

ПРЕДЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ ДУАЛЬНЫХ И МУЛЬТИЭНЕРГИЙ

© 2019 г. С.П. Осипов^{1,*}, Е.Ю. Усачёв², С.В. Чахлов^{1,**}, С.А. Щетинкин², С. Сун³, Г. Жанг³,
А.В. Батрагин¹, О.С. Осипов⁴

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия 634028 Томск,
пр-т Ленина, 30

²МИРЭА — Российский технологический университет, Россия 119454 Москва, пр. Вернадского, 78

³PowerScan LTD, P. R. China 100029 Beijing, Chaoyang District, Northern four Mid Road, Huatingjiayuan
Building, No: D—17B

⁴Сольвейг Мультимедиа, Россия 634055 Томск, пр-т Развития, 3
E-mail: *osip1809@rambler.ru; **chakhlov@tpu.ru

Поступила в редакцию 12.04.2019; после доработки 31.05.2019

Принята к публикации 07.06.2019

Рассмотрен способ распознавания материалов крупногабаритных объектов контроля высокоэнергетическими методами дуальных и мультиэнергий на основе оценки эффективного атомного номера. Приведен алгоритм обработки исходных изображений методов дуальных и мультиэнергий, позволяющий определить эффективный атомный номер материала объекта контроля и его фрагментов. Методом вычислительного эксперимента доказана значимость влияния разрядности АЦП, массовой толщины и эффективного атомного номера материала объекта контроля на качество распознавания. Обоснована необходимость применения предварительной фильтрации тормозного излучения с целью обеспечения заданного качества распознавания для малых толщин фрагментов исследуемых объектов. Приведен алгоритм для оценки предельных возможностей предлагаемого способа распознавания материалов. Методом численного моделирования экспериментально доказана принципиальная возможность различения материалов: легкая органика — $Z = 6$; минеральные материалы — $Z = 9$; легкие металлы — $Z = 13$; кальций — $Z = 19$; металлы — $Z = 26$; тяжелые металлы — $Z > 50$.

Ключевые слова: досмотровый контроль, тормозное излучение, метод дуальных энергий, метод мультиэнергий, распознавание материалов, эффективный атомный номер, массовая толщина, предварительная фильтрация, разрядность АЦП.

DOI: 10.1134/S0130308219090069

ВВЕДЕНИЕ

Высокоэнергетический метод дуальных энергий (МДЭ) широко применяется в досмотровом контроле для распознавания материалов крупногабаритных объектов и их фрагментов [1—4]. Под распознаванием понимается отнесение объекта контроля по параметру распознавания (ПР) к одному из нескольких классов материалов. В качестве ПР используется эффективный атомный номер (ЭАН) либо неявная функция от него. Возросшие запросы к качеству распознавания материалов привели к появлению и развитию метода мультиэнергий (ММЭ) [5—10], в том числе и в области высоких энергий. В настоящее время всю совокупность распознаваемых материалов разделяют на четыре больших класса [1, 3, 4, 6], ассоциируемых с полиэтиленом или углеродом, алюминием (сплавы), железом (сплавы) и свинцом (сплавы). В [2] предложен подход к раздельному распознаванию материалов с высокими значениями ЭАН. В области малых энергий рентгеновского излучения достигнуты определенные успехи по повышению точности оценки ЭАН [11—15], что позволило кратно повысить количество классов распознавания. Увеличение числа классов распознаваемых материалов применительно к досмотровому контролю крупногабаритных объектов сопряжено рядом сложностей, связанных с определением диапазона максимальных энергий тормозного излучения. В диапазоне энергий от 2 до 9 МэВ преобладающими эффектами взаимодействия фотонов с веществом являются эффекты Комптона и рождения пар [16]. Следует отметить, что вклад эффекта рождения пар в массовый коэффициент ослабления излучения пропорционален ЭАН [17], а для малых значений ЭАН отмеченный вклад незначителен. Этот факт и является основным препятствием к увеличению числа классов распознаваемых материалов. В [18] кратко обсуждаются проблемы, связанные с распознаванием материалов применительно к низко- и высокоэнергетической реализациям МДЭ. К этим проблемам относятся некачественное распознавание материалов для малых и больших массовых толщин объектов контроля (ОК). Предварительная фильтрация тормозного излучения позволяет [19, 20] расширить диапазон массовых толщин ОК с надежно распознаваемыми материалами в сторону меньших значений. В [18] подчеркивается

недостаточность четырех классов распознавания материалов для современных требований обеспечения безопасности и одновременно отмечается гипотетическая возможность корректного распознавания материалов для моноэнергетических реализаций МДЭ. Теоретические аспекты возможного применения высокоинтенсивных квазимонохроматических источников фотонного излучения применительно к методу мультиэнергий, который является расширением МДЭ, рассмотрены в [2]. Из вышесказанного следует необходимость рассмотрения предельных возможностей высокоэнергетических МДЭ и ММЭ применительно к задаче распознавания материалов объектов досмотрового контроля. Здесь под предельными возможностями понимаются максимально возможное расширение диапазонов изменения массовых толщин и ЭАН и оценка систематической погрешности ЭАН. Информация о значении систематической погрешности оценки ЭАН позволит ответить на вопросы о возможности корректного распознавания материалов из пяти, шести и более классов и границах этих классов по эффективному атомному номеру.

Для решения поставленных выше задач наиболее рационально на первом этапе исследований разработать имитационную модель инспекционных досмотровых комплексов (ИДК) с функцией распознавания материалов ОК и их фрагментов. Модель ИДК должна включать блок формирования первичных изображений высокоэнергетических реализаций МДЭ и ММЭ, а также блок трансформации полученных изображений в информацию о массовой толщине и ЭАН материала ОК. Второй блок должен базироваться на некотором алгоритме обработки исходных изображений МДЭ и ММЭ — алгоритме способа распознавания материалов ОК и их фрагментов.

На втором этапе необходимо провести ряд вычислительных экспериментов с вариацией основных параметров инспекционных досмотровых комплексов, оценить значение систематической погрешности оценки ЭАН и определить границы применимости методов.

Третий этап предназначен для экспериментальной проверки способа распознавания материалов методом дуальных или мультиэнергий.

1. ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРВИЧНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАЛИЗАЦИЙ МДЭ И ММЭ

В высокоэнергетическом методе мультиэнергий исходные цифровые радиографические изображения $\mathbf{D}_1, \mathbf{D}_2, \dots, \mathbf{D}_n$, $n > 2$ формируются для специальным образом подобранных максимальных энергий тормозного излучения — $E_1, E_2, \dots, E_{n0}$. Для определенности будем считать, что $E_1 < E_2 < \dots < E_{n0}$. В методе дуальных энергий используются две энергии, то есть $n0 = 2$. Отсюда следует, что ММЭ является естественным обобщением МДЭ.

В качестве основы имитационной модели для формирования первичных изображений высокоэнергетических реализаций МДЭ и ММЭ может быть взята модель из [20].

К основным параметрам источника тормозного излучения (ИТИ) относятся: максимальная энергия — $E_{\max}$; энергетический спектр — $f(E, E_{\max})$; плотность, атомный номер материала и толщина предварительного фильтра — ρ_f, Z_f, h_f .

Детектор тормозного излучения (ДТИ) характеризуется плотностью, атомным номером материала и толщиной радиационно-чувствительного элемента детектора — ρ_d, Z_d, h_d , а также разрядностью АЦП — k_{adc} .

