

## Способ контроля содержания алмазов в пробе

**Б.И. Китов\***

*Иркутский государственный университет путей сообщения,  
Российская Федерация, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15*

\*Адрес для переписки: Китов Борис Иванович, E-mail: kitov@irgups.ru

Поступила в редакцию 22 января 2019 г., после исправления – 12 февраля 2019 г.

В статье представлены результаты исследований по созданию нового способа обнаружения алмазов в кусковом рудном материале, основанного на отличии средних атомных номеров составляющих его минералов. Проба проходит дробление, гравитационное разделение материала с целью выделения фракции, близкой по удельной плотности к алмазу, и разделение частиц по размерам с помощью набора сит. Затем поштучно частицы пробы сбрасываются в тонкий плоский поток рентгеновского излучения. Первичное излучение проникает в частицу, рассеивается на ее атомах и на выходе из частицы ослабляется. Большое различие массовых коэффициентов фотоэлектрического ослабления у частиц сопутствующих минералов и у частиц алмазов играет в этом процессе определяющую роль. Рассеянное рентгеновское излучение регистрируется сцинтилляционным счетчиком. Аналитическим параметром, формирующим признак разделения минералов, является сумма интенсивности рассеянного частицей рентгеновского излучения и интенсивности рассеянного излучения от установленного между частицей и детектором полупрозрачного экрана. Роль этого вспомогательного экрана заключается в увеличении различия между сигналами детектора от алмазов и от частиц сопутствующих минералов. Разработана конструкция аналитического прибора, реализующего данный способ, приведены результаты испытаний лабораторного макета прибора. Для алмазов размером 2-5 мм способ показал их обнаружение с надежностью 100 %. В течение одного часа способ позволяет обработать до 900 граммов материала алмазосодержащих проб.

**Ключевые слова:** алмаз, сопутствующий минерал, рассеянное рентгеновское излучение, полупрозрачный экран, сигнал детектора,

For citation: *Analitika i kontrol'* [Analytics and Control], 2019, vol. 23, no. 1, pp. 78–83

DOI: 10.15826/analitika.2019.23.1.013

## The method of screening samples for diamonds

**Boris I. Kitov\***

*Irkutsk State University of Railway Engineering (IRGUPS),  
Chernyshevskogo st., 15, Irkutsk, 664074, Russian Federation*

\*Corresponding author: Boris I. Kitov, E-mail: kitov@irgups.ru

Submitted 22 January 2019, received in revised form 12 February 2019

The current article presents research results on developing a new method of detecting diamonds in lump ores based on the differences in mean atomic numbers of minerals in them. Samples are broken up, separated with gravity to extract the fraction closest to the diamonds in its density, and then separated by size using sieves. Then particles are dropped one-by-one into a thin flat flux of X-ray radiation. The primary radiation penetrates the particle, is scattered by its atoms and is attenuated as it leaves the particle. A considerable difference between mass coefficients of photoelectric attenuation of the particles of accompanying minerals and the diamond particles plays a decisive role in this process. The scattered radiation is registered by a scintillation meter. The analytical parameter that makes it possible to separate the minerals is the sum of the intensities of X-ray radiation scattered by the particle and the intensity of radiation scattered by the semi-transparent screen positioned between the particle and the detector. The role of this auxiliary screen is to increase the difference between the detector's signals from the diamonds and the particles of accompanying minerals. An analytical device that uses this method was designed and the results of testing its lab model are presented. Diamonds with the diameter of 2-5 mm are detected in 100% of the cases. Up to 900 grams of diamond-containing samples can be processed within one hour.

**Keywords:** diamond; accompanying mineral; scattered X-ray radiation; semi-transparent screen; detector's signal.

## Введение

Используемый для обнаружения в пробе алмазов рентгенолюминесцентный способ [1, 2] не может считаться идеальным, так как часть алмазов имеет интенсивность люминесценции ниже среднего уровня свечения сопутствующих минералов [3]. Среди других рентгенофизических эффектов для решения данной задачи привлекает внимание абсорбционный способ [4]. Примерная схема автоматического устройства для обнаружения кристаллов алмаза этим способом приведена на рис. 1, где показано как с помощью вибрационной транспортной системы частицы исследуемого материала поштучно сбрасываются в поток рентгеновских лучей, направленных в детектор. Разная прозрачность в рентгеновских лучах алмаза и более тяжелых минералов приводит к различию в сигналах регистрируемых детектором.

