

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-4-650-658

УДК 543.426

Метод дистанционного контроля радиационных параметров космических аппаратов на основе рентгенофлуоресцентного анализа

Людмила Анатольевна Лукьянова¹, Игорь Владимирович Свитнев²✉,
Елена Александровна Харитоновна³, Илья Евгеньевич Гаврилов⁴

^{1,2,3,4} Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034, Российская Федерация

¹ lalukianova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5458-3019>

² isvitnev@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-8862-1797>

³ Haritonova_ea@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4851-2756>

⁴ Ilyusha-2145@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1124-0336>

Аннотация

Предмет исследования. Существующие международные юридические акты, инструменты и процедуры не гарантируют обеспечения паритетных условий для освоения и использования космического пространства. Необходимы средства объективного контроля космических аппаратов, на борту которых могут находиться изделия с делящимися материалами. Инспекция таких объектов может проводиться методами рентгенофлуоресценции. Однако в рассматриваемой предметной области применение подобных методов мало изучено. В данной работе предложен метод получения спектров рентгенофлуоресцентного излучения материалов, исследуемого объекта на основе расчета пространственно-энергетических характеристик рентгеновского излучения. **Метод.** Спектры рентгенофлуоресцентного исследования объектов получены на основе расчета пространственно-энергетических характеристик рентгеновского излучения по разработанным авторами оригинальным геометрической (математической) и имитационным моделям. При расчетах учтена сложная слоистая система объекта с учетом долей высокоэнергетического флуоресцентного излучения вышележащих слоев. Предложен численный эксперимент с использованием программы, которая позволяет выбрать проекции объекта, подвергаемого рентгеновскому облучению, длину волны и интенсивность параметров излучателя. С помощью полученного пространственно-энергетического распределения квантов излучения и физических свойств среды прохождения излучения решена задача поиска координат и углов пересечения треков пучков квантов в каждой области объекта. Результат программной обработки отображен в виде результирующего спектра. Полученный спектр позволил сделать вывод о химическом составе материалов инспектируемого объекта. Пучок рентгеновского излучения, достигающий объекта, смоделирован в виде пятна площадью, соизмеримой с сечением аппарата в виде выбранного геометрического примитива — квадрата. Площадь пятна падающих фотонов рассчитана по заранее задаваемому углу расхождения. **Основные результаты.** На основе открытых научных работ выбрана физическая модель объекта с ядерными делящимися материалами W88 (США). Приняты следующие характеристики рентгеновских пучков (подпучков): когерентный пучок фотонов с длиной волны 0,005 нм; угол рассеяния пучка 1°, число квантов от $1 \cdot 10^{15}$ (для дистанции облучения 10 м) до $1 \cdot 10^{21}$ (для дистанции 10 км); площадь детектора излучателя 4 м². Получен результирующий спектр рентгеновской флуоресценции, представляющий химический состав узлов и блоков аппарата и объекта, находящегося внутри. Наличие на борту объекта специфических изделий подтверждается характеристическими линиями с нормированными длинами волн, которые демонстрируют присутствие химических элементов радиоактивного ряда. **Практическая значимость.** Полученные результаты могут найти применение при разработке оборудования и программного обеспечения устройств космических аппаратов, при контроле наличия распадающихся материалов на борту инспектируемого аппарата.

Ключевые слова

делящиеся материалы, длина волны, рентгеновское излучение, флуоресценция, элементный состав, энергия кванта

Ссылка для цитирования: Лукьянова Л.А., Свитнев И.В., Харитоновна Е.А., Гаврилов И.Е. Метод дистанционного контроля радиационных параметров космических аппаратов на основе рентгенофлуоресцентного анализа // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 4. С. 650–658. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-4-650-658

© Лукьянова Л.А., Свитнев И.В., Харитоновна Е.А., Гаврилов И.Е., 2022

Method for remote control of radiation parameters of spacecraft based on X-ray fluorescence analysis

Lyudmila A. Lukyanova¹, Igor V. Svitnev²✉, Elena A. Kharitonova³, Ilya E. Gavrilov⁴

^{1,2,3,4} St. Petersburg State University (SPbSU), Saint Petersburg, 199034, Russian Federation

¹ lalukyanova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5458-3019>

² isvitnev@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-8862-1797>

³ Xaritonova_ea@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4851-2756>

⁴ Ilyusha-2145@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1124-0336>

Abstract

Existing international legal acts, instruments and procedures do not guarantee equal conditions for the exploration and use of outer space. There is a need for means of objective control of spacecraft carrying products with fissile materials. Inspection of such objects can be carried out by X-ray fluorescence methods. However, in the subject area under consideration, the use of such methods has been little studied. In this paper, a method is proposed for obtaining the spectra of X-ray fluorescence radiation of materials, the object under study based on the calculation of the spatial and energy characteristics of X-ray radiation. The X-ray fluorescence spectra of objects are obtained on the basis of the calculation of the spatial and energy characteristics of X-ray radiation according to the original geometric (mathematical) and simulation models developed by the authors. The calculations take into account the complex layered system of the object, taking into account the proportions of high-energy fluorescent radiation of the overlying layers. An original numerical experiment is proposed using a program that allows one to choose the projections of an object subjected to X-ray irradiation, the wavelength and intensity of the emitter parameters. Using the obtained spatial-energy distribution of radiation quanta and the physical properties of the radiation transmission medium, the problem of finding the coordinates and angles of intersection of tracks of quanta beams in each area of the object is solved. The result of software processing is displayed as the resulting spectrum. The obtained spectrum makes it possible to draw a conclusion about the chemical composition of the materials of the inspected object. The X-ray beam reaching the object is modeled as a spot with an area commensurate with the cross section of the device in the form of a selected geometric primitive — a square. The spot area of the incident photons is calculated from a predetermined divergence angle. On the basis of open literary sources, a physical model of an object with nuclear fissile materials W88 (USA) was chosen. The following characteristics of X-ray beams (subbeams) are accepted: a coherent beam of photons with a wavelength of 0.005 nm; beam scattering angle of 1 degree; emitter detector area of 4 m². The resulting X-ray fluorescence spectrum was obtained which gives an idea of the chemical composition of the units and blocks of the apparatus and the object inside. The presence of specific products on the object board is confirmed by characteristic lines with normalized wavelengths indicating the presence of chemical elements belonging to the radioactive series. The results obtained can be used in the development of hardware and software for spacecraft devices that monitor the presence of fissile materials on board of the inspected vehicle.