Геометрическая схема формирования первичных радиографических изображений описывает взаимное расположение ОК в пространстве с неподвижной системой координат $OXYZ$. Формируемое изображение $\mathbf{D}$ представляет собой матрицу размерностью $M \times N$ с элементами D_{ij} , $i = 1 \dots M, j = 1 \dots N$.

Объект контроля занимает часть трехмерного пространства $\mathbf{V} \subset \mathbb{R}^3$.

Для однородного ОК, характеризующегося массовой толщиной $(\rho H)_{ij}$ по направлению, соединяющего центр излучающей поверхности и центр пикселя с координатами (i, j) , и ЭАН материала Z_{ij} по тому же направлению, выражение для вычисления D_{ij} имеет вид

$$D_{ij}(E_{\max}) = \left\lfloor \frac{I((\rho H)_{ij}, Z_{ij})}{\Delta} \right\rfloor, \Delta = \frac{CI(\rho_a H_a, Z_a)}{2^k - 1}, \quad (1)$$

где $[\arg]$ — целая часть $\arg$; $C, C > 1$ — коэффициент защиты от переполнения; I — аналоговый сигнал на входе АЦП; индекс a относится к ослаблению воздухом.

Выражение, связывающее аналоговый сигнал I с параметрами ОК, ИТИ и ДТИ, выглядит следующим образом:

$$I(\rho H, Z) = N(\rho_a H_a, Z_a) \int_0^{E_{\max}} f(E, E_{\max}) E_{ab} \exp(-m(E, Z) \rho H) \varepsilon(E, Z_d, \rho_d h_d) dE, \quad (2)$$

где N — количество фотонов; E_{ab} — среднее значение поглощенной энергии зарегистрированного фотона; m — массовый коэффициент ослабления (МКО); ε — эффективность регистрации излучения.

Для имитации шумов в радиографических изображениях, кроме оценки аналогового сигнала, необходима и оценка количества фотонов N

$$N(\rho H, Z) = N(\rho_a H_a, Z_a) \int_0^{E_{\max}} f(E, E_{\max}) \exp(-m(E, Z)\rho H) \varepsilon(E, Z_d, \rho_d h_d) dE. \quad (3)$$

Относительное среднеквадратическое отклонение аналогового сигнала δI вычисляется по формуле [21]

$$\delta I(\rho H, Z) = \frac{\eta(\rho_a H_a, Z_a)}{N(\rho_a H_a, Z_a)}, \quad (4)$$

где η — коэффициент накопления флуктуаций. Его значение можно ограничить сверху $\sqrt{2}$.

Итоговое выражение для имитации зашумленного сигнала I_N выглядит следующим образом:

$$I_N(\rho H, Z) = I(\rho H, Z)(1 + \xi_N(0, \delta I(\rho H, Z))), \quad (5)$$

здесь $\xi_N(0, \delta I)$ — случайная величина, распределенная по нормальному закону, с параметрами 0 и δI .

Совокупность формул (1)–(5) является основой имитационного моделирования исходных цифровых радиографических изображений для необходимого количества максимальных энергий $E_{\max}$ и пространственного описания ОК. Отметим, что ОК полностью определяется двумя распределениями $(\rho H)(x, y, z)$, $Z(x, y, z)$.

2. АЛГОРИТМ СПОСОБА РАСПОЗНАВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДАМИ ДУАЛЬНЫХ И МУЛЬТИЭНЕРГИЙ

На вход блока распознавания материалов поступают исходные цифровые радиографические изображения $\mathbf{D}_1, \mathbf{D}_2, \dots, \mathbf{D}_{n0}$. Существуют различные подходы к их дальнейшей обработке с целью распознавания материалов ОК и их фрагментов по эффективному атомному номеру Z [11, 12, 14, 22–24]. Выше отмечено, что любой фрагмент ОК характеризуется парой параметров $((\rho H), Z)$. С формальной точки зрения для нахождения этих параметров достаточно двух максимальных энергий, но их выбор существенно зависит от диапазонов изменения ρH и Z .

На первом этапе изображения $\mathbf{D}_1, \mathbf{D}_2, \dots, \mathbf{D}_{n0}$ подвергаются калибровке «по-черному» и «по-белому», а затем оцениваются распределения толщин ОК и его фрагментов в единицах длин свободного пробега (д.с.п.) $\mathbf{Y}_1, \mathbf{Y}_2, \dots, \mathbf{Y}_{n0}$. В соответствии с выбором максимальных энергий можно сделать заключение о том, что любой из элементов $Y_1(i, j)$ матрицы $\mathbf{Y}_1$ практически не зависит от Z , так как превалирующим эффектом взаимодействия фотонов для излучения с максимальной энергией E_1 является эффект Комптона. Поэтому на основе изображений $\mathbf{Y}_1, \mathbf{Y}_2, \dots, \mathbf{Y}_{n0}$ строится $n0-1$ изображений $\mathbf{Q}_1, \mathbf{Q}_2, \dots, \mathbf{Q}_{n0-1}$

$$Q_n(i, j) = \frac{Y_n(i, j)}{Y_1(i, j)}, Y_n(i, j) = Y_n(i, j); n = 2 \dots n0, Y_L(i, j) = Y_k(i, j), k < n, i = 1 \dots N, j = 1 \dots M. \quad (6)$$

Для нахождения распределения $Z(i, j)$ используется одно или несколько уравнений следующего вида:

$$\tilde{Q}_n(Z(i, j)) = Q_n(i, j), n = 1 \dots n0 - 1, i = 1 \dots N, j = 1 \dots M, \quad (7)$$

где $\tilde{Q}_n(Z)$ — калибровочные функции для оценки эффективных атомных номеров.

Замечание 1. Для формирования экспериментальных оценок параметров распознавания Q_n в качестве реперного изображения может быть использовано изображение $\mathbf{Y}_m \neq \mathbf{Y}_1$, при этом должно соблюдаться условие $E_m < E_n$.

Из замечания следует, что общее число уравнений в (7) больше или равно $n0 - 1$.

Функции $Q_n(Z)$ формируются по результатам просвечивания тестовых объектов (ТО). Параметры фрагментов ТО $((\rho H), Z)$ пробегают всю область изменения массовой толщины и эффективного атомного номера потребительского интереса.

Каждая из функций $\tilde{Q}_n(Z)$ должна удовлетворять на соответствующих областях $[Z_{\min n}, Z_{\max n}] \times [(\rho H)_{\min n}, (\rho H)_{\max n}]$ условиям непрерывности, гладкости и строгого монотонного возрастания. В этом случае существуют обратные функции к функциям $Q_n(Z)$

$$Z = \tilde{Q}_n^{-1}(Q). \quad (8)$$

Выражения (6)–(8) являются основой алгоритма, предназначенного для распознавания материалов объектов контроля и их фрагментов методами дуальных и мультиэнергий. Этот алгоритм в совокупности с имитационной моделью, описанной в предыдущем разделе, позволяет осуществлять численное моделирование способа распознавания материалов высокоэнергетическими методами дуальных и мультиэнергий и выяснить предельные возможности способа.

3. ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СПОСОБА РАСПОЗНАВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

3.1. Определения понятий

Введем два базовых определения.

Определение 1. Разрешением по эффективному атомному номеру ΔZ будем называть минимальную разность между эффективными атомными номерами материалов объектов при надежном их различении.

