Diamond & Related Materials. V.37. 2013. Pp. 8—16.
12. Yelisseyev A., Vins V., Afanasyev V., Rybak A. Effect of electron irradiation on optical absorption of impact diamonds from the Popigai meteorite crater // Elsevier Science, Diamond & Related Materials. V.79. 2017. Pp. 7—13.
13. Yelisseyev A., Afanasyev V., Panchenko A. V., Gromilov S. A., Kaichev V. V., Saraev A. A. Are they impact diamonds from the Popigai crater? // Elsevier Science, Lithos. V.265. 2016. Pp. 278—291. **PLAS**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Алгебраистова Наталья Константиновна¹ — кандидат технических наук, профессор, доцент, e-mail: algebraistova@mail.ru,
 Перфилова Ольга Юрьевна¹ — кандидат геолого-минералогических наук, доцент, e-mail: perfil57@mail.ru,
 Колотушкин Денис Михайлович¹ — аспирант, e-mail: denisss911@mail.ru,
 Комарова Екатерина Сергеевна¹ — студент, e-mail: ekaterina.komarova.1995@mail.ru,

¹ Сибирский федеральный университет.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 6, pp. 13—19.

Material constitution and recovery of impact diamonds

Algebraistova N.K.¹, Candidate of Technical Sciences, Professor, Assistant Professor, e-mail: algebraistova@mail.ru,
 Perfilova O.Yu.¹, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Assistant Professor, e-mail: perfil57@mail.ru,
 Kolotushkin D.M.¹, Graduate Student, e-mail: denisss911@mail.ru,
 Komarova E.S.¹, Student, e-mail: ekaterina.komarova.1995@mail.ru,
¹ Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Russia.

Abstract. Material constitution and processability of sinking fraction of carbon-bearing material sampled in the Popigai Astrobleme area is studied. In terms of abrasive ability, impact diamond powders exceed natural and synthesized diamonds by 1.8–2.4 times, while the super-hard material and products made of the powdered impact diamonds have the abrasive ability 2.0–2.5 times higher. The study objects were Archean graphite-bearing schist, gneiss and plagioclase gneiss of the Anabar Shield (garnet, biotite–garnet, biotite–pyroxene, two-pyroxene) and sedimentary cover rocks (quartzite, siltstone, sandstone, shale, carbon-bearing argillite, limestone, dolomite, sand and clay). The composition of the diamond-bearing rocks of the Popigai Astrobleme differs considerably from the composition of kimberlite and lamproite. The diamond-bearing rocks at Popigai contain much quartz (more than 35%), impact-crater acid and medium-composition glass, feldspar (albite and potassic feldspar). Quartz is acid-resistant. The studies were carried out using engineering, mathematical, flotation, gravity and other dedicated test methods. The developed circuit for rough concentrate finishing ensures complete recovery of the valuable component.

Key words: impact diamonds, Popigai Astrobleme, material constitution, mineralogy, structure, recovery, combination processing circuits.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-0-13-19

REFERENCES

1. Afanas'ev V. P. Pokhilenko N. P. Popigayskie impaktnye almazy: novoe rossiyskoe syr'e dlya sushchestvuyushchikh i budushchikh tekhnologiy [Popigai crater impact diamonds: a new raw material for the current and future technologies in Russia]. *Innovatika i ekspertiza*. 2013, no 1 (10), pp. 8–15. [In Russ].
2. Bochko A. V. Val'ter A. A. Gurskiy D. S. Eremenko G. K. Tekhnologicheskie svoystva impaktnykh almazov [Processing behavior of impact diamonds]. *Mineralogicheskiiy zhurnal*. 1999, vol. 21, no 2–3, pp. 16–22. [In Russ].
3. Masaytis V. L., Futergendler S. I., Gnevushev M. A. Almazy v impaktitakh Popigayskogo meteoritnogo kratera [Diamonds in the impact material of the Popigai meteorite crater]. *Zapiski VMO*. 1972, part 101, issue 1, pp. 108–112. [In Russ].
4. Masaytis V. L., Mikhaylov M. V., Selivanovskaya T. V. Popigayskiy meteoritnyy krater [Popigai meteorite crater]. *Sovetskaya geologiya*. 1971, no 6, pp. 143–147. [In Russ].
5. Masaytis V. L., Mashchak M. S., Raykhlin A. I. *Almazonosnye impaktity Popigayskoy astroblemy* [Diamond-bearing impact material of the Popigai Astrobleme], Saint-Petersburg, Izd-vo VSEGEI, 1998, 178 p.
6. Masaytis V. L., Simonov O. N. Unikal'nye mestorozhdeniya tekhnicheskikh almazov Popigayskogo rayona [Unique commercial diamonds of the Popigai region]. *Mineral'nye resursy Taymyrskogo avtonomnogo okruga i perspektivy ikh osvoeniya*, Saint-Petersburg, Izd-vo VSEGEI, 2004, pp. 156–161.
7. Sil'yanov S. A. Savchik D. M. Tagamity Popigaykoy astroblemy [Popigai Astrobleme tagamite]. *Mel'nikovskie chteniya 2016: sbornik dokladov Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii*. Blagoveshchensk, FGBOU VPO AmGU, 2016, pp. 104–107. [In Russ].
8. Masaytis V. L., Kirichenko V. T., Mashchak M. S., Fedorova I. G. Korennye mestorozhdeniya i rossypi impaktnykh almazov Popigayskogo rayona (Severnaya Sibir') [Primary deposits and impact diamond placers in the Popigai region (North Siberia)]. *Regional'naya geologiya i metallogeniya*. 2013, no 64, pp. 89–98. [In Russ].
9. Rudy i kontsentraty tsvetnykh metallov. GOST R 53198-2008 [Nonferrous metal ore and concentrates. State Standard R 53198-2008], Moscow, Standartinform, 2009, 23 p.
10. Chernoknizhnikov V. V., Goncharov M. M. *Impaktnye almazy Taymyrskogo avtonomnogo okruga i ikh promyshlennoe ispol'zovanie* [Impact diamonds and their industrial use in the Taymyr Autonomous Okrug], Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2003, pp. 337–339.
11. Yelisseyev A., Meng G. S., Afanasyev V., Pokhilenko N., Pustovarov V., Isakova A., Lin Z. S., Lin H. Q. Optical properties of impact diamonds from the Popigai astrobleme. *Elsevier Science, Diamond & Related Materials*. Vol. 37. 2013. Pp. 8–16.
12. Yelisseyev A., Vins V., Afanasyev V., Rybak A. Effect of electron irradiation on optical absorption of impact diamonds from the Popigai meteorite crater. *Elsevier Science, Diamond & Related Materials*. Vol. 79. 2017. Pp. 7–13.
13. Yelisseyev A., Afanasyev V., Panchenko A. V., Gromilov S. A., Kaichev V. V., Saraev A. A. Are they impact diamonds from the Popigai crater? *Elsevier Science, Lithos*. Vol. 265. 2016. Pp. 278–291.