

Научная статья

УДК 622.7

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18205>

РЕНТГЕНО-АБСОРБЦИОННАЯ ИММЕРСИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБОГАЩЕНИЯ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩИХ РУД: ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

В. Д. Купцов 

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

 kuptsov@spbstu.ru

Аннотация. В работе представлены физические основы рентгено-абсорбционной иммерсионной технологии (РАИТ), основанной на регистрации рентгеновского излучения, прошедшего через алмазосодержащую руду, пустоты между кусками которой предварительно заполняются иммерсионной средой (ИС). При этом определен диапазон энергий рентгеновских фотонов, в котором алмаз более прозрачен, чем компоненты руды. На основе предложенной аппроксимации массовых коэффициентов ослабления элементов суммой двух степенных функций проведено обоснование осознанного выбора массового коэффициента ослабления ИС, равного среднему значению по всем компонентам руды с учетом их весового содержания. По результатам тестирования предложен оптимальный состав ИС в виде сыпучего материала: порошок сплава алюминия с цинком. Эксперименты, проведенные на разработанном и изготовленном образце сепаратора, подтвердили возможность применения РАИТ, обладающей существенными преимуществами над аналогами.

Ключевые слова: рентгено-абсорбционная технология, иммерсионная среда, массовый коэффициент ослабления, рентгеновское излучение, алмазы

Для цитирования: Купцов В. Д. Рентгено-абсорбционная иммерсионная технология обогащения алмазосодержащих руд: физические основы и практическая реализация // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2025. Т. 18. № 2. С. 49–59. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18205>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18205>

THE X-RAY ABSORPTION IMMERSION TECHNOLOGY FOR ENRICHMENT OF DIAMOND ORES: PHYSICAL FOUNDATIONS AND PRACTICAL IMPLEMENTATION

V. D. Kuptsov 

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

 kuptsov@spbstu.ru

Abstract. The paper presents physical principles of X-ray absorption immersion technology (XRAIT) based on recording X-ray radiation passed through diamond-containing ore, pore spaces between the pieces of which are preliminarily filled with an immersion medium (IM). The energy range of X-ray photons where the diamond is more transparent than the ore components has been determined. Based on the proposed approximation of the mass attenuation coefficients of elements by the sum of two power functions, a justification for a conscious choice of the mass attenuation coefficient of the IM equal to the average value for all ore components was carried out taking into account their weight content. An optimal composition of the IM in the form of a bulk material, namely aluminum-zinc alloy powder, was proposed. Experiments conducted on a developed and manufactured prototype of the separator confirmed the possibility of using the XRAIT with significant advantages over analogues.

Keywords: X-ray absorption technology, immersion medium, mass attenuation coefficient, X-ray radiation, diamonds

For citation: Kuptsov V. D., The X-ray absorption immersion technology for enrichment of diamond ores: Physical foundations and practical implementation, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 18 (2) (2025) 49–59. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18205>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Рентгено-абсорбционная технология обогащения полезных ископаемых использует в своей физической основе ослабление (поглощение и рассеивание) электромагнитного излучения рентгеновского диапазона при прохождении через алмазосодержащую руду. Разделительным признаком при сепарации минералов служит различие интенсивностей излучения, прошедшего через руду в ее сечениях, содержащих алмазы и не содержащих.

Рост технологических показателей рентгено-абсорбционной технологии, достигнутый в последнее время, указывает на возможность заменить широко применяемые методы обогащения алмазосодержащих руд этой технологией, причем не только на доводочных, но и на основных операциях их обогащения [1].

В настоящее время на горно-обогатительных фабриках широкое распространение получили рентгенолюминесцентная, гравитационная и липкостная технологии.

Физической основой рентгенолюминесцентной технологии является люминесцентное излучение алмаза в результате воздействия на него импульсного рентгеновского излучения. Для анализа этой люминесценции используют два критерия разделения: автокорреляционную функцию и соотношение компонент времени затухания люминесценции [1]. Такой анализ предполагает, что алмаз должен находиться на поверхности куска кимберлита, иначе он не будет обнаружен. Следовательно, эта технология требует дезинтеграции руды в шаровых мельницах мокрого самоизмельчения или в щековых дробилках, а это наносит вред (технологические сколы) самим драгоценным камням, значительно снижая их стоимость. Кроме проблемы образования технологических сколов, при рентгенолюминесцентной сепарации возникают потери, обусловленные нехарактерной кинетикой люминесценции, которая свойственна части алмазов [2].

Для преодоления этого недостатка технологии, ведутся исследования по обработке сырья люминофорсодержащими органическими композициями для модифицирования рентгенолюминесцентных свойств слаболюминесцирующих алмазов и их избирательной идентификации в рентгенолюминесцентных сепараторах [3].

Физической основой гравитационной (тяжелосредной) технологии является различие значений плотности алмазов и пустой породы. Плотность алмаза составляет $3,40 - 3,55 \text{ г/см}^3$, а пустой породы — около $2,5 \text{ г/см}^3$. В процессе такого разделения, в жидкой среде с плотностью примерно $3,0 \text{ г/см}^3$ куски руды с алмазами опускаются ко дну емкости, а пустая порода всплывает. Применение вращения жидкости вместе с кусками руды в специальных гидроциклонах ускоряет процесс разделения [4]. К преимуществу гравитационной технологии относится возможность извлечения нескрытых алмазов (находящихся внутри кусков руды). К ее недостаткам можно отнести необходимость прецизионного поддержания плотности тяжелосредной жидкости на уровне $3,0 \text{ г/см}^3$, а главное — экологический вред окружающей среде.

