

Метод получения и двухэнергетической обработки рентгеновских синограмм для выделения малококонтрастных веществ на КТ при использовании источников с непрерывным спектром излучения

А.А. Комарский¹, С.Р. Корженевский¹, В.В. Криницин¹

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

Аннотация

В статье предложен и реализован метод двухэнергетической КТ, позволяющий контрастно выделить одно вещество относительно другого, для случаев, когда вещества имеют близкие химические составы и плотности. В данном случае прямое применение стандартных методов двухэнергетической КТ не позволяет однозначно провести идентификацию искомого вещества в силу того, что рентгеновские источники излучают не монохроматическое излучение, и изменение толщины объектов приводит к существенному поглощению низкоэнергетической части спектра излучения. Это нарушает пропорциональность поглощения веществами излучения разного энергетического состава. В статье обосновано использование конструктивного решения для снижения влияния переменной толщины объектов на поглощение низкоэнергетического рентгеновского излучения. Это позволяет проводить двухэнергетическое преобразование не КТ-срезов, а преобразование синограмм, полученных при разных энергетических спектрах рентгеновского излучения. После реконструкции двухэнергетической синограммы на КТ-срезе однозначно выделяется искомое вещество. В работе показана успешная реализация данного метода на примере частиц берилла, вмещенных в мусковит. На КТ-срезах, полученных после реконструкции двухэнергетических синограмм, контрастно выделены частицы берилла с размерами от 1 мм при общей толщине образца 30 мм.

Ключевые слова: двухэнергетическая КТ, обработка изображений, двухэнергетическая обработка, синограмма, рентгеновское изображение, берилл.

Цитирование: Комарский, А.А. Метод получения и двухэнергетической обработки рентгеновских синограмм для выделения малококонтрастных веществ на КТ при использовании источников с непрерывным спектром излучения / А.А. Комарский, С.Р. Корженевский, В.В. Криницин // Компьютерная оптика. – 2025. – Т. 49, № 2. – С. 282-291. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1485.

Citation: Komarskiy AA, Korzhenevskiy SR, Krinitsin VV. Method for obtaining and dual-energy processing of X-ray sinograms for identifying low-contrast substances in CT using sources with a continuous radiation spectrum. Computer Optics 2025; 49(2): 282-291. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1485.

Введение

Двухэнергетическая компьютерная томография (КТ) – тип КТ-исследований, в котором используется рентгеновское излучение разных энергий для создания внутренних изображений объектов исследования [1 – 4]. Это позволяет добиваться повышения в различении внутренней структуры объекта исследования, например, в медицине улучшить визуализацию внутренней структуры мягких тканей и патологий.

Получение излучения с разными энергиями для двухэнергетической КТ представляет сложность как в техническом аспекте, так и при разработке алгоритмов обработки изображений. Техническая сложность заключается в необходимости получить абсолютно идентичные наборы данных при двух различных энергиях, что требует обеспечения полного пиксельного совпадения изображений. Сложность при разработке алгоритмов обработки двухэнергетических изображений связана с тем, что источники излучения не являются моноэнергетическими, следова-

тельно, необходимо учитывать спектр тормозного излучения и его поглощение. По этим причинам двухэнергетическая КТ, предложенная еще в 70-е годы Г.Н. Хаунсфилдом [5], практическое применение получила только после 2000-х годов благодаря высокому технологическому развитию.

Методика получения изображений для двухэнергетической КТ предполагает получение изображений на двух разных уровнях энергии рентгеновских лучей одновременно или последовательно. Это можно сделать, используя две рентгеновские трубки с разными настройками энергии [6] или быстро переключая уровень энергии одной рентгеновской трубки [7]. Полученные изображения затем можно обработать для создания двухэнергетических изображений, которые предоставят более подробную информацию о составе тканей и материалов в объекте исследования.

В то время как при традиционной одноэнергетической КТ создается единый набор изображений, данные, полученные в результате двухэнергетического рентгеновского излучения, могут использоваться

для реконструкции множества типов изображений. Могут быть получены изображения разложения материала или удаления веществ с известными характеристиками ослабления, таких как йод, кальций или мочева кислота, виртуальные бесконтрастные изображения (удаленный йод), концентрация йода (йодные карты), подавление кальция (удаление кальция), подавление мочевой кислоты (удаление мочевой кислоты), карты электронной плотности, карты эффективного атомного номера [8, 9].

Рентгеновские кванты в основном взаимодействуют с веществом посредством фотоэлектрического эффекта и комптоновского рассеяния. Эти эффекты лежат в основе при получении двухэнергетических КТ-изображений в медицине [10]. Поглощение в веществе рентгеновских фотонов меньших энергий в основном связано с фотоэффектом, поглощения при фотоэффекте зависят от химического состава веществ. Поглощение в веществе рентгеновских фотонов с высокими энергиями вызвано в большей степени эффектом Комптона и зависит от плотности вещества.

Двухэнергетические преобразования показывают хорошую эффективность, когда исследуемые объекты имеют отличающийся химический состав, например, мягкие ткани и костная структура, а также разную плотность. Нередко вводят контрастные вещества для того, чтобы увеличить разницу при поглощении рентгеновского излучения близкими по рентгенопоглощающим свойствам веществами [11 – 13].

Технология двухэнергетической КТ также является перспективной для неразрушающего контроля и исследований в области горных пород [14 – 16]. Однако при близких свойствах веществ возникает сложность интерпретации химического состава вещества даже с использованием двухэнергетической компьютерной томографии [17].

В работе [18] приводится исследование, где авторы двухэнергетическими методами обработки рентгеновских изображений выделяют алмаз размером 2 мм в измельченном кимберлите. Эксперимент проведен в упрощенном виде, алгоритмы обработки не представлены. Первое упрощение заключается в том, что алмаз помещен в центре цилиндра, таким образом влияние краевых эффектов существенно снижается. Второе упрощение заключается в том, что используется крупный помол кимберлита, поэтому насыпная плотность в несколько раз ниже, чем у реального камня кимберлита.

Определение минералов, скрытых в горных породах, является крайне актуальной задачей, т.к. на данный момент при сепарации горных пород используются методы рентгенолюминесценции [19, 20]. С помощью данных методов удастся извлекать открытые минералы, т.е. те минералы, часть которых находится снаружи. Для извлечения полезных минералов, скрытых внутри пустой породы, производится механическое дробление до тех пор, пока минерал не окажется

снаружи. Это приводит к измельчению полезных минералов. Задачу поиска скрытых минералов в перспективе можно решить рентгенографическими методами.

