

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ИЗМЕНЕНИЯ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИСТОЧНИКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАИБОЛЕЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ДВУХЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

© 2024 г. А.А. Комарский^{1,*}, С.Р. Корженевский^{1,**}, А.В. Пономарев^{1,***},
А.С. Чепусов¹, В.В. Криницин¹, О.Д. Красный¹

¹Институт электрофизики УрО РАН, Россия 620110 Екатеринбург, ул. Амундсена, 106

E-mail: *aakomarskiy@gmail.com; **korser1970@yandex.ru; ***avponomarev@ya.ru

Поступила в редакцию 29.07.2024; после доработки 08.08.2024

Принята к публикации 15.08.2024

Для детектирования близких по химическому составу и плотности веществ одним из перспективных методов неразрушающего контроля является двухэнергетическая обработка рентгеновских изображений. В частности, алгоритмы двухэнергетических преобразований могут применяться для поиска скрытых в пустой породе минералов. Метод является наиболее эффективным, когда правильно подобраны условия регистрации рентгеновских изображений и энергетические уровни. В работе проведено сравнение эффективности обработки изображений двухэнергетическим методом для трех случаев изменения спектрального состава: во-первых, в результате регулирования напряжения на рентгеновской трубке; во-вторых, при ослаблении низкоэнергетического излучения за счет применения медного фильтра; в-третьих, при комбинации данных способов. В качестве образцов для детектирования применяются частицы берилла, впрыснутые в измельченный мусковит. В работе применяется источник импульсного рентгеновского излучения, который обеспечивает генерацию импульсов излучения наносекундной длительности. Для способа регулирования энергии излучения за счет изменения пикового напряжения на рентгеновской трубке реализована оригинальная схема высоковольтного генератора. Применение рентгеновских источников данного типа обеспечивает возможность получения рентгеновских изображений движущихся объектов с высоким разрешением.

Ключевые слова: двухэнергетическая обработка изображений, импульсное рентгеновское излучение, тормозной спектр, рентгеновский детектор, сэндвич-детектор, берилл, минерал.

COMPARISON OF METHODS FOR CHANGING THE SPECTRUM OF RADIATION OF A PULSE X-RAY SOURCE TO DETERMINE THE MOST EFFECTIVE TWO-ENERGY IMAGE PROCESSING

© 2024 A.A. Komarskiy^{1,*}, S.R. Korzhenevskiy^{1,**}, A.V. Ponomarev^{1,***}, A.S. Chepusov¹,
V.V. Krinitzin¹, O.D. Krasniy¹

¹Institute of Electrophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,

Russia 620110 Yekaterinburg, Amundsen St. 106

E-mail: *aakomarskiy@gmail.com; **korser1970@yandex.ru; ***avponomarev@ya.ru

For detecting substances with similar chemical composition and density, one of the promising methods of non-destructive testing is dual-energy processing of X-ray images. In particular, dual-energy transformation algorithms can be used to search for minerals hidden within barren rock. This method is most effective when the conditions for registering X-ray images and energy levels are properly selected. This study compares the effectiveness of image processing using the dual-energy method for three cases of spectral composition variation: firstly, as a result of adjusting the voltage on the X-ray tube; secondly, by attenuating low-energy radiation through the use of a copper filter; and thirdly, by combining these two methods. Beryl particles embedded in ground muscovite are used as samples for detection. The study utilizes a pulsed X-ray radiation source that generates radiation pulses of nanosecond duration. An original high-voltage generator scheme has been implemented for the method of regulating radiation energy by changing the peak voltage on the X-ray tube. The use of X-ray sources of this type enables the acquisition of high-resolution X-ray images of moving objects.

Keywords: dual-energy image processing, pulsed X-ray radiation, bremsstrahlung spectrum, X-ray detector, sandwich detector, beryl, mineral.

DOI: 10.31857/S0130308224090044

ВВЕДЕНИЕ

Двухэнергетическая обработка рентгеновских изображений является современным методом анализа данных, полученных в результате неразрушающего контроля. Этот подход основывается на использовании двух различных энергетических спектров рентгеновского излучения и позволяет получать более детальную информацию о внутренней структуре объекта [1–4].

Двухэнергетическая обработка рентгеновских изображений может быть использована для обнаружения различных материалов, выявления дефектов и улучшения общего качества изображений. Метод применяется при диагностике различных заболеваний, а также в промышленных и научных приложениях [5—9].

Для корректировки спектрального состава применяются различные методы и их комбинации. Встречается применение двух независимых источников излучения, настроенных на разные напряжения [10]. Основная сложность заключается в том, что необходимо получить наборы данных при одинаковом оптическом ходе рентгеновских лучей через образец, т.е. необходимо полное попиксельное совпадение изображений, получаемых при разных энергиях. Используются рентгенопоглощающие фильтры, что позволяет отсечь излучение с низкой энергией. В частности, такой метод распространен в досмотровых системах, где применяют детекторы типа сэндвич [11—14]. Также встречаются детекторы, позволяющие регистрировать независимыми каналами рентгеновское излучение с разной энергией [15]. Однако такие детекторы пока применимы в ограниченных областях исследований, т.к. показывают высокую эффективность для невысоких энергий рентгеновского излучения.

В настоящее время интересной задачей является детектирование скрытых минералов в горных породах. Сложность заключается в том, что искомым объект и вмещающая порода имеют обычно близкий химический состав и плотность. На рентгеновских однопроекционных изображениях, полученных при тормозном спектре излучения, объекты практически не отличаются по контрасту. В данном случае для контрастного выделения минералов метод двухэнергетических преобразований демонстрирует свою эффективность. В наших работах, а также в работах зарубежных исследователей, показаны перспективы данного метода в этой области промышленности [16—21].

Для достижения высокой вероятности детектирования и успешного применения методов двухэнергетической обработки рентгеновских изображений на практике помимо минимизации шумов [22] необходимо учитывать несколько ключевых аспектов. Во-первых, важно обеспечить высокую резкость рентгеновских изображений объектов, которые движутся с большой скоростью, например, на конвейерной ленте. Во-вторых, следует оптимально разделить излучение по спектральному составу, чтобы повысить контраст и разрешение изображений, полученных в результате двухэнергетической обработки.

Для получения с высокой резкостью изображений движущихся объектов на высокой скорости мы в своих работах предложили использовать импульсные рентгеновские источники, основанные на полупроводниковых прерывателях тока (SOS — semiconductor opening switch) [23]. Импульсные рентгеновские источники с SOS позволяют получать мощные рентгеновские импульсы с длительностью порядка 10—50 нс при частоте следования до нескольких десятков кГц, что позволяет применять в разных научных и прикладных областях [24—26]. Мощность в одной вспышке достигает сотен МВт, что соответствует работе постоянного рентгеновского источника по времени порядка нескольких десятков мс. Высокое разрешение изображения движущегося объекта обеспечивается за счет того, что за короткую длительность рентгеновского импульса объект, движущийся со скоростью десятки метров в секунду, проходит лишь тысячные доли мм [27].