Keywords

fissile materials, wavelength, X-rays, fluorescence, elemental composition, quantum energy

For citation: Lukyanova L.A., Svitnev I.V., Kharitonova E.A., Gavrilov I.E. Method for remote control of radiation parameters of spacecraft based on X-ray fluorescence analysis. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 4, pp. 650–658 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-4-650-658

Введение

Современная международная деятельность в области исследования и освоения космического пространства характеризуется: расширением перечня государств, реализующих практические программы; прогрессирующим объемом межгосударственного сотрудничества; увеличением масштабов действий, предпринимаемых, в том числе неправительственными юридическими лицами и партнерскими компаниями; постоянным появлением новых технологий; возрастанием числа запусков космических аппаратов различного назначения. В этих условиях сложно обнаружить нарушение паритетных отношений при использовании космического пространства.

В соответствии с принципами, государства-участники Договора¹ обязуются не выводить на орбиту вокруг Земли какие бы то ни было объекты с ядерным ору-

жием или любыми другими видами оружия массового уничтожения, не устанавливать такое оружие на небесных телах и не размещать такое оружие в космическом пространстве каким-либо иным образом. Кроме того, требуется сводить к минимуму количество радиоактивного материала в космосе и связанные с этим риски использования ядерных источников энергии в космическом пространстве².

В интересах контроля выполнения взятых обязательств государствами-участниками действует система регистрации объектов, запускаемых в космическое пространство³, согласно которой осуществляется национальная регистрация запускающими государствами космических объектов, включающая, в том числе сведения

¹ Договор о принципах деятельности государств по исследованию и использованию космического пространства, включая Луну и другие небесные. Принят резолюцией 2222 (XXI) Генеральной Ассамблеи ООН от 19.12.1966 г. Статьи IV и V.

² Принципы, касающиеся использования ядерных источников энергии в космическом пространстве. Приняты Генеральной Ассамблеей ООН в резолюции 47/68 от 14.12.1992 г. Часть 2, Глава В.

³ Конвенция о регистрации объектов, запускаемых в космическое пространство. Принята 12.11.1974 резолюцией 3235 (XXIX) на 2280-ом пленарном заседании 29-ой сессии Генеральной Ассамблеи ООН. Часть 1, глава С, Статьи I–IV.

об общем назначении космического аппарата. Вместе с тем, в рамках принятого соглашения, предусматривается возможность обеспечения государств-участников дополнительными средствами и процедурами, способствующими идентификации космических объектов. Исходя из этого, одной из мер проверки соответствия заявленным задачам запущенных космических аппаратов может рассматриваться их инспекция.

Идея осмотра чужих спутников появилась еще в семидесятых годах, и в настоящее время ведущие космические державы разрабатывают, испытывают и вводят в строй свои орбитальные средства для этой цели^{1,2,3,4}.

Спутник-инспектор — аппарат, который может приблизиться к другому спутнику и осмотреть его. Основная задача спутников-инспекторов заключается в сборе данных о других объектах, находящихся на орбите. Относительно небольшие размеры аппарата обеспечивают его малозаметность.

Реализованные на сегодняшний день методы инспекции с использованием оптико-электронной аппаратуры [1] не могут дать полного понимания о фактическом назначении аппарата.

Постановка задачи

Наиболее близкий по физическому содержанию метод инспекции назначения космического аппарата гамма-спектрометрия [2]. Сущность данного метода состоит в регистрации гамма-квантов, испускаемых радиоактивными изотопами, накопленными за время работы космических ядерных энергетических установок. Соответственно, гамма-спектрометрия не дает представление о делящихся материалах, находящихся в подкритическом состоянии.

В качестве одного из возможных подходов к решению рассматриваемой проблемы предложен метод обнаружения изделий, размещенных на борту космического аппарата и содержащих радиоактивные элементы, основанный на рентгенофлуоресцентном анализе (рис. 1).

Рентгенофлуоресцентный анализ — современный физический метод элементного анализа, т. е. качественного и количественного определения содержания химических элементов в конструкционных узлах и блоках исследуемого объекта.