В данной работе с помощью двухэнергетической компьютерной томографии исследуются вещества, близкие по своему составу, плотности и рентгенопоглощающим свойствам. В качестве примера используются горные породы берилл и мусковит (рис. 1а). В данном случае нельзя ввести контрастные вещества, как при медицинских исследованиях. Исследование берилла представляет интерес еще в том смысле, что драгоценный камень изумруд является одной из его форм. Скрытый берилл во вмещающей его породе мусковите на рентгенопроекционных изображениях, полученных от источников с тормозным спектром излучения, практически невозможно отличить, пример рентгеновского изображения показан на рис. 1б. Как видно из рисунка, контраст зависит в большей степени от перепада толщины объекта, а не от включений.



Рис. 1. Сrostок берилла с мусковитом: (а) фото образцов, (б) рентгеновское проекционное изображение

На рис. 2 приведена зависимость поглощения рентгеновского излучения при прохождении через берилл, мусковит и измельченный мусковит для толщин 10 мм от энергии падающего излучения. Интенсивность падающего излучения на образец обозначена I_0 , прошедшего через образец I .

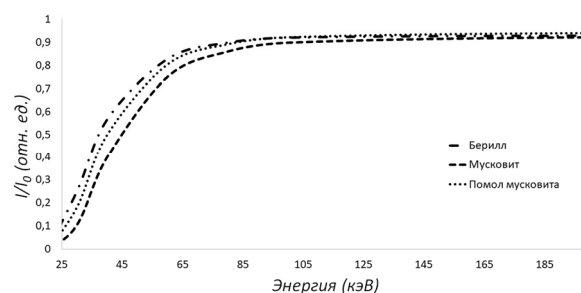


Рис. 2. Зависимость поглощения рентгеновского излучения от энергии в исследуемых образцах толщиной 10 мм

Видно, что кривые для берилла и мусковита лежат близко. Из-за меньшей плотности измельченного мусковита поглощение излучения разной энергии в нем практически совпадает с поглощением в берилле. Этот случай также приводится, т.к. является наиболее сложным и будет рассмотрен при двухэнергетическом получении КТ-срезов.

Исследование берилла и мусковита представляет с научной точки зрения больший интерес, чем исследование алмаза и кимберлита. Берилл – это минерал, имеющий сложный химический состав, близкий к мусковиту. Алмаз состоит из углерода с пренебрежимо малой долей примесей и гораздо сильнее отличается от кимберлита как по химическому составу, так и по рентгенопоглощению.

В одной из наших работ [21] подробно рассмотрены случаи поглощения рентгеновского излучения разного спектрального состава в берилле и мусковите, показаны размеры частиц берилла, которые контрастно выделяются на фоне мусковита разной толщины за счет двухэнергетической обработки. Задачи определения берилла решаются в основном для однопроекционных изображений в случаях, когда толщина мусковита постоянная. На двухэнергетических КТ-срезах не удалось однозначно выделить берилл на фоне мусковита разной плотности. Это и является основной задачей данной работы.

1. Теоретическое обоснование методики проведения эксперимента

Интенсивность I_E рентгеновского излучения с энергией E , прошедшего через объект плотностью ρ и толщиной x , зависит от интенсивности падающего на объект излучения I_{0_E} по экспоненциальному закону (1).

$$I_E = I_{0_E} \times \exp(-(\mu_E \cdot \rho \cdot x)), \quad (1)$$

где μ_E – коэффициент ослабления излучения с энергией E для данного вещества.

На рис. 3а представлен случай, когда рентгеновское излучение проходит через образец, имеющий значительные перепады по толщине. Для случая моноэнергетического излучения ослабление излучения определяется по закону (1). Поглощение моноэнергетического излучения 50 кэВ для алюминия толщиной 5, 15, 30 мм представлено на рис. 3б. Приводится поглощение в алюминии, поскольку алюминий близок к исследуемым веществам по плотности и атомному номеру.

Для случая, когда излучение не монохроматическое, а это справедливо для большинства рентгеновских источников излучения, т.к. они имеют сплошной тормозной спектр излучения, μ зависит от энергии падающего излучения, то при прохождении такого излучения через объект, имеющий переменную толщину, происходит изменение спектра излучения, как показано на рис. 3в. В таком случае более интенсивно поглощается излучение из длинноволновой области спектра, зависимость от толщины в соответствии с выражением (1) нарушается. Ослабление излучения в таком случае есть сумма интенсивностей, соответствующих всем энергиям излучения (2).

$$I = \sum I_E. \quad (2)$$

На рис. 3в представлены спектры излучения, прошедшего через 0 мм, 5 мм, 15 мм и 30 мм алюминия.

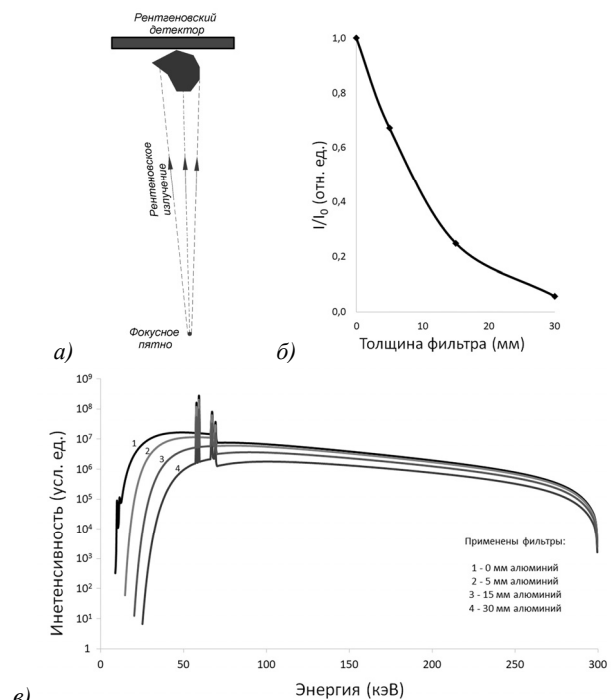


Рис. 3. Поглощение рентгеновского излучения в веществе: (а) схема объекта, (б) ослабление монохроматического излучения с энергией 50 кэВ в алюминии, (в) изменение спектрального состава излучения при прохождении объекта разной толщины

Берилл и мусковит, несмотря на то, что имеют максимальные отличия поглощения рентгеновского излучения при энергиях до 60 кэВ, из-за сильного поглощения низкоэнергетического излучения практически невозможно отличать по контрасту на изображениях, полученных от рентгеновских источников с тормозным спектром излучения. Небольшое изменение в толщине объекта приводит к большим изменениям в поглощении излучения низкоэнергетической части спектра. Таким образом, при использовании источника тормозного рентгеновского излучения с максимальной энергией, например, 90 кэВ, различия между бериллом и мусковитом практически не наблюдаются.