Физической основой липкостной (жировой) технологии является разница в адгезии алмаза и кусков кимберлита к жировому покрытию. Липкостная сепарация применима, в основном, на доводочных операциях извлечения алмазов.

Технологии обогащения алмазосодержащих руд постоянно совершенствуются. Среди последних достижений стоит выделить двуэнергетический рентгенографический метод, использующий наносекундные импульсы двух уровней энергии взрывозмиссионной рентгеновской трубки [5], а также объединение и взаимное дополнение рентгенолюминесцентного и рентгено-абсорбционного методов [6, 7].

Перечисленные недостатки технологий обогащения алмазосодержащей руды можно существенно снизить и даже полностью устранить путем внедрения рентгено-абсорбционной иммерсионной технологии [8].

Рентгено-абсорбционная иммерсионная технология основана на помещении кусков алмазосодержащей руды в иммерсионную среду, имеющую линейный коэффициент ослабления рентгеновского излучения, близкий к линейному коэффициенту ослабления кимберлита. Предназначение иммерсионной среды состоит в ее способности заполнять все полости между кусками алмазосодержащей руды и создавать таким образом композицию руды с этой средой, обладающую постоянной толщиной на конвейере [9].

Иммерсионная среда позволяет представлять подготовленную композицию кусков алмазосодержащей руды на конвейере в виде параллелепипеда из кимберлита, внутри которого может находиться алмаз. Принципиальная блок-схема рентгено-абсорбционной иммерсионной технологии представлена на рис. 1.

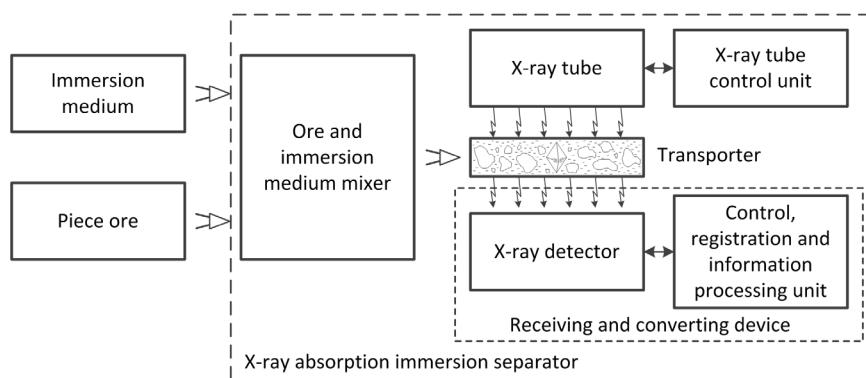


Рис. 1. Принципиальная блок-схема рентгено-абсорбционной иммерсионной технологии: immersion medium – иммерсионная среда; piece ore – кусковая руда; X-ray tube control unit – блок управления рентгеновской трубкой; receiving and converting device – приемно-преобразующее устройство

Целями настоящей работы являлись теоретический анализ физических основ рентгено-абсорбционной иммерсионной технологии и решение ее основных технологических проблем.

Для достижения указанных целей было необходимо выявить особенности ослабления рентгеновского излучения в алмазе и сопутствующих минералах, а также на этой основе провести экспериментальную апробацию предложенной технологии.

Ослабление рентгеновского излучения различными средами

Проникающее излучение, генерируемое в рентгеновской трубке, проходит сквозь смесь руды и иммерсионной среды, преобразуется в оптическое излучение в сцинтилляторе, которое, в свою очередь, преобразуется в электрический сигнал в приемно-преобразующем устройстве. Тормозное излучение рентгеновской трубки возникает при криволинейном движении электронов в кулоновском поле атомов анода трубки. Кроме тормозного излучения, рентгеновские трубки излучают достаточно узкие спектральные линии характеристического рентгеновского излучения, связанные с переходом электронов с одной орбиты на другую. Однако в характеристическом излучении сосредоточена значительно меньшая энергия, по сравнению с тормозным, что позволяет не учитывать характеристическое излучение в расчетах интенсивности прошедшего излучения.

Принцип рентгено-абсорбционной иммерсионной технологии основан на регистрации излучения, прошедшего через руду, помещенную в иммерсионную среду с линейным коэффициентом ослабления, близким к линейному коэффициенту ослабления пустой породы алмазосодержащей руды. В итоге уровень интенсивности рентгеновского излучения после прохождения алмазосодержащей руды в иммерсионной среде определяется ослаблением излучения в кимберлите, алмазе, иммерсионной среде и сцинтилляторе. В приемно-преобразующем устройстве формируется уровень фототока, пропорциональный интенсивности прошедшего рентгеновского излучения.

Интенсивность рентгеновского излучения I_x на глубине среды x определяется законом Бугера – Ламберта:

$$I_x = I_0 \exp(-\mu_x x) = I_0 \exp(-\mu_m \rho x), \quad (1)$$

где μ_x – линейный коэффициент ослабления рентгеновского излучения, μ_m – массовый коэффициент ослабления, ρ – плотность поглощающего вещества, I_0 – интенсивность падающего излучения.

Массовый коэффициент ослабления, в отличие от линейного, не зависит от агрегатного состояния вещества. Значения массовых коэффициентов ослабления элементов, полученные экспериментально, приведены в таблицах Интернет-источника [10].

Для аналитических расчетов проникающего излучения применяются аппроксимации энергетической зависимости массовых коэффициентов ослабления. В отличие от дискретного набора энергий в таблицах экспериментальных данных [10], аппроксимированные зависимости позволяют проводить расчеты ослабления рентгеновского излучения непрерывно по всем энергиям фотонов.

