

УДК: 621.039

DOI: 10.26277/SECNRS.2026.120.2.003

© 2026. Все права защищены.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ ЗАГРЯЗНЕННЫХ РАДИОАКТИВНЫМИ ИЗОТОПАМИ ПОМЕЩЕНИЙ В ТРЕХМЕРНОЙ ГЕОМЕТРИИ НА ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЦИФРОВОЙ ПЛАТФОРМЕ СОПРОВОЖДЕНИЯ ВЫВОДА ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ DIGITAL DECOMMISSIONING: ЧАСТЬ 1 – РЕШЕНИЕ «ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ»

Брединин А. С.\* (bredinin@neolant.group), Бундин А. А.\* (bundin@neolant.com),  
Гуралев С. С.\* (guralev@neolant.group), Кононов П. В.\* (pavel.kononov@neolant.group),  
Мендельбаум М. А.\*, канд. техн. наук (mendelbaum@neolant.group), Терещенко В. Н.\* (tereschenko@neolant.com),  
Тихоновский В. Л.\*, канд. техн. наук (tikhonovsky@neolant.group), Тынянский И. А.\* (tynyanskij@neolant.group),  
Чуйко Д. В.\*, канд. техн. наук (chuyko@neolant.group), Юшицин К. В.\*, канд. физ.-мат. наук (ukv@dcmf.ru)

Статья поступила в редакцию 15 мая 2026 г.

### Аннотация

В статье представлена методика моделирования трехмерного радиационного поля в отдельном помещении здания объекта использования атомной энергии, обусловленного радиоактивным загрязнением оборудования и элементов технологических систем. Такое моделирование применяется для оценки радиационной обстановки внутри помещений объекта использования атомной энергии, в частности при анализе результатов комплексного инженерного и радиационного обследования и проектировании технологических решений по демонтажу при выводе из эксплуатации.

Технологические объекты и строительные конструкции помещения задаются в виде геометрических примитивов – фантомов цилиндров, параллелепипедов и секторов тора, как полнотелых, так и пустотелых, с известными толщинами стенок. Все фантомы априори считаются источниками гамма-излучения, для каждого задается уровень удельной активности и строится трехмерная координатная сетка. Разрешены комбинации расположения фантомов в пустотелом фантоме, например многослойные конструкции или жидкость в сосуде. Расположение фантомов в расчетной модели соответствует форме и расположению моделируемых объектов помещения. Количество моделируемых в помещении объектов и, соответственно, фантомов в расчетной модели ограничено только вычислительной мощностью используемого компьютера. Расположение расчетных точек возможно как вне фантомов, так и внутри них, а также в стенках пустотелых фантомов. Для объектов со сложным составом из нескольких материалов реализуются полнотелые фантомы с гомогенизированным содержанием, коэффициенты поглощения гамма-излучения и дозовые факторы, накопления которых рассчитываются на основании составов всех материалов моделируемого объекта.

Методика реализована в виде Расчетного модуля в составе системы автоматического проектирования вывода из эксплуатации объекта использования атомной энергии. Расчетный модуль написан на языке Golang с распараллеливанием расчетных процессов. Апробация результатов проведена расчетами тестового примера Расчетным модулем и известными программами TDMCC и MERCURAD.

► **Ключевые слова:** радиационная обстановка, комплексное инженерное и радиационное обследование, удельная активность, вывод из эксплуатации, объект использования атомной энергии, гамма-излучение, сеточные трехмерные модели, расчетные точки, Golang.

\* АО Группа компаний «НЕОЛАНТ», Москва, Россия.

## MODELING THE RADIATION ENVIRONMENT IN ROOMS CONTAMINATED WITH RADIOACTIVE ISOTOPES USING THREE-DIMENSIONAL GEOMETRY IN THE DOMESTIC DIGITAL DECOMMISSIONING PLATFORM FOR DECOMMISSIONING SUPPORT OF NUCLEAR FACILITIES: PART 1 – “FORWARD PROBLEM” SOLUTION

Bredinin A. S.\*,  
Bundin A. A.\*,  
Guralev S. S.\*,  
Kononov P. V.\*,  
Mendelbaum M. A.\*, Ph. D.,  
Tereshenko V. N.\*,  
Tikhonovskii V. L.\*, Ph. D.,  
Tynyanskii I. A.\*,  
Chuiko D. V.\*, Ph. D.,  
Yushitsin K. V.\*, Ph. D.