Если использовать источник, генерирующий излучение с пиковыми энергиями более 200 кэВ, и отсеять низкоэнергетическое излучение за счет медных фильтров, то получится спектр с более высокой энергией излучения. На рис. 4 приведены графики спектров излучения, где видно, что на спектре, полученном после фильтрации, преобладает излучение с энергией в области 120 кэВ.

Повышение энергии излучения приведет к случаю более близкому к моноэнергетическому излучению, т.к. на данных энергиях поглощение в мусковите и берилле происходит практически в соответствии с законом (1), резких перепадов в поглощении от изменения

толщины не будет. Однако высокая энергия излучения приводит к снижению динамического диапазона. На рис. 5 слева приведено изображение сростка берилла с мусковитом, полученного без применения медного фильтра, когда максимум энергии смещен в низкоэнергетическую область спектра (спектр без фильтра), справа приведено изображение, полученное при высокой энергии рентгеновского излучения (спектр после прохождения медного фильтра).

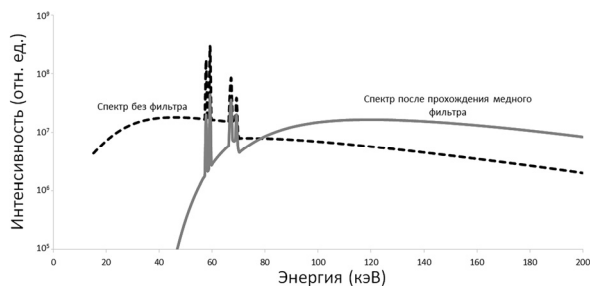


Рис. 4. Спектр источника без фильтра и спектр после прохождения через фильтр 2,5 мм меди



Рис. 5. Рентгеновские изображения сростка берилла с мусковитом, помещенные в цилиндр с измельченным мусковитом. Изображения получены при разном спектральном составе излучения

На изображении, полученном при более высокой энергии излучения, структура камня различима чуть лучше. Для снижения влияния резких перепадов толщины исследуемых объектов и, как следствие, сильно выраженных краевых эффектов сросток берилла с мусковитом помещен в цилиндр диаметром 30 мм и засыпан измельченным мусковитом. Кроме сростка берилла с мусковитом, в измельченную смесь помещены также отдельные частицы мусковита с размерами 3 мм и более.

При получении набора изображений, которые будут применяться для дальнейшей КТ-реконструкции, предполагается, что излучение затухает пропорционально изменению плотности объекта и толщины в соответствии с законом Бугера–Ламберта–Бера. Рис. 6 демонстрирует схему получения данных, необходимых для реконструкции КТ-срезов.

Интенсивность излучения, измеряемая детектором в определенной точке s_M линейки, пропорциональна выражению (3).

$$I_{s_M} \sim \exp\left(-\int_M^{M'} \rho_s \cdot dz\right), \quad (3)$$

где ρ_s — показатель поглощения вещества объекта для данной энергии излучения, а интеграл берется вдоль прямой, перпендикулярной линейке детекторов и проходящей через данный объект, соответственно, z — это координата на этой прямой (рис. 6). В идеальном случае предполагается, что излучение моноэнергетическое, тогда такая зависимость будет справедлива и для точки детектора s_K . Но при сильном поглощении плотными веществами энергетический спектр значительно искажается и в случае, когда излучение проходит через объект вдоль прямой KK' , показатель поглощения ρ_s имеет отличие от случая, когда объект лежит на пути рентгеновского излучения, проходящего вдоль прямой MM' .

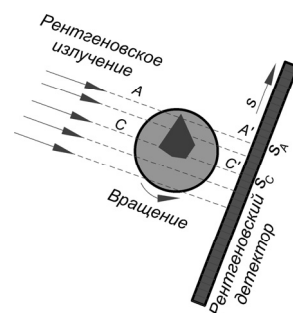


Рис. 6. Схема получения данных прямого преобразования Радона, необходимых для восстановления КТ-срезов

При медицинских исследованиях подходит излучение с непрерывным тормозным спектром, т.к. в основном исследуются сильно отличающиеся по контрасту объекты, например, костная структура в мягких тканях, камни в почках. В случаях, когда исследуются малоконтрастные объекты, вводятся контрастные вещества. При использовании двухэнергетических преобразований в случае, когда исследуются образцы с малым отличием по рентгенопоглощающим свойствам, например, берилл и мусковит, возникает сложность, т.к. практически невозможно выявить закономерность при поглощении веществами излучения с одной энергией к поглощению этими же веществами излучения с другой энергией. Это связано с сильным изменением спектрального состава излучения при небольшом изменении толщины объектов. Необходимо уменьшить число зависимых переменных от энергии излучения или от изменения общей толщины объектов исследования, т.е. получить спектр излучения максимально однородный при прохождении через объекты исследования. Для одной проекции это выполнимо, можно сделать засыпку из помола пустой породы (мусковита) в прямоугольную форму, внутрь внедрять объект исследования — сросток берилла с мусковитом или отдельные частицы [21].

Схема, где исследуемые образцы (сросток берилла с мусковитом и отдельные частицы мусковита) помещены в цилиндр с измельченным мусковитом, также не позволяет применять два спектра излучения с высокой и низкой энергиями для однозначного

выделения необходимого вещества. Схематически эксперимент по КТ-сканированию представлен на рис. 7а.

В данном случае наблюдается перепад толщины в зависимости от того, где проходят рентгеновские лучи. Для однозначного выделения на КТ с помощью двухэнергетических преобразований близких по рентгенопоглощающим свойствам веществ предлагается сделать следующее. Поместить данный цилиндр в обхватывающую неподвижную форму, в которую будет также засыпан измельченный мусковит. Форма будет обхватывать цилиндр с образцом таким образом, что рентгеновские лучи будут проходить через одинаковую толщину объекта. Рентгеновское излучение после прохождения через объект исследования, толщина которого для всех направлений хода лучей одинакова, будет иметь близкий спектральный состав, а влиять на изменение спектра будут только частицы берилла или мусковита. Зависимости изменения массового коэффициента поглощения от изменения толщины объекта практически не будет, то есть толщина является константой в данном случае. На рис. 7б показана схема предлагаемого эксперимента.