Из рассмотренных автором аппроксимаций массового коэффициента ослабления наименьшую погрешность обеспечивает аппроксимация в виде суммы двух степенных функций:

$$\begin{cases} \mu_1 = a_{11}E^{-b_{11}} + a_{12}E^{-b_{12}} + c_1, & E < E_k; \\ \mu_2 = a_{21}E^{-b_{21}} + a_{22}E^{-b_{22}} + c_2, & E \geq E_k, \end{cases} \quad (2)$$

где E_k – энергия k -края поглощения.

Для элементов с атомным номером Z , меньшим 26, в диапазоне энергий 1 – 150 кэВ относительная погрешность данной аппроксимации не превышает 1 % по сравнению с экспериментальными данными [10]. Для элементов с атомным номером выше 26 (^{26}Fe), в диапазоне 1 – 400 кэВ относительная погрешность не превышает 2 %. В табл. 1 приведены полученные аппроксимации массовых коэффициентов ослабления элементов алмазосодержащей руды, материалов анодов рентгеновских трубок, фильтров и сцинтилляторов. Характеристическое излучение не учитывалось.

Массовый коэффициент ослабления сложной молекулы равен

$$(\mu_m)_{mol} = \sum_i C_i \mu_{mi}, \quad (3)$$

где μ_{mi} – массовый коэффициент ослабления i -го элемента в молекуле, C_i – весовое содержание i -го элемента в молекуле, причем суммирование проводится по всем элементам в молекуле. Аналогично определяются массовые коэффициенты ослабления смесей суспензий, сплавов, растворов. В этом случае C_i – весовое содержание i -го вещества в такой среде [11].

Интенсивность прошедшего излучения снижается вдвое в так называемом слое половинного поглощения [11]:

$$d(E) = \frac{\ln 2}{\mu_m(E) \cdot \rho} = \frac{\ln 2}{\mu_x(E)}. \quad (4)$$

Химический состав основных компонентов алмазосодержащей руды приведен в табл. 2. На основании полученных энергетических зависимостей массовых коэффициентов ослабления элементов и в соответствии с выражениями (3) и (4), рассчитаны слои половинного ослабления компонентов алмазосодержащей руды в зависимости от энергии рентгеновских фотонов для диапазонов 10 – 100 и 100 – 1000 кэВ (рис. 2).

В диапазоне энергий фотонов 10 – 50 кэВ наблюдается существенное превышение значения слоя половинного ослабления алмаза по отношению к любому из компонентов алмазосодержащей руды (см. рис. 2, а). При энергии 30 кэВ слой половинного ослабления алмаза в два раза превышает слой половинного ослабления ближайшего компонента алмазосодержащей руды – серпентина.

За основу рентгено-абсорбционной иммерсионной технологии взята особенность ослабления рентгеновского излучения алмазом в диапазоне энергий фотона 10 – 50 кэВ, в

Таблица 1

**Формулы полученных аппроксимаций массовых коэффициентов
ослабления элементов суммой двух степенных функций (см. ф-лу (2))**