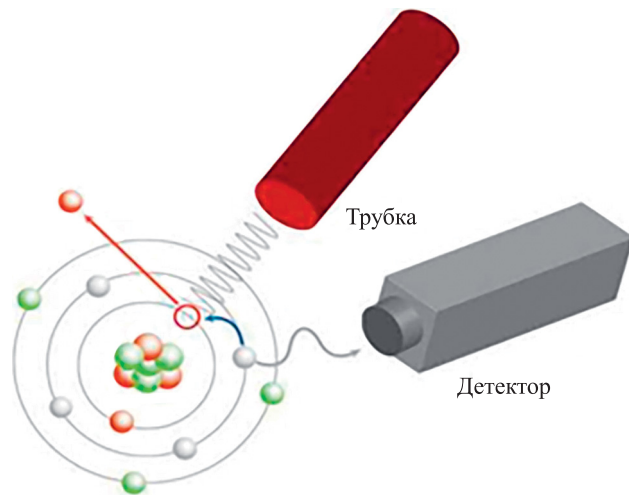


Рис. 1. Принципиальная схема применения метода рентгенофлуоресцентного анализа

Fig. 1. Schematic diagram of the application of the X-ray fluorescence method

Традиционно рентгенофлуоресцентный метод используется при определении главной компоненты в ходе анализа материалов в металлургической, строительной, топливной промышленности, а также в геологии. В последнее время наблюдается расширение сферы практического приложения метода в области анализа объектов окружающей среды, в медицине и научно-исследовательских целях.

Рентгеновские кванты, испускаемые источником рентгеновского излучения, проходят сквозь исследуемый материал, вызывая в нем рентгеновскую флуоресценцию. Кванты, испущенные материалом, покидают его, некоторая их часть попадает в детектор и подвергается анализу.

При прохождении пучка рентгеновского излучения через слой вещества интенсивность пучка ослабевает в направлении его распространения вследствие процессов: поглощения и рассеяния. В случае поглощения фотона первичного излучения из атома выбрасывается фотоэлектрон и образуется вакансия в одной из внутренних оболочек. Уменьшение энергии атома путем заполнения этой вакансии более удаленным от ядра электроном возможно переходами двух типов: радиационным (с испусканием фотона характеристического излучения) и безрадиационным (с выбрасыванием из атома еще одного электрона). В первом случае атом флуоресцирует, во втором случае — нет [3].

В зависимости от относительной вероятности переходов этих двух типов доля случаев, в которых испускаются характеристические фотоны, может быть больше или меньше.

В соответствии с положением в периодической системе, каждый химический элемент [4] обладает своей конфигурацией заполняемых электронных уровней, следствием чего является уникальный для каждого элемента набор переходов электронов с одного уровня на другой. Энергия кванта рентгеновской флуоресценции элемента зависит от разницы энергий уровней, между которыми происходит переход. Длина волны излуче-

¹ Спутник «Космос-2519». Инспектор на орбите. Военное обозрение [Электронный ресурс]. URL: <https://topwar.ru/128281-sputnik-kosmos-2519-inspektor-na-orbite.html> (дата обращения: 19.02.2022).

² США увеличивают группировку спутников-инспекторов GSSAP. Военное обозрение [Электронный ресурс]. URL: <https://topwar.ru/191611-ssha-uvlichivajut-gruppirovku-sputnikov-inspektorov-gssap.html> (дата обращения: 19.02.2022).

³ Инспектор и буксир. Экспериментальный космический аппарат «Шицзянь-21» (Китай). Военное обозрение: сайт. 2017 [Электронный ресурс]. URL: <https://topwar.ru/191898-inspektor-i-buksir-jeksperimentalnyj-kosmicheskij-apparat-shiczyan-21-kitaj.html> (дата обращения: 18.02.2022).

⁴ GSSAP (Geosynchronous Space Situational Awareness Program) [Электронный ресурс]. URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/g/gssap> (дата обращения: 20.02.2022).

ния прямо пропорциональна энергии кванта. Таким образом, существует однозначная взаимосвязь между длинами волн излучения и порядковыми номерами элементов, это излучение испустивших.

Использование рентгенофлуоресцентного анализа в интересах инспекции космического аппарата предоставляет возможность быстрого получения информации о качественном составе исследуемого объекта по отдельным химическим элементам от бериллия (Be) до урана (U), а при применении аппаратов-эталонов и проведении серии измерений — приблизительно количественном содержании простых веществ [5]. Это позволяет делать аргументированные предположения об устройстве и назначении аппарата и находящихся на нем объектов. При этом необходимо учитывать ряд существенных факторов, влияющих на эффективность применения предлагаемого метода. К ним относятся:

- большая энергозатратность;
- высокие требования к углу расхождения пучка квантов, а также к точности наведения излучателя на исследуемый аппарат;
- вероятность случайного повреждения радиоэлектронного оборудования космического аппарата, оказавшихся на линии пролета пучка частиц, либо вывод из строя исследуемого объекта при избыточной интенсивности излучения на небольшой дистанции.

Проверка целесообразности и безопасности применения метода рентгенофлуоресцентного анализа в задачах инспекции орбитальных средств осуществляется путем компьютерного моделирования процесса прохождения рентгеновского излучения через космический аппарат с последующим заключением о наличии в составе конструктивных блоков специфических химических элементов.

Моделирование прохождения пучка рентгеновского излучения через космический аппарат

Имитационная модель процесса прохождения квантов рентгеновского излучения через вещество базируется на решении дифференциальных уравнений, описывающих расчет интенсивности флуоресценции, и задачи вычислительной геометрии прохождения рентгеновского излучения через трехмерные объекты произвольной формы, и реализована в программной среде Microsoft Visual Studio Community 2017.

Исходные данные и допущения.

1. Исследуемый объект представлен в виде графической модели, оригинальной геометрической модели прохождения квантов рентгеновского излучения через среду и расчета значений альbedo, а также физической модели в виде набора уравнений, задающих определенные области пространства, соответствующие тем или иным функциональным элементам и узлам космического аппарата.
2. Вследствие больших расстояний до inspectируемого аппарата можно допустить, что лучи рентгеновского излучения движутся перпендикулярно моделируемому пятну на аппарате.