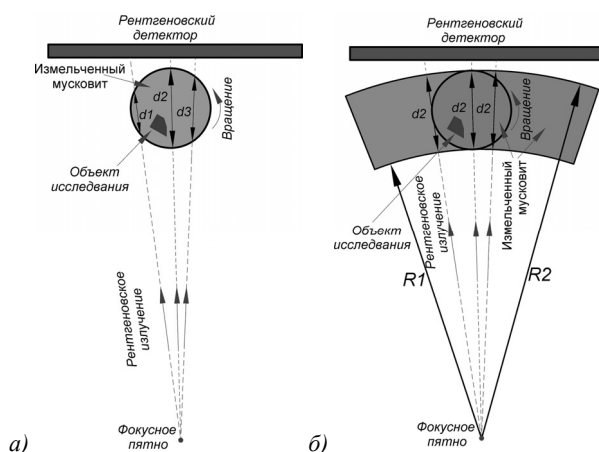


Рис. 7. Схема получения данных для реконструкции КТ-срезов: (а) образец находится в цилиндре, толщина объекта меняется, (б) цилиндр с образцом помещен в неподвижную форму, толщина объекта фиксированная

Для получения первоначальных данных, по которым восстанавливаются КТ-срезы, производится поворот объекта исследования. В данных условиях требуется производить поворот на необходимое количество углов не всего объекта, а только цилиндра с образцами, обхватывающая форма должна быть неподвижной. Модель видится приемлемой, т.к. измельченный мусковит будет выполнять роль однородной среды, это будет близко к случаю, когда объект находится в однороднопоглощающей среде, например, в воде или в воздухе. Для двухэнергетической КТ необходимо получить 2 набора данных при разных спектральных составах падающего излучения. Далее составить синаграммы при низкой и высокой энергиях излучения, провести двухэнергетические преобра-

зования, что позволит выделить частицы берилла на фоне измельченной пустой породы, а плотные частицы мусковита примут общую фоновую яркость. За счет обратного преобразования Радона из двухэнергетических синаграмм будут получены результирующие срезы.

2. Эксперимент

Как описано выше, из-за близкой плотности и химического состава берилла и мусковита на рентгеновских снимках, полученных от источников с непрерывным энергетическим спектром, не возникает пропорциональной зависимости ослабления излучения исследуемыми веществами. Перепады толщины объектов исследования влияют на изменение спектра и на неравномерное поглощение излучения с разной энергией. Для проверки предположения по проведению двухэнергетической томографии руды, содержащей берилл, с использованием дополнительной обхватывающей формы с измельченной пустой породой, изготовлена конструкция под засыпку измельченного мусковита. На рис. 8 представлена фотография подготовленного образца в цилиндре и обхватывающая форма, в которую засыпан измельченный мусковит.



Рис. 8. Форма с образцом для КТ-исследования, компенсирующая перепад толщин. Внутри цилиндрической формы помещен образец и засыпан измельченным мусковитом. Цилиндрическая форма вращается относительно неподвижной обхватывающей конструкции

В силу большого расстояния от источника до детектора 800 мм, малого расстояния от объекта исследования до регистрирующего детектора и сравнительно небольшого размера исследуемого объекта, принимается, что лучи движутся параллельно, поэтому форма практически не имеет кривизны.

Получение наборов данных в двух спектральных составах на практике достигается разными способами. Существует способ, когда применяется два источника излучения с разными высоковольтными напряжениями [6], может применяться один источник с быстрым переключением напряжения с высокого на более низкое [22], существует двухлучевая КТ с применением рентгенопоглощающих фильтров [23], также с развитием детекторов рентгеновского излучения все большее распространение получает двухслойная спектральная КТ [24].

В исследовании применяется один источник излучения. В качестве низкоэнергетического спектра применялось излучение источника без фильтров. Получение излучения с выраженной интенсивностью в высокоэнергетической области спектра успешно реализовано за счет применения рентгенопоглощающих фильтров. Эффект разделения энергий в таком случае получается более значительным, когда детектор, принимающий высокоэнергетическую составляющую, имеет большую чувствительность к высокоэнергетическому излучению. В нашем случае применяется один детектор для регистрации излучения низкоэнергетического и высокоэнергетического. Доза высокоэнергетического излучения (прошедшего через медный рентгенопоглощающий фильтр) увеличена до значения дозы низкоэнергетического излучения, т.е. детектор регистрирует близкие амплитуды сигналов от данных излучений.

У выходного окна источника излучения установлен рентгенопоглощающий фильтр на двигателе. Образец устанавливается на шаговый двигатель и располагается вблизи детектора, производится при каждом угле поворота две экспозиции с низкой и высокой энергиями излучения, что дает точное попиксельное совпадение двух изображений. Схема эксперимента представлена на рис. 9.

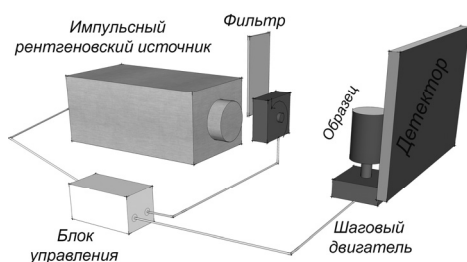


Рис. 9. Схема эксперимента

Образец на схеме представлен в виде цилиндра, в дальнейших экспериментах вокруг него установлена форма, которая показана на рис. 8.

В качестве источника излучения применяется импульсный рентгеновский источник с напряжением в пике до 300 кВ [25, 26]. Генератор высоковольтных импульсов построен по схеме с индуктивным накопителем энергии с твердотельным прерывателем тока (SOS) [27, 28]. Спектр такого источника отличается от постоянного источника излучения, т.к. он имеет большую долю низкоэнергетических квантов [29]. Если не рассматривать предельную энергию, то спектр данного источника близок к источникам постоянного излучения с напряжением около 220 кВ. Примеры спектров излучения для низкой и высокой энергий приведены на рис. 4.

Регистрация излучения производится на плоскостной детектор VIVIX-V 2323D, который имеет сцинтиллятор CsI:Tl, размеры регистрирующей области – 220×220 мм, размер пикселя составляет 185 мкм.

Для сравнения на рис. 10 получены КТ-срезы одного и того же сростка берилла с мусковитом для случаев, когда данный объект помещен в цилиндр с измельченным мусковитом (рис. 10а) и когда этот цилиндр помещен в обхватывающую форму (рис. 10б), показанную на рис. 8. Схемы эксперимента приведены на рис. 7. Темные включения – это небольшие частицы природного мусковита в смеси измельченного мусковита, берилл представляет собой более яркие включения в области камня, по яркости близок к измельченному мусковиту.

Как можно видеть, визуальные отличия практически не наблюдаются. При сравнении профиля распределения интенсивности видно, что перепад в областях мусковита наблюдается очень резкий. Это связано с зависимостью поглощения низкоэнергетического излучения от толщины объекта (в данном случае цилиндра), что приводит к существенному изменению спектра излучения. В случае, когда применяется форма, обхватывающая цилиндр, перепада по толщине не наблюдается и яркость частиц мусковита близка независимо от того, в центре или на периферии находится частица.