Элемент	Формула аппроксимации μ (E , кэВ), см ² /г	Пределы энергии E , кэВ
⁶ C	$2,781 \cdot 10^3 \cdot E^{-3,100} - 8,477 \cdot 10^{-4} \cdot E^{0,840} + 0,1930$	$1,0000 \leq E < 200,00$
⁸ O	$6,284 \cdot 10^3 \cdot E^{-3,032} - 3,403 \cdot 10^{-4} \cdot E^{0,977} + 0,1820$	$1,0000 \leq E < 200,00$
¹¹ Na	$1,575 \cdot 10^4 \cdot E^{-3,010} - 7,884 \cdot 10^{-7} \cdot E^{2,044} + 0,1557$	$1,0000 \leq E < 200,00$
¹² Mg	$2,130 \cdot 10^4 \cdot E^{-3,007} - 6,825 \cdot 10^{-6} \cdot E^{1,655} + 0,1640$	$1,0000 \leq E < 200,00$
¹³ Al	$1,955 \cdot 10^3 \cdot E^{-2,623} - 10,5560$ $2,390 \cdot 10^4 \cdot E^{-2,961} - 1,880 \cdot 10^{-4} \cdot E^{-4,541} + 0,1430$	$1,0000 \leq E < 1,5596$ $1,5596 \leq E < 105,00$
¹⁴ Si	$1,582 \cdot 10^3 \cdot E^{-2,616} - 12,2000$ $3,190 \cdot 10^4 \cdot E^{-2,967} - 3,020 \cdot 10^{-4} \cdot E^{-4,403} + 0,1480$	$1,0000 \leq E < 1,8389$ $1,8389 \leq E < 110,00$
¹⁹ K	$4,272 \cdot 10^3 \cdot E^{-2,684} - 2,100 \cdot 10^2 \cdot E^{-6,354} - 3,7300$ $7,720 \cdot 10^4 \cdot E^{-2,949} - 1,080 \cdot 10^5 \cdot E^{-4,094} + 0,1350$	$1,0000 \leq E < 3,6074$ $3,6074 \leq E < 125,00$
²⁰ Ca	$5,163 \cdot 10^3 \cdot E^{-2,677} - 2,900 \cdot 10^2 \cdot E^{-6,183} - 4,3500$ $8,565 \cdot 10^4 \cdot E^{-2,930} - 1,855 \cdot 10^5 \cdot E^{-4,367} + 0,1365$	$1,0000 \leq E < 4,0381$ $4,0381 \leq E < 125,00$
²⁵ Mn	$9,770 \cdot 10^3 \cdot E^{-2,716} - 1,680 \cdot 10^3 \cdot E^{-4,701} - 1,3000$ $1,380 \cdot 10^5 \cdot E^{-2,902} - 7,830 \cdot 10^5 \cdot E^{-4,580} + 0,1185$	$1,0000 \leq E < 6,5390$ $6,5390 \leq E < 150,00$
²⁶ Fe	$1,113 \cdot 10^4 \cdot E^{-2,709} - 2,050 \cdot 10^3 \cdot E^{-4,758} - 1,4000$ $1,555 \cdot 10^5 \cdot E^{-2,897} - 10,45 \cdot 10^5 \cdot E^{-4,609} + 0,1204$	$1,0000 \leq E < 7,1120$ $7,1120 \leq E < 150,00$
²⁹ Cu	$1,505 \cdot 10^4 \cdot E^{-2,709} - 3,700 \cdot 10^3 \cdot E^{-4,741} - 1,0000$ $1,840 \cdot 10^5 \cdot E^{-2,864} - 8,300 \cdot 10^6 \cdot E^{-5,350} + 0,1120$	$1,0961 \leq E < 8,9789$ $8,9789 \leq E < 175,00$
³⁰ Zn	$1,685 \cdot 10^4 \cdot E^{-2,710} - 4,600 \cdot 10^3 \cdot E^{-4,617} - 0,9000$ $2,029 \cdot 10^5 \cdot E^{-2,859} - 3,600 \cdot 10^6 \cdot E^{-4,872} + 0,1100$	$1,1936 \leq E < 9,6586$ $9,6586 \leq E < 195,00$
³⁹ Y	$3,210 \cdot 10^4 \cdot E^{-2,660} - 2,777 \cdot 10^4 \cdot E^{-5,381} - 0,9100$ $3,131 \cdot 10^5 \cdot E^{-2,791} - 8,232 \cdot 10^7 \cdot E^{-5,558} + 0,0950$	$2,3725 \leq E < 17,0384$ $17,0384 \leq E < 220,00$
⁴² Mo	$4,007 \cdot 10^4 \cdot E^{-2,665} - 9,713 \cdot 10^4 \cdot E^{-5,978} - 0,6500$ $3,852 \cdot 10^5 \cdot E^{-2,792} - 1,489 \cdot 10^8 \cdot E^{-5,533} + 0,0970$	$2,8655 \leq E < 19,9995$ $19,9995 \leq E < 220,00$
⁴⁷ Ag	$5,557 \cdot 10^4 \cdot E^{-2,667} - 5,017 \cdot 10^5 \cdot E^{-6,354} - 0,3500$ $4,413 \cdot 10^5 \cdot E^{-2,751} - 1,476 \cdot 10^9 \cdot E^{-6,066} + 0,0895$	$3,8058 \leq E < 25,5140$ $25,5140 \leq E < 280,00$
⁴⁸ Cd	$5,733 \cdot 10^4 \cdot E^{-2,663} - 8,930 \cdot 10^5 \cdot E^{-6,629} - 0,3200$ $4,439 \cdot 10^4 \cdot E^{-2,743} - 4,511 \cdot 10^8 \cdot E^{-5,663} + 0,0850$	$4,0180 \leq E < 26,7112$ $26,7112 \leq E < 320,00$
⁵³ I	$8,091 \cdot 10^4 \cdot E^{-2,693} - 1,333 \cdot 10^6 \cdot E^{-5,932} + 0,0600$ $5,245 \cdot 10^5 \cdot E^{-2,724} - 1,200 \cdot 10^9 \cdot E^{-5,790} + 0,0824$	$5,1881 \leq E < 33,1694$ $33,1694 \leq E < 320,00$
⁵⁵ Cs	$8,757 \cdot 10^4 \cdot E^{-2,684} - 2,230 \cdot 10^6 \cdot E^{-6,050} + 0,0260$ $5,920 \cdot 10^5 \cdot E^{-2,732} - 2,150 \cdot 10^{10} \cdot E^{-6,447} + 0,0860$	$5,7143 \leq E < 35,9846$ $35,9846 \leq E < 320,00$
⁵⁶ Ba	$8,986 \cdot 10^4 \cdot E^{-2,679} - 2,253 \cdot 10^6 \cdot E^{-5,983} + 0,0210$ $5,943 \cdot 10^5 \cdot E^{-2,725} - 1,631 \cdot 10^{10} \cdot E^{-6,368} + 0,0839$	$5,9888 \leq E < 37,4406$ $37,4406 \leq E < 320,00$
⁶⁴ Gd	$1,294 \cdot 10^5 \cdot E^{-2,669} - 3,501 \cdot 10^5 \cdot E^{-6,639} + 0,0800$ $7,300 \cdot 10^5 \cdot E^{-2,689} - 1,330 \cdot 10^8 \cdot E^{-4,800} + 0,0818$	$8,3756 \leq E < 50,2391$ $50,2391 \leq E < 320,00$
⁶⁵ Tb	$1,341 \cdot 10^5 \cdot E^{-2,664} - 4,335 \cdot 10^7 \cdot E^{-6,673} + 0,0740$ $7,520 \cdot 10^5 \cdot E^{-2,684} - 2,260 \cdot 10^7 \cdot E^{-4,300} + 0,0804$	$8,7080 \leq E < 51,9957$ $51,9957 \leq E < 320,00$
⁷⁴ W	$1,959 \cdot 10^5 \cdot E^{-2,665} - 2,036 \cdot 10^7 \cdot E^{-5,619} + 0,1390$ $7,715 \cdot 10^5 \cdot E^{-2,623} - 3,140 \cdot 10^8 \cdot E^{-4,981} + 0,0775$	$12,0998 \leq E < 69,5250$ $69,5250 \leq E < 400,00$
⁷⁹ Au	$2,194 \cdot 10^5 \cdot E^{-2,642} - 3,200 \cdot 10^7 \cdot E^{-5,631} + 0,1290$ $8,118 \cdot 10^5 \cdot E^{-2,600} - 2,784 \cdot 10^7 \cdot E^{-4,400} + 0,0795$	$14,3528 \leq E < 80,7249$ $80,7249 \leq E < 400,00$
⁸² Pb	$2,385 \cdot 10^5 \cdot E^{-2,636} - 3,226 \cdot 10^7 \cdot E^{-5,471} + 0,1250$ $7,526 \cdot 10^5 \cdot E^{-2,569} + 0,0770$	$15,8608 \leq E < 88,0045$ $88,0045 \leq E < 400,00$