Одной из особенностей импульсных рентгеновских источников является использование двухэлектродной рентгеновской трубки с холодным катодом. В отличие от источников постоянного излучения, регулировка напряжения на рентгеновской трубке и тока в широких диапазонах для импульсных рентгеновских источников является сложной задачей. Стоит отметить, что изменение напряжения на рентгеновской трубке позволяет варьировать спектр рентгеновского излучения, что имеет важное значение при получении изображений, используемых для двухэнергетической обработки. Для изменения напряжения и, как следствие, спектрального состава излучения для импульсного рентгеновского источника в данной работе предложен метод, основанный на изменении напряжения первичного накопителя энергии, что приближает импульсный источник рентгеновского излучения по параметрам к источнику непрерывного действия с постоянным напряжением.

В данной работе проводится сравнение нескольких методов изменения спектрального состава рентгеновского излучения для получения контрастного выделения минералов на изображениях после двухэнергетической обработки. В качестве источника излучения применяется импульсный рентгеновский источник, для которого разработана система регулировки напряжения. В качестве объекта исследования применяются образцы берилла, помещенные во вмещающую породу мусковит. Эти образцы представляют не только практический, но и научный интерес, т.к. плотность и химический состав минералов и вмещающей породы имеют близкий химический состав и плотность.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Для определения максимального контраста частиц берилла, скрытых в мусковите, планируется сравнить три метода изменения спектра тормозного рентгеновского излучения, полученного на импульсном рентгеновском источнике. Первый способ получения двух отличающихся спектров будет реализован путем изменения амплитуды импульса напряжения. Во втором способе изменение спектрального состава будет осуществлено за счет использования рентгенопоглощающего фильтра при неизменной амплитуде импульса напряжения. В третьем способе излучение с низкой энергией будет получено при меньшем значении напряжения, а высокоэнергетическое излучение — при большем значении напряжения и использовании фильтра для удаления низкоэнергетической составляющей. Таким образом, в третьем способе спектральный состав будет модифицирован за счет изменения амплитуды напряжения в сочетании с использованием медного рентгенопоглощающего фильтра.

Импульсный рентгеновский источник с регулировкой амплитуды напряжения

Структурная схема генератора для получения высоковольтных импульсов напряжения с использованием индуктивного накопителя энергии с полупроводниковым прерывателем тока SOS-диода представлена на рис. 1. Конденсатор C_0 в первом контуре генератора заряжается до 600 В. После подачи импульса запуска на тиристор энергия из конденсатора C_0 передается в магнитный компрессор. Магнитный компрессор представляет собой последовательность контуров с трансформаторами (в некоторых случаях с дросселями) и конденсаторами, на выходе из которого происходит существенное увеличение амплитуды импульса напряжения при уменьшении его длительности. Если амплитуда импульса после прохождения первого трансформатора составляет около 15 кВ, а длительность порядка нескольких мкс, то на выходе максимальное напряжение достигает значения 70 кВ при длительности импульса около 100 нс. Полупроводниковый прерыватель тока обеспечивает резкий обрыв тока, что создает бросок напряжения на нагрузке. Таким образом, напряжение на нагрузке достигает значения выше 140 кВ при длительности 30 нс. В зависимости от энергии, запасаемой в конденсаторе C_0 , настройки контуров магнитного компрессора и применения достаточного количества полупроводниковых прерывателей тока значение напряжения может достигать 1 МВ. Отсутствие разрядников обострителей, применяемых в большинстве промышленных импульсных рентгеновских источников, дает возможность генерировать импульсы с частотой десятки кГц [28].

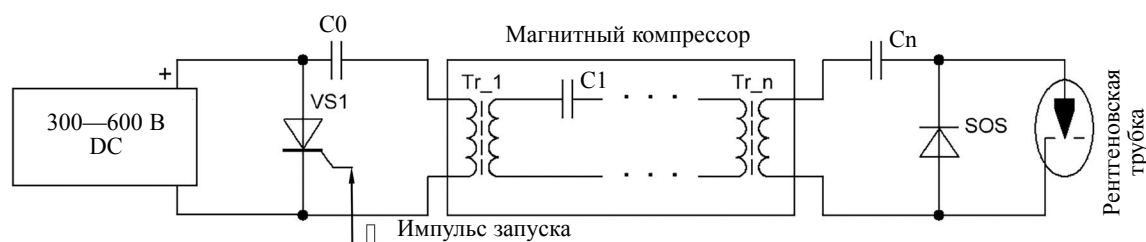


Рис. 1. Структурная схема импульсного рентгеновского источника.

Оптимальная настройка источника, применяемого в экспериментах, позволяет получить импульс напряжения на рентгеновской трубке с максимальным значением 145 кВ. Ток через трубку достигает значений 900 А. Для источников с индуктивным накопителем энергии и полупроводниковым прерывателем тока нами предложена электронная регулировка амплитуды выходного импульса напряжения. Регулировка может быть обеспечена за счет уменьшения напряжения первичного накопителя и, как следствие, запасаемой в нем энергии. Это приводит к снижению амплитуды тока накачки полупроводникового прерывателя, и к снижению значения максимального напряжения на рентгеновской трубке. С помощью источника постоянного напряжения можно в режиме реального времени изменять напряжение заряда конденсатора от 300 до 600 В. Экспериментально получена зависимость изменения выходного импульса напряжения от напряжения на первичном накопителе, показанная на рис. 2.

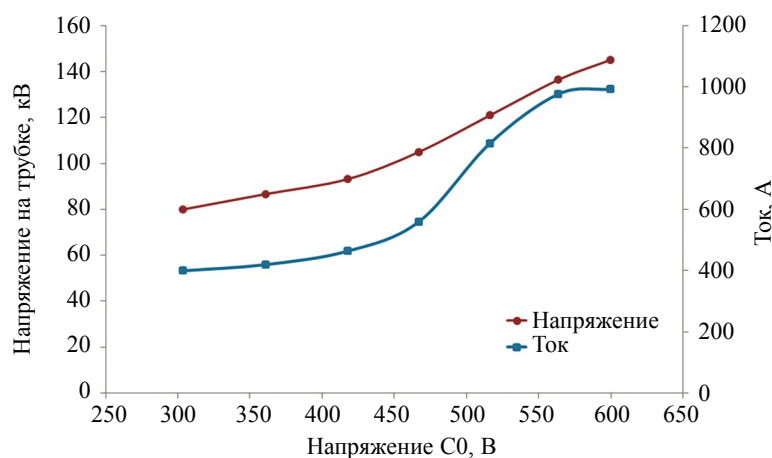


Рис. 2. Зависимость максимумов напряжений и токов импульсной рентгеновской трубки от напряжения на первичном накопителе.