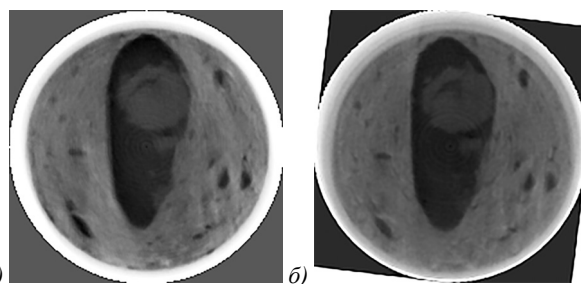


Рис. 10. Срез сростка берилла с мусковитом, помещенного в цилиндр с измельченным мусковитом, (а) цилиндр без формы, (б) с внешней формой, показанной на рис. 8

Можно сделать вывод, что обхватывающая форма с измельченной пустой породой не приводит к искажениям при реконструкции срезов.

3. Результаты и обсуждение

Для экспериментов выбран сросток берилла с мусковитом (крупный камень на рис. 1) и отдельные частицы берилла. Фотография данных частиц представлена на рис. 11. Цифровое обозначение приводится для дальнейшего соответствия данных частиц с частицами, выделенными на томографических срезах.

Образцы помещены в цилиндрическую форму на разную глубину и заполнены измельченным мусковитом, обхватывающая форма также наполнена измельченным мусковитом, как показано на рис. 8.

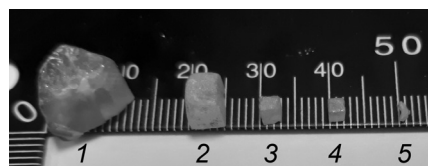


Рис. 11. Частицы берилла, используемые в экспериментах

Примеры изображений в одной проекции при заданном угле, полученные при полном спектре излучения (обозначено низкая энергия) и при прошедшем через фильтр (высокая энергия), представлены на рис. 12. Дозы излучения выровнены для получения близкой яркости на изображениях. На рисунках показаны линии, по которым будет произведено восстановление томографических срезов. На данных изображениях нет возможности различить по плотности малые частицы берилла, а также определить берилловую составляющую в сростке. Берилловая часть сростка близка по яркости к измельченному мусковиту, это подтверждается графиками, приведенными на рис. 2.

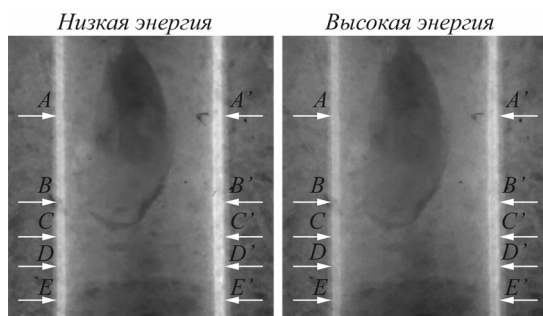


Рис. 12. Примеры рентгеновских однопроекционных изображений образцов, полученных при разном спектральном составе. Буквами обозначены места, где производятся реконструкции КТ-срезов

В ходе эксперимента получено 2 набора проекционных изображений при повороте на 180 градусов с шагом 1,8 градуса.

На рис. 13а показана синограмма для изображений, полученных при низкой энергии излучения, на рис. 13б показана синограмма для изображений, полученных при высокой энергии излучения. Синограммы соответствуют срезу, обозначенному на рис. 12 отрезком BB'.

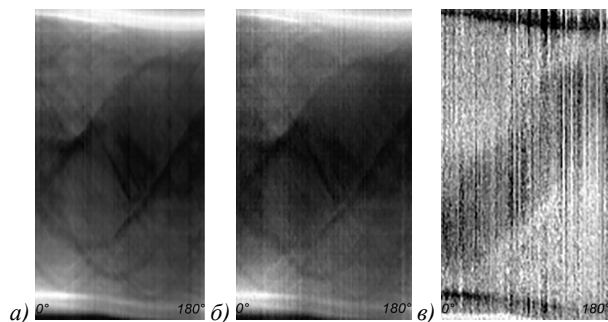


Рис. 13. Синограммы среза BB' (рис. 12). (а) при низкой энергии излучения, (б) при высокой энергии излучения, (в) синограмма, полученная в результате двухэнергетического преобразования

Методика двухэнергетического преобразования для одной проекции описана в нашей предыдущей работе [21]. Суть методики заключается в выделении области пикселей на изображении, которые отражают определенную зависимость от изменения энергии излучения. Так как синограммы составлены из двумерных однопроекционных рентгеновских изображений,

то к ним применима описанная методика двухэнергетических преобразований. На рис. 13в показана результирующая синограмма, полученная в результате двухэнергетического преобразования, где темным цветом выделен берилл.

На рис. 14 показаны томографические срезы, соответствующие синограммам, приведенным на рис. 13. Как видно на срезе (рис. 14в), реконструкция которого соответствует двухэнергетической синограмме, темным цветом выделена область, относящаяся к бериллу, а мусковит в виде камня, частиц и измельченной засыпки имеет практически однородную фоновую яркость.

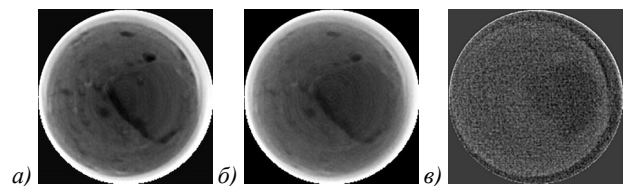


Рис. 14. КТ-срезы, соответствующие синограммам на рис. 13: (а) срез, полученный при низкой энергии излучения, (б) срез, полученный при высокой энергии излучения, в) срез, полученный в результате двухэнергетического преобразования синограммы

Для сравнения проведен эксперимент по получению среза сростка мусковита с бериллом, помещенным в цилиндр и засыпанный измельченным мусковитом, но без обхватывающей формы. Двухэнергетическое преобразование синограмм, полученных при низкой энергии и высокой энергии излучения, проведено таким же способом, как описано выше. Результат приведен на рис. 15. Видно, что на изображении, полученном после двухэнергетического преобразования, области берилла и мусковита имеют близкую яркость. Плотные частицы мусковита, расположенные в измельченном мусковите ближе к центру, проявляются более контрастно, а расположенные ближе к краям – сливаются с общим фоном – измельченным мусковитом. Разделение произошло по плотности, нет необходимого контраста берилла.

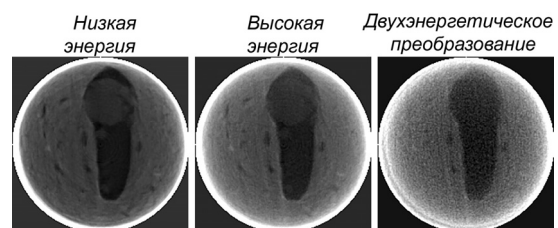


Рис. 15. КТ-срезы, полученные при разных энергиях излучения и после двухэнергетического преобразования синограммы. Образцы помещены в цилиндр без обхватывающей формы (схема на рис. 7а). Берилл и мусковит на двухэнергетическом срезе не различимы

В случае, когда применяется форма, обхватывающая цилиндр, перепада по толщине не наблюдается, сохраняется пропорциональная зависимость поглощения излучения при переходе с низкой энергии излучения на более высокую, чего не

наблюдается в случае объекта с переменной толщиной. Можно заключить, что методика, позволяющая компенсировать перепад толщины, позволяет выделить интересующий материал на двухэнергетических срезах.