Таблица 2

Ключевые характеристики природных минералов алмазосодержащей руды

Номер	Минерал	Химическая формула	Плотность, кг/м³
1	Серпентин	Mg ₆ Si ₄ O ₁₈ H ₈	2,52
2	Кварц	SiO ₂	2,60
3	Алмаз	C	3,51
4	Кальцит	CaCO ₃	2,65
5	Пироп	Mg ₃ Al ₂ Si ₃ O ₁₂	3,55
6	Дистен	Al ₂ O ₈ Si	3,58
7	Диопсид	CaMgSiO ₂	3,28
8	Биотит	KMg ₃ Fe ₃ AlO ₁₂ H ₂ F ₂	3,00
9	Ильменит	FeTiO ₃	4,73
10	Пирит	FeS ₂	4,95
11	Магнетит	Fe ₃ O ₄	5,00
12	Циркон	SrSiO ₄	4,66
13	Шеелит	CaWO ₄	5,90

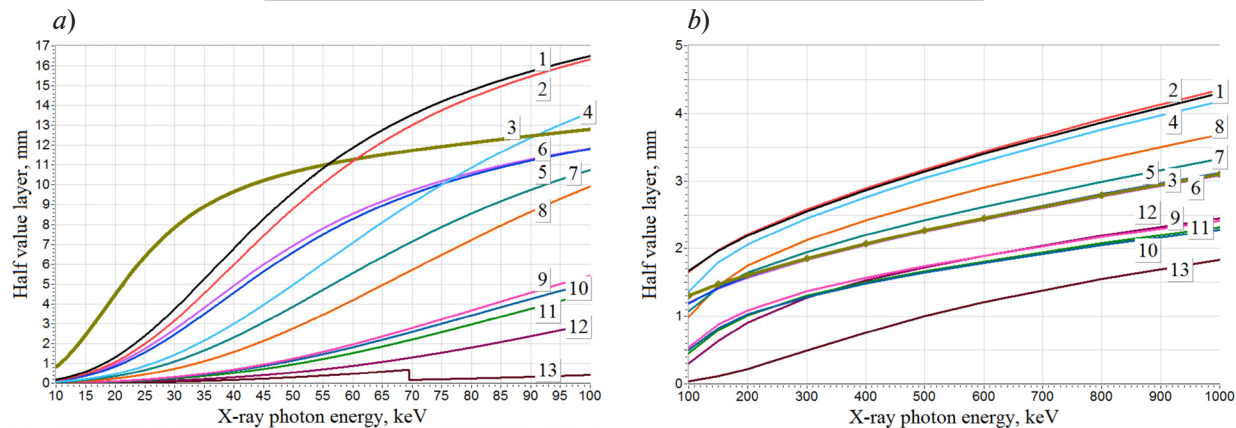


Рис. 2. Зависимости слоев половинного ослабления рентгеновского излучения компонентами алмазосодержащей руды от энергии рентгеновских фотонов в диапазонах 10 – 100 кэВ (а) и 100 – 1000 кэВ (b).

Номера кривых соответствуют приведенным в табл. 2

котором толщина слоя половинного ослабления рентгеновского излучения алмазом оказывается превышенной над таковой для всех остальных минералов руды, а также обстоятельство заполнения пустот между кусками руды иммерсионной средой с линейным коэффициентом ослабления, близким к среднему значению линейных коэффициентов всех компонентов руды с учетом их весового содержания.

В диапазоне энергий фотона 10 – 50 кэВ алмаз значительно прозрачнее, чем любой из остальных компонентов алмазосодержащей руды. Иммерсионная среда применяется для заполнения пустот между кусками алмазосодержащей руды. Тогда в сечении алмаза возникает существенное увеличение интенсивности прошедшего рентгеновского излучения. Если же пустоты оставить незаполненными, то интенсивность прошедшего рентгеновского излучения в сечениях пустот возрастает так же, как если бы в этом сечении был большой алмаз. Пустот между кусками руды на многослойном конвейере очень много, поэтому без применения иммерсионной среды рентгено-абсорбционная технология не способна выделять куски руды, содержащие алмаз.



В случае, когда иммерсионная среда равномерно заполняет все пустоты между кусками руды, рентгеновское излучение будет гарантированно проходить при движении конвейера через одинаковую толщину смеси компонентов: руды, алмаза и иммерсионной среды. Разделительным признаком алмаза от пустой породы служит превышение уровня прошедшего рентгеновского излучения над пороговым, определяемым флуктуациями рентгеновского фона, связанными с неоднородным составом руды.

В патенте [5] предложен способ двуэнергетической рентгенопроекционной сепарации минерального сырья, основанный на эффектах снижения показателя ослабления излучения, по сравнению с исходной вмещающей породой при низком уровне энергии рентгеновского излучения (приводятся значения 20 – 230 кэВ) и (наоборот) повышения этого показателя на высоком уровне энергии (250 – 700 кэВ).