При напряжениях на рентгеновской трубке ниже 100 кВ наблюдается нестабильная работа, воспроизводимость импульсов снижается. Применяются двухэлектродные импульсные рентгеновские трубки с холодным катодом. Эмиссия электронов с таких катодов происходит под воздействием высокой напряженности электрического поля [29]. Для экспериментов по получению двух отличающихся спектров излучения выбраны режимы генерации рентгеновских импульсов при максимальных значениях напряжений 145 и 105 кВ. На рис. 3 представлены соответствующие графики зависимостей импульсного тока рентгеновской трубки и импульсного напряжения на трубке от времени.

Для источника импульсного излучения с индуктивным накопителем энергии регулировка выходного импульса напряжения достигает 40 процентов от максимального значения. Это приближает импульсный источник к источникам непрерывного действия, в которых есть возможность изменять ток накала нити катода, что приводит к изменению мощности излучения, и изменять напряжение на трубке, что ведет не только к изменению мощности излучения, но спектрального состава.

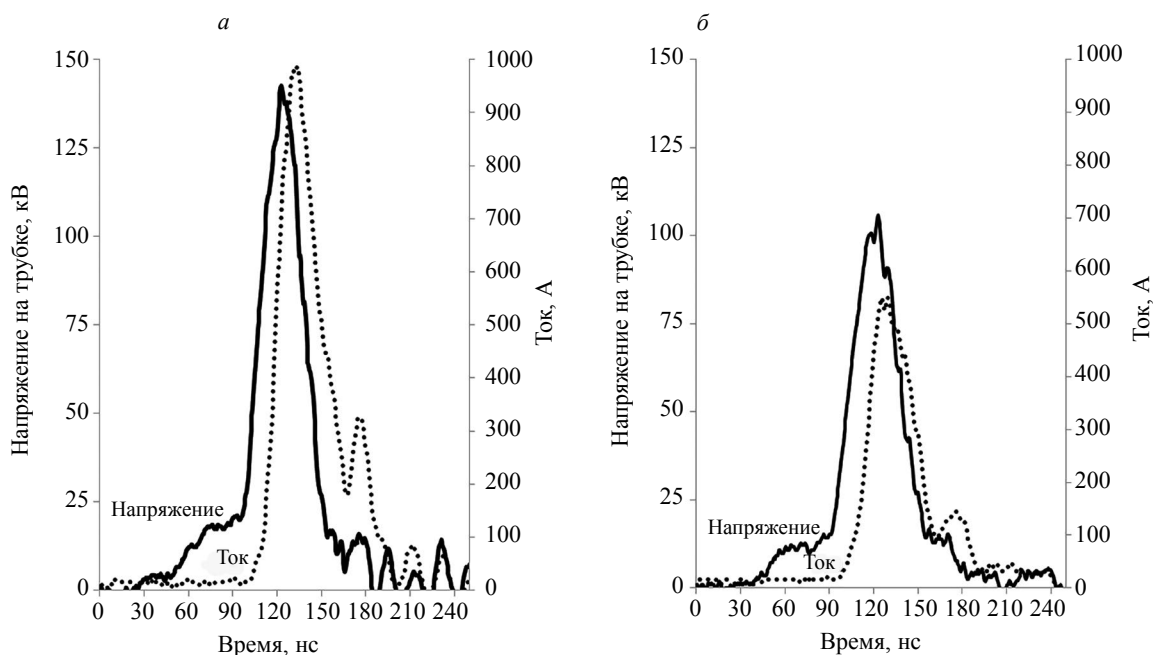


Рис. 3. Осциллограммы импульсов напряжения и тока: максимального напряжения 145 кВ (а); максимальное напряжение 105 кВ (б).

Получение двухэнергетических изображений при разных спектральных составах излучения

Двухэнергетическая обработка рентгеновских изображений зависит в большой степени от спектрального состава излучения. Необходимо получать 2 изображения, для одного из которых выше доля низкоэнергетических квантов, а для другого выше доля высокоэнергетических квантов. В идеальном случае необходимо моноэнергетическое излучение. Однако для практических целей целесообразно использовать рентгеновские источники, генерирующие излучение с непрерывным тормозным спектром.

Для данных параметров импульсов напряжения и тока рассчитаны спектры излучения. Как видно из графиков (см. рис. 2), при расчете спектра излучения импульсного рентгеновского источника необходимо учитывать изменение значений тока и напряжения от времени. Эмиссия электронов с холодного катода имеет пороговое значение, т.е. начинается, когда напряжение достигает определенных значений. За счет этих факторов спектр излучения импульсного источника имеет отличие от источника непрерывного излучения: доля квантов излучения с низкой энергией выше в случае применения источника импульсного излучения, чем при использовании источника постоянного действия при одинаковых значениях максимальных напряжений. Расчеты спектров выполнены, исходя из полученных зависимостей импульсов тока и напряжения от времени. На рис. 4 приводятся рассчитанные спектры излучения. Изменение максимального значения импульса напряжения приводит к изменению спектра импульсного источника излучения.

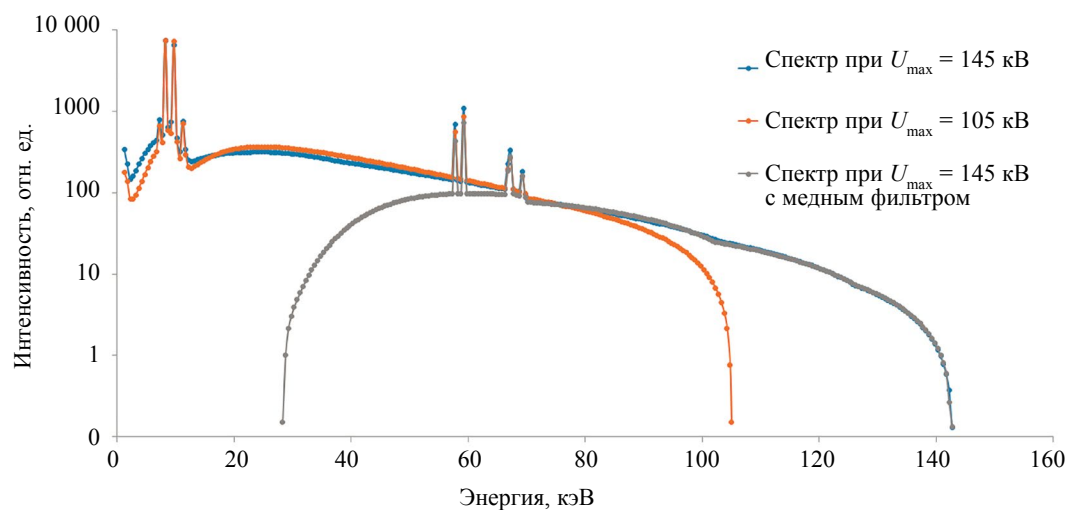


Рис. 4. Спектры излучения для импульсного рентгеновского источника при максимальном напряжении 145 кВ, 105 кВ и при напряжении 145 кВ с использованием медного фильтра.