The article was received by the editors' crew on May 15<sup>th</sup>, 2026.

### *Abstract*

*A paper provides a methodology for modeling a three-dimensional radiation field within a single room of a nuclear facility, caused by radioactive contamination of equipment and process system components. This type of modeling is used to assess the radiation environment inside rooms of a nuclear facility, particularly when analyzing the results of a comprehensive engineering and radiological survey and when designing technological solutions for dismantling during decommissioning.*

*Process facilities and building structures are specified with geometric primitives (phantoms), including cylinders, parallelepipeds, and toroidal sectors, both solid and hollow with known wall thicknesses. All phantoms are a priori treated as sources of gamma radiation, the specific activity level is set for each one, and a three-dimensional coordinate mesh is made up for each phantom. Configurations involving phantoms embedded within hollow phantoms are permitted, for example multilayer structures or liquid contained within a vessel. The spatial arrangement of phantoms in the computational model corresponds to the geometry and positioning of the modeled objects and is not constrained by the coordinate axes of the model. The number of objects (and thus phantoms) included in the model and depends solely on the available computational resources. Calculation points may be located outside phantoms, inside them, or within the walls of hollow phantoms. For objects composed of multiple materials, solid phantoms with homogenized composition are used; the gamma-ray attenuation coefficients and dose buildup factors are calculated based on the material composition of the modeled object.*

*The methodology is implemented as a computational module within a computer-aided system for nuclear facility decommissioning design. The module is written in Golang with parallelized computation. Validation of the results has been performed using benchmark calculations with the developed module and established software packages TDMCC and MERCURAD.*

► **Keywords:** *radiation environment, comprehensive engineering and radiological survey, specific activity, nuclear decommissioning, nuclear facility, gamma radiation, three-dimensional mesh models, calculation points, Golang.*

\* NEOLANT Group of Companies, Moscow, Russia.

## Введение

Из большого числа возникающих при выводе из эксплуатации (ВЭ) объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) проблем в настоящей статье рассматривается только методика решения задачи моделирования пространственного распределения мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД), которая связана с нормируемым параметром – мощностью эквивалентной дозы (МЭД), обусловленной поглощением гамма-излучения, образующегося при радиоактивном распаде изотопов, определяющих радиоактивное загрязнение технологических элементов, – это «прямая задача». Распределение МАЭД моделируется в пределах отдельного помещения здания объекта ВЭ при заданных физических параметрах технологических элементов. Методика расчета не имеет принципиальных ограничений по количеству технологических элементов, находящихся в данном помещении, и их пространственному расположению.

Методика моделирования реализована в виде Расчетного модуля, входящего совместно с системой управления инженерными данными «НЕОСИНТЕЗ» [1] и графическим ядром системы автоматического проектирования «ПОЛИНОМ» в состав цифровой платформы сопровождения стадии вывода из эксплуатации ОИАЭ Digital Decommissioning (далее – ПАК DD), разработанной АО Группа компаний «НЕОЛАНТ» (г. Москва).

Алгоритмы решения «прямой задачи» Расчетным модулем в сокращенном варианте описаны в нашем патенте [2]. Настоящая статья представляет расширенный вариант описания алгоритма «прямой задачи».

Для построения радиационной модели помещения используются исходные данные о технологических объектах: форма, геометрические размеры, координаты и данные о составе материалов. Априори считается, что каждый моделируемый элемент представляет собой источник ионизирующего излучения (ИИИ), но активность элемента может быть задана, в том числе, и нулевой, например для устанавливаемых защитных экранов. В таком случае элемент будет учтен только как барьер с учетом фактора накопления. Все материалы фантомов на траектории от загрязненных ИИИ-поверхностей или ИИИ-объемов фантома до каждой расчетной по МЭД точки учитываются как барьеры гамма-излучению с набором энергий источника излучения и с расчетными значениями оптических длин.