Следует отметить, что в энергетическом диапазоне 250 – 700 кэВ компоненты руды серпентин, кварц, кальцит и биотит меньше ослабляют первичное излучение, чем алмаз (см. рис. 2, *b*). Следовательно, эти минералы подходят под разделительный признак, предложенный в патенте [5]. Однако такие минералы, как диопсид, пироп и дистен практически неотличимы по ослаблению проникающего излучения от алмаза. Что же касается таких минералов, как ильменит, пирит, магнетит, циркон и шеелит, то они так же, как и в диапазоне прозрачности алмаза 10 – 50 кэВ, обладают значительно меньшей прозрачностью, по сравнению с алмазом. Значит, эти минералы противоречат разделительному признаку, предложенному в патенте [5]. В итоге метод, предложенный авторами патента [5], не всегда применим для отделения алмаза от его руды.

Результаты экспериментов, проведенных на рентгено-абсорбционном иммерсионном сепараторе

Рентгено-абсорбционные иммерсионные сепараторы составляют производственное оборудование предложенной технологии. Образец такого сепаратора был создан, и на нем были проведены эксперименты по обнаружению нескрытых алмазов в кусках кимберлита. В состав сепаратора входят следующие части:

- рентгеновская трубка с блоком управления и системой охлаждения вольфрамового анода проточной водой;
- вибропитатель для подачи руды;
- устройство подачи иммерсионной среды;
- отделяющее устройство;
- приемно-преобразующее устройство.

Преобразование рентгеновского излучения, прошедшего сквозь руду в иммерсионной среде, в электрический сигнал осуществляется в приемно-преобразующем устройстве, в состав которого входят позиционно-чувствительный сцинтилляционный детектор на основе оксисульфида гадолиния $Gd_2O_2S(Tb)$ (толщина – 0,3 мм), 256 фотоинтеграторов на основе фотодиодов и операционных усилителей с емкостной обратной связью, а также блок регистрации проникающего рентгеновского излучения, обработки информации и управления исполнительными устройствами сепаратора. Сцинтиллятор $Gd_2O_2S(Tb)$ преобразует прошедшие рентгеновские лучи в оптическое излучение зеленого цвета (видимый диапазон), которое подается на фотодиоды. Электрический заряд с фотодиодов, пропорциональный прошедшему рентгеновскому излучению, поступает на операционные усилители интегрирующего типа. Блок регистрации позволяет визуализировать интенсивность прошедшего рентгеновского излучения в поперечном сечении конвейера в виде графиков на экране монитора компьютера.

Иммерсионная среда может быть жидкой: как в виде суспензий, так и водных растворов солей. Проведенные экспериментальные исследования показали возможность применения суспензий сульфата бария $BaSO_4$ и ферросилиция $FeSi$. Тестирование многих водных растворов позволило выделить для практического применения йодистый калий KI , уксуснокислый свинец $Pb(CH_3COO)_2 \cdot 3H_2O$ и вольфрамат натрия $Na_2WO_4 \cdot 2H_2O$. Чтобы достичь требуемого линейного коэффициента ослабления рентгеновского излучения иммерсионной среды, необходим подбор соответствующей концентрации. При этом важно отметить, что требуемая весовая плотность иммерсионных суспензий и растворов оказалась ниже, чем плотность жидких сред в гравитационной технологии.

Однако возникла следующая проблема: при смешении кусковой руды и жидкой иммерсионной среды образовывались воздушные пузырьки, которые еще прозрачнее для рентгеновского излучения, чем алмазы; как следствие этого, пузырьки ошибочно регистрировались как крупные алмазы. Несмотря на попытки устранять пузырьки путем барботирования, эффективного решения указанной проблемы получить не удалось.

Гораздо лучше зарекомендовала себя иммерсионная среда в виде сыпучего порошка. При использовании сыпучего материала дополнительно требовалось выравнивание толщины слоя насыпного материала, но эта задача была легко решена с помощью скребка, установленного над конвейером. Были проведены эксперименты по применению измельченного ферросилиция, оксида железа, отдельно железного и алюминиевого порошков, порошков сплавов алюминия с оловом и медью, алюминия с цинком, алюминия с никелем, а также кварцевого песка.

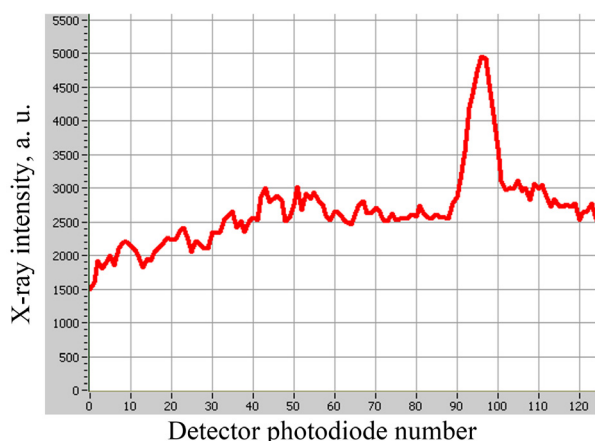


Рис. 3. Распределение интенсивности рентгеновского излучения, прошедшего через руду с алмазом размером 4 мм, помещенную в иммерсионную среду (порошок сплава Al + Zn) вдоль поперечного сечения конвейера. По горизонтали отложены номера фотодиодов позиционно-чувствительного сцинтилляционного детектора

экспериментальном образце сепаратора. Полученные результаты представлены на рис. 3, где приведено распределение интенсивности прошедшего рентгеновского излучения через кусковую руду в поперечном сечении конвейера при анодном напряжении рентгеновской трубки 30 кВ и толщине слоя 26 мм. Иммерсионной средой служил порошок сплава алюминия с цинком (94 % Al + 6 % Zn), фракция 100 – 200 мкм, насыпная плотность – 1,46 г/см³.