Также приводится спектр, рассчитанный для случая, когда импульсное излучение с амплитудой напряжения 145 кВ прошло через медный фильтр толщиной 0,5 мм. В данном случае по спектру видно, что низкоэнергетическое излучение поглощается фильтром. Интенсивность приводится в относительных единицах, чтобы нагляднее представить изменение спектральных составов для данных случаев. Спектр, полученный при максимальном напряжении и с применением медного фильтра, нормирован по высокоэнергетической составляющей относительно спектра, полученного при 145 кВ без фильтра. Это позволяет показать долю отсекаемых низкоэнергетических квантов. Спектр, полученный при максимальном напряжении на трубке 105 кВ, нормирован по низкоэнергетической части спектра относительно спектра, полученного при максимальном напряжении 145 кВ без применения медного фильтра. Это позволяет показать отличие в высокоэнергетической составляющей.

Комбинации излучений данных спектральных составов выбраны для получения пар изображений и дальнейшей двухэнергетической обработки. Введем обозначения для излучений представленных спектров. Излучение, полученное без фильтров при максимальном напряжении на трубке 145 кВ ($E[145\text{kV}]$); излучение, полученное при максимальном напряжении на трубке после прохождения медного фильтра 0,5 мм ($E[145\text{kV_Cu}]$); излучение при напряже-

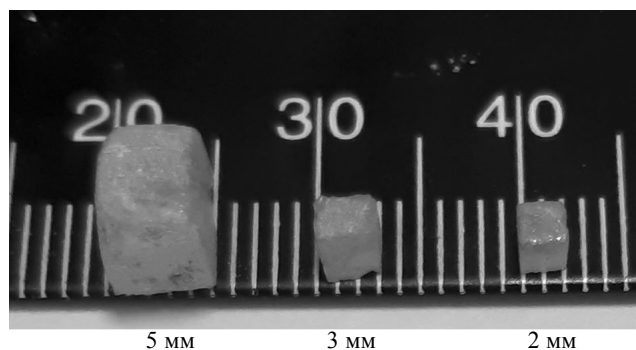


Рис. 5. Фото частиц берилла с прямоугольными гранями.

нии на рентгеновской трубке 105 кВ, полученное после снижения напряжения на конденсаторе первого контура генератора (E[105kV]).

Для исследования изготовлено две тонкостенные прямоугольные формы с полостями 5 мм, куда впрессован измельченный мусковит фракцией 0,1—1 мм с отдельными частицами мусковита размерами до 4 мм, а в одну из форм также помещены частицы берилла, близкие к кубической форме, с размерами ребер 2, 3 и 5 мм, показанные на рис. 5.

Изображения получены при излучении со спектрами, описанными выше. В качестве образцов взята как одна форма толщиной 5 мм с частицами берилла в мусковите, так и обе формы, наложенные друг на друга, в этом случае толщина составляет 10 мм.

Исходные рентгеновские проекционные изображения, полученные при данных спектральных составах, представлены на рис. 6.

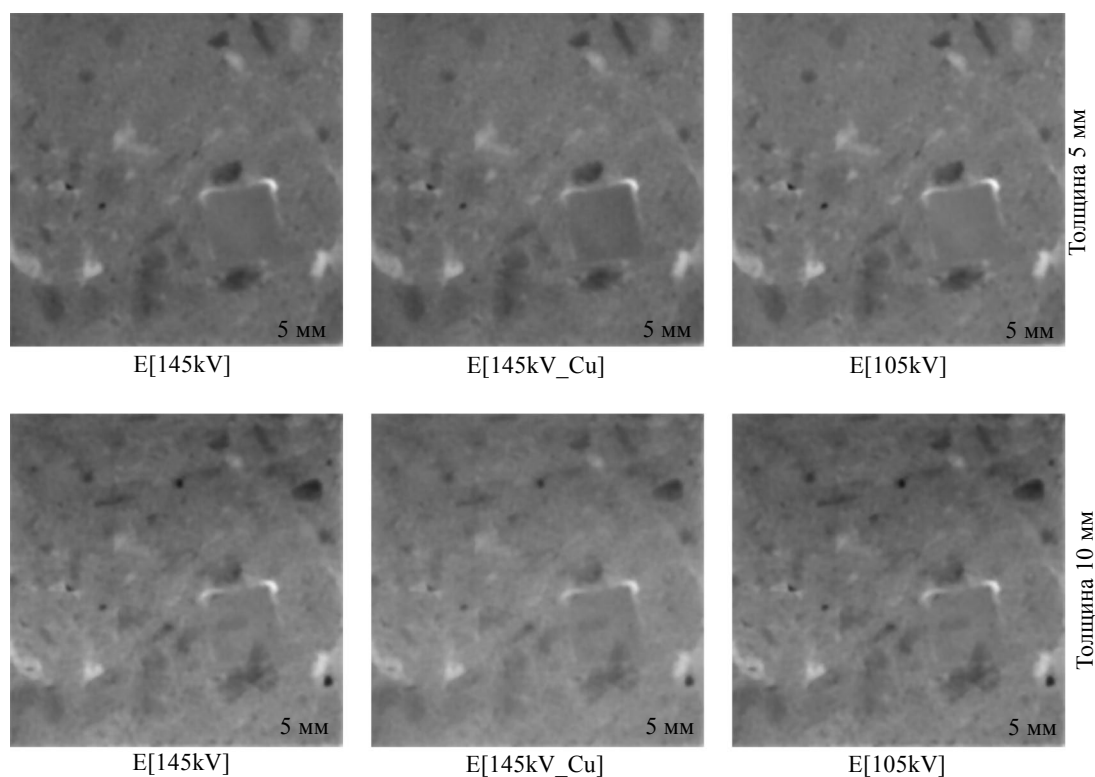


Рис. 6. Рентгеновские изображения объектов исследования, полученные при разных спектральных составах.

Дозы излучения для каждого снимка экспериментально выбраны таким образом, чтобы интенсивность засветки детектора соответствовала 2/3 от максимального значения его динами-

ческого диапазона. В качестве приемника рентгеновского излучения выбран плоскочувствительный детектор VIVIX-V 2323D с размерами 1280×1280 пикселей, который имеет сцинтиллятор CsI, размер пикселя составляет 185 мкм, АЦП — 16 бит.