Однако попытки применить на практике абсорбционный способ нельзя признать удачными [4-7]. Сигнал от алмаза из-за его низкого коэффициента ослабления рентгеновского излучения мало отличается от холостого сигнала, наблюдаемого при засветке детектора открытым пучком, а контрастный сигнал наблюдается только у сопутствующих минералов. Построенный по такой схеме прибор фиксирует сигналы от тысяч частиц сопутствующих минералов, но не реагирует на появление в зоне облучения полезного компонента.

В работах [8, 9] на примере сепарации угля и позднее в работах [10-13] на примере сепарации алмазосодержащего материала было показано,

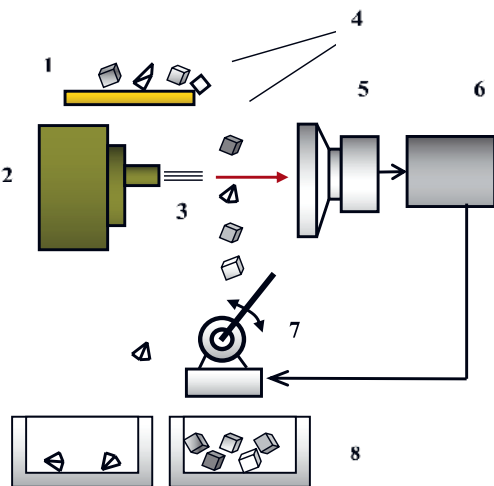


Рис. 1. Схема рентгеноабсорбционного прибора: 1 – вибропитатель, 2 – источник рентгеновского излучения, 3 – коллиматор, 4 – кусковой алмазосодержащий материал, 5 – детектор, 6 – электронный блок, 7 – исполнительный механизм на основе шагового двигателя, 8 – контейнеры для сбора разделенного материала.

Fig. 1. X-ray absorption device scheme: 1 – vibro-feeder; 2 – X-ray source; 3 – collimator; 4 – lump diamond-containing material; 5 – detector; 6 – electronic block; 7 – executory mechanism based on the step motor; 8 – containers for collecting the separated material.

как изменить ситуацию: предлагалось убрать детектор с пути прямого рентгеновского потока и регистрировать излучение, рассеянное в глубине частицы и поглощенное в материале частицы при выходе из нее.

Основным сопутствующим минералом у алмаза, остающимся после предварительного гравитационного разделения алмазосодержащего материала по удельной плотности, является кальцит. Ближайшим же к алмазу по среднему атомному номеру является кварц. Согласно справочника [14], массовые коэффициенты ослабления  $K_{\alpha}$ -линии молибденового анода алмазом, кварцем и кальцитом равны соответственно 0.6, 3.6 и 8.1 г/см. Плотности алмаза, кремния и кальцита равны соответственно 3.5, 2.65 и 2.7 г/см<sup>3</sup>. С учетом этого для частиц размером 0.3 см даже грубая оценка показывает, что различие в поглощении излучения  $MoK_{\alpha}$ -линии между кварцем и алмазом достигает  $e^3 \approx 20$ , а между кальцитом и алмазом и вовсе  $e^{7.5} \approx 1800$ . Можно ожидать, что такими же будут и отношения сигналов рассеянного излучения зарегистрированных детектором от алмаза и от сопутствующих минералов. Однако, на практике, как будет показано ниже, действие многих неконтролируемых факторов значительно снижают эти отношения.

Таким образом, целью работы была экспериментальная проверка возможности контроля содержания алмазов в пробах алмазосодержащего сырья с использованием одновременно поглощенного и рассеянного рентгеновского излучения.

## Принципиальная схема аналитического узла

При проектировании прибора следовало учесть, что время пролета частицей минерала зоны облучения составляет всего 3-5 мс. Поэтому для повышения сигнала детектор должен быть максимально приближен к зоне облучения, но, в то же время, должно быть исключено попадание первичного рентгеновского излучения в детектор.