3. На площади пятна выбирается область, покрывающая габариты модели. Область разделяется на подобласти, задаваемые программно.
4. Траекторией всего излучения подпучка квантов, проходящего через подобласти объекта, является линия, перпендикулярная пятну.
5. Поскольку форма подобластей объекта может быть произвольной, то для простоты расчетов и организации памяти программы она выбрана квадратной. Форма подобластей не оказывает значительного влияния на точность вычислений.
6. Весь падающий поток квантов рентгеновского излучения разбивается на подпучки меньшего диаметра в форме цилиндров, оси симметрии которых принимаются как пути прохождения всех квантов рентгеновского излучения в этих пучках.
7. Частота флуоресценции для разных химических элементов задается коэффициентами выхода флуоресценции уровня в виде вероятности возникновения «скачка» поглощения квантов рентгеновского излучения — $P_{пр}$. Вероятность $P_{пр}$ тем меньше, чем легче элемент и выше энергетический уровень.
8. Химические элементы до алюминия, не включительно, не способны создавать рентгенофлуоресцентное излучение достаточной интенсивности; их наличием при создании модели можно пренебречь, так как их вклад в результирующий спектр незначителен.
9. Значения геометрического параметра модели прохождения рентгеновского излучения через среду β рассчитано авторами на основе геометрической модели для расчета альbedo.

Вербальное описание модели. С помощью разработанной авторским коллективом программы исследуемый объект воспроизводится в виде демонстрационной графической модели, а также физической модели в форме набора уравнений, задающих определенные подобласти пространства, соответствующие тем или иным функциональным элементам и узлам космического аппарата. К каждой из подобластей привязан набор физических коэффициентов, характеризующих проницаемость квантов первичного излучения и рентгеновскую флуоресценцию в зависимости от химического состава вещества, заполняющего подобласть [6].

Программа предлагает выбрать проекцию космического аппарата, подвергаемого облучению, длину волны и интенсивность излучения. Проекция космического аппарата разбивается на подобласти, число которых зависит от требуемой точности и скорости вычислений. Центр каждой подобласти считается точкой попадания всех квантов излучения в космический аппарат. Рассчитывается длина пути квантов в заданных математически подобластях пространства, занимаемых теми или иными узлами, и углы падения квантов рентгеновского излучения при переходе из одной среды в другую. С использованием данных о пробегах квантов и физических свойствах пройденных ими сред решаются задачи вычислительной геометрии — поиск координат и углов пересечений прямых линий и трехмерных фигур произвольной формы. На конечном этапе вычисляется рентгеновская флуоресценция каждой подобласти.

Полученные значения сводятся вместе и отображаются в виде результирующего спектра.

Графическая интерпретация моделируемых процессов представлена на рис. 2.

Математическое представление модели. Подобласти космического аппарата характеризуются вероятностью P проникновения квантов рентгеновского излучения без взаимодействия на глубину ξ , рассеяния в обратном направлении и выходе за пределы отражателя в направлении детектора. Ее значение может быть получено из выражения:

$$\frac{dP}{d\Omega d\xi} = \rho_i \frac{N_A}{A_i} \cdot \sec\Theta_0 \exp\left[\frac{\bar{\mu}_0(E_0)\xi}{\cos\Theta_0}\right] \cdot \left(\frac{E_1^s}{E_0}\right) \times \\ \times \left\{ \frac{d\sigma_k}{d\Omega}(E_0, \Theta_s) \cdot Z \cdot \exp\left[-\frac{\bar{\mu}_1(E_1^s)\xi}{\cos\Theta_1}\right] + \frac{d\sigma_R}{d\Omega}(E_0, \Theta_s) \cdot \exp\left[-\frac{\bar{\mu}_0(E_0)\xi}{\cos\Theta_0}\right] \right\},$$

где ξ — глубина рассеивающего материала, г·см⁻²; ρ_i — плотность i -го материала, г/см³; N_A — число Авогадро, 6,022 140 76·10²³ моль⁻¹; A_i — атомная масса i -го элемента, а.е.м.; $\Theta_0, \Theta_1, \Theta_s$ — углы падения, рассеяния и выхода квантов, град.; ($\bar{\mu}_0$ и $\bar{\mu}_1$ — линейные коэффициенты ослабления рентгеновского излучения оболочкой космического аппарата и материалами подобласти космического аппарата, см⁻¹ (E_0 и E_1^s — энергия рент-

геновского излучения падающего потока и отраженная в точке, кэВ); ($\frac{d\sigma_k}{d\Omega}$ и $\frac{d\sigma_R}{d\Omega}$ — дифференциальные сечения комптоновского и когерентного рассеяний, см²); Z — атомный номер; Ω — геометрическая постоянная сечения взаимодействия.

Подобласти разбиваются на геометрические примитивы, принимая во внимание возможность пересечения отдельных объектов космического аппарата и путей квантов в подобластях. Проводится перебор слоев материалов космического аппарата при условии, что сведения по обратному рассеянию излучения от тонких рассеивателей с $Z \leq 26$ и $E_0 = 50\text{--}300$ кэВ в справочном материале не приводятся.

Поскольку для исследуемого диапазона энергии (0,0001–14,4 нм) толщины оболочки космического аппарата составляют величину меньше или порядка двух длин свободного пробега, то необходимо получить выражения для расчета дифференциального токового энергетического (a_E) и дифференциального числового (a_N) альбеда. Для получения математических зависимостей a_E и a_N необходимо знать значение энергии падающего потока рентгеновского излучения на элемент подобласти.

Рентгеновское излучение с энергией E_0 падает на элемент поверхности, с учетом предлагаемой ориги-

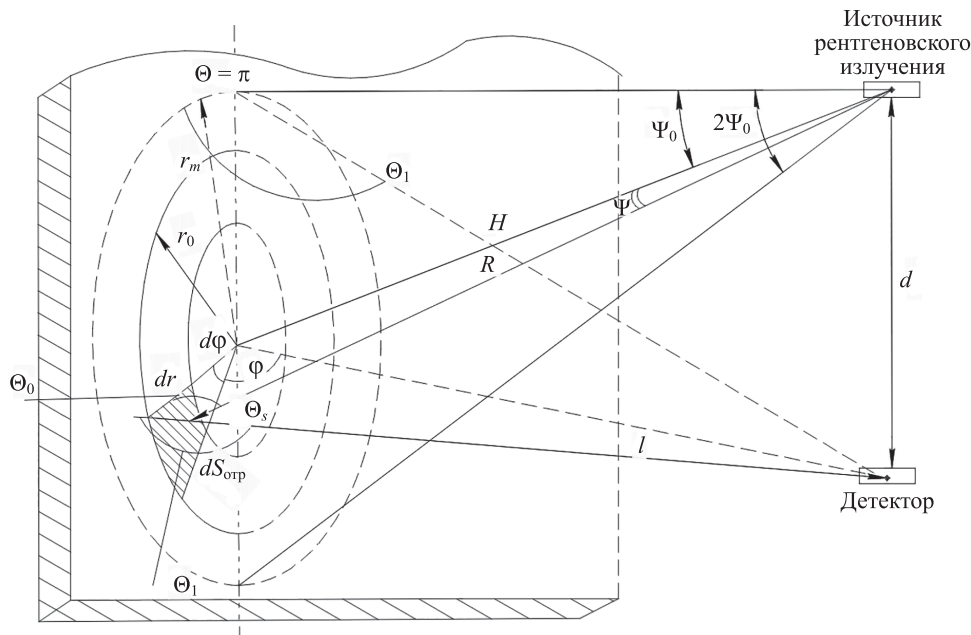


Рис. 2. Геометрическая схема прохождения квантов рентгеновского излучения через среду и расчета значений альбеда: $\Theta_0, \Theta_1, \Theta_s$ — углы падения, выхода и рассеяния квантов соответственно, рад; Ψ_0 — половина угла раскрытия диаграммы направленности генератора; Ψ — угол между нормалью к элементу поверхности и направлением квантов рентгеновского излучения; φ — угол рассеяния квантов рентгеновского излучения в подобластях; H — расстояние от источника до космического аппарата; R — длина пробега рентгеновского кванта; l — длина пробега отраженного рентгеновского кванта до детектора; r — радиус отражаемой поверхности; d — величина базы «источник-детектор»; r_0, r_m — характеристики отражающей поверхности для расчета альбеда

Fig. 2. The geometric scheme of the passage of X-ray quanta through matter and calculation of albedo values: $\Theta_0, \Theta_1, \Theta_s$ — the angles of incidence, output and scattering of quanta, respectively; Ψ_0 — half of the angle of opening of the radiation pattern of the generator; Ψ — the angle between the normal to the surface element and the direction of the X-ray quanta; φ — scattering angle of X-ray quanta in subdomains; H — the distance from the source to the spacecraft; R — the length of the path of the X-ray quantum; l — the length of the path of the reflected X-ray quantum to the detector; r — the radius of the reflected surface; d — the value of the base «source-detector»; r_0, r_m — characteristics of the reflecting surface for calculating albedo

нальной геометрической модели прохождения излучения (рис. 2), площадью $dS_{\text{отр}} = r dr d\varphi$ с энергией $dE_{\text{пад}}$:

$$dE_{\text{пад}} = \frac{E_0}{2\pi R^2} \cos\Psi \exp(-\mu_0 R) dS_{\text{отр}},$$

где $R = (H^2 + r^2)^{1/2}$; μ_0 — энергетический коэффициент ослабления рентгеновского излучения, падающего на отражатель.

Тогда с помощью предлагаемой геометрической модели прохождения излучения через среду и расчета альбеда (рис. 2) можно рассчитать значение падающей энергии $dE_{\text{пад}}$ на элемент отражаемой поверхности $dS_{\text{отр}}$.

Авторская модель (рис. 2) позволяет сформулировать математическую запись для расчетов параметров выражений.

Тогда энергия излучения, падающая на отражаемую поверхность радиусом $r = H \tan\Psi_0$, будет равна:

$$E_{\text{пад}} = \int_0^{H \tan\Psi_0} \int_0^{2\pi} \frac{E_0}{2\pi R^2} \exp(-\mu_0 R) \cos\Psi r dr d\varphi.$$

Величина отраженной энергии E_1^s в точке приема составляет:

$$E_1^s = E_{\text{пад}} \Omega A_E \beta,$$

где $\Omega = 4\pi \sin^2\left(\frac{\Psi_0}{2}\right)$; β — геометрический параметр системы:

$$\beta = \int_0^{H \tan\Psi_0} \int_0^{2\pi} \times \frac{\exp(-9\sqrt{H^2 + r^2}) \exp(-\mu_1 \sqrt{H^2 + d^2 + r^2 - 2dr \cos\varphi})}{8\pi^2 (H^2 + r^2)(H^2 + d^2 + r^2 - 2dr \cos\varphi)} r dr d\varphi.$$

Коэффициенты $\bar{\mu}_0$, μ_1 имеют непосредственную взаимосвязь с зарядовыми числами атомов вещества. Общий пучок излучения разбивается относительно проекции на космический аппарат по подобластям с учетом значений дифференциальных альбедо A_N и a_E . Определение A_N в зависимости от толщины конструкционного материала космического аппарата осуществляется по следующему выражению:

$$A_N = \rho_i \frac{N_A}{A_i} \frac{1}{\cos\Theta_1} \left\{ \frac{d\sigma_k}{d\Omega}(E_0, \Theta_0) Z \times \times \left(\frac{\cos\Theta_0 \cos\Theta_1}{\mu_0(E_0) \cos\Theta_1 + \bar{\mu}_1(E_1^s) \cos\Theta_0} \right) \times \times \left[1 - \exp\left(-\frac{\bar{\mu}_0(E_0)}{\cos\Theta_0} + \frac{\bar{\mu}_1(E_1^s)}{\cos\Theta_1} \cdot \xi \right) \right] \frac{d\sigma_R}{d\Omega}(E_0, \Theta_0) \times \times \left(\frac{\cos\Theta_0}{2\bar{\mu}_0(E_0)} \right) \left[1 - \exp\left(-\frac{2\bar{\mu}_0(E_0)}{\cos\Theta_0} \right) \right] \right\}.$$

Определим a_E по формуле:

$$a_E = \rho_i \frac{N_A}{A_i} \sec\Theta_0 \left\{ \frac{d\sigma_k}{d\Omega}(E_0, \Theta_0) Z \times$$

$$\times \left(\frac{\cos\Theta_0 \cos\Theta_1}{\mu_0(E_0) \cos\Theta_1 + \bar{\mu}_1(E_1^s) \cos\Theta_0} \right) \times \times \left[1 - \exp\left(-\frac{\bar{\mu}_0(E_0)}{\cos\Theta_0} + \frac{\bar{\mu}_1(E_1^s)}{\cos\Theta_1} \cdot \xi \right) \right] \left(\frac{E_1^s}{E_0} \right) + + \frac{d\sigma_R}{d\Omega}(E_0, \Theta_0) \left(\frac{\cos\Theta_0}{2\bar{\mu}_0(E_0)} \right) \left[1 - \exp\left(-\frac{2\bar{\mu}_0(E_0)}{\cos\Theta_0} \right) \right] \right\}.$$

В каждой подобласти считается, что все кванты прошли по одной прямой линии, перпендикулярной к центру подобласти. В зависимости от вероятности проникновения P квантов рентгеновского излучения в подобласти рассеяния в обратном направлении и выходу к детектору, выбираемого направления движения пучка квантов в программе расчета динамически вычисляются точки пересечений отдельных объектов космического аппарата и путей квантов в подобластях.

Определение максимального пробега квантов флуоресценции осуществляется по следующей функциональной зависимости:

$$R_{\text{макс}} = f(E_0, N_0, K_{\Sigma E^*}, \varepsilon_d, P_{\text{ск}}, A_N),$$

где N_0 — выход квантов, с^{-1} ; $K_{\Sigma E^*}$ — суммарный коэффициент ослабления энергии рентгеновского излучения корпусом космического аппарата; ε_d — эффективность регистрации детектором квантов рентгеновского излучения, %; $P_{\text{ск}}$ — вероятность поглощения квантов рентгеновского излучения с испусканием фотоэлектрона.

На основании полученных значений a_E , A_N и $P_{\text{пр}}$, а также учета толщин элементов конструкции космического аппарата выбирается оптимальная энергия излучателя рентгеновского излучения.

Вычисление длины λ_i пути квантов рентгеновского излучения в заданной подобласти аппарата произведена с учетом факторов, определяющих виды взаимодействия [7]:

$$\lambda_i = f(E_0, \Psi, \varphi, \bar{\mu}_0, \bar{\mu}_1, S_q, R, A_N),$$

где S_q — скачок поглощения (характеристика изменения коэффициента поглощения элементом на соответствующем крае поглощения).

Выполним расчет числа отраженных квантов рентгеновского излучения на поверхности детектора [8]

$$N_{\text{отр}} = f(N_0, A_N, \beta, S_{\text{отр}}, S_d, R, K_{\Sigma E^*}, d),$$

где S_d — площадь детектора, м^2 .

Решение задачи вычислительной геометрии позволяет вычислить рентгеновскую флуоресценцию каждой подобласти космического аппарата (X, Y, Z, φ, Θ) и доли интенсивности отдельных линий флуоресцентного излучения, а также суммарные интенсивности всех линий, серий, соответствующих скачку поглощения.

Расчет интенсивности флуоресценции (I_2) осуществляется по следующей зависимости:

$$I_2 = f(I_1, \omega_q, \bar{\mu}_0, \bar{\mu}_1, S_q, R, A_N, \lambda_i, \Psi, \varphi, \Theta, E_0),$$

где I_1 — интенсивность падающего потока, квант/(с·ст); ω_q — выход флуоресценции, %.

После проведения моделирования результаты представляются в графическом виде.

Если пришедшее на детектор излучение значительно превышает фоновое космическое излучение на длине волны, соответствующей характеристическому излучению того или иного элемента, то делается вывод о наличии на борту космического аппарата соответствующего химического элемента.

В итоге были рассмотрены физические, геометрические и математические основы, положенные в основу разработки программы, позволяющей получить результаты, поставленные в цели работы.

Алгоритм программы

Модель¹ реализована в программной среде MS Visio с применением дополнительных программных средств, чтобы более наглядно показать работу метода дистанционного контроля радиационных параметров космического аппарата на основе рентгенофлуоресцентного анализа.

Примем следующие начальные исходные данные: минимальное число фотонов рентгеновского излучения для обнаружения ядерных материалов на борту космического аппарата от 10^{15} до 10^{21} для дистанций от 10 до 10 000 м (длина волны излучения $\lambda = 0,005$ нм, угол расхождения пучка источника излучения инспектора $\varphi = 1^\circ$, площадь детектора $S = 4$ м²). Упрощенный вариант алгоритма программы при словесном способе его представления разработан с учетом исходных данных и допущений, рассмотренных ранее, и включает в себя следующие укрупненные блоки.

Блоки ввода-вывода: (1) обеспечивает ввод исходных данных по объекту инспекции и аппарату-инспектору и получение данных о моделируемой ситуации; (2) загружает выбранные параметры модели излучателя аппарата-инспектора, модели фонового излучения и трехмерную модель инспектируемого космического аппарата с данными об используемых в нем материалах; (7) выводит зависимость интенсивности излучения от длины волны в виде графика и трехмерную модель космического аппарата с траекториями пучков рентгеновского излучения, пересекших объект. Трехмерная визуализация осуществляется на основе расчетов положения пучка рентгеновского излучения и положения объекта инспекции на экране с учетом решенных задач вычислительной геометрии по поиску координат и углов пересечения прямых линий (пучков рентгеновского излучения) и трехмерных фигур произвольной формы в каждой подобласти аппарата.

Блоки обработки данных: (3) производит расчет ослабления пучка излучения при прохождении им космического пространства до поверхности космического аппарата; (4) производит расчет пересечения элементарными подпучками слоев материала космического аппарата; (5) циклически перебирает элементарные

подпучки; (5А) рассчитывает флуоресцентное излучение при прохождении элементарного подпучка от поверхностного слоя до центра космического аппарата с учетом доли высокоэнергетического флуоресцентного излучения вышележащих слоев, направленного вглубь космического аппарата. Реализует функции нахождения коэффициентов ослабления и поглощения, расчета доли сквозного непроореагировавшего излучения и флуоресцентного излучения. Данный блок представляет наиболее долгий и ресурсоемкий участок алгоритма, поскольку использует большое количество физических констант и вспомогательных математических алгоритмов; (5Б) рассчитывает ослабление флуоресцентного излучения при прохождении слоев космического аппарата в обратном направлении до поверхности космического аппарата; (6) производит расчет ослабления пучка излучения с поверхности космического аппарата при прохождении им космического пространства до детектора аппарата-инспектора.

Результаты исследования

С учетом ранее рассмотренных исходных данных и допущений, разработанной программы выполнен численный эксперимент с целью получения спектра рентгенофлуоресцентного анализа материалов исследуемого объекта.

На рис. 3 представлен результат моделирования рентгеновской флуоресценции, вызванной прохождением пучка рентгеновского излучения через космический аппарат, содержащий материалы, относящиеся к радиоактивному ряду. Яркими линиями обозначены длины волн, явно указывающие на присутствие таких химических элементов, как уран и плутоний.

Результаты расчетов, выполненных с помощью разработанной программы, могут стать основой для обоснования требований к излучательной аппаратуре спутника-инспектора.

Отдельное внимание необходимо уделить принятым допущениям. В разработанной программе не обрабатываются свойства материалов низкой плотности и

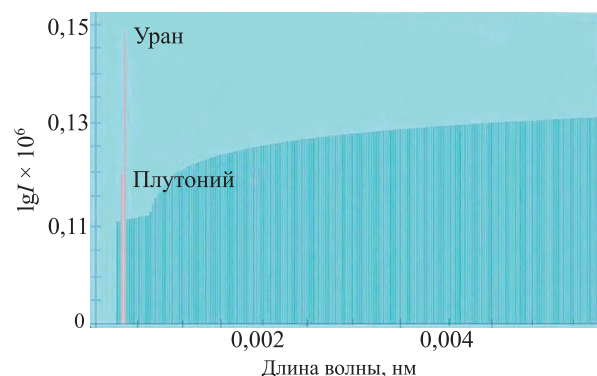


Рис. 3. Совмещенные спектры рентгенофлуоресцентного излучения материалов космических аппаратов (красный цвет) и фонового рентгеновского излучения космического пространства (синий цвет)

Fig. 3. Combined spectra of the X-ray fluorescence radiation of spacecraft materials (red) and the background X-ray radiation of outer space (blue)

¹ [Электронный ресурс]. <https://disk.yandex.ru/i/s7nufJ17OLQ6mA> (дата обращения: 19.02.2022).

элементным составом до алюминия, поскольку поглощение рентгеновского кванта такими материалами с последующим выходом флуоресценции маловероятно. Кроме того, не учитываются неровности поверхности аппарата, так как вызываемая ими разница путей, пройденных отдельными лучами, пренебрежимо мала по сравнению с общим расстоянием, преодолеваемым ими в космосе. Задаваемые углы ограничены двадцатью угловыми минутами. Все цифровые массивы в машинной памяти представлены в формате числовых данных float языка программирования C.

Указанные допущения не оказывают существенного влияния на адекватность моделирования физических процессов, изначально характеризующихся точностью значений физических коэффициентов, используемых в расчетах.

Вывод

Разработаны модель и программа имитационного моделирования прохождения пучка рентгеновского

излучения через материалы космических аппаратов. В зависимости от расстояния между спутником-инспектором и исследуемым объектом, длины волны и энергии излучения, а также угла падения квантов на поверхность функциональных узлов космических аппаратов определяется интенсивность флуоресцентного излучения и делается вывод об элементном составе материалов внутреннего наполнения объекта.

Заключение

Рассмотрена возможность применения метода рентгенофлуоресцентного анализа для инспектирования космических аппаратов с целью соблюдения требований международного законодательства в области использования космического пространства.

Полученные результаты могут найти применение в ходе обоснования технических проектов, предназначенных для решения задач инспекции орбитальных средств.

Литература

1. Клименко Н.Н., Назаров А.Е. Перспективная космическая система для наблюдения геостационарной орбиты // Вестник «НПО имени С.А. Лавочкина». 2015. № 4(30). С. 16–22.
2. Ляпко П.С., Олейников И.И., Улин С.Е. Методы инспекции космических аппаратов с ядерными энергетическими установками на борту // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2016. Т. 43. № 11. С. 24–30.
3. Лосев Н.Ф. Количественный рентгеноспектральный флуоресцентный анализ. М.: Наука, 1969. 336 с.
4. Маркова Ю.Н., Анчутина Е.А., Кербер Е.В., Максимовская В.В., Золотарев К.В. Оценка пригодности методики измерений состава горных пород для анализа растительных материалов рентгенофлуоресцентным методом с использованием синхротронного излучения // Стандартные образцы. 2013. № 4. С. 19–24.
5. Симаков В.А. Рентгенофлуоресцентный анализ руд и продуктов их переработки (при разведке месторождений): автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук: 02.00.02. Москва, 2000. 40 с.
6. Shand C.A., Wendler R. Portable X-ray fluorescence analysis of mineral and organic soils and the influence of organic matter // Journal of Geochemical Exploration. 2014. V. 143. P. 31–42. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.03.005>
7. Мазурицкий М.И., Лерер А.М., Новакович А.А., Махно А.С., Махно П.В. Канализация рентгеновской флуоресценции, возбуждаемой внутри полых микрокапилляров // Инженерный вестник Дона. 2013. № 3(26). С. 65.
8. Симаков В.А., Кордюков С.В. Применение стандартных образцов состава при рентгеноспектральном флуоресцентном анализе твердых полезных ископаемых // Стандартные образцы. 2013. № 4. С. 11–15.

Авторы

Лукьянова Людмила Анатольевна — старший преподаватель, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-5458-3019>, lalukianova@mail.ru

Свитнев Игорь Владимирович — кандидат военных наук, доцент, доцент, заведующий кафедрой, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-8862-1797>, isvitnev@mail.ru

Харитонов Елена Александровна — кандидат медицинских наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-

References

1. Klimenko N.N., Nazarov A.E. Advanced space-borne system for surveillance of geostationary orbit. *Vestnik "NPO im. S. A. Lavochkina"*, 2015, no. 4(30), pp. 16–22. (in Russian)
2. Lyanko P.S., Oleinikov I.I., Ulin S.E. Inspection methods for spacecrafts with nuclear power plants. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2016, vol. 43, no. 11, pp. 332–335. <https://doi.org/10.3103/S106833561611004X>
3. Losev N.F. *Quantitative X-ray Spectrum Fluorescence Analysis*. Moscow, Nauka Publ., 1969, 336 p. (in Russian)
4. Markova Yu.N., Anchutina E.A., Kerber E.V., Maksimovskaya V.V., Zolotarev K.V. Applicability evaluation of procedure for measurement of rock composition for analysis of plant materials by x-ray fluorescence method with the use of synchrotron radiation. *Reference Materials*, 2013, no. 4, pp. 19–24. (in Russian)
5. Simakov V.A. *X-ray fluorescence analysis of ores and products of their processing (in the mineral exploration)*. Dissertation abstract for the degree of doctor of technical sciences: 02.00.02. Moscow, 2000, 40 p. (in Russian)
6. Shand C.A., Wendler R. Portable X-ray fluorescence analysis of mineral and organic soils and the influence of organic matter. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, vol. 143, pp. 31–42. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.03.005>
7. Mazuritskiy M.I., Lerer A.M., Novakovich A.A., Makhno A.S., Makhno P.V. Channeling of X-ray fluorescence excited in hollow microcapillaries. *Engineering Journal of Don*, 2013, no. 3(26), pp. 65. (in Russian)
8. Simakov V.A., Kordyukov S.V. The use of reference materials of composition with x-ray fluorescent analysis of solid minerals. *Reference Materials*, 2013, no. 4, pp. 11–15. (in Russian)

Authors

Lyudmila A. Lukyanova — Senior Lecturer, St. Petersburg State University (SPbSU), Saint Petersburg, 199034, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-5458-3019>, lalukianova@mail.ru

Igor V. Svitnev — PhD (Military Science), Associate Professor, Associate Professor, Head of Department, St. Petersburg State University (SPbSU), Saint Petersburg, 199034, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-8862-1797>, isvitnev@mail.ru

Elena A. Kharitonova — PhD (Medicine), Associate Professor, St. Petersburg State University (SPbSU), Saint Petersburg, 199034, Russian

Петербург, 199034, Российская Федерация,  57217586798, <https://orcid.org/0000-0002-4851-2756>, Haritonova_ea@mail.ru

Гаврилов Илья Евгеньевич — студент, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-1124-0336>, Ilyusha-2145@mail.ru

Federation,  57217586798, <https://orcid.org/0000-0002-4851-2756>, Haritonova_ea@mail.ru

Ilya E. Gavrilov — Student, St. Petersburg State University (SPbSU), Saint Petersburg, 199034, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-1124-0336>, Ilyusha-2145@mail.ru

Статья поступила в редакцию 07.04.2022
Одобрена после рецензирования 30.05.2022
Принята к печати 14.07.2022

Received 07.04.2022
Approved after reviewing 30.05.2022
Accepted 14.07.2022



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»