Как видно из рис. 6, частицы берилла практически неразличимы на фоне измельченного мусковита. Мусковит в виде небольших частиц представляет собой темные включения на изображении. Выделяется самый большой берилл с гранью 5 мм за счет того, что вокруг него имеются пустоты, хотя значения яркости пикселей, относящихся к частицам берилла, близки к значениям яркости пикселей измельченного мусковита.

Двухэнергетические преобразования изображений, полученных при разных спектральных составах

Методы двухэнергетической обработки основаны на том, что поглощение рентгеновского излучения разными веществами зависит от энергии излучения. В данном эксперименте сложность заключается в том, что необходимо детектировать вещества, имеющие близкий химический состав, плотность и, как следствие, близкие рентгенопоглощающие свойства. Алгоритм двухэнергетической обработки, который используется в данном исследовании, описан в нашей работе [20]. Он основан на различии абсорбции рентгеновского излучения при разных энергетических спектрах. Алгоритм позволяет повысить контраст между близкими веществами с незначительным различием по атомному номеру. В результате, на обработанных изображениях вмещающая порода вне зависимости от плотности и размеров частиц имеет близкую яркость, а искомые частицы берилла контрастно выделяются на их фоне.

Для двухэнергетических преобразований выбраны пары изображений, полученных при разных спектрах, которые показаны на рис. 6. Двухэнергетическая обработка проведена независимо для образцов толщиной 5 и 10 мм (рис. 7).

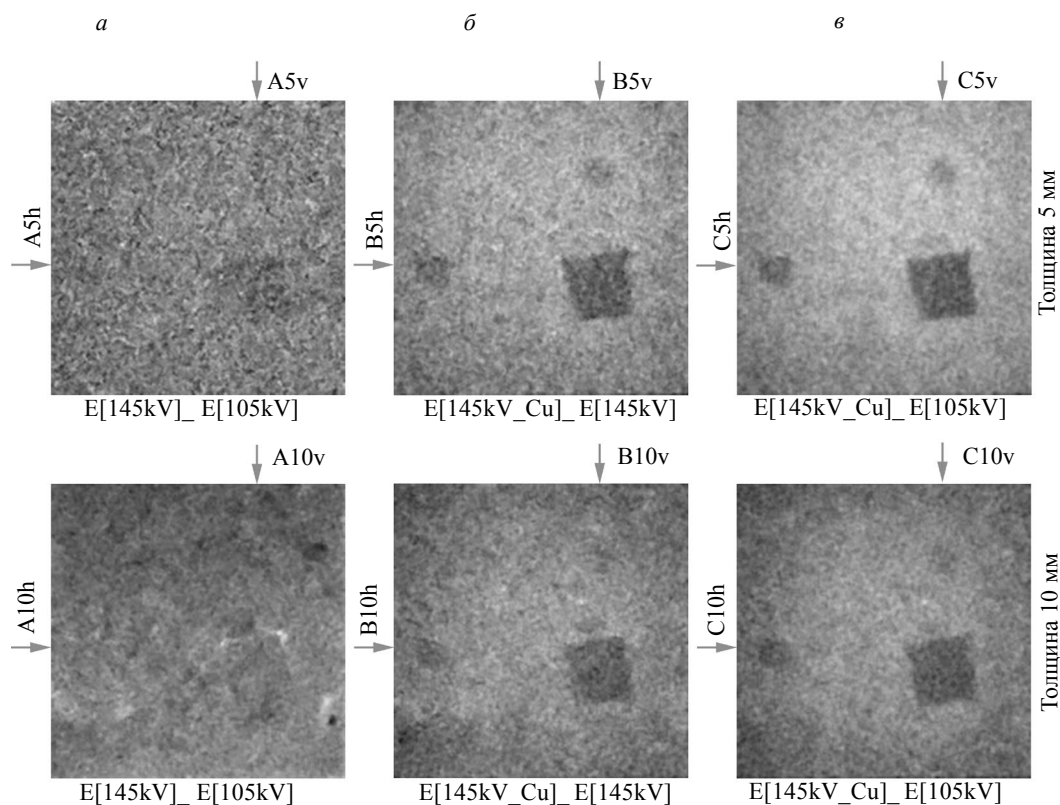


Рис. 7. Двухэнергетическая обработка при сочетании пар изображений, полученных при разных энергетических спектрах излучения. Частицы берилла проявляются как более темные включения (на изображениях имеется 3 частицы берилла, самая крупная имеет грань 5 мм, частица слева — 3 мм, частица сверху — 2 мм). В обозначениях направлений, указанных стрелками, цифра — это толщина образца (5 и 10 мм); v, h — вертикальное и горизонтальное направление соответственно, по которому получено распределение интенсивности яркости пикселей в дальнейшем.

Для первой пары выбраны изображения с высокой энергией $E[145\text{kV}]$ и низкой энергией $E[105\text{kV}]$. Результат работы алгоритма представлен на рис. 7а. Вторая пара изображений для двухэнергетической обработки выбрана при высокой энергии $E[145\text{kV_Cu}]$ и низкой энергии $E[145\text{kV}]$, т.е. при одном максимальном напряжении, но с применением фильтра, отсекающим низкоэнергетическое излучение. Обработанные изображения для толщин 5 и 10 мм показаны на рис. 7б. В качестве последней пары взяты изображения, полученные при высокой энергии излучения $E[145\text{kV_Cu}]$ и при низкой энергии $E[105\text{kV}]$. Результат работы алгоритма показан на рис. 7в.

По результатам двухэнергетической обработки визуально можно отметить, что регулировка спектрального состава, выполненная только за счет изменения максимального напряжения на рентгеновской трубке, дает наихудший результат: при толщине образца 5 мм из трех частиц низкий контраст имеет только частица берилла 5 мм, другие частицы не проявляются (см. рис. 7а сверху), для толщины 10 мм все частицы берилла неразличимы (см. рис. 7а снизу). Для двух других методов разделения спектрального состава при толщине образца 5 мм все частицы берилла с гранями 2, 3, 5 мм имеют значительный контраст относительно вмещающей породы (см. рис. 7б, 7в сверху), при толщине образца 10 мм контраст частиц берилла ухудшается, частица с размером грани 2 мм практически неразличима с фоном (см. рис. 7б снизу).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнения методов получения двухэнергетических изображений проведено на основе оценки контраста частиц берилла относительно мусковита разного фракционного состава и плотности. Для двухэнергетических изображений построены профили распределения интенсивности вдоль направлений, указанных стрелками на рис. 7. По изображениям видно, что имеется градиент распределения яркости, т.е. центральная часть изображений имеет более светлую область относительно периферии. При построении профилей интенсивности это учтено.

На рис. 8 представлены профили распределения интенсивности пикселей для обработанных при разных спектрах излучения изображений толщиной 5 мм.