Амплитуда отклика алмаза размером 4 мм вдвое превышала средний уровень прошедшего рентгеновского излучения. Отношение полезного сигнала, определяемого наличием алмаза, к уровню флуктуаций, связанных с неоднородностью фракций в составе кусков кимберлита, превышало пятикратное значение. В итоге вероятность определения алмаза в куске алмазосодержащей руды составила 99 %.

Заключение

Исследования физических основ рентгено-абсорбционной иммерсионной технологии выявили особенности распространения электромагнитных волн рентгеновского диапазона в алмазосодержащей руде, содержащей много разных минералов. Это серпентин, кварц, кальцит, пироп, дистен, диопсид, биотит, ильменит, циркон и шеелит. Нами найден и обоснован удобный диапазон энергий фотонов рентгеновского излучения: 10 – 50 кэВ, в котором алмаз более прозрачен для проникающего рентгеновского излучения, по сравнению с другими природными минералами алмазосодержащей руды.



Установлено, что в этом диапазоне наиболее близким по прозрачности к алмазу является серпентин.

Для математического описания физического явления ослабления проникающего рентгеновского излучения через набор изучаемых объектов создана модель, для которой предложена аппроксимация массовых коэффициентов ослабления суммой двух степенных функций, содержащих набор ключевых параметров. Предложенные аппроксимации обеспечивают относительную погрешность 1 – 2 % в энергетическом диапазоне 1 – 400 кэВ и пригодны для расчета энергетических зависимостей проникающего рентгеновского излучения.

На основе выявленных закономерностей ослабления рентгеновского излучения предложена рентгено-абсорбционная иммерсионная технология извлечения природных алмазов, которая предполагает заполнение пустот между кусками кимберлита иммерсионной средой с линейным коэффициентом ослабления, равным среднему значению по всем компонентам руды, с учетом их весового процентного содержания. Выявлены преимущества применения иммерсионной среды в виде сыпучего материала (порошок сплава алюминия с цинком) над жидкими иммерсионными средами, с которыми возникла проблема устранения влияния образующихся воздушных пузырьков.

Экспериментальная апробация предложенного рентгено-абсорбционного иммерсионного метода была проведена на разработанном и созданном образце сепаратора, на котором проведены эксперименты по обнаружению нескрытых алмазов в кусках кимберлита. Проведенные эксперименты показали, что амплитуда отклика алмаза 4 мм вдвое превышает средний уровень прошедшего рентгеновского излучения. Такой важный показатель, как отношение полезного сигнала, отвечающего наличию алмаза, к уровню флуктуаций, связанных с неоднородностью фракций в составе кусков кимберлита, как установлено, превышал пятикратное значение. В результате наличие алмаза в куске алмазосодержащей руды определяется с высокой вероятностью – 99 %.

Предлагаемая рентгено-абсорбционная иммерсионная технология извлечения природных алмазов обладает существенными преимуществами:

- возможностью извлечения нескрытых алмазов,
- уменьшением количества техногенных сколов при дезинтеграции руды,
- возможностью извлечения слабо люминесцирующих алмазов,
- малым нанесением экологического вреда окружающей среде.

Разумеется, реализация столь значимых преимуществ потребует введения на горно-обогатительных предприятиях дополнительного оборудования, связанного с необходимостью смешения иммерсионной среды (сухого порошка) с дезинтегрированной алмазосодержащей рудой и обеспечения замкнутого цикла по многократному использованию иммерсионной среды. Потребуется также перестройка технологических схем предприятия.

Но такие затраты, несомненно, оправданы и быстро окупятся: даже сбережение от сколов всего одного алмаза в 100 карат дает выручку вплоть до десятков млн. долларов.

Настройка технических параметров рентгено-абсорбционных иммерсионных сепараторов позволит добиться извлечения алмазов на беднотоварных и удаленных месторождениях, и даже разработки отвальных терриконов на действующих месторождениях с высокой экономической эффективностью.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность доктору технических наук В. П. Валюхову за поддержку в проведении исследований рентгено-абсорбционной иммерсионной технологии и полезное обсуждение полученных результатов.