Определение 2. Под понятием «предельные возможности способа распознавания материалов» применительно к МДЭ подразумевается разрешение по эффективному атомному номеру ΔZ с соответствующими диапазонами изменения эффективного атомного номера $Z = [Z_{\min}, Z_{\max}]$ и массовой толщины $\rho H = [(\rho H)_{\min}, (\rho H)_{\max}]$. Для ММЭ оно корректируется с учетом возможного различия разрешения по Z и интервалов изменения параметров ММЭ

$$\Delta Z = \min_n (\Delta Z_n), \mathbf{M}_Z = \bigcup_n \mathbf{M}_{Z_n}, \mathbf{M}_{\rho H} = \bigcup_n \mathbf{M}_{\rho H_n}. \quad (9)$$

Замечание 2. Строго говоря, разрешение по эффективному атомному номеру ΔZ зависит от значений эффективного атомного номера Z и массовой толщины ρH .

В [20] отмечена существенная зависимость качества распознавания материалов ОК и, следовательно, предельных возможностей способа от некоторых основных параметров ИДК. К таким параметрам относятся разрядность АЦП — k_{ADC} ; количество фотонов, падающих на фронтальную поверхность детектора линейки, — N_0 ; атомный номер, материал и толщина предварительного фильтра — Z_f, ρ_f, h_f ; атомный номер, материал и толщина радиационно-чувствительного объема детектора — Z_d, ρ_d, h_d .

В статьях показана необходимость согласования диапазонов изменения аналоговых сигналов в МДЭ [9, 20]. Распространение этого требования на ММЭ приведет к близости $N(\rho_a H_a, Z_a)$ для всех максимальных энергий метода.

Проверим принцип физической реализуемости оценки Z способами, основанными на МДЭ и ММЭ.

3.2. Проверка физической реализуемости измерения Z

Принцип физической реализуемости применительно к рассматриваемой задаче заключается в наличии закономерностей, связывающих измеряемые физические величины МДЭ и ММЭ и эффективный атомный номер Z . Проверка отмеченного принципа сводится в исследуемом случае к анализу функций $Q(Z)$ для необходимых уровней ρH . В этой ситуации максимально идеализируются условия измерений.

Идеализация условий измерений в МДЭ и ММЭ сводится к следующим допущениям: энергетические спектры излучения — δ -функции; детекторы являются детекторами полного поглощения — $\varepsilon(E) = 1$; количество фотонов, падающих на поверхность детектора, велико — $N(\rho_a H_a, Z_a) = \infty$; разрядность АЦП велика — $k_{ADC} = \infty$.

На рис. 1 приведены функции $Q(Z)$, рассчитанные для указанных выше условий.

Из анализа приведенных графиков можно сделать вывод о значимости выбора максимальных энергий для конкретного диапазона изменения Z . Во всех случаях качество распознавания для высоких значений Z возрастает с ростом энергии E_2 . Интервал монотонного возрастания

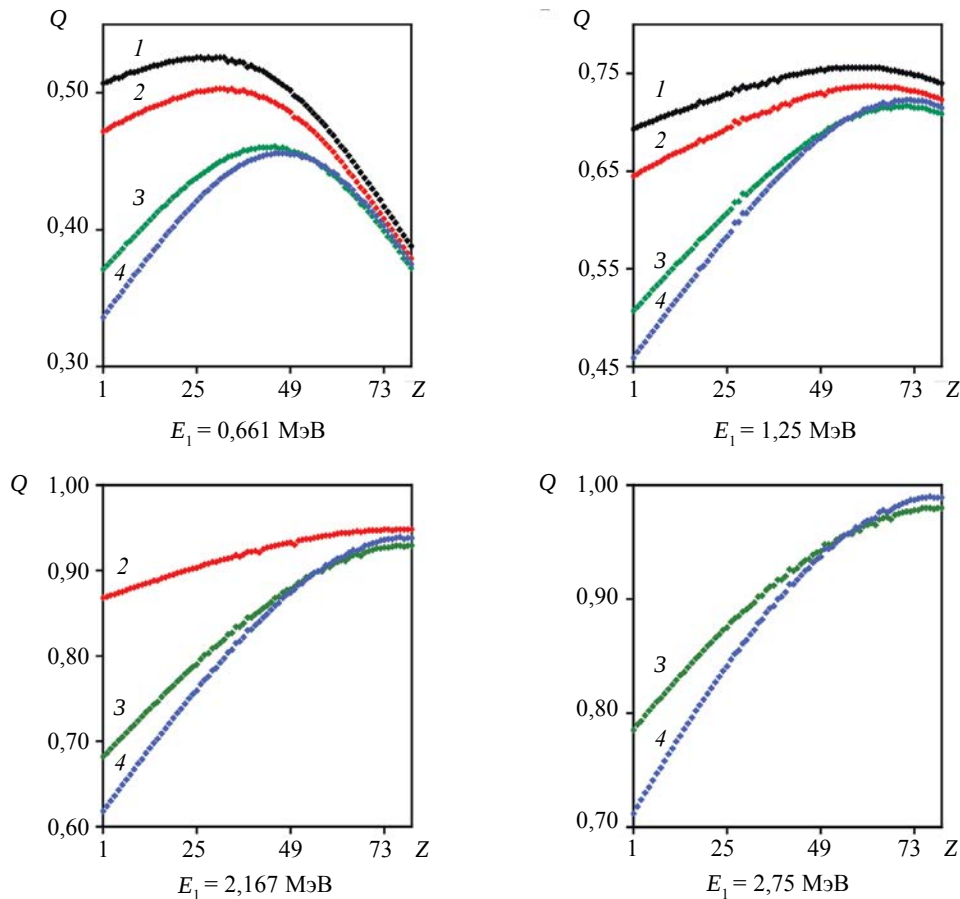


Рис. 1. Функции $Q(Z)$ для гамма-излучения:
 ♦ (1) — $E_2 = 2,44$ МэВ; ♦ (2) — $E_2 = 2,75$ МэВ; ♦ (3) — $E_2 = 4,06$ МэВ; ♦ (4) — $E_2 = 4,81$ МэВ.

функции $Q(Z)$ увеличивается с возрастанием энергии E_1 и соответствующим увеличением E_2 . Можно сделать вывод о физической реализуемости измерения эффективного атомного номера Z с высокой точностью для высокоэнергетических реализаций МДЭ и ММЭ на основе источников моноэнергетического гамма-излучения. К сложности использования источников гамма-излучения для рассматриваемых способов распознавания материалов следует отнести узкую номенклатуру долгоживущих высокоэнергетических источников гамма-излучения [25, 26]. Отсюда следует, что замена источников тормозного излучения в ИДК с функцией распознавания материалов ОК и их фрагментов на источники гамма-излучения представляется практически нереализуемой.

Главным достоинством применения источников гамма-излучения в МДЭ и ММЭ является отсутствие зависимости параметра распознавания Q от массовой толщины ОК ρH . Анализируемые методы на базе источников тормозного излучения указанным достоинством не обладают [19, 20, 27].

Применение в высокоэнергетических ИДК предварительных свинцовых фильтров с массовой толщиной вплоть до $\rho_f h_f = 30$ г/см² [20, 27] существенно улучшает качество распознавания материалов, что обусловлено ужесточением пучков тормозного излучения.