Эти условия были соблюдены в работе [10], где было предложено перекрыть центральную часть

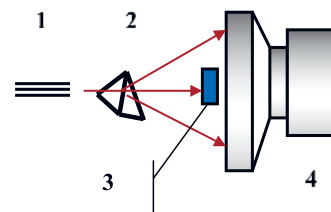


Рис. 2. Схема аналитического узла для регистрации рассеянного излучения периферийной частью входного окна детектора: 1 – коллиматор, 2 – минерал, 3 – свинцовая пластина, 4 – детектор.

Fig. 2. Scheme of the analytical unit for registering the scattered radiation by the peripheral part of the input window of the detector: 1 – collimator; 2 – mineral; 3 – lead plate; 4 – detector.

входного окна детектора свинцовой пластиной и направить на нее поток первичного рентгеновского излучения (рис. 2). Тогда в периферийную незащищенную свинцом часть окна детектора попадает только рассеянное зерном минерала излучение.

При сборке экспериментальной установки источником рентгеновского излучения был выбран российский излучатель РЕИС-И мощностью 100 Вт с рентгеновской трубкой прострельного типа БС-1, имеющей молибденовый анод. Напряжение на аноде поддерживалось равным 34 кВ, сила тока – 55 мкА. Коллиматор формировал плоский рентгеновский луч высотой 1 мм и шириной 20 мм.

Детектор был выполнен на базе фотоэлектронных умножителей и сцинтилляторов из кристаллов фторида кальция, активированных европием. Диаметр входного окна равнялся 63 мм, что обеспечило сбор рассеянного излучения в телесном угле 1.5-1.8 стерadian. Так как кристалл фторида кальция не гигроскопичен, он не нуждался в герметичном

контейнере и защищался только от оптического излучения тонкой алюминиевой фольгой, что уменьшало потерю сигнала. Конечным измерительным прибором являлся цифровой вольтметр.

При выбранной схеме установки, чем ближе зерно минерала пролетало перед окном детектора, тем больше сигнал детектора. Но одновременно сигнал становился все более чувствительным к вариациям траектории полета зерна, что приводило к увеличению дисперсии сигнала. Поэтому расстояние от окна детектора до траектории движения частицы потребовало оптимизации.

Для исследования были выбраны 4 необработанных природных алмаза характерных форм в классе размеров 2-5 мм и 10 кристаллов кальцитов, сланцев, пиритов, кварца и известняка, имеющих удельную плотность, близкую к плотности алмаза.

В табл. 1 проведены средние значения очищенных от фона амплитуд сигналов  $\bar{U}$  и их стандартные отклонения  $\sigma_U$ , измеренные по 7 независимым

**Таблица 1**

Амплитуды сигналов детектора (В) и среднеквадратичные отклонения (В) при рассеянии рентгеновского излучения на алмазах и сопутствующих минералах

**Table 1**

Amplitude of the signals of the detector (V) and the mean square deviation (V) for the scattering of X-ray radiation by the diamonds and accompanying minerals

Тип минерала	Статистика	Расстояние между облучаемой частицей и детектором, мм			
		25	45	65	85
Алмаз № 1. Октаэдр, размер ребра 4.1 мм.	$\bar{U}$	0.760	0.410	0.212	0.096
	$\sigma_U$	0.068	0.018	0.027	0.042
Алмаз № 2. Октаэдр, размер ребра 2.6 мм.	$\bar{U}$	0.42	0.269	0.174	0.103
	$\sigma_U$	0.026	0.065	0.097	0.034
Алмаз № 3. Шпинелевый двойник, 7 '2.7 мм	$\bar{U}$	0.93	0.704	0.313	0.135
	$\sigma_U$	0.24	0.27	0.144	0.065
Алмаз № 4. Пластина, размер 5.3'3.4'1.2 мм	$\bar{U}$	0.59	0.256	0.308	0.114
	$\sigma_U$	0.15	0.095	0.23	0.067
Кальцит, размер ребра 5 мм	$\bar{U}$	0.105	0.089	0.06	0.035
	$\sigma_U$	0.011	0.024	0.026	0.017
Калицит, размер ребра 2 мм	$\bar{U}$	0.116	0.103	0.076	0.046
	$\sigma_U$	0.01	0.02	0.041	0.019
Сланец, размер ребра 5 мм	$\bar{U}$	0.17	0.155	0.108	0.069
	$\sigma_U$	0.04	0.044	0.017	0.024
Сланец, размер ребра 2 мм	$\bar{U}$	0.146	0.118	0.085	0.047
	$\sigma_U$	0.033	0.014	0.006	0.011
Пирит, размер ребра 5 мм	$\bar{U}$	0.098	0.075	0.041	0.027
	$\sigma_U$	0.04	0.016	0.013	0.009
Пирит, размер ребра 2 мм	$\bar{U}$	0.033	0.034	0.024	0.0452
	$\sigma_U$	0.008	0.027	0.005	0.024
Кварц, размер ребра 5 мм	$\bar{U}$	0.240	0.249	0.167	0.111
	$\sigma_U$	0.152	0.03	0.044	0.033
Кварц, размер ребра 2 мм	$\bar{U}$	0.175	0.187	0.155	0.114
	$\sigma_U$	0.001	0.02	0.038	0.027
Известняк, размер ребра 5 мм	$\bar{U}$	0.106	0.091	0.046	0.035
	$\sigma_U$	0.036	0.03	0.011	0.014
Известняк, размер ребра 2 мм	$\bar{U}$	0.144	0.165	0.125	0.069
	$\sigma_U$	0.017	0.037	0.006	0.015

забросам каждого минерала в зону облучения при различных расстояниях между коллиматором и детектором. Фон составлял в среднем 0.18 В со среднеквадратичным отклонением флуктуаций фона 0.02 В. Из данных табл. 1 следует, что самое большее различие импульсов сигналов алмазов и зерен сопутствующих минералов с учетом доверительных интервалов наступает при расстоянии между объектом и детектором 25-45 мм, которое и было использовано в дальнейшем как оптимальное.

Эксперимент не подтвердил предположение о большом различии сигналов от алмазов и сопутствующих минералов. Случайная форма частиц и их стохастическое положение в зоне облучения уменьшили ожидаемое различие сигналов от почти 2000 до 1.5-2.0 единиц. При этом относительное стандартное отклонение сигналов составило значительную величину в 10-60 %, показывая тенденцию к увеличению по мере отклонения частицы от округлой формы. В подтверждении этого, наибольшее  $\sigma_U$  наблюдается у алмазов в форме шпинелей (spinnell (лат.) – шип) и пластин, а наименьшее  $\sigma_U$  – у зерен сопутствующих минералов, которые имеют форму окатышей. В крайних случаях различие сигналов от алмаза и сопутствующего минерала почти исчезает, как, например, это можно проследить для сигналов от алмаза № 4 (табл. 1) в виде пластины и кварца с ребром 5 мм. В промышленных условиях это приводит к тому, что, алмаз большого размера может быть идентифицирован автоматом как малый сопутствующий минерал и потерян.

Для увеличения различия сигналов от алмазов и сопутствующих минералов в работе [11, 13] был применен полупрозрачный экран, установленный между минералом и окном детектора (рис. 3). Экран представляет собой тонкую пластину из материала с низким атомным номером (полиэтилен, картон) и призван формировать в детекторе некоторый фон в качестве опорного сигнала.

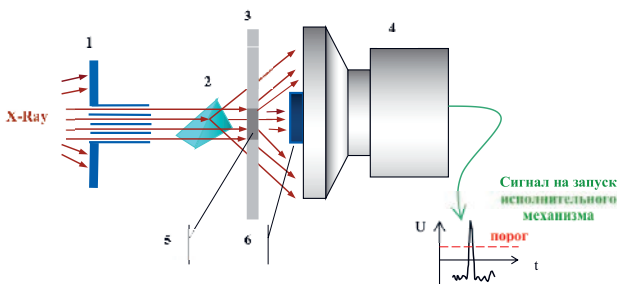


Рис. 3. Схема аналитического узла с регистрацией рассеянного излучения от вспомогательного экрана: 1 – коллиматор, 2 – минерал, 3 – вспомогательный полупрозрачный экран, 4 – детектор, 5 – затененная зона вспомогательного экрана, 6 – свинцовая пластина.

Fig. 3. Scheme of the analytical unit for registering the scattered radiation from the auxiliary screen: 1 – collimator; 2 – mineral; 3 – auxiliary semi-transparent screen; 4 – detector; 5 – shaded zone of the auxiliary screen; 6 – lead plate.

Появление в зоне облучения алмаза, сильно рассеивающего излучение, приводит к большому повышению сигнала и незначительному уменьшению фона за счет малого затенения алмазом части экрана. На рис. 3 затененная часть экрана (позиция 5) показана серым цветом. В итоге, импульс сигнала, то есть сигнал за вычетом фона, становится положительной величиной.

Иная ситуация возникает при облучении минерала со значительно большим, чем у алмаза, коэффициентом ослабления. Здесь происходит небольшое увеличение сигнала от рассеяния на минерале и значительное уменьшение фона за счет того, что часть экрана за объектом затеняется практически полностью. В этом случае импульс сигнала является отрицательной величиной.

Эти два разнонаправленных процесса (увеличение сигнала от алмаза и уменьшение сигнала от сопутствующего минерала) позволили экспериментально подобрать такую толщину вспомогательного экрана из целлюлозы, при которой сигналы от алмаза и сопутствующего минерала приобретали противоположные полярности. Оптимальная толщина экрана оказалась равной 0.8 см. Опорный сигнал составлял 1.53 В со стандартным отклонением 0.008 В. Результаты приведены в табл. 2. Из данных этой таблицы следует, что абсолютное различие в сигналах от алмазов и сопутствующих минералов при использовании экрана возросло примерно в 1.5 раза. Все испытываемые алмазы вызывали появление импульсов статистически значимых сигналов положительного знака с вероятностью большей 0.99. Все сопутствующие минералы вызывали импульс отрицательного знака. Отрицательный

Таблица 2

Амплитуды сигналов детектора и среднеквадратичные отклонения после установки вспомогательного экрана. Расстояние от частицы до детектора 45 мм

Table 2

Amplitude of the signals of the detector and the mean square deviations after the installment of an auxiliary screen. Distance between the particle and the detector is 45 mm

Тип минерала	$\bar{U}$ , В	$\sigma_U$ , В
Алмаз № 1, 4.1 мм	+0.395	0.057
Алмаз № 2, 2.6 мм	+0.246	0.056
Алмаз № 3, 7 '2.7 мм	+0.651	0.150
Алмаз № 4, 5.3'3.4'1.2 мм	+0.383	0.110
Кальцит, 5 мм	-0.430	0.030
Калицит, 2 мм	-0.268	0.024
Сланец, 5 мм	-0.286	0.042
Сланец, 2 мм	-0.267	0.026
Пирит, 5 мм	-0.422	0.048
Пирит, 2 мм	-0.253	0.037
Кварц, 5 мм	-0.056	0.004
Кварц, 2 мм	-0.050	0.005
Известняк, 5 мм	-0.494	0.070
Известняк, 2 мм	-0.228	0.027

импульс, хотя и почти равный опорному сигнала, наблюдается и у кварца – наиболее близкого по среднему атомному номеру к алмазу.

## Испытание способа

Очевидно, что прибор для поштучной проверки каждой частицы пробы на принадлежность к алмазу должен быть автоматическим. По рентгенооптической схеме, показанной на рис. 3, был создан действующий лабораторный макет прибора. Сброс материала в зону облучения проводился вибрационным питателем, как это показано на рис. 1. Извлечение алмазов осуществлялось исполнительным механизмом, который запускался с задержкой на 100 мс, необходимой для пролета алмаза от зоны облучения до расположенного ниже электромагнитного отсекавателя. Еще 50 мс исполнительный механизм затрачивал на отсечку алмаза в сборный контейнер.

Для оценки качества исполнительного механизма в 560 грамм безалмазного материала ввели 500 имитаторов – нарубленных кусочков органического стекла, сходного с алмазом по поглощающим и рассеивающим характеристикам. Эксперимент, выполненный на приборе по схеме рис. 3, был повторен 4 раза. В результате было извлечено 1995 имитаторов (99.6 %) и 59 зерен пустой породы общим весом 14 грамм.

Для прямого опробования способа в 560 грамм безалмазного материала ввели 78 природных необработанных алмазов размером от 2 до 5 мм (средний вес 0.2 г), отобранных на трех месторождениях. Эксперимент повторяли четыре раза. В результате испытаний во всех случаях извлекались 77 одних и тех же алмазов. Один алмаз (это оказался шпинелевый двойник толщиной 1 мм и длиной ребра 3.4 мм) из четырех раз обнаруживался два раза. Процентное отношение числа обнаруженных алмазов к общему числу частиц, отобранных исполнительным механизмом равнялось в среднем 95 %. При уменьшении порога чувствительности шпинелевый двойник извлекался пять раз из пяти опытов, но при этом увеличивалось число ложных срабатываний исполнительного механизма.

Прибор показал невысокую производительность: не более 0.9 кг материала в час. Это объясняется использованием амплитудного режима измерения аналитического сигнала, который возможно реализовать только при поштучной подаче частиц в зону облучения.

## Заключение

Подготовка алмазосодержащих проб к анализу предполагает дробление материала, его последующее гравитационное разделение с целью выделения фракции, близкой по удельной плотности к алмазу, и сортировку частиц по размерам с помощью набора сит.

Предлагаемый способ анализа проб на содержание алмазов был испытан на частицах

крупностью -5+2 мм. В лабораторных условиях испытания продемонстрировали обнаружение алмазов с надежностью 100 %. Переход к другому классу крупности требует его перенастройки аппаратуры. Производительность способа составила 0.9 кг материала в час.

Кроме анализа геологических проб данный способ, использующий рассеянное рентгеновское излучение, может быть применен для контроля рентгенолюминесцентной сепарации, для окончательной доводки алмазосодержащего концентрата и для проверки на подлинность бриллиантов в ювелирных изделиях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Финне В.В., Красов Л.М. Рентгенолюминесцентный автомат, обеспечивающий автоматическое извлечение люминесцирующих алмазов // Авторское свидетельство СССР № 110341. Бюллетень изобретений № 25, 1958.
2. Устройство для сепарации минерального сырья / А.М. Волков [и др.] // Патент РФ № 2069100. Бюллетень № 32, 1996.
3. Патент РФ № 2004100806. Способ разделения минералов по их люминесцентным свойствам и способ определения порога разделения / Шлюфман Е.М. Бюл. № 16, 2005.
4. Справочник по обогащению руд / Под. ред. О.С. Богданова. М.: Наука, 1974. Т. 2. 452 с.
5. Patent № 941301. Improved Means for Sorting Grains. Int. Cl.: G08C (B02F) Complete Specification Published 1963, 6 (Patent of Great Britain of 25.01.1961). Пат. GB 941301 Великобритании, МПК G08C, B02F. Improved means for sorting grains [Электронный ресурс]; патентообладатель: ACEC, Brussels, Belgium, Belgium Body Corporate. №1144/63. Дата приоритета Франции: 21.07.1960; заявл. 25.01.1961; опубл. 06.11.1963. URL: <http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails>. (дата обращения 22.02.2016).
6. Patent № 1103591 Improvements in or relating to analysing and/or sorting arrangements. Int. Cl.: G 01 n 23/00, Complete Specification Published: 21 February 1968. (Patent of Great Britain from 19.02.1965).
7. Patent № 1135232, Int. Cl. G01N 23/12 (Patent of Great Britain from 16.03.1966).
8. А.С. СССР, № 988377. Устройство для сепарации кусков материалов / Л.П. Старчик, Ю.И. Горлов, В.Т. Цораев, Ю.В. Горлов М. кл.(3) В 07 С 5/34, опубл. 15.01.83.
9. А.С. СССР, № 757192. Способ сепарации угля на ленточном конвейере / Л.П. Старчик, П.И. Грабов, А.М. Онищенко, А.Г. Локшин, Е.Н. Комова. М кл.(3) В 03 В 13/06, опубл. 23.08.80.
10. The use small section X-ray radiation in roentgen - radiometric separation of ores / B.I. Kitov [et al.] // Proceedings of SPIE. 2005. V. 5943, P. 127-131.
11. Kitov B.I., Mukhachev Yu. S. Detection of minerals by scattered X-ray radiation // X-Ray Spectrometry. 2010. V. 39. P. 32-36.
12. Kitov B.I., Mukhachev Yu.S., Ryabov E.V. Time lag as a characteristic feature in the identification of a moving object by a two-detector X-ray sensor // X-Ray Spectrometry. 2016. V. 45. P. 48-53.
13. Патент РФ №2199108 (7 G 01 N 23/007, В 07 С 5/342) Способ сепарации алмазосодержащих материалов / Шлюфман Е.М.; Мухачев Ю.С.; Китов Б.И.; Борзенко

С.Ю. // Изобретения. Полезные модели. Бюлл. , М., № 5, 2003, с. 495.

14. Маренков О.С., Комков Б.Г. Таблицы полных массовых коэффициентов ослабления характеристического рентгеновского излучения / Под ред. Н.И. Комяка. Л.: ЛНПО «Буревестник», 1978. 274 с.

## REFERENCES

1. Finnt V.V., e.a. *Rentgenoluminestsentnyi avtomat, obespechivaiushchii avtomaticheskoe izvlechenie liuminestsivuiushchikh almazov (X-ray fluorescent device that automatically extracts luminescent diamonds)*. SU patent 110341, 30 Jan 1957 (In Russian).
2. Volkov A.M., e.a. *Ustroistvo dlia separatsii mineralnogo syr'ia (Device for separating mineral ores)*. RU Patent 2069100, 20 Nov 1996. (In Russian).
3. Shliufman E.M. *Sposob razdeleniia mineralov po ikh liuministsentnym svoistvam i sposob opredeleniia poroga razdeleniia (Method of separating minerals based on their luminescent characteristics and a method of determining the threshold of separation)*. RU Patent 2004100806, 10 Jun 2005. (In Russian).
4. *Spravochnik po obogashcheniiu rud (Reference book of ores concentration)*, 1974, vol 2. Nedra, Moscow. 452 p.
5. *Improved Means for Sorting Grains*. GB Patent 941301, 25 Jan 1961.
6. Slight D.L. *Improvements in or relating to analysing and/or sorting arrangements*. GB Patent 1,103,591, 19 Feb 1965.
7. Marston G.F., e.a. *Improvements in or relating to sorting systems, especially for mineral sorting*. GB Patent 1135232, 16 Mar 1966.
8. Starchik L.P., Gorlov Iu.I., Tsoraev W.T., Gorlov Yu.W. *Ustroistvo dlia separatsii kuskov materialov (Device of separating lumps of material)*. SU patent 988377, 15 Jan 1983. (In Russian).
9. Starchik L.P., Gribov P.I., Onishchenko A.M., Lokshin A.G., Komova E.N. *Sposob separatsii uglia na lentochnom konve're (Method of coal separation using a belt conveyor)*. SU Patent 757192, 23 Aug 1980. (In Russian).
10. Kitov B.I., Mukhachyov Yu.S., Ryabov E.V., Shlufman E.M., Borzenko S.Yu. The use small section X-ray radiation in roentgen - radiometric separation of ores. *Proceedings of SPIE*, vol. 5943, pp. 127-131. DOI: 10.1117/12.637908
11. Kitov B.I., Mukhachev Yu.S. Detection of minerals by scattered X-ray radiation. *X-Ray Spec.*, 2010, vol. 39, pp. 32–36. DOI: 10.1002/xrs.1214
12. Kitov B.I., Mukhachev Yu.S., Ryabov E.V. Time lag as a characteristic feature in the identification of a moving object by a two-detector X-ray sensor. *X-Ray Spectr.*, 2016, vol. 45, pp. 48–53. DOI: 10.1002/xrs.2654
13. Shliufman E.M., e.a. *Sposob separatsii almazosoderzhashchikh materialov (Method of separating diamond-containing ores)*. RU Patent 2199108, 20 Feb 2003 (In Russian).
14. Marенков О.С., Комков Б.Г. *Tablitsy polnykh massovykh koeffitsientov oslableniia kharakteristicheskogo rentgenovskogo izlucheniia [Tables of full attenuation coefficients of characteristic X-ray radiation]* / Ed. by N.I. Komyaka. Leningrad : Burevestnik, 1978. 274 p. (In Russian).