Светлая благодарная память уже ушедшим из жизни коллегам: кандидатам технических наук В. В. Новикову, разработчику первых промышленных рентгенолюминесцентных сепараторов, и В. А. Ольховому; оба они принимали активное участие на ранних стадиях представленной здесь работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зырянов И. В., Яковлев В. Н., Иванов А. В., Макалин И. А. История и перспективы развития отечественной технологии радиометрического обогащения алмазосодержащих руд // Горный журнал. 2024. № 2. С. 37–41.
2. Mironov V. P., Emelyanova A. S., Shabalin S. A., Bubyer E. V., Kazakov L. V., Martynovich E. F. X-ray luminescence in diamonds and its application in industry // AIP Conference Proceedings. 2021. Vol. 2392. No. 1. P. 020010.
3. Морозов В. В., Чантурия В. А., Двойченкова Г. П., Чантурия В. А., Подкаменный Ю. А. Выбор органических коллекторов в составе люминофорсодержащих модификаторов для извлечения слабосветящихся алмазов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2023. № 2. С. 122–133.
4. Карлина А. И. Изучение гидродинамики гравитационного обогащения полезных ископаемых // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 3 (98). С. 194–199.
5. Дворцов М. А., Комарский А. А., Корженевский С. Р., Корженевский Н. С. Способ и устройство для рентгенопроекционной сепарации минерального сырья. Пат. 2785068 Российская Федерация, МПК В 07 С 5/34, G 01 N 23/083., заявитель и патентообладатель ООО «ИМ-ПУЛЬС-У». № 2022105162; заявл. 26.02.2022; опубл. 02.12.2022, Бюл. № 34. 22 с.
6. Modise E. G., Zungeru A. M., Mtengi B., Ude A. A fast and noise rejecting Kolmogorov – Smirnov sorting algorithm in X-ray diamond sorting // Proceedings of the 2022 International Conference on Smart Applications, Communications and Networking (SmartNets). Nov. 29th–Dec 1st, 2022. Palapye, Botswana (Southern Africa), 2022. Pp. 1–5.
7. Modise E. G., Zungeru A. M., Chuma J. M., Prabakaran S. R. S., Mtengi B., Ude A., Nedev Z. The new paradox of dual modality X-ray diamond sorting // IEEE Photonics Journal. 2021. Vol. 13. No. 3. P. 3400124.
8. Купцов В. Д., Валюхов В. П., Новиков В. В., Ольховой В. А. Новая технология извлечения природных алмазов в кусках кимберлита // Труды СПбГТУ. 2008. № 507. С. 98–100.
9. Новиков В. В., Рудаков В. В., Злобин М. Н., Малаховский В. И., Купцов В. Д., Валюхов В. П., Купцов М. В., Ольховой В. А. Способ сепарации минералов. Пат. 2472595 Российская Федерация, МПК В07С 5/346, заявитель и патентообладатель Новиков Владлен Васильевич. № 2011150666/12; заявл. 14.12.2011; опубл. 20.01.2013, Бюл. № 2. 11 с.
10. Physical reference data. Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients. Режим доступа: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/cover.html> (дата обращения: 15.06.2024).
11. Павлинский Г. В. Основы физики рентгеновского излучения: Физматлит, 2007. 240 с.

REFERENCES

1. Zyryanov I. V., Yakovlev V. N., Ivanov A. V., Makalin I. A., Istoriya i perspektivy razvitiya otechestvennoy tekhnologii radiometricheskogo obogashcheniya almazosoderzhashchikh rud [History and prospects for the development of domestic technology for radiometric enrichment of diamond ores], Gornyi Zhurnal [Mining Magazine]. (2) (2024) 37–41 (in Russian).
2. Mironov V. P., Emelyanova A. S., Shabalin S. A., et al., X-ray luminescence in diamonds and its application in industry, AIP Conf. Proc. 2392 (1) (2021) 020010.
3. Morozov V. V., Chanturia V. A., Dvoichenkova G. P., et al., Selecting organic collectors for luminophore-bearing modifying agents to extract weakly fluorescent diamonds, J. Min. Sci. 59 (2) (2023) 292–301.
4. Karlina A., Mineral gravity separation hydrodynamics study, Proc. Irkutsk State Techn. Univ. (3(98)) (2015) 194–199 (in Russian).
5. Dvortsov M. A., Komarskii A. A., Korzhenevskii S. R., Korzhenevskii N. S., Method and device for X-ray projection separation of mineral raw materials, Pat. No. 2785068 Russian Federation, MPK B 07 C 5/34, G 01 N 23/083; ООО "IMPULS-U" is a declarant and patentee. No. 2022105162; declar. 26.02.2022; publ. 02.12.2022, Bull. No. 34.
6. Modise E. G., Zungeru A. M., Mtengi B., Ude A., A fast and noise rejecting Kolmogorov – Smirnov sorting algorithm in X-ray diamond sorting, Proc. 2022 Int. Conf. Smart Appl., Commun.



Networking (SmartNets). Nov.29th–Dec. 1st, 2022. Palapye, Botswana (Southern Africa) (2022) 1–5.

7. Modise E. G., Zungeru A. M., Chuma J. M., et al., The new paradox of dual modality X-ray diamond sorting, IEEE Photonics J. 13 (3) (2021) 3400124.

8. Kuptsov V. D., Valjukhov V. P., Novikov V. V., Olkhovoy V. A., The new natural diamonds extraction out of fragmented kimberlite technology, Trudy SPbGTU [Transactions of St. Petersburg State Technical University]. (507) (2008) 98–100 (in Russian).

9. Novikov V. V., Rudakov V. V., Zlobin M. N., et al., The method of separation of minerals, Pat. No. 2472595 Russian Federation, MPK B07C 5/346, Novikov Vladlen Vasilyevich is a declarant and patentee. No. 2011150666/12; declar. 14.12.2011; publ. 20.01.2013, Bull. No. 2.

10. Physical reference data. Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients. Access Mode: <http://physics.nist.gov/PhysRef Data/ XrayMassCoef /cover.html> (Date of Access is 15.06.2024).

11. Pavlinsky G. V., Fundamentals of X-ray physics, Cambridge International Science Publishing, Cambridge, UK, 2008.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

КУПЦОВ Владимир Дмитриевич — доктор технических наук, профессор Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

kuptsov@spbstu.ru

ORCID: 0000-0001-8594-9423

THE AUTHOR

KUPTSOV Vladimir D.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

kuptsov@spbstu.ru

ORCID: 0000-0001-8594-9423

Статья поступила в редакцию 20.06.2024. Одобрена после рецензирования 13.02.2025. Принята 13.02.2025.

Received 20.06.2024. Approved after reviewing 13.02.2025. Accepted 13.02.2025.