Для иллюстрации этого положения был проведен цикл расчетов зависимости $Q(\rho H)$ для различных уровней Z и вариаций массовой толщины свинцовых фильтров $\rho_f h_f$ от 0 до 30 г/см². Расчеты проводились при соблюдении второго, третьего и четвертого из идеальных условий измерений. Отметим, что диапазон изменения толщины ОК Y_L в единицах д.с.п. определяет диапазон изменения аналоговых сигналов, поэтому вместо функций $Q(\rho H)$ рассматривают функции $Q(Y_L)$. На рис. 2 приведены графики функций $Q(Y_L)$ для изделий из углерода, оксида кремния, алюминия, железа и различных пар максимальных энергий $E_{\max}$ из диапазона от 2 до 9 МэВ.

Анализируя полученные графики, можно сделать вывод о целесообразности и эффективности предварительной фильтрации тормозного излучения в МДЭ и ММЭ.

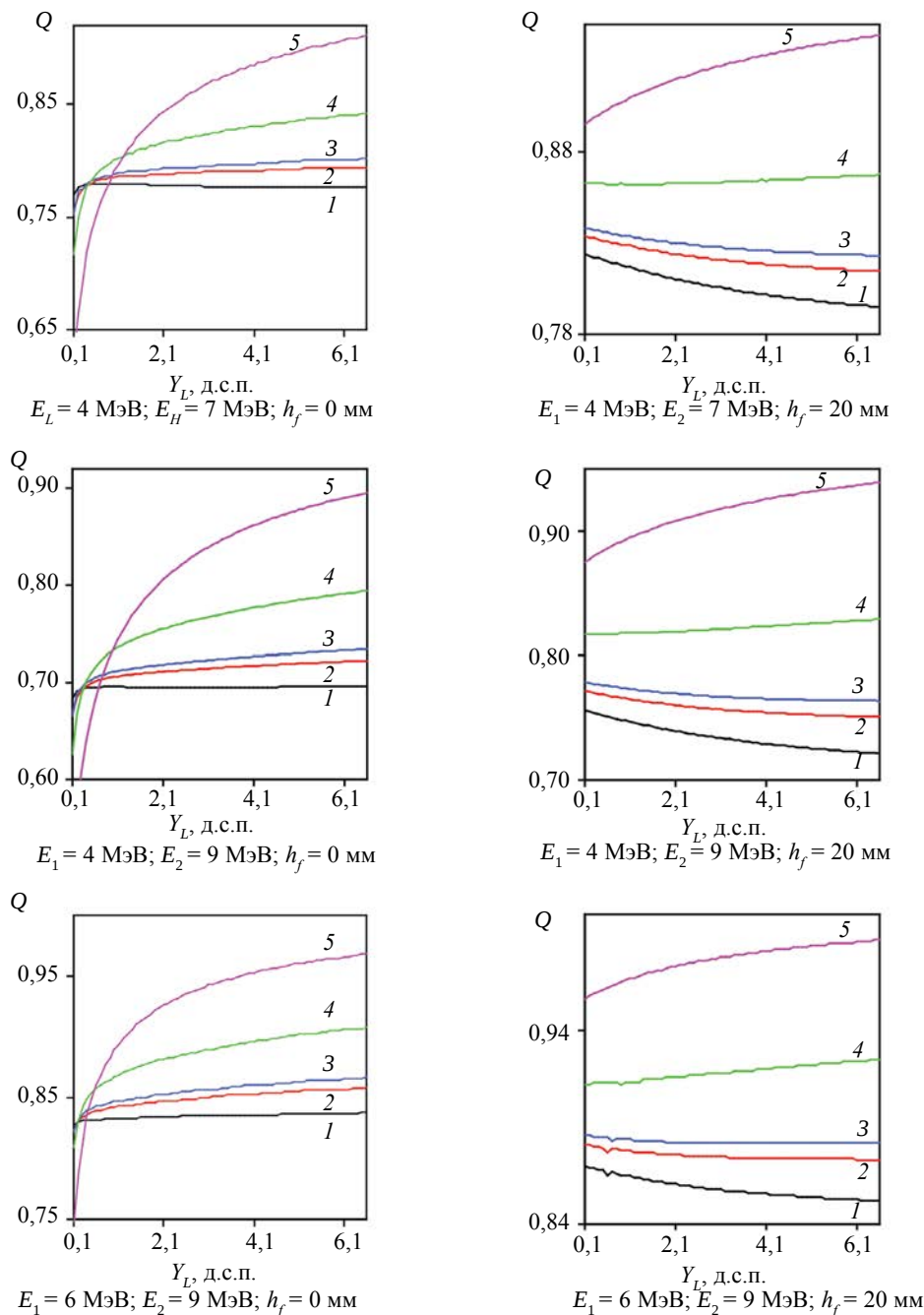


Рис. 2. Функции $Q(Z)$ для тормозного излучения:
—(1) углерод; —(2) окись кремния; —(3) алюминий; —(4) железо; —(5) свинец.

Из анализа данных, представленных на рис. 2, можно сделать вывод о принципиальной возможности раздельного распознавания изделий из углерода, окиси кремния и алюминия в рассматриваемом диапазоне изменения толщины ОК Y_L в единицах д.с.п.

Выбор в пользу той или иной пары максимальных энергий МДЭ или ММЭ связан со степенью прозрачности ОК для этой пары энергий с учетом фильтрации излучения.

Техническая реализуемость задачи увеличения числа классов распознавания в МДЭ и ММЭ сводится к оценке влияния основных параметров ИДК на предельное разрешение по Z — ΔZ . К таким параметрам относятся уровни шумов в изображениях ПР и разрядность АЦП k_{ADC} . Уровни шумов зависят от значения $N_a = N(\rho_a H_a, Z_a)$. Исследование отмеченного влияния может быть осуществлено методом математического моделирования.

3.3. Оценка предельного разрешения по эффективному атомному номеру методом имитационного моделирования

Для имитационного моделирования выберем объект с вариациями ρH и Z . Значение Z пробегает следующее множество: $\{6, 9, 13, 19, 26, 50, 65\}$. Для каждого уровня Z фрагменты представляют собой пластины с массовой толщиной ρH от $(\rho H)_{\min} = 5$ до $(\rho H)_{\max} = 100$ г/см² с шагом 5 г/см². Расчеты проводили для следующих уровней максимальных энергий $E_{\max}$: 3, 5 и 9 МэВ для виртуального аналога ИДК Томского политехнического университета (ТПУ) [28]. Калибровочные функции $Q_n(Z)$ строились в соответствии с рекомендациями, описанными выше.

Будем рассматривать два сценария имитационного моделирования — оптимистичный и реалистичный. Эти условия отличаются по подходу к условиям расчета. Оптимистичный сценарий основывается на рекомендациях из [9, 20], касающихся частичного или полного выравнивания диапазонов изменения аналоговых сигналов для всех энергий МДЭ и ММЭ и частичного или полного согласования диапазонов изменения аналоговых и цифровых сигналов. В реалистичном сценарии учитываются практические соотношения уровней аналоговых сигналов для различных значений максимальных энергий тормозного излучения.

3.3.1. Оптимистичный сценарий моделирования способа распознавания материалов методами дуальных и мультиэнергий

В соответствии с определением оптимистичного сценария могут быть предложены следующие ограничения:

$$C \approx 1, I_1(\rho_a H_a, Z_a) \approx I_2(\rho_a H_a, Z_a) \approx \dots \approx I_{n0}(\rho_a H_a, Z_a). \quad (10)$$

Очевидно, что для выполнения требований (10) с целью своей реализации нужны значительные материальные и (или) временные затраты.