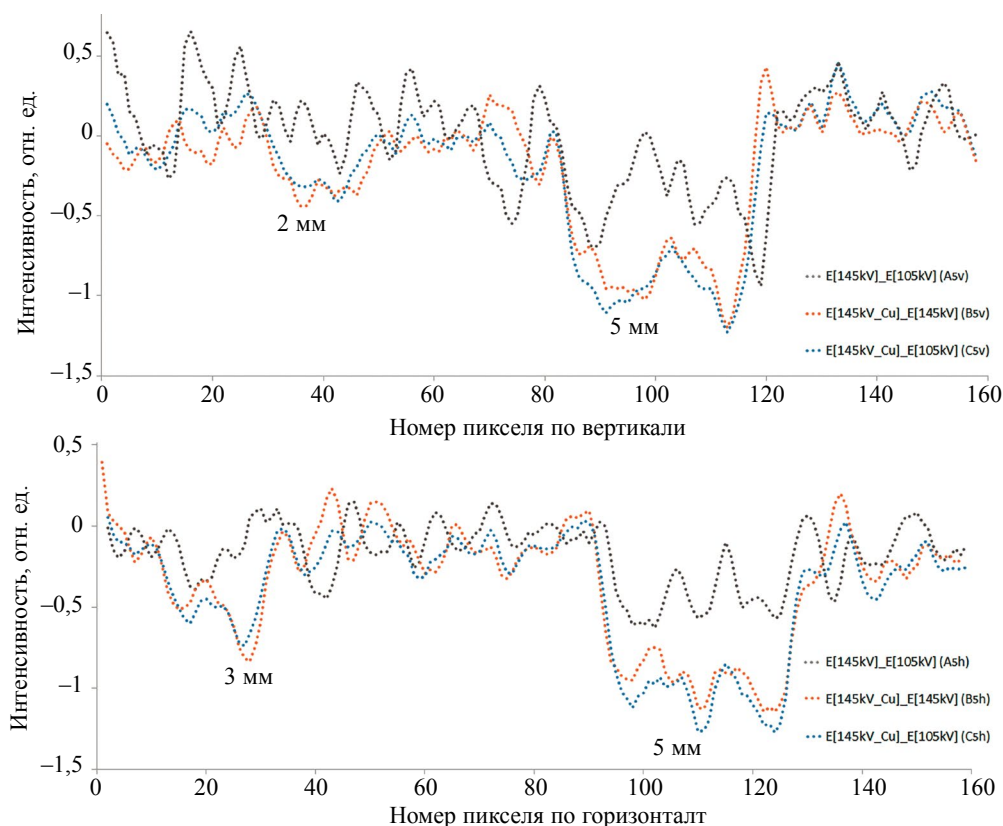


Рис. 8. Профили интенсивности пикселей двухэнергетических изображений для образца толщиной 5 мм, направления распределений показаны стрелками на рис. 7 сверху; 2, 3 и 5 мм — это размеры граней частиц, которые попали в профили распределений.

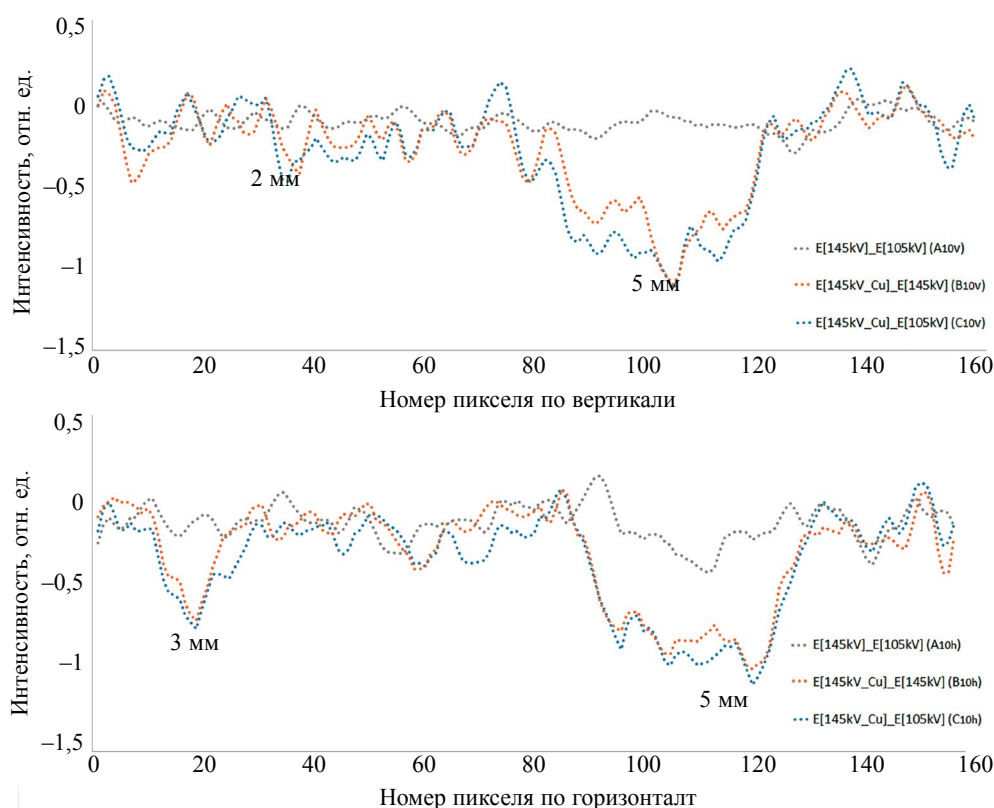


Рис. 9. Профили интенсивности пикселей двухэнергетических изображений для образца толщиной 10 мм, направления распределений показаны стрелками на рис. 7 снизу; 2, 3 и 5 мм — это размеры граней частиц берилла, которые попали в профили распределений.

В распределения интенсивности пикселей вдоль вертикальных направлений, обозначенных на рис. 7 стрелками A5v, B5v, C5v, попадают частицы берилла с размерами граней 2 и 5 мм. В распределения интенсивностей пикселей вдоль горизонтальных направлений, обозначенных на рис. 7 стрелками A5h, B5h, C5h, попадают частицы берилла с размерами граней 3 и 5 мм.

На рис. 9 представлены профили распределения интенсивности для обработанных изображений при разных спектрах излучения для образцов толщиной 10 мм. Профили построены по аналогии с рис. 8 вдоль вертикальных и горизонтальных направлений, обозначенных стрелками A10v, B10v, C10v (вертикальные направления) и A10h, B10h, C10h (горизонтальные направления) на рис. 7.

Интенсивность показана в относительных единицах, по графикам сложно сделать однозначный вывод, какой метод изменения спектрального состава наиболее эффективен при двухэнергетической обработки. Очевидно, что худшим является метод, когда спектры разделяются только за счет изменения максимального напряжения на трубке.