Далее с использованием двухэнергетической обработки синопграмм, полученных при разной энергии, произведена КТ-реконструкция срезов цилиндра, которые соответствуют отрезкам AA', CC', DD', EE', обозначенным на рис. 12. Результат реконструкции КТ-срезов из синопграммы с низкой энергией, из синопграммы с высокой энергией и синопграммы, полученной после двухэнергетического преобразования, представлены на рис. 16. Области берилла на двухэнергетических изображениях выглядят более темными. Для наглядности области с бериллом на срезах, полученных при низкой энергии, высокой энергии и после двухэнергетического преобразования, обведены. Цифровые обозначения соответствуют номерам образцов, приведенным на рис. 11.

Как видно, на срезах в низкой и высокой энергиях контрастно выделяются частицы мусковита размерами несколько миллиметров на фоне измельченного мусковита за счет высокой плотности. Берилл, находящийся в области сростка с мусковитом (AA'), а также присутствующий в виде частиц на остальных случаях, практически сливается с измельченным мусковитом на срезах, полученных при низкой энергии, и контрастнее проявляется на срезах, полученных при высокой энергии. На двухэнергетических срезах берилл представляет собой более контрастные включения, которые можно идентифицировать, а мусковит во всех фракциях: в виде сростка с бериллом, измельченном состоянии и состоянии отдельных частиц – практически принимает общую фоновую яркость. Самая мелкая частица берилла, обозначенная номером 5, имеет размеры от 1 мм и присутствует в срезе CC'.

На изображениях, полученных после двухэнергетических преобразований, частицы мусковита разной плотности имеют яркость, близкую к измельченному мусковиту, а частицы берилла проявляются на их фоне. Таким образом, двухэнергетическое преобразование позволяет произвести бинарную классификацию, т.е. выделить контрастно частицы берилла на фоне мусковита разной плотности.

Для объективного представления на рис. 17 приведены вертикальные распределения интенсивностей для двухэнергетических срезов, представленных на рис. 16. Распределения выбраны таким образом, чтобы в них попадали частицы берилла. Произведено усреднение по 5 пикселям, т.е. взято пять вертикальных линий и произведено усреднение по пяти горизонтальным пикселям, что соответствует 0,8 мм. Графики построены с учетом калибровки на среднее значение интенсивности, а также краевые пиксели исключены.

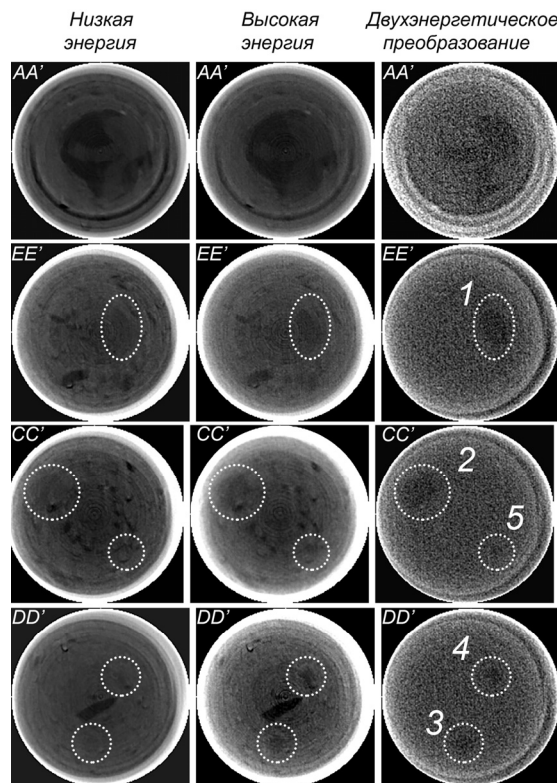


Рис. 16. КТ срезы для отрезков, соответствующих обозначениям на рис. 12. Срезы получены при низкой и высокой энергиях излучения, а также после двухэнергетического преобразования синопграмм. Выделены места, где присутствуют частицы берилла. Цифровые обозначения частиц берилла совпадают с обозначениями, приведенными на рис. 11. Диаметр цилиндра – 30 мм

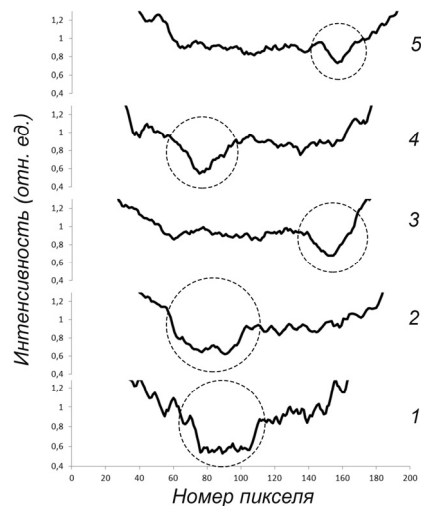


Рис. 17. Вертикальные распределения интенсивностей для двухэнергетических срезов. Номер распределения соответствует тому, что в данном распределении присутствует частица, обозначенная таким же номером на рис. 16. Области, где присутствует частица берилла, выделены пунктирными окружностями

Таким образом, используя предложенную схему эксперимента и специальную подготовку образцов, удается на этапе получения синопграмм успешно применять двухэнергетические преобразования. Это поз-

воляет выделить объекты нужного химического состава из близких по плотности, в частности, берилл на фоне мусковита. Эта методика может быть успешно применена для горных пород при идентификации веществ близкого состава, т.к. в данном случае нет необходимости вводить контрастные вещества для увеличения разницы в рентгенопоглощении.

Заключение

В работе показана методика по контрастному выделению двух близких по плотности веществ на КТ-срезах за счет двухэнергетической обработки синограмм. В качестве образцов использован берилл и вмещающая его порода мусковит. Исследованы как природные сростки берилла с пустой породой мусковит, так и частицы берилла малого размера в измельченном мусковите. Второй случай представляет больший научный интерес, поскольку из-за меньшей насыпной плотности мусковит имеет рентгенопоглощающие свойства, близкие с бериллом.

Поскольку введение контрастных веществ внутрь горной породы не представляется возможным, предложен и реализован метод компенсации перепада толщины исследуемых объектов. Благодаря фиксированной толщине исследуемой области на спектр рентгеновского излучения влияет только поглощение исследуемыми объектами. Появляется возможность производить двухэнергетические преобразования непосредственно синограмм, которые получены при высокой и низкой энергиях рентгеновского излучения. Это приводит к уменьшению времени обработки, т.к. в данном случае результирующий срез получается после реконструкции только одной двухэнергетической синограммы, в отличие от стандартного метода, когда производится отдельно реконструкция синограмм для низкой и высокой энергий излучения, а затем двухэнергетическая обработка.

На срезах, полученных после реконструкции двухэнергетических синограмм, контрастно выделены искомые частицы берилла. Размер частиц составляет от 1 мм при толщине пустой породы 30 мм.

Метод проведения двухэнергетической КТ, предложенный в данной работе, может быть успешно применен при исследовании керна различного типа природных руд, что является важным при геолого-разведке и определении состава горных пород.

Благодарности

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

References

[1] Johnson TR. Dual-energy CT: general principles. *Am J Roentgenol* 2012; 199(5): 3-8. DOI: 10.2214/AJR.12.9116.
[2] Forghani R, De Man B, Gupta R. Dual energy computed tomography: physical principles, approaches to scanning, usage,

and implementation: Part 1. *Neuroimaging Clin N Am* 2017; 27(3): 371-384. DOI: 10.1016/j.nic.2017.03.002.
[3] Forghani R, De Man B, Gupta R. Dual energy computed tomography: physical principles, approaches to scanning, usage, and implementation: Part 2. *Neuroimaging Clin N Am* 2017; 27(3): 385-400. DOI: 10.1016/j.nic.2017.03.003.
[4] Aran S, Shaqdan KW, Abujudeh HH. Dual-energy computed tomography (DECT) in emergency radiology: basic principles, techniques, and limitations. *Emerg Radiol* 2014; 21(4): 391-405. DOI: 10.1007/s10140-014-1208-2.
[5] Hounsfield GN. Computerized transverse axial scanning (tomography): Part 1. Description of system. *Br J Radiol* 1973; 46(552): 1016-1022. DOI: 10.1259/0007-1285-46-552-1016.
[6] Schmidt B, Flohr T. Principles and applications of dual source CT. *Phys Med* 2020; 79: 36-46 DOI: 10.1016/j.ejmp.2020.10.014.
[7] Pinho DF, Kulkarni NM, Krishnaraj A, Kalva SP, Sahani DV. Initial experience with single-source dual-energy CT abdominal angiography and comparison with single-energy CT angiography: image quality, enhancement, diagnosis and radiation dose. *Eur Radiol* 2013; 23(2): 351-359. DOI: 10.1007/s00330-012-2624-x.
[8] Ohira S, Ikawa T, Kanayama N, Minamitani M, Kihara S, Inui S, Ueda Y, Miyazaki M, Yamashita H, Nishio T, Koizumi M, Nakagawa K, Konishi K. Dual-energy computed tomography-based iodine concentration as a predictor of histopathological response to preoperative chemoradiotherapy for pancreatic cancer. *J Radiat Res* 2023; 64(6): 940-947. DOI: 10.1093/jrr/rtrd076.
[9] Oda S, Emoto T, Nakaura T, Kidoh M, Utsunomiya D, Funama Yo, Nagayama Ya, Takashio S, Ueda M, Yamashita T, Tsujita K, Ando Yu, Yamashita Ya. Myocardial late iodine enhancement and extracellular volume quantification with dual-layer spectral detector dual-energy cardiac CT. *Radiol Cardiothorac Imaging* 2019; 1(1): e180003. DOI: 10.1148/ryct.2019180003.
[10] Ashoor M, Asgari A, Khorshidi A, Rezaei A. Evaluation of Compton attenuation and photoelectric absorption coefficients by convolution of scattering and primary functions and counts ratio on energy spectra. *Indian J Nucl Med* 2015; 30(3): 239-247. DOI: 10.4103/0972-3919.158532.
[11] Bolus DN. Dual-energy computed tomographic scanners: principles, comparisons, and contrasts. *J Comput Assist Tomogr* 2013; 37(6): 944-947. DOI: 10.1097/RCT.0000000000000028.
[12] Cellina M, Bausano MV, Pais D, Chiarpenello V, Costa M, Vincenzo Z, Cè M, Martinenghi C, Oliva G, Carrafiello G. Dual-energy CT applications in urological diseases. *Appl Sci* 2023; 13(13): 7653. DOI: 10.3390/app13137653.
[13] Roele ED, Timmer VCML, Vaassen LAA, Kroonenburgh AMJL, Postma AA. Dual-energy CT in head and neck imaging. *Curr Radiol Rep* 2017; 5(5): 19. DOI: 10.1007/s40134-017-0213-0.
[14] Tonai S, Kubo Y, Tsang MY, Bowden S, Ide K, Hirose T, Kamiya N, Yamamoto Y, Yang K, Yamada Y, Morono Y, Heuer VB, Inagaki F, Expedition 370 Scientists. A new method for quality control of geological cores by X-ray computed tomography: Application in IODP expedition 370. *Front Earth Sci* 2019; 7: 117. DOI: 10.3389/feart.2019.00117.
[15] Bauer C, Wagner R, Orberger B, Firsching M, Ennen A, Pina CG, Wagner C, Honarmand M, Nabatian G, Monsef I. Potential of dual and multi energy XRT and CT analyses

- on iron formations. *Sensors* 2021; 21(7): 2455. DOI: 10.3390/s21072455.
- [16] Firsching M, Nachtrab F, Uhlmann N, Hanke R. Multi-Energy X-ray imaging as a quantitative method for materials characterization. *Adv Mater* 2011; 23(22-23): 2655-2656. DOI: 10.1002/adma.201004111.
- [17] Rebuffel V, Dinten JM. Dual-energy X-ray imaging: benefits and limits. *Insight: Non-Destr Test Cond Monit* 2007; 49(10): 589-594. DOI: 10.1784/insi.2007.49.10.589.
- [18] Firsching M, Nachtrab F, Mühlbauer J, Uhlmann N. Detection of enclosed diamonds using dual energy X-ray imaging. *NDT.net* 2012; 17(7): 1-7. Source: <https://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/397_wcndt_final00397.pdf>.
- [19] Dean PJ, Male JC. Some properties of the visible luminescence excited in diamond by irradiation in the fundamental absorption edge. *J Phys Chem Solids* 1964; 25(12): 1369-1383. DOI: 10.1016/0022-3697(64)90052-6.
- [20] Calas G, Petiau J, Manceau A. X-ray absorption spectroscopy of geological materials. *J Phys Colloq* 1986; 47(C8): 813-818. DOI: 10.1051/jphyscol:19868156.
- [21] 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; 23(9): 4393. DOI: 10.3390/s23094393.
- [22] Li B, Yadava G, Hsieh J. Quantification of head and body CTDI(VOL) of dual-energy x-ray CT with fast-kVp switching. *Med Phys* 2011; 38(5): 2595-2601. DOI: 10.1118/1.3582701.
- [23] Niu Z, Chen J, Ren H, Wang Y, Tao XW, Zhan K. Comparison of image quality between split-filter twin beam dual energy and single energy images in abdominal CT. *Eur J Radiol* 2019; 121: 108702. DOI: 10.1016/j.ejrad.2019.108702.
- [24] Franco PN, Spasiano CM, Maino C, Ponti E, Ragusi M, Giandola T, Terrani S, Peroni M, Corso R, Ippolito D. Principles and applications of dual-layer spectral CT in gastrointestinal imaging. *Diagnostics* 2023; 13(10): 1740. DOI: 10.3390/diagnostics13101740.
- [25] Komarskiy AA, Korzhenevskiy SR, Ponomarev AV, Komarov NA. Pulsed X-ray source with the pulse duration of 50 ns and the peak power of 70 MW for capturing moving objects. *J Xray Sci Technol* 2021; 29(4): 567-576. DOI: 10.3233/XST-210873.
- [26] Komarskiy AA, Korzhenevskiy SR, Komarov NA. X-ray sources of nanosecond pulses based on semiconductor opening switch for CT. *AIP Conf Proc* 2020; 2250(1): 020018. DOI: 10.1063/5.0013238.
- [27] Rukin SN, Tsyranov SN. Subnanosecond breakage of current in high-power semiconductor switches. *Tech Phys Lett* 2000; 26(9): 824-826. DOI: 10.1134/1.1315507.
- [28] Rukin SN. Pulsed power technology based on semiconductor opening switches: A review. *Rev Sci Instrum* 2020; 91(1): 011501. DOI: 10.1063/1.5128297.
- [29] Komarskiy AA, Korzhenevskiy SR, Komarov NA, Krasniy OD. Calculating the radiation spectrum of pulsed X-ray sources based on semiconductor opening switches. *AIP Conf Proc* 2021; 2356(1): 020015. DOI: 10.1063/5.0052861.

Сведения об авторах

Комарский Александр Александрович, кандидат технических наук, 1988 года рождения, в 2012 году окончил Уральский федеральный университет по специальности 01.04.04 «Физическая электроника», работает научным сотрудником в Институте электрофизики УрО РАН. Область научных интересов: обработка рентгеновских изображений, двухэнергетическая обработка изображений, компьютерная томография, разработка импульсных рентгеновских генераторов. E-mail: aakomarskiy@gmail.com ORCID: 0000-0002-1102-8282.

Корженевский Сергей Романович, кандидат технических наук, 1970 г. рождения, в 1994 г. окончил Уральский государственный технический университет – УПИ по специальности «Молекулярно-кинетические и ядерно-физические процессы со специализацией инженерная электрофизика», работает в должности старшего научного сотрудника в лаборатории импульсных источников излучения Института электрофизики УрО РАН. Область научных интересов: генерация мощных пучков ионизирующего излучения, разработка электрофизических установок, регистрация рентгеновского излучения. E-mail: sk@iep.uran.ru

Криницин Владислав Валерьевич, 1992 года рождения, в 2015 году окончил магистратуру Физико-технологического института уральского федерального университета по направлению «Электроника и наноэлектроника», работает инженером в Институте электрофизики УрО РАН. Область научных интересов: разработка алгоритмов и ПО для обработки рентгеновских изображений, компьютерной томографии. E-mail: vladvkrin@yandex.ru

ГРНТИ: 59.45.39

Поступила в редакцию 19 декабря 2023 г. Окончательный вариант – 15 февраля 2024 г.

Method for obtaining and dual-energy processing of X-ray sinograms for identifying low-contrast substances in CT using sources with a continuous radiation spectrum

A.A. Komarskiy¹, S.R. Korzhenevskiy¹, V.V. Krinitsin¹

¹ Institute of Electrophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Amundsen St. 106, Ekaterinburg, 620110, Russia

Abstract

The article proposes and implements a method of dual-energy CT. The method allows the contrast-enhanced differentiation of one substance from another when substances have similar chemical compositions and densities. In this case, the use of standard dual-energy CT methods does not allow the unambiguous identification of the desired substance. This is because X-ray sources emit non-monochromatic radiation, and changes in object thickness lead to significant absorption of low-energy radiation. The article justifies the use of a design solution to reduce the influence of variable object thickness on the absorption of low-energy X-ray radiation. This allows dual-energy transformation to be performed not for CT slices but for sinograms obtained at different energy spectra of X-ray radiation. After reconstructing the dual-energy sinogram on a CT slice, the desired substance is unambiguously identified. The successful implementation of this method is demonstrated in the example of beryl particles embedded in muscovite. In CT slices obtained after reconstructing dual-energy sinograms, beryl particles with sizes as small as 1 mm are clearly distinguished with a total sample thickness of 30 mm.

Keywords: dual-energy CT, image processing, dual-energy processing, sinogram, x-ray image, beryl.

Citation: Komarskiy AA, Korzhenevskiy SR, Krinitsin VV. Method for obtaining and dual-energy processing of X-ray sinograms for identifying low-contrast substances in CT using sources with a continuous radiation spectrum. *Computer Optics* 2025; 49(2): 282-291. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1485.

Acknowledgements: The investigation was funded by the Russian Science Foundation (RSF) under project No. 22-79-10013.

Authors' information

Alexander Alexandrovich Komarskiy (b. 1988) graduated from Ural Federal University in 2012 with a degree in Physical Electronics. He works as a research associate at the Institute of Electrophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Candidate of Technical Sciences. His scientific interests include processing of X-ray images, dual-energy image processing, computer tomography, and development of pulsed X-ray generators. E-mail: aakomarskiy@gmail.com ORCID: 0000-0002-1102-8282.

Sergey Romanovich Korzhenevskiy (b. 1970) graduated from the Ural State Technical University - UPI in 1994 with a degree in "Molecular-Kinetic and Nuclear-Physical Processes with a specialization in Engineering Electrophysics". He currently works as a senior research fellow at the Laboratory of Pulsed Radiation Sources at the Institute of Electrophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Candidate of Technical Sciences. His scientific interests include the generation of powerful ionizing radiation beams, development of electrophysical installations, and registration of X-ray radiation. E-mail: wsk@iep.uran.ru

Vladislav Valer'evich Krinitsin (b. 1992) graduated from the Master's program at the Institute of Physics and Technology of the Ural Federal University in Electronics and Nanoelectronics in 2015, and works as an engineer at the Institute of Electrophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Area of scientific interests: development of algorithms and software for processing X-ray images, computed tomography. E-mail: vladvkrin@yandex.ru

Received December 19, 2023. The final version – February 15, 2024.