В системе детектирования ИДК ТПУ разрядность АЦП $k_{ADC} = 16$. Предельный уровень проникающей способности тормозного излучения с $E_{\max} = 3$ МэВ для систем с такой разрядностью АЦП близок к 200 г/см² по стали [21]. Этого уровня вполне достаточно на современном уровне развития систем ИДК, поэтому проводилось исследование влияния параметра N_a (10^5 ; 10^6 ; 10^7) на качество распознавания для $k_{ADC} = 16$. Отметим, что параметр N_a можно интерпретировать не только как количество фотонов, соответствующее одному пикселю изображения, но и эквивалентное минимальной тени фрагмента ОК, материал которого надежно распознается.

На рис. 3 приведены изображения оценок эффективного атомного номера для $k = 16$ и $N_a = 10^5$; 10^6 ; 10^7 . Цвет изменяли от фиолетового ($Z = Z_{\min}$) до красного ($Z = Z_{\max}$). Более темным участкам соответствует большая толщина фрагмента ОК Y_L в д.с.п.

Из анализа изображений, приведенных на рис. 3, можно сделать вывод о достаточно уверенном различении материалов из 5 групп для пар максимальных энергий $E_L = 3$ МэВ; $E_H = 9$ МэВ и $E_L = 5$ МэВ; $E_H = 9$ МэВ для массовых толщин от 30 до 100 г/см². Для малых значений массовых толщин материалы не распознаются корректно. Уровень шумов на изображениях ПР уменьшается с ростом параметра N_a . Протяженность интервалов массовых толщин некорректного распознавания материалов с возрастанием Z увеличивается.

Выше показано, что фильтрация тормозного излучения является эффективным подходом, позволяющим увеличить интервал массовых толщин с надежно распознаваемыми материалами в сторону меньших значений. Была проведена серия расчетов для $k = 16$ и $N_a = 10^6$, $N_a = 10^7$ и $h_f = 20$ мм. На рис. 4 приведена визуализация результатов имитационного моделирования для указанных выше условий.

Анализируя данные, приведенные на рис. 4, можно уверенно подтвердить эффективность применения предварительной фильтрации. Нижняя граница интервала надежного распознавания материалов опустилась до уровня 8-10 г/см².

Ниже рассмотрим реалистичный сценарий имитационного моделирования.

3.3.2. Реалистичный сценарий моделирования способа распознавания материалов методами дуальных и мультиэнергий

В реалистичном сценарии не соблюдаются условия (10). Главное расхождение связано с тем, что уменьшение максимальной энергии в бетатроне приводит к существенному уменьшению интенсив-

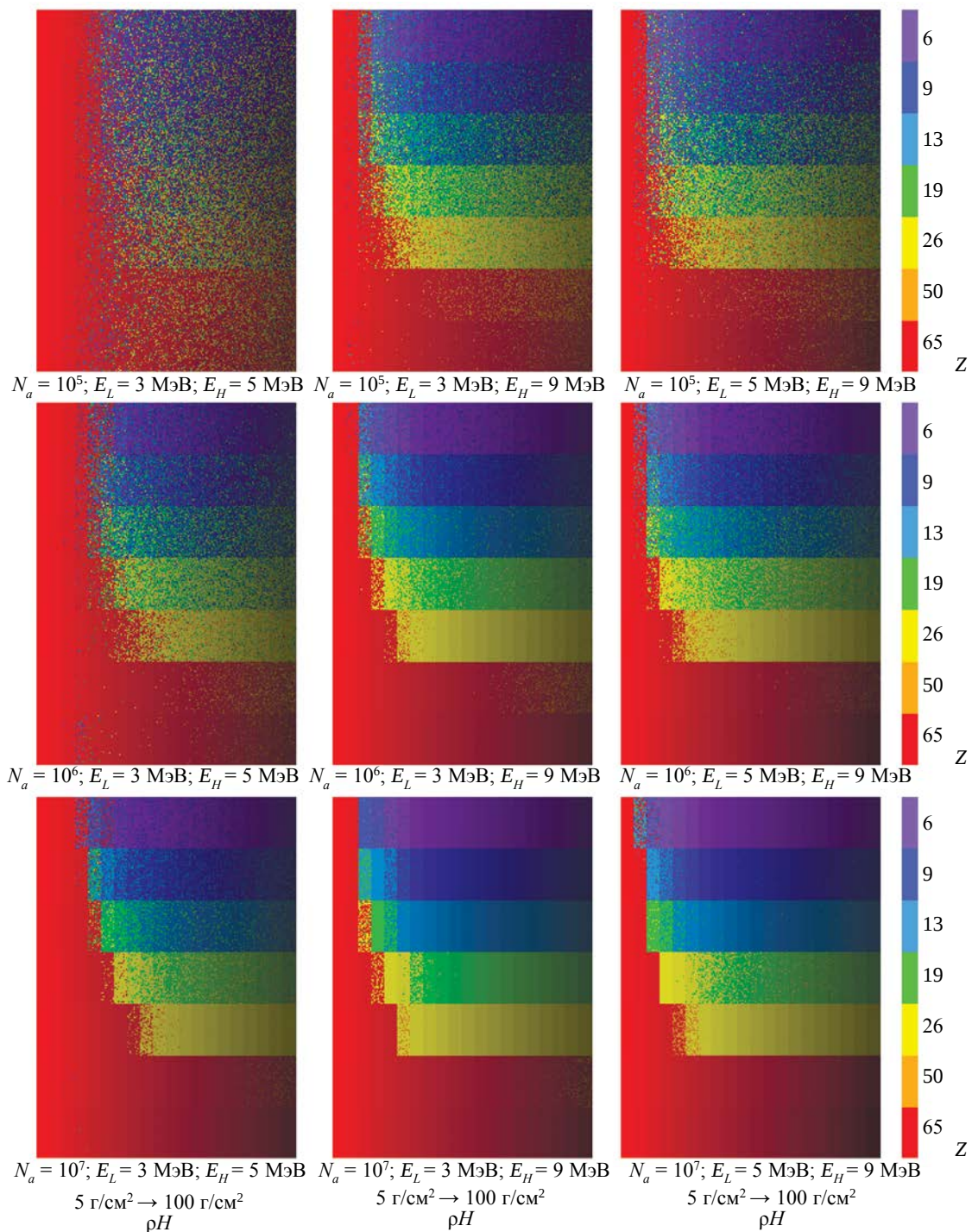


Рис. 3. Визуализация оценок эффективного атомного номера $Z_m(Z, \rho H)$ методом ММЭ: $k_{ADC} = 16$; $h_f = 0$.

ности и, следовательно, уровней аналоговых сигналов [29]. Одним из технических способов компенсации этого негативного фактора является увеличение разрядности АЦП. Аналого-цифровые преобразователи с разрядностью до 24 бит находят широкое распространение в методах неразрушающих испытаний и измерений [30—33]. Второй подход связан с аналоговым сжатием сигналов, которое осуществляется логарифмическими усилителями [34, 35], он не получил должного развития в ИДК.

Исследовалось влияние разрядности АЦП k_{ADC} и значения параметра N_a на качество распознавания с учетом фактора, описанного выше. Естественно ожидать повышение уровня шумов для

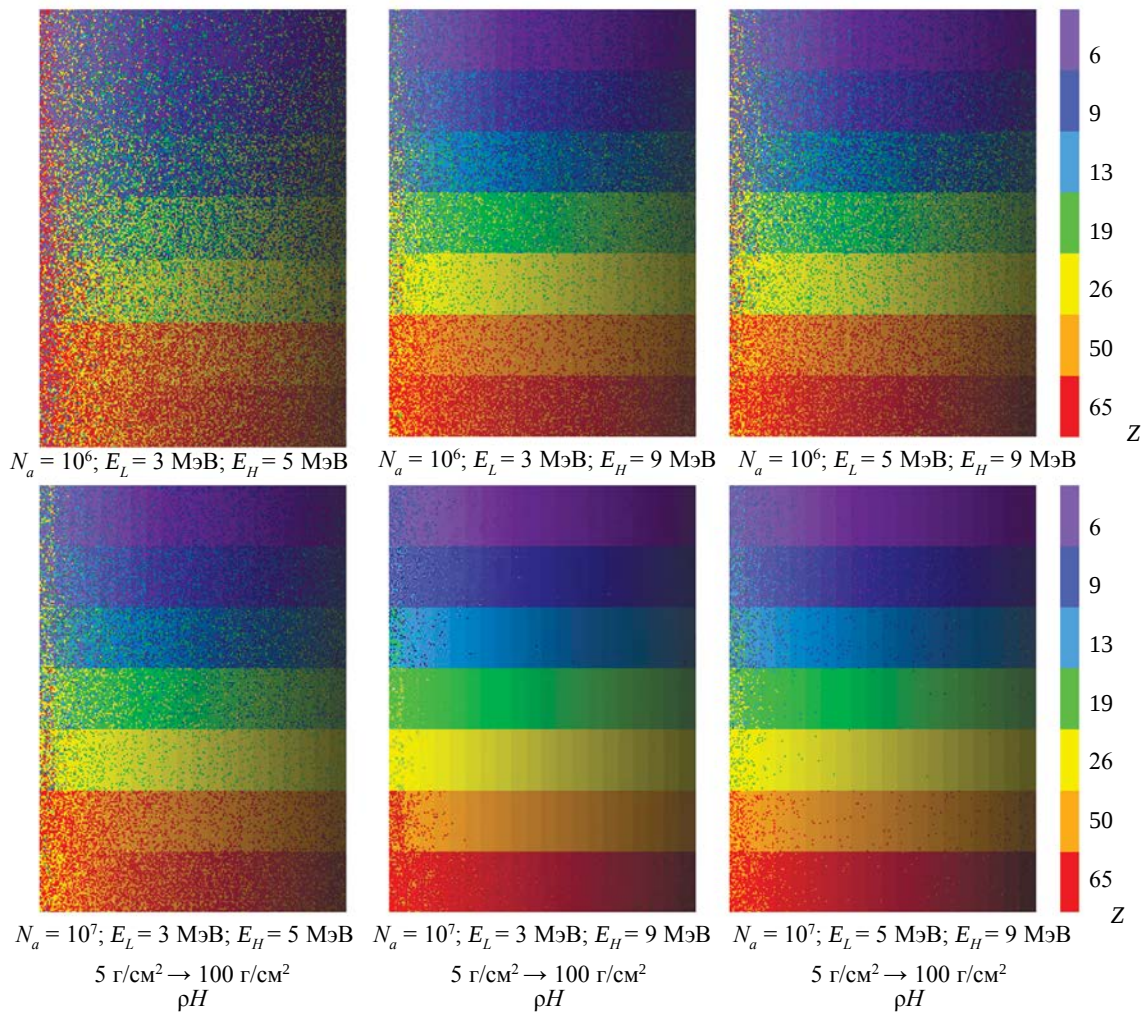


Рис. 4. Визуализация оценок эффективного атомного номера $Z_m(Z, \rho H)$ методом ММЭ:
 $k_{ADC} = 16$; $h_f = 20$ мм.

изображений с энергиями E_L и соответственно в изображениях параметра распознавания. Поэтому для имитационного моделирования выбирались следующие значения параметров ИДК: $h_f = 20$ мм, $k_{ADC} = 16$; 20; 24 и $N_a = 10^7$.

На рис. 5 приведены изображения ПР, полученные методом имитационного моделирования для реалистичных условий. Из анализа полученных изображений можно сделать вывод об улучшении распознавания для пар энергий с $E_L = 3$ МэВ при увеличении разрядности АЦП. Вторым вывод касается необходимости сближения диапазонов изменения аналоговых сигналов для всех максимальных энергий МДЭ и ММЭ. Одним из вариантов указанного сближения является аналоговое накопление для сигналов с меньшими максимальными энергиями. Главным достоинством такого подхода является работа всех каналов регистратора с аналоговыми сигналами с уровнями из близкого диапазона, недостатком — уменьшение производительности контроля и ухудшение качества распознавания на входе и выходе фрагмента ОК из веерного пучка тормозного излучения.

Следует отметить, что практическое расширение диапазона массовых толщин с надежным распознаванием материалов в большую сторону значений ρH приведет к необходимости использования в ИДК источников тормозного излучения с высокой мощностью и АЦП с разрядностью 20 бит и выше.

Ниже рассмотрим подход к экспериментальной оценке возможности увеличения числа классов распознавания материалов методами дуальных и мультиэнергий.

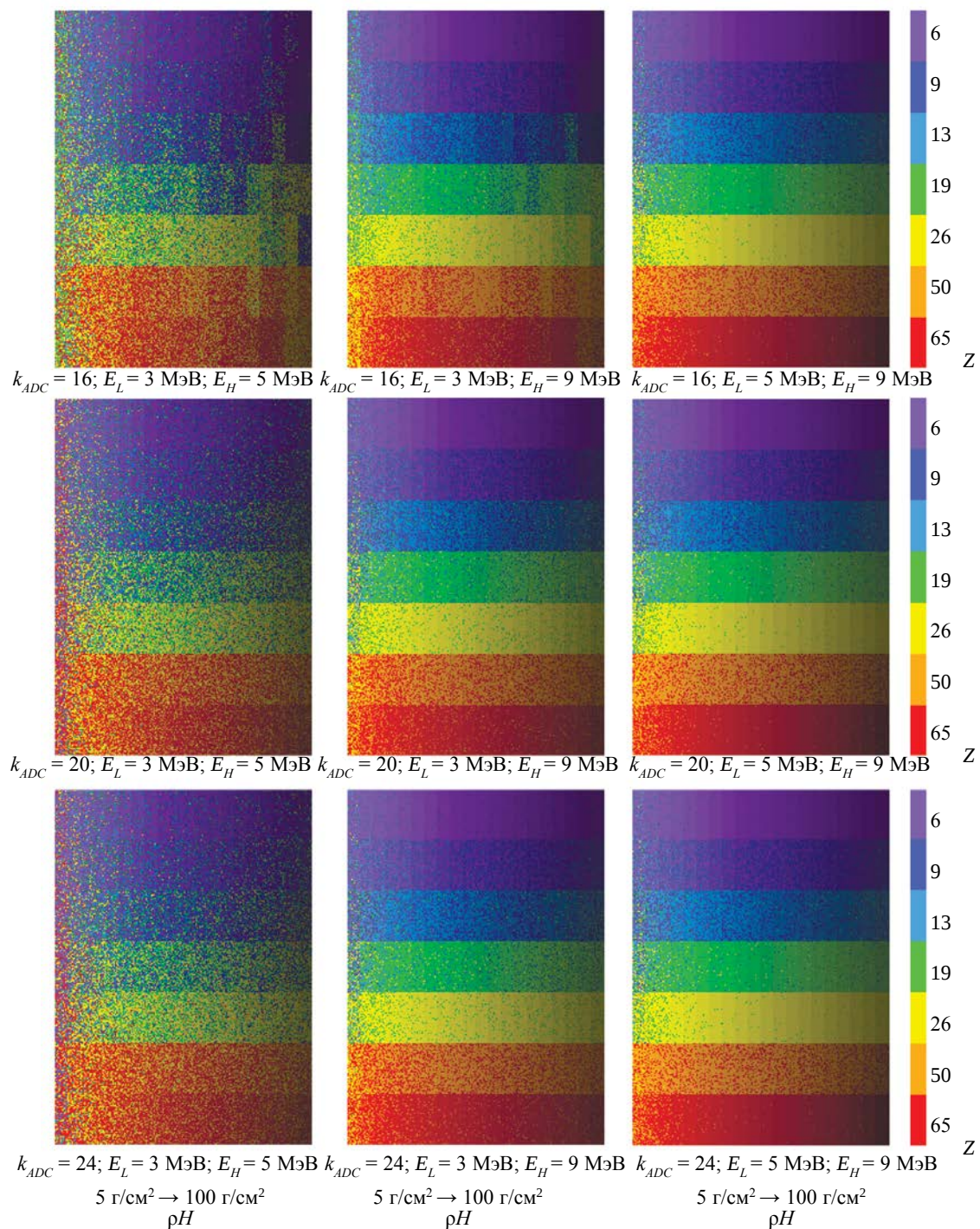


Рис. 5. Визуализация оценок $Z_m(Z, \rho H)$ методом ММЭ (реалистичный сценарий):
 $N_a = 10^7$; $h_f = 20$ мм.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ ЧИСЛА КЛАССОВ РАСПОЗНАВАНИЯ

Выше подчеркнуто, что в настоящее время материалы ОК относят к четырем классам, которые ассоциируют с углеродом (C), алюминием (Al), железом (Fe) и свинцом (Pb). На ИДК ТПУ [28] экспериментально установлено, что для энергий $E_L = 4$ МэВ; $E_H = 7,5$ МэВ и толщин фрагментов ОК, превышающих 25 г/см^2 , калибровочных функций $Q_C(Y_L)$, $Q_{Al}(Y_L)$, $Q_{Fe}(Y_L)$ и $Q_{Pb}(Y_L)$ выполняются следующие неравенства:

$$Q_C(Y_L) < Q_{Al}(Y_L) < Q_{Fe}(Y_L) < Q_{Pb}(Y_L). \quad (11)$$

Неравенства (11) согласуются с результатами численного моделирования. Увеличение числа классов распознавания на практике может быть достигнуто, если разность функций для соседних классов достаточно велика. Анализ результатов численного моделирования подтверждает упомянутую возможность.

Для экспериментального подтверждения возможности увеличения числа классов распознавания за счет деления интервалов по эффективному атомному номеру между углеродом и алюминием и между алюминием и железом была проведена серия экспериментов по оценке зависимостей $Q_C(Y_L)$, $Q_{Al}(Y_L)$, $Q_{Fe}(Y_L)$, $Q_{Pb}(Y_L)$.

На рис. 6 приведены экспериментальные зависимости $Q_C(Y_L)$, $Q_{Al}(Y_L)$, $Q_{Fe}(Y_L)$, $Q_{Pb}(Y_L)$ без и с предварительными фильтрациями.

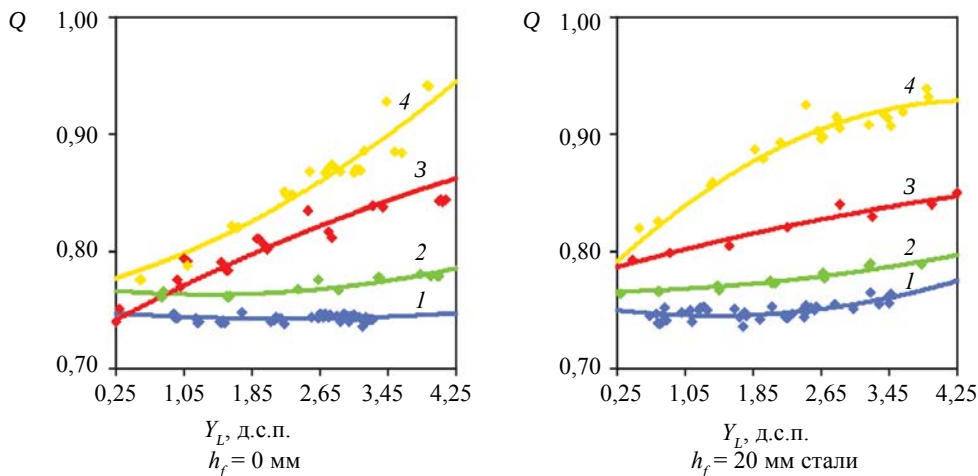


Рис. 6. Зависимости $Q_C(Y_L)$, $Q_{Al}(Y_L)$, $Q_{Fe}(Y_L)$, $Q_{Pb}(Y_L)$ для $E_L = 4$ МэВ, $E_H = 7,5$ МэВ:
C ♦ — эксперимент, — аппроксимация (1); Al ♦ — эксперимент, — аппроксимация (2); Fe ♦ — эксперимент, — аппроксимация (3); Pb ♦ — эксперимент, — аппроксимация (4).

Из анализа данных, приведенных на рис. 6, можно сделать вывод об экспериментальном подтверждении возможности увеличения классов распознавания для пары энергий $E_L = 4$ МэВ; $E_H = 7,5$ МэВ для диапазона толщин материалов Y_L от 1,5 до 4 д.с.п. без предварительной фильтрации и от 0,5 до 4 д.с.п. — с предварительной фильтрацией, что соответствует диапазонам изменения массовых толщин от 30 до 80 г/см² без фильтрации и от 11 до 80 г/см² — с фильтрацией. Сравнение результатов распознавания свидетельствует об эффективности применения предварительной фильтрации тормозного излучения применительно к задаче уменьшения минимальной надежно распознаваемой толщины материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен способ распознавания материалов крупногабаритных объектов контроля высокo-энергетическими методами дуальных и мультиспектральных на основе оценки эффективного атомного номера. Приведен алгоритм обработки исходных изображений методами дуальных и мультиспектральных, позволяющий определить эффективные атомные номера материалов объекта контроля и его фрагментов. Методом вычислительного эксперимента доказана значимость влияния разрядности АЦП, массовой толщины и эффективного атомного номера материала объекта контроля на качество распознавания. Обоснована необходимость применения предварительной фильтрации тормозного излучения с целью обеспечения заданного качества распознавания для малых толщин фрагментов исследуемых объектов. Приведен алгоритм для оценки предельных возможностей предлагаемого способа распознавания материалов. Теоретически и экспериментально доказана принципиальная возможность различения материалов: легкая органика $Z = 6$; минеральные материалы $Z = 9$; легкие металлы $Z = 13$; кальций $Z = 19$; металлы $Z = 26$; тяжелые металлы $Z > 50$.

Исследование проводилось в Томском политехническом университете в рамках гранта Программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета и при финансовой поддержке компании PowerScan Ltd (КНР).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lee D., Lee J., Min J., Lee B., Lee B., Oh K., Kim J., Cho S. Efficient material decomposition method for dual-energy X-ray cargo inspection system // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2018. V. 884. P. 105—112.
2. Martz H.E., Glenn S.M., Smith J.A., Divin C.J., Azevedo S.G. Poly-versus mono-energetic dual-spectrum non-intrusive inspection of cargo containers // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2017. V. 64. No. 7. P. 1709—1718.
3. Li L., Li R., Zhang S., Zhao T., Chen Z. A dynamic material discrimination algorithm for dual MV energy X-ray digital radiography // Applied Radiation and Isotopes. 2016. V. 114. P. 188—195.
4. Chen Z.Q., Zhao T., Li L. A curve-based material recognition method in MeV dual-energy X-ray imaging system // Nuclear Science and Techniques. 2016. V. 27. No. 1. No. article 25.
5. Paulus C., Moulin V., Perion D., Radisson P., Verger L. Multi-energy x-ray detectors to improve air-cargo security // Anomaly Detection and Imaging with X-Rays (ADIX) II. International Society for Optics and Photonics. 2017. V. 10187. No. article 1018701.
6. Shikhaliev P.M. Megavoltage cargo radiography with dual energy material decomposition // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2018. V. 882. P. 158—168.
7. Arodzero A., Boucher S., Burstein P., Frenkel M., Katsevich A., Kutsaev S.V., Lanza R.C. ACTM: Adaptive computed tomography with modulated-energy X-ray pulses / 2017 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC). IEEE, 2017. P. 1—6.
8. Jimenez E.S. Big-data multi-energy iterative volumetric reconstruction methods for as-built validation & verification applications. — Sandia National Lab. (SNL-NM), Albuquerque, NM (United States). 2018. No. SAND2018-10707. DOI: 10.2172/1475102
9. Saverskiy A.Y., Dinca D.C., Rommel J.M. Cargo and container X-ray inspection with intra-pulse multi-energy method for material discrimination // Physics Procedia. 2015. V. 66. P. 232—241.
10. Arodzero A., Boucher S., Kutsaev S.V., Lanza R.C., Palermo V., O'Shea F., Ziskin V. MEBICIS: Multi-energy betatron-based cargo inspection system / 2016 IEEE Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference and Room-Temperature Semiconductor Detector Workshop (NSS/MIC/RTSD). IEEE, 2016. P. 1—5.
11. Udod V.A., Osipov S.P., Wang Y. Comparative analysis of various definitions of the concept of effective atomic number of material of a multicomponent object // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. No. 9. P. 662—674.
12. Gorshkov V. The effective atomic number and the mass attenuation coefficient of a multicomponent object for the continuous spectrum of the radiation // Nondestructive Testing and Evaluation. 2017. V. 32. No. 1. P. 79—89.
13. Ryzhikov V.D., Naydenov S.V., Opolonin O.D., Volkov V.G., Smith C.F. Multi-energy method of digital radiography for imaging of biological objects // Medical Imaging 2016: Physics of Medical Imaging. International Society for Optics and Photonics, 2016. V. 9783. No. article 978348.
14. Duvillier J., Dierick M., Dhaene J., Van Loo D., Masschaele B., Geurts R., Van Hoorebeke L., Boone M.N. Inline multi-material identification via dual energy radiographic measurements // NDT & E International. 2018. V. 94. P. 120—125.
15. Osipov S.P., Usachev E.Y., Chakhlov S.V., Shchetinkin S.A., Kamysheva E.N. Selecting Parameters of Detectors When Recognizing Materials Based on the Separation of Soft and Hard X-Ray Components // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. No. 11. P. 797—810.
16. Hubbell J.H. Photon cross sections, attenuation coefficients and energy absorption coefficients / National Bureau of Standards Report NSRDS-NBS29, Washington DC, 1969. 90 p.
17. Hubbell J.H. Electron-positron pair production by photons: A historical overview // Radiation Physics and Chemistry. 2006. V. 75. No. 6. P. 614—623.
18. Rogers T.W., Jaccard N., Morton E.J., Griffin L.D. Automated x-ray image analysis for cargo security: Critical review and future promise // Journal of X-ray science and technology. 2017. V. 25. No. 1. P. 33—56.
19. Ogorodnikov S., Petrunin V. Processing of interlaced images in 4—10 MeV dual energy customs system for material recognition // Physical Review Special Topics — Accelerator and Beams. 2002. V. 5. No. 10. P. 67—77.
20. Osipov S.P., Chakhlov S.V., Osipov O.S., Li S., Sun X., Zheng J., Hu X., Zhang G. Physical and technical restrictions of materials recognition by the dual high energy X-ray imaging // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. V. 12. No. 23. P. 13127—13136.
21. Osipov S.P., Zhang G.L., Chakhlov S.V., Shtein M.M., Shtein A.M., Trinh V.B., Sirotan E. Estimation of parameters of digital radiography systems // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2018. V. 65. No. 10. P. 2732—2742.

22. *Park J.S., Kim J.K.* Calculation of effective atomic number and normal density using a source weighting method in a dual energy X-ray inspection system // *Journal of the Korean physical society*. 2011. V. 59. No. 4. P. 2709—2713.
23. *Bonnin A., Duvauchelle P., Kaftandjian V., Ponard P.* Concept of effective atomic number and effective mass density in dual-energy X-ray computed tomography // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2014. V. 318. P. 223—231.
24. *Kolkoori S., Wrobel N., Hohendorf S., Ewert U.* High energy X-ray imaging technology for the detection of dangerous materials in air freight containers / *Technologies for Homeland Security (HST)*, 2015 IEEE International Symposium on. IEEE, 2015. P. 1—6.
25. *Holden N.E.* Table of the isotopes. Brookhaven National Lab., Upton, NY (US), 2003. No. BNL-71000-2003-BC. 92 p.
26. *Немец О.Ф., Гофман Ю.В.* Справочник по ядерной физике. Киев: Наукова думка, 1975. 416 с.
27. *Liu Y., Sowerby B.D., Tickner J.R.* Comparison of neutron and high-energy X-ray dual-beam radiography for air cargo inspection // *Applied Radiation and Isotopes*. 2008. V. 66. No. 4. P. 463—473.
28. Scientific educational cargo vehicle inspection system.
URL: <http://portal.tpu.ru/departments/laboratory/rknl/eng/products/iDK>
29. *Osipov S.P., Chakhlov S.V., Osipov O.S., Shtein A.M., Strugovtsev D.V.* About accuracy of the discrimination parameter estimation for the dual high-energy method // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2015. V. 81. No. 1. No. article 012082.
30. *Cao J., Jiang C.Y., Zhao Y.F., Yang Q.W., Yin Z.J.* A novel X-ray tube spectra reconstruction method based on transmission measurements // *Nuclear Science and Techniques*. 2016. V. 27. No. 2. 45 p.
31. *Mahfouz M.R., Kuhn M.J., To G., Fathy A.E.* Integration of UWB and wireless pressure mapping in surgical navigation // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2009. V. 57. No. 10. P. 2550—2564.
32. *Dipova N.* Automated strain measurements in uniaxial testing via computer vision // *Geotechnical Testing Journal*. 2018. V. 42. No. 4. <https://doi.org/10.1520/GTJ20170349>.
33. *Sommer M., Jahn A., Henniger J.* A new personal dosimetry system for HP (10) and HP (0.07) photon dose based on OSL-dosimetry of beryllium oxide // *Radiation Measurements*. 2011. V. 46. No. 12. P. 1818—1821.
34. *Hahn S., Elphic R., Murphy T., Hodgson M., Byrd R., Longmire J., Meier M.* A validation payload for space and atmospheric nuclear event detection // *2002 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*. IEEE, 2002. V. 1. P. 71—77.
35. *Zacher A.R.* A wide-range logarithmic charge digitizer // *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*. 1993. V. 40. No. 5. P. 307—316.
-