## Имитационная модель

В качестве исходных данных для Расчетного модуля все моделируемые технологические объекты помещения представляются геометрическими примитивами – фантомами с расчетными геометрическими и физическими, в том числе радиационными, параметрами. Фантомы формируются на основе 3D-модельного отображения (3D-модель объекта ВЭ) технологических элементов в объеме ограниченного строительными конструкциями помещения. 3D-модель формируется при проведении инженерного обследования объекта ВЭ с использованием архивной проектной и эксплуатационной документации, технологий 3D-фотографирования и лазерного сканирования. Точность геометрического представления объектов в 3D-модели достигает 1 мм. Модель соответствует реальному объекту ВЭ в состоянии «как есть» на момент проведения обследования.

Математическая модель, реализованная в Расчетном модуле, обуславливает необходимость аппроксимации геометрии реальных технологических элементов геометрическими примитивами (фантомами) трех классов:

- цилиндры для моделирования, в частности резервуаров, труб, колонн;
- параллелепипеды для моделирования, например фундаментов или воздухопроводов прямоугольного сечения;
- секторы тора для моделирования отводов – поворотных элементов на трубопроводах.

Классы геометрических форм расширяются применением полнотелых и пустотелых фантомов. Пустотелые цилиндры и параллелепипеды могут иметь днища, крышки, торцевые заглушки или не иметь их. Использование перечисленных геометрических примитивов практически полностью обеспечивает фантомное представление всех технологических элементов, имеющих на объекте ВЭ.

При формировании фантомной расчетной модели предполагается, что полнотелые фантомы имеют гомогенную внутреннюю структуру. Вся масса технологического элемента равномерно распределяется по объему фантома, определяющего его среднюю плотность. При наличии в составе технологического элемента материалов различного элементного состава все «содержимое» технологического элемента гомогенно распределяется по объему фантома в соответствии с его парциальным составом по материалам. Принцип гомогенизации применяется и для радиоактивного загрязнения

моделируемого фантомом технологического элемента. Общая активность технологического элемента равномерно распределяется по объему фантома с расчетом влияния на радиационные параметры фантома долей каждого изотопа, входящего в состав радиоактивного загрязнения, определяя такие его параметры, как объемная и удельная активности. Полнотелые фантомы применяются для моделирования не только строительных конструкций типа колонн или заполнения, например пустотелых, резервуаров жидкостями, но и для моделирования сложных технологических элементов, например теплообменников. При этом эквивалентные, определяемые гомогенизацией внутреннего содержания веществ параметры композитного материала, как барьера излучению, рассчитываются одним из компонентов Расчетного модуля.

Для пустотелых фантомов задается толщина стенки (учет самопоглощения). Геометрия, материал, толщина стенки пустотелого фантома, как правило, наследуются от связанного с ним технологического элемента при соблюдении массового баланса. Общая активность технологического элемента равномерно распределяется по внутренней поверхности его фантома, определяя такие параметры, как поверхностная и удельная активности с учетом нуклидного состава загрязняющих изотопов.

Однозначное позиционирование фантомов в моделируемом помещении обеспечивается привязкой собственных систем координат фантомов к системе координат помещения или глобальной системе координат объекта ВЭ.

Кроме позиционирования в помещении, каждый фантом представляется трехмерной сеточной моделью в его собственной системе координат с оптимизируемой дискретизацией по каждой из них.

В составе исходных данных, в зависимости от задачи расчета, задается и материал межфантомной среды, например воздух определенной влажности и температуры.

Если обозначить индексами  $m$  – номер элементарного ИИИ,  $k$  – номер среды на траектории между источником и расчетной точкой, а  $n$  – номер в ряду учитываемых в расчете энергий излучения присутствующих гамма-активных изотопов, то для гамма-квантов каждой энергии  $E_n$  плотность потока  $q_{nm}$  от  $M$  элементарных ИИИ определяется соотношением [3]:

$$q_{nm} = \frac{1}{4\pi} \sum_{m=1}^M \left[ \frac{Q_m \cdot \delta_{nm}}{l_m^2} B_{\text{гет}} \cdot \exp\left(-\sum_{k=1}^K \mu_{nk} l_{mk}\right) \right], \quad (1)$$

где  $l_m$  – полная длина линейной траектории гамма-квантов от центра элементарного ИИИ до расчетной точки,  $l_{mk}$  – длины линейных траекторий гамма-квантов в каждой  $k$ -ой среде для полнотелого или пустотелого объекта;

$\delta_{nm}$  – парциальные доли гамма-квантов с энергией  $E_n$  в спектре загрязняющего объем или площадь, принятого за точку  $m$  радиоактивного изотопа;

$\mu_{nk}$  – линейные коэффициенты поглощения гамма-квантов с энергией  $E_n$  в  $k$ -ой среде;  $\mu_{nk} = \mu_{nk}(E_n)$  – для каждого материала или фантома в целом, если он получен гомогенизацией физических объектов;

$Q_m$  – интенсивность элементарного ИИИ.  $Q_m = Q_s \cdot d_s$  для поверхностного радиоактивного загрязнения изотопами и  $Q_m = Q_v \cdot d_v$  для объемного радиоактивного загрязнения изотопами, где  $d_s$  и  $d_v$  – площадь и объем источника-дискрета, принимаемого за элементарный ИИИ, а  $Q_s$  и  $Q_v$  – соответственно, интенсивность поверхностного и объемного радиоактивного загрязнения;

$B_{\text{гет}}$  – дозовый фактор накопления многослойного барьера от источника до расчетной точки из веществ  $k$ , энергии  $n$  при известных оптических толщинах барьеров – произведения  $l_{mk}$  на  $\mu_{nk}$ .

Значение AMBIENTНОГО эквивалента дозы  $H^*(r)$  в мкЗв/час в заданной точке пространства для плотностей потоков гамма-квантов  $q_n$  определяется следующим уравнением [2]:

$$\dot{H}^*(r) = 0,0036 \cdot \sum_{n=1}^{N_m} \sum_{m=1}^M q_{nm} C_n, \quad (2)$$

где 0,0036 – масштабирующий коэффициент, определяющий заданную размерность мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы «в час»;

$M$  – общее число источников;

$C_n$ , пЗв·см<sup>2</sup> – коэффициент пересчета флюенса гамма-квантов с энергией  $E_n$  в AMBIENTНЫЙ эквивалент. Конкретное значение  $C_n$  получается линейной интерполяцией справочных, табличных данных, выбор которых зависит от  $r$  – стандартной глубины измерения внешнего облучения хрусталика глаза или дозы в коже (10; 3 или 0,07 см). В Расчетном модуле заложены как таблицы  $C_n$  международных организаций, так и национальные стандарты [4, 5].

Для расчета суммарного дозового фактора накопления на последовательности барьеров  $n = 1, 2, \dots, N$  по траектории от источников гамма-излучения до расчетных по МЭД точек используется рекомендованная для инженерных расчетов формула факторов накопления  $N$ -слойной гетерогенной среды Д. Л. Бродера [6], в которой результат зависит

не только от свойств слоев-барьеров, но и от их последовательности.

Для подготовки исходных данных по коэффициентам поглощения и дозовому фактору накопления мономатериалов фантомов и компонентов композитов используются таблицы, например [6], и сторонние программы [7, 8]. По возможности используются результаты точных расчетов [9].

Получение зависимостей  $\mu(E)$  композитных материалов фантомов производится графическим суммированием характеристик всех компонентов с весовыми коэффициентами массовых долей в составе в точках единого ряда значений энергии  $E$  [10].

$$\mu_{nk}(E) = \sum_{i=1}^k \mu_i(E) \cdot n_i, \quad (3)$$

где  $n_i$  – массовая концентрация компонента  $i$ .

Двумерная таблица дозового фактора накопления для композитных материалов в настоящей работе рассчитывается по технологии, описанной в [11].

$$B_{k(E)} = \frac{1}{\mu_{k(E)}} \sum_i B_{i(E)} \mu_{i(E)} n_i, \quad (4)$$

где  $B_k$  и  $\mu_k$  – параметры композита;

$n_i$  – массовая концентрация компонентов;

$B_i$  и  $\mu_i$  – известные параметры компонентов, а  $\mu_k$  рассчитывается по формуле (3).

Подставив в уравнение (2) значения  $q_{nm}$  всех элементарных ИИИ всех фантомов, рассчитав все траектории распространения излучения от источников к расчетной точке и учтя поглощающие и рассеивающие свойства материалов на этих траекториях в зависимости от энергий проходящего излучения, мы получим уравнения для нахождения уровней МЭД в любой точке пространства с известными координатами. Итоговая формула Расчетного модуля для «прямой задачи» для набора точек по помещению:

$$\dot{H}_{jn}(r) = \frac{0,0036 \cdot C_n}{4\pi} \sum_{m=1}^M \left[ Q_{(v \text{ или } s)} \frac{\delta_{nm} \cdot (\Delta v \text{ или } \Delta s)_m}{l_m^2} \cdot B_{\Pi} \exp \left( - \sum_{k=1}^K \mu_{nk} l_{mk} \right) \right]_j. \quad (5)$$

Упростить использование уравнения (5) позволяет допущение об одинаковости уровня загрязнения радиоактивными изотопами по одному фантому. Если предположительно у моделируемого элемента в значительной степени разноуровневое распределение загрязнения по площади или объему, он может быть представлен группой фантомов с приближающемуся к одинаковому по площади

или объему уровню загрязнения радиоактивными изотопами у отдельных фантомов.

Для расчета барьеров на траекториях используются переходы из системы координат помещения в собственные системы координат фантомов и обратно с помощью прямых и обратных аффинных преобразований систем координат. Для подтверждения пересечения фантома траекторией в собственных системах координат фантомов решается система уравнения прямой через две точки в пространстве – точку-источник и расчетную точку, а также уравнения плоскостей для параллелепипеда и крышек цилиндра вида  $z=const$  ( $x=const$ ,  $y=const$ ), уравнения цилиндра, как поверхности второго порядка, и уравнения тора с граничными условиями моделируемых фантомами объектов. Для тора решение системы сводится к решению уравнения четвертой степени, которая решается аналитически методом Феррари [12] через резольвенту [13, 14] относительно четырех корней  $z$ , из которых через уравнение прямой получаются координаты  $x$  и  $y$  в собственной декартовой системе координат тора. Для определения пересечения границ сектора тора по углу на плоскости решается уравнение проекции прямой и сектора тора на проходящую через три точки задания тора плоскость, где вычисляются ограничивающие сектор тора углы, которые могут лежать во всех четырех квадрантах. Для определения пересечения торцевых плоскостей фантома-сектора тора траекториями от источников до расчетных точек находятся решения системы уравнений траектории и уравнений плоскостей торцевых образующих по технологии в пределах их радиуса  $r$ .

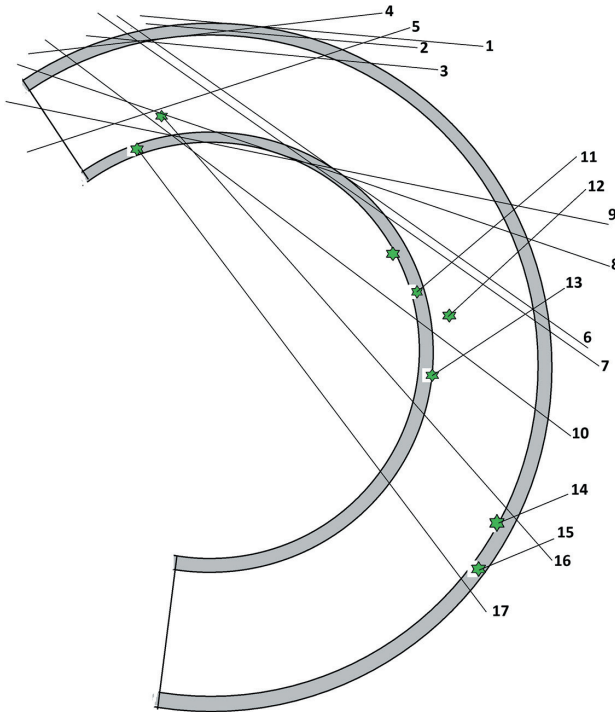
Если при решении системы уравнений сколько-то из координат  $z$  получились мнимыми, то это соответствует отсутствию пересечения в точке с такими  $z$ .

Для последующего определения материалов барьеров на траекториях алгоритмом анализируются типы траекторий четырех вариантов, образуемых из мест расположения точки-источника и расчетной точки внутри или снаружи как пустотелых, так и полнотелых фантомов, то есть всего восемь вариантов.

Чтобы распознать материал, в котором поглощается излучение, участки траектории ранