

## ОБРАТНОЕ КОМПТОНОВСКОЕ РАССЕЯНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СЛОИСТЫХ СРЕДАХ

А. Ю. Ставцев, Ю. В. Штоцкий

Московский инженерно-физический институт (государственный университет)  
E.-mail: a210883s@yandex.ru

Исследованы вклады в поле прошедшего и отраженного излучения гамма-квантов с энергией 100–400 кэВ, претерпевших однократное и многократное рассеяние. Расчеты проводились методом Монте-Карло с использованием генератора псевдослучайных чисел Knuth's. Были рассмотрены случаи неограниченного по площади  $(x, y)$  и ограниченного  $(30 \times 30 \text{ мм})$  образцов из алюминия толщиной  $t$ . Для полубесконечной среды из алюминия, железа, олова и свинца получены зависимости альbedo, потока отраженной энергии и характерных размеров активного пятна отраженного излучения. Исследовано также влияние состава гетерогенной композиции на поток отраженной энергии и размеры активного пятна.

### Введение

Рентгеновское излучение было открыто в 1895 году. Почти сразу после открытия оно стало применяться для просвечивания тела человека и других объектов. В технике и медицине широко применяются методы рентгеновской визуализации внутренней структуры объектов уже более ста лет.

Все традиционные методы рентгеновской визуализации основаны на трансмиссионном принципе, при котором регистрируется излучение, прошедшее через объект (нерассеянное). По получаемой проекции нельзя однозначно судить о распределении плотности в объекте. В рентгеновской компьютерной томографии (РКТ) измеряется большое число проекций и с помощью специальных математических алгоритмов производится восстановление распределения коэффициента линейного ослабления.

Однако не всякий объект и не всегда может быть помещен в томограф. Не всегда и приемник излучения может быть помещен за объектом. Например: крупногабаритные конструкции или диагностика стен тоннелей; неразрушающий контроль качества дорожного покрытия и т. д. В этом случае возникает необходимость "одностороннего" контроля внутренней структуры объектов. Эту задачу можно решать с помощью регистрации отраженного рентгеновского излучения.

Под отраженным излучением понимается однократно или многократно обратно рассеянное излучение самого источника, а также вторичное излучение того же вида, что и излучение источника, возникающее в

результате взаимодействия первичного излучения со средой. Для фотонов таковым является тормозное, характеристическое, аннигиляционное и флуоресцентное излучение. Отношение отраженного потока излучения к потоку падающему называется альbedo [1].

Рентгеновское и гамма-излучение при прохождении через вещество взаимодействует с электронами атомных оболочек и рассеивается в интервале углов от 0 до 180 градусов. Эти гамма-кванты несут информацию о плотности и атомном номере вещества, на котором они рассеялись. Интенсивность обратно рассеянного излучения для веществ с меньшей плотностью и меньшим атомным номером выше, чем для веществ с большей плотностью и большим атомным номером [2]. Перечислим возможные области применения сканеров обратного рассеяния:

- таможенный досмотр автотранспорта и багажа пассажиров;
- диагностика лопастей вертолетов в собранном виде;
- диагностика сварных швов трубопроводов и стен тоннелей;
- контроль толщины и качества дорожного покрытия;
- проверка качества несущих конструкций при монолитном строительстве;
- поиск тайников с боеприпасами и наркотиками;
- проверка герметичности тепловыделяющих элементов ядерных реакторов;
- поиск жучков внутри стен и других каналов утечки информации;

- диагностика онкологических заболеваний молочных желез у женщин.

## 1. Многократное рассеяние в алюминии

Были исследованы вклады в поле прошедшего и отраженного излучения гамма-квантов с энергией 150 кэВ, претерпевших однократное и многократное рассеяние. Расчеты проводились методом Монте-Карло с использованием генератора случайных чисел Knuth's [3]. Были рассмотрены случаи неограниченного по площади ( $x, y$ ) и ограниченного ( $30 \times 30$  мм) образцов из алюминия. Моноэнергетический луч фотонов падал в центр пластины под углом  $0^\circ$  и  $10^\circ$  от нормали. При анализе данных учитывались только фотоны, вышедшие через горизонтальные поверхности  $z = 0$  и  $z = t$ , где  $t$  – толщина слоя.

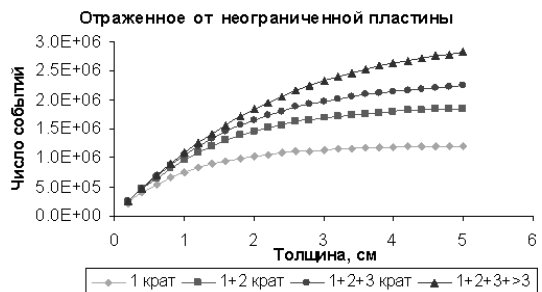
Энергия источника 150 кэВ, отсечка по энергии прошедшего излучения 149,9999 кэВ – для отсека первичного излучения, а также фотонов, рассеянных на малые углы, почти без потери энергии. Расходимость пучка 0,05 радиан. Статистика 10 млн. событий источника. Исследуемый диапазон: от 2 до 50 мм, шаг по толщине 2 мм.

На рис. 1 представлены полученные зависимости интегрального альbedo и интенсивности прошедшего рассеянного излучения от толщины слоя вещества. Для альbedo (рис. 1,а,б) наблюдается экспоненциальное возрастание интенсивности при малых толщинах с дальнейшим выходом на плато. Для ограниченного образца выход на плато происходит быстрее и при меньшем значении интенсивности насыщения. Примерно до 5 мм по толщине графики с учетом рассеяний разной кратности совпадают.

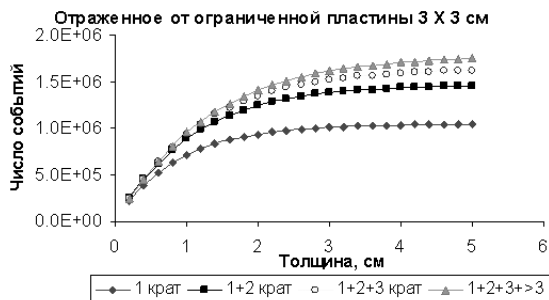
Для прошедшего однократно рассеянного излучения количество рассеянных фотонов сначала растет, достигает некоторого максимума и начинает плавно падать. Это происходит из-за того, что сначала с ростом толщины образца растет количество взаимодействовавших фотонов. При дальнейшем увеличении толщины образца кванты, рассеянные на большие углы относительно начального направления, имеют меньшую вероятность выйти из вещества, не претерпев еще, как минимум, одного рассеяния. Это приводит к некоторому сужению пика прошедшего излучения. Аналогичные рассуждения можно провести и для других графиков. Для ограниченного образца спад более резкий и начинается раньше. При учете рассеяний большей кратности пик смещается в сторону больших толщин и становится шире.

На рис. 2 представлены процентные вклады рассеяний разной кратности в интегральное альbedo в зависимости от толщины образца алюминия ограниченной ( $30 \times 30$  мм) и неограниченной площади. Как видно из графиков, до определенной толщины слоя количество отраженных фотонов, претерпевших двух и трехкратное рассеяние, растет, а затем выходит на плато. При ограничении размеров образца доля однократно

рассеянных отраженных фотонов возрастает в среднем на 10 %. Это происходит из-за квантов, рассеивающихся под прямым углом и выходящих через боковую поверхность образца.



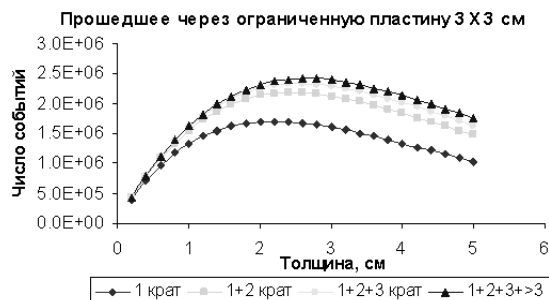
а



б



в



г

Рис. 1. Зависимость интегрального числового альbedo (а, б) и интенсивности прошедшего рассеянного излучения (в, г) от толщины образца алюминия, неограниченного по площади и размером  $30 \times 30$  мм

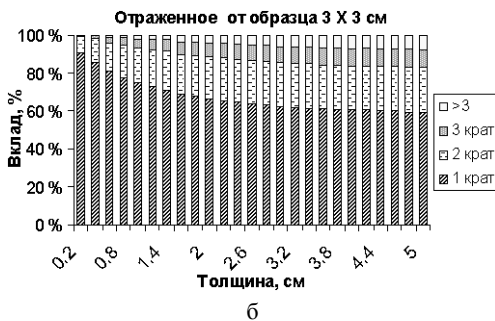
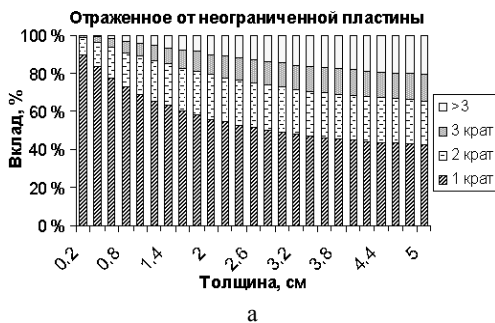


Рис. 2. Зависимость процентных вкладов рассеяний разной кратности для: а – неограниченного по площади образца алюминия; б – образца алюминия 30 × 30 мм

Результаты расчетов, приведенные в табл. 1, показывают, что для образцов конечной толщины доля однократно рассеянных фотонов в отраженном излучении существенно возрастает (от ~40 до ~90 %), при этом общее количество отраженных фотонов уменьшается в 5–10 раз в зависимости от учета рассеяний разной кратности.

Таблица 1

Вклады рассеяний разной кратности для алюминия, %

Число рассеяний	Неогр. по $x, y, z$	Неогр. по $x$ и $y$ , $t = 2$ мм		30 × 30 × 2 мм	
		Отраж.	Прошед.	Отраж.	Прошед.
1	39,29	89,76	93,44	90,93	93,95
2	21,96	8,77	5,79	8,21	5,39
3	13,83	1,19	0,56	0,65	0,30
>3	24,92	0,28	0,21	0,21	0,36

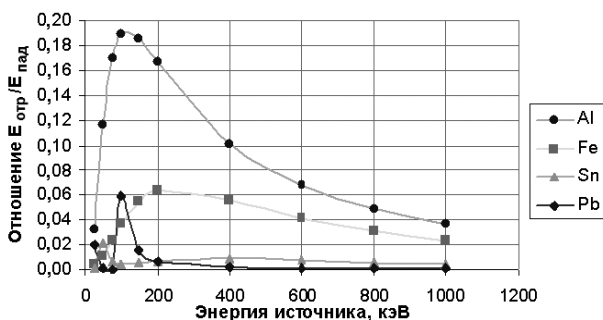


Рис. 3. Зависимость доли потока отраженной энергии от начальной энергии источника для Al, Fe, Sn, Pb

Также были исследованы альбедо и потоки энергии отраженного излучения для разных материалов и энергий источника. Показано (рис. 3), что наибольший поток энергии и количество фотонов в отраженном из-

лучении наблюдаются при энергии падающих квантов 100–300 кэВ. Среди исследованных веществ максимальные потоки отраженного излучения получены для алюминия. Из рис. 3 видно, что доля отраженной энергии для алюминия составляет 19 % при энергии источника ~ 100 кэВ.

## 2. Размеры активной области альбедо

Отраженное излучение выходит из вещества в пределах некой области, площадь и форма которой зависят от энергии, источника и геометрии задачи. Так, например, при нормальном падении первичного излучения активная область будет иметь форму круга. При наклонном падении излучения круг перейдет в эллипс. На рис. 4 приведены результаты расчетов доли потока отраженной энергии от радиуса этого круга для разных материалов при энергии источника 100–400 кэВ. Все зависимости имеют экспоненциальный характер.

Полученные зависимости позволяют оценить размеры коллиматоров, необходимые для детектирования излучения от различных материалов. Для исследованного диапазона материалов ( $Z = 13 \div 82$ ) размер коллиматора находится в диапазоне от ~ 10 см до ~ 1 мм. Чем тяжелее вещество и меньше энергия источника, тем меньше размер активного пятна.

Для выявления диапазонов, в которых распределены характерные размеры активных пятен, была дополнительно исследована зависимость потока отраженной энергии от размера детектора и коллиматора в диапазоне энергий 100–400 кэВ (см. рис. 4).

Для алюминия размеры детектируемой области сконцентрированы в одном порядке (20–110 мм), для железа и олова диапазон растянут на два порядка – от 3 до 100 мм и от 0,5 до 10 мм, соответственно. Для свинца же диапазон коллиматоров снова укладывается в один порядок 0,3–2 мм.

Таким образом, для элементов середины таблицы Менделеева размеры пятна сильно зависят от энергии первичных фотонов. Характерный размер пятна уменьшается на порядок при увеличении атомного номера вещества в ~ 2 раза (рис. 5).

## 3. Исследование слоистых (композиционных) структур

Объектом исследования являлась композиционная структура, состоящая из трех неограниченных по площади (координатам  $x, y$ ) слоев (см. табл. 2): верхний и нижний слой – из алюминия (9 мм) или железа (4 мм), средний слой толщиной 2 мм (прослойка) – воздух, свинец, алюминий или железо. Геометрия всех композиций была одинакова. Для воздуха брался средневзвешенный  $Z$  по смеси кислорода и азота.

В качестве анализируемых параметров выбраны поток отраженной энергии и размер пятна, откуда выходит 90 % отраженного излучения (см. табл. 2).

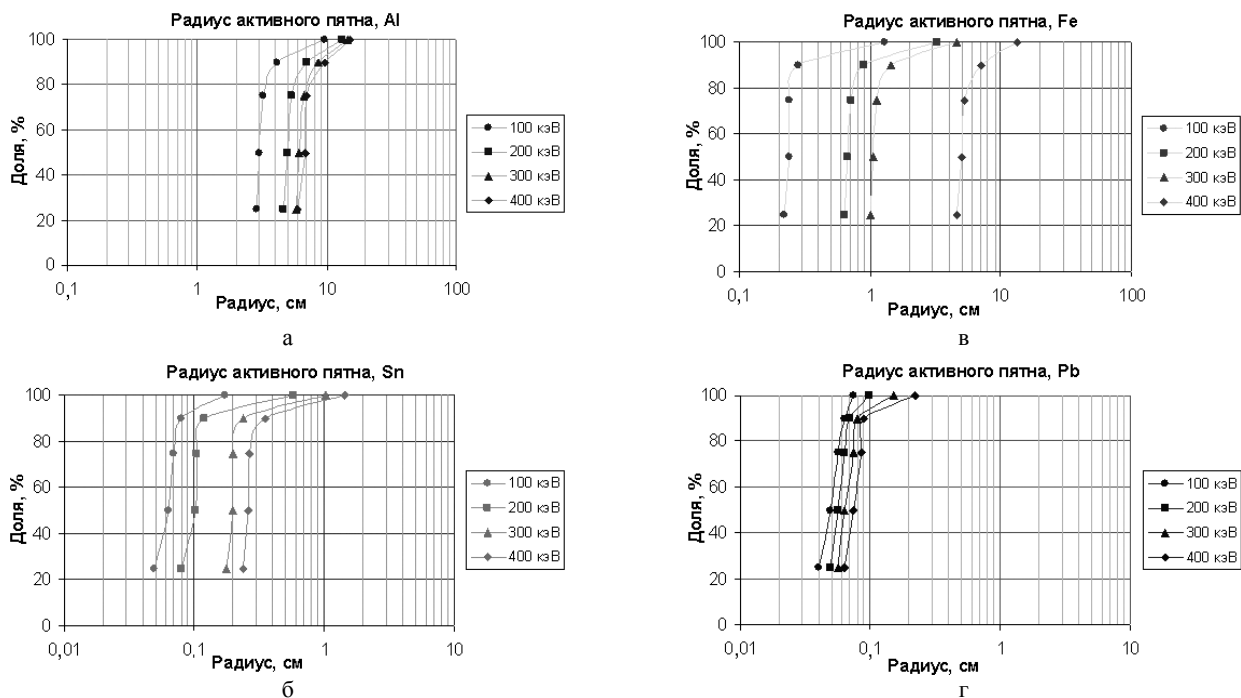


Рис. 4. Зависимости долей потока отраженной энергии от размеров детектируемого пятна для начальной энергии фотонов в диапазоне 100–400 кэВ

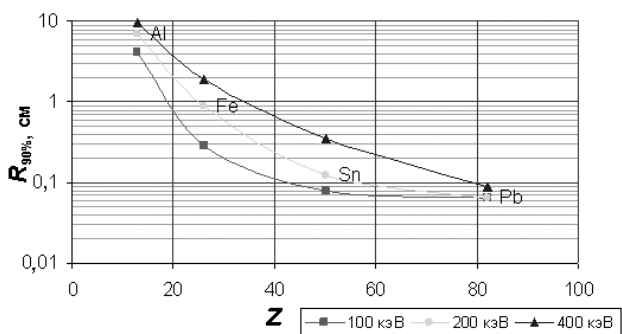
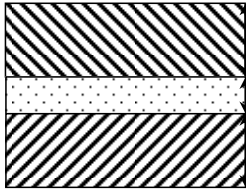
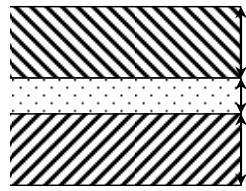


Рис. 5. Зависимость размера активного пятна, откуда излучается 90 % потока отраженной энергии, от атомного номера вещества

Таблица 2

Зависимость потока отраженной энергии и размеров пятна от состава композиции ( $E_{нач} = 200$  кэВ, статистика  $10^8$ )

Композиция	X	Поток энергии (альbedo), кэВ	$R_{90\%}$ , мм
 Al – 9 мм X – 2 мм Al – 9 мм	Воздух	1.74E+08	36,7
	Al	1.87E+08	35,2
	Fe	1.78E+08	27,2
	Pb	1.09E+08	19,8
 Fe – 4 мм X – 2 мм Fe – 4 мм	Воздух	1.12E+08	8,6
	Al	1.18E+08	8,7
	Fe	1.17E+08	7,8
	Pb	8.61E+07	5,2

Как можно видеть из табл. 2, для алюминия и железа наличие воздушного зазора привело к уширению пятна по сравнению со сплошным образцом материала. Данное явление вызвано разлетом фотонов в слабо поглощающей среде. Однако поток отраженной энергии уменьшается, так как отражение от воздуха мало ввиду его малой по сравнению с металлами плотности.

Ввод прослойки железа в структуру из алюминия приводит к уменьшению и потока отраженной энергии, и размеров пятна. Размещение же прослойки алюминия в железе приводит к незначительному изменению потока отраженной энергии (по сравнению с цельным куском железа), но при этом размеры пятна увеличиваются.

Наличие свинцовой вставки приводит к значительному уменьшению как потока отраженной энергии, так и размеров активного пятна для обоих случаев. То есть, происходит экранирование нижележащих слоев.

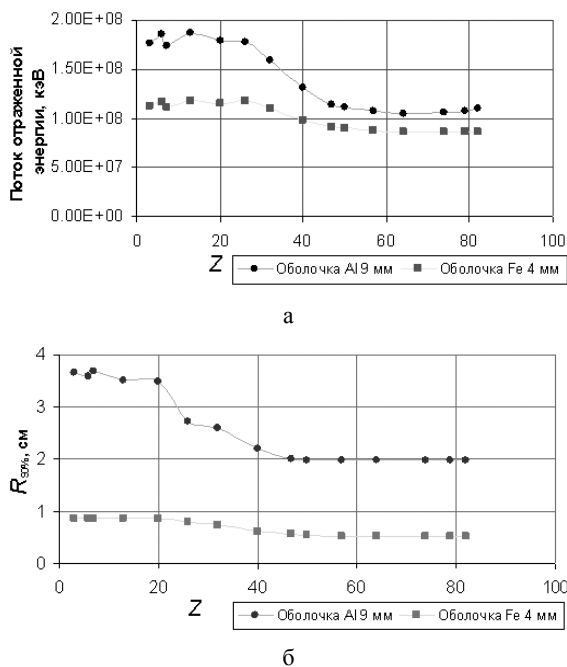


Рис. 6. Зависимость потока отраженной энергии (а) и размеров активного пятна (б) от  $Z$  образца прослойки ( $E_{нач} = 200$  кэВ, статистика  $10^8$ )

Более полно эти данные отражены на рис. 6. Данные охватывают вещества от лития ( $Z = 3$ ) до свинца ( $Z = 82$ ). Шаг по  $Z$  выбран в диапазоне примерно от 5 до 10. Видно, что зависимости имеют два уровня (легкие вещества до  $Z = 25$  и тяжелые с  $Z = 50$ ) и область перехода между ними. Размеры пятен для этих областей отличаются примерно в 2 раза. Так же наблюдаются небольшие осцилляции для легких веществ, вызванные колебаниями плотности, так как для некоторых твердых веществ с увеличением атомного номера может быть уменьшение плотности. Для воздушной прослойки присутствует некоторый провал по потоку энергии и уширение пятна.

Для прослоек из тяжелых веществ имеет место минимум исследуемых величин в районе  $Z = 64$  (гадолиний). Далее, при приближении к свинцу, наблюдает-

ся небольшой рост потока отраженной энергии, вызванный ростом энергии связи  $K$  оболочки и соответственно энергии характеристического излучения. Энергия становится достаточной для выхода этих фотонов. Размеры активного пятна при этом почти не меняются.

В данной постановке эксперимента зона наилучшего контраста по  $Z$  достигается в диапазоне от 20 до 50.

## Выводы

- Рассеяния кратности выше 5 дают незначительный вклад в поле отраженного излучения.
- С ростом энергии источника альbedo для всех исследованных материалов (Al, Fe, Sn, Pb) уменьшается.
- Альbedo и поток отраженной энергии максимальны для источников с энергией 100–300 кэВ (диапазон рентгеновского излучения).
- Наибольшая доля отраженной энергии 20 % (при облучении фотонами с энергией 100 кэВ) наблюдается для алюминия.
- С ростом энергии источника размер активного пятна  $R$  экспоненциально увеличивается, что вызвано ростом многократного рассеяния.
- При энергиях источника, близких к  $K$ -линии тяжелых элементов, в альbedo наблюдается резкое возрастание числа фотонов характеристического излучения.
- С ростом атомного номера материала размер активного пятна уменьшается от  $\sim 100$  мм (Al) до  $\sim 0,1$  мм (Pb).
- Наличие воздушной полости в образце приводит к уширению активного пятна альbedo и уменьшению потока отраженной энергии.
- Для образца из железа и прослойки из алюминия наблюдается незначительное изменение потока отраженной энергии (по сравнению с цельным куском железа), но при этом размеры пятна увеличиваются.
- Прослойка из тяжелого вещества (Pb) приводит к экранированию нижележащих слоев и уменьшению как потока отраженной энергии, так и размеров пятна.
- Наилучший контраст по  $Z$  достигается в диапазоне от 20 до 50.

## Список литературы

1. Булатов Б. П., Ефименко Б. А., Золотухин В. Г., Климанов В. А., Машкович В. П. Альbedo гамма-излучения. М.: Атомиздат, 1968.
2. Беляев В. Н., Ставцев А. Ю. Разработка методов одностороннего контроля внутренней структуры объектов по отраженному рентгеновскому излучению // Сборник научных трудов «Научная сессия МИФИ-2006». М.: МИФИ. 2006. Т. 5. С. 27–28.
3. Беляев В. Н., Ставцев А. Ю. Генераторы псевдослучайных чисел и их применимость для расчетов Монте-Карло в задачах обратного рассеяния рентгеновского излучения // Сборник аннотаций «4-й Курчатовской молодежной научной школы». М.: РНЦ «Курчатовский институт». 2006. С. 102.

Статья поступила в редакцию 21.10.2008.