Для точной оценки найдены отношения сигнал/шум SNR по следующей формуле:

$$\text{SNR} = \frac{I_s^2}{I_n^2}, \quad (1)$$

где I_s — среднеквадратичное значение интенсивности сигнала; I_n — среднеквадратичное значение интенсивности шума.

Результаты расчетов SNR для трех способов изменения спектрального состава представлены в табл. 1.

По результатам, указанным в табл. 1, можно заметить, что для образца толщиной 5 мм отношение значений сигнал/шум выше, чем для образца толщиной 10 мм. Это вполне объяснимо тем, что отношение искомого вещества относительно толщины объекта исследования также выше для образца толщиной 5 мм.

Стоит отметить, что для образца толщиной 5 мм частица берилла с размером грани 2 мм имеет больший контраст на обработанном двухэнергетическом изображении, полученном

при изменении спектра только за счет применения медного фильтра ($E[145_Cu_E[145]]$), $SNR = 4,4$, тогда как при корректировке спектра за счет использования медного фильтра и изменения напряжения на трубке ($E[145_Cu_E[105]]$) контраст оказался ниже, а $SNR = 3,5$. Для частицы берилла с размером грани 3 мм при этих двух методах наблюдается меньшее отличие в контрасте: $SNR = 10,4$ при $E[145_Cu_E[145]]$, $SNR = 9,9$ при $E[145_Cu_E[105]]$. Для крупной частицы с гранью 5 мм контраст уже выше на изображении, полученном при регулировке спектров за счет применения фильтра и изменения напряжения на трубке: $SNR = 32,7$ при $E[145_Cu_E[105]]$, тогда как $SNR = 24,2$ при спектрах $E[145_Cu_E[145]]$. На двухэнергетическом изображении, полученном в результате обработки снимков, когда изменение спектра излучения основано только на регулировке напряжения на рентгеновской трубке, частицы берилла малоконтрастны, интенсивность близка к шуму. Различима только частица размером 5 мм в образце толщиной 5 мм, $SNR = 3,5$, слабый контраст можно заметить визуально на рис. 7 (верхнее изображение слева).

При толщине образца 10 мм для всех размеров частиц берилла наблюдается наиболее высокий контраст для двухэнергетических изображений, полученных в результате изменения спектров с помощью регулировки амплитуды импульса напряжения и применения медного фильтра. Для детектирования мелких частиц при толщине образца 10 мм приемлем только метод двухэнергетической обработки изображений, полученных при двух спектрах излучения: низкая энергия при напряжении на трубке 105 кВ, высокая энергия при напряжении на трубке 145 кВ и с установленным медным фильтром.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Успешно реализован метод изменения напряжения на импульсном рентгеновском источнике с индуктивным накопителем энергии и полупроводниковым прерывателем тока за счет изменения напряжения на первичном накопителе энергии. Регулировка напряжения на первичном накопителе приводит к изменению максимального напряжения в пределах от 105 до 145 кВ. Это позволяет получать разный спектральный состав тормозного рентгеновского излучения, что является важнейшим параметром при двухэнергетической обработке рентгеновских изображений. В свою очередь, применение импульсных рентгеновских источников может позволить повысить разрешение изображений, получаемых в том числе для двухэнергетической обработки, т.к. за наносекундную длительность импульса движущийся объект проходит крайне малое расстояние, и в таком случае его можно считать практически неподвижным. Реализация регулировки напряжения приближает параметры импульсного рентгеновского источника к источнику непрерывного действия.

Проведено сравнение методов изменения спектрального состава излучения для получения максимального контраста при двухэнергетической обработке для объектов с близким составом и плотностью. Получение излучения высокой и низкой энергий для детектирования частиц берилла во вмещающей породе методом двухэнергетической обработки осуществлено тремя способами. В первом способе низкая энергия получена при максимуме напряжения на рентгеновской трубке 105 кВ, высокая энергия получена при максимальном напряжении на трубке 145 кВ. Во втором способе максимальное напряжение на трубке составляет 145 кВ, низкоэнергетическое излучение получено без фильтра, высокоэнергетическое излучение получено при использовании рентгенопоглощающего медного фильтра 0,5 мм. В третьем случае низкая энергия получена при максимальном напряжении на рентгеновской трубке 105 кВ без применения фильтров, а высокая энергия получена при максимальном напряжении 145 кВ и применении медного фильтра 0,5 мм.

Общий вывод можно сделать следующий, несмотря на то, что разделение энергий наиболее эффективно происходит, когда низкая энергия излучения получена при максимальном напряжении на трубке 105 кВ, а высокая — при напряжении 145 кВ и применении медного фильтра, контраст частиц берилла с размером 2—3 мм в образце толщиной 5 мм оказывается выше при двухэнергетической обработке для метода разделения энергий только за счет фильтрации рентгеновского излучения при максимальном напряжении 145 кВ. Для больших толщин объекта исследования метод изменения напряжения и использования рентгенопоглощающего фильтра является эффективнее. В некоторых случаях разделение спектров получают за счет изменения напряжения на рентгеновской трубке. Однако эксперименты показывают, что этот метод оказывается малоэффективным для веществ с близкими рентгенопоглощающими свойствами. Он может быть применим только в ограниченных случаях, например, для контрастирования материалов, значительно отличающихся по плотности и атомным номерам, таких как костная структура и мягкие ткани. Эти результаты подтверждаются расчетом SNR для частиц берилла, введенных в породу мусковит, данные приведены в табл. 1.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-79-10013); <https://rscf.ru/en/project/22-79-10013>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Blake G.M., Fogelman I. Technical principles of dual energy X-ray absorptiometry // *Seminars in Nuclear Medicine*. 1997. V. 27. No. 3. P. 210—228. DOI: 10.1016/S0001-2998(97)80025-6
2. Ramos R.M.L., Arman J.A., Galeano N.A., Hernandez A.M., Gomez J.M.G., Molinero J.G. Dual energy X-ray absorptiometry: Fundamentals, methodology, and clinical applications // *Radiología (English Edition)*. 2012. V. 54. No. 5. P. 410—423. DOI: 10.1016/j.rxeng.2011.09.005
3. Rebuffel V., Dinten J.M. Dual-energy X-ray imaging: benefits and limits. Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. 2007. V. 49. P. 589—594. DOI: 10.1784/insi.2007.49.10.589
4. Johnson T.R. Dual-energy CT: general principles // *American Journal of Roentgenology*. 2012. V. 199. No. 5. P. 3—8. DOI: 10.2214/AJR.12.9116
5. Abbasi S., Mohammadzadeh M., Zamzamin M. A novel dual high-energy X-ray imaging method for materials discrimination // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*. 2019. V. 930. P. 82—86. DOI: 10.1016/j.nima.2019.03.064
6. Kanno I., Yamashita Y., Kimura M., Inoue F. Effective atomic number measurement with energy-resolved X-ray computed tomography // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*. 2015. V. 787. P. 121—124. DOI: 10.1016/j.nima.2014.11.072
7. Iovea M., Neagu M., Dului O.G., Oaie G., Szobotka S., Mateiasi G. A Dedicated on-board dual-energy computer tomograph // *J. Nondestruct. Eval.* 2011. V. 30. P. 164—171. DOI: 10.1007/s10921-011-0104-x
8. Komarskiy A.A., Korzhenevskiy S.R., Komarov N.A. Detection of plastic articles behind metal layers of variable thickness on dual-energy X-ray images using artificial neural networks // *AIP Conf. Proc.* 2023. V. 2726. No. 1. P. 020012. DOI: 10.1063/5.0134249
9. Yalçın O., Reyhancan İ.A. Detection of explosive materials in dual-energy X-Ray security systems // *Nuclear Inst. And Methods in Physics Research. A*. 2022. V. 1040. No. 1. P. 167265. DOI: 10.1016/j.nima.2022.167265
10. Li B., Yadava G., Hsieh J. Quantification of head and body CTDI(VOL) of dual-energy x-ray CT with fast-kVp switching // *Medical Physics*. 2011. V. 38. No. 5. P. 2595—2601. DOI: 10.1118/1.3582701
11. Alvarez R.E. Invertibility of the dual energy x-ray data transform // *Medical Physics*. 2019. V. 46. No. 1. P. 93—103. DOI: 10.1002/mp.13255
12. Udod V.A., Osipov S.P., Nazarenko S.Yu. Algorithm for Optimizing the Parameters of Sandwich X-ray Detectors // *X-ray Methods*. 2023. V. 59. P. 359—373. DOI: 10.1134/S1061830923700298
13. Osipov S.P., Udod V.A., Wang Y. Identification of materials in X-Ray inspections of objects by the dual-energy method // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2017. V. 53. No. 8. P. 568—587. DOI: 10.1134/S1061830917080058
14. Macdonald R. Design and implementation of a dual-energy X-ray imaging system for organic material detection in an airport security application // *Proceedings of the SPIE*. 2001. V. 4301. P. 31—41. DOI: 10.1117/12.420922
15. Rosenfeld A., Alnaghy S., Petasecca M., Cutajar D., Lerch M., Pospisil S., Giacometti V., Schulte R., Rosso V., Würfl M., Granja C., Martišiková M., Parodi K. Medipix detectors in radiation therapy for advanced quality-assurance // *Radiation Measurements*. 2020. V. 130. P. 106211. DOI: 10.1016/j.radmeas.2019.106211
16. Bauer C., Wagner R., Orberger B., Firsching M., Ennen A., Pina C.G., Wagner C., Honarmand M., Nabatian G., Monsef I. Potential of Dual and Multi Energy XRT and CT Analyses on Iron Formations // *Sensors*. 2021. V. 21. P. 2455. DOI: 10.3390/s21072455
17. Tonai S., Kubo Y., Tsang M.Y., Bowden S., Ide K., Hirose T., Kamiya N., Yamamoto Y., Yang K., Yamada Y. A New Method for Quality Control of Geological Cores by X-Ray Computed Tomography: Application in IODP Expedition 370 // *Frontiers in Earth Science*. 2019. V. 7. P. 1—13. DOI: 10.3389/feart.2019.00117
18. Ghorbani Y., Becker M., Petersen J., Morar S.H., Mainza A., Franzidis J.-P. Use of X-ray computed tomography to investigate crack distribution and mineral dissemination in sphalerite ore particles // *Minerals Engineering*. 2011. V. 24. No. 12. P. 1249—1257. DOI: 10.1016/j.mineng.2011.04.008
19. Zhang Yi.R., Yoon N., Holuszko M.E. Assessment of Sortability Using a Dual-Energy X-ray Transmission System for Studied Sulphide Ore // *Minerals*. 2021. V. 11. No. 5. P. 490. DOI: 10.3390/min11050490
20. Komarskiy A., Korzhenevskiy S., Ponomarev A., Chepusov A. Dual-Energy Processing of X-ray Images of Beryl in Muscovite Obtained Using Pulsed X-ray Sources // *Sensors*. 2023. V. 23. No. 9. P. 4393. DOI: 10.3390/s23094393
21. Firsching M., Bauer C., Wagner R., Ennen A., Ahsan A., Kampmann T.C., Tiu G., Valencia A., Casali A., Atenas M.G. REWO-SORT Sensor Fusion for Enhanced Ore Sorting: A Project Overview / In *Proceedings of the Procemin-Geomet Conference 2019. Chile*. 2019. P. 1—9.
22. Udod V.A., Osipov S.P., Wang Y. Estimating the influence of quantum noises on the quality of material identification by the dual-energy method // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2018. V. 54. No. 8. P. 585—600. DOI: 10.1134/S1061830918080077

23. *Rukin S.N., Tsyranov S.N.* Subnanosecond breakage of current in high-power semiconductor switches // *Technical Physics Letters*. 2000. V. 26. No. 9. P. 824—826. DOI: 10.1134/1.1315507
24. *Korzhenevsky S.R., Bessonova V.A., Komarsky A.A., Motovilov V.A., Chepusov A.S.* Selection of electrohydraulic grinding parameters for quartz ore // *Journal of Mining Science*. 2016. V. 52. No. 3. P. 493—496. DOI: 10.1134/S1062739116030706
25. *Rukin S.N.* Pulsed power technology based on semiconductor opening switches: A review // *Review of Scientific Instruments*. 2020. V. 91. No. 1. P. 011501. DOI: 10.1063/1.5128297
26. *Komarskii A.A., Baiankin S.N., Mozharova I.E., Kuznetsov V.L., Korzhenevskii S.R.* Use of diagnostic nanosecond X-ray pulse apparatuses // *Vestnik rentgenologii i radiologii*. 2015. V. 2. P. 42—46.
27. *Komarskiy A.A., Korzhenevskiy S.R., Ponomarev A.V., Komarov N.A.* Pulsed X-ray source with the pulse duration of 50ns and the peak power of 70MW for capturing moving objects. // *Journal of X-Ray Science and Technology*. 2021. V. 29. No. 4. P. 567—576. DOI: 10.3233/XST-210873
28. *Vasil'ev P.V., Lyubutin S.K., Pedos M.S., Ponomarev A.V., Rukin S.N., Slovikovskii B.G., Timoshenkov S.P., Cholakh S.O.* A nanosecond SOS generator with a 20-kHz pulse repetition rate // *Instrum. Exp. Tech.* 2010. V. 53. P. 830—835. DOI: 10.1134/s0020441210060114
29. *Chepusov A., Komarskiy A., Kuznetsov V.* The influence of ion bombardment on emission properties of carbon materials // *Applied Surface Science*. 2014. V. 306. P. 94—97. DOI: 10.1007/s10812-013-9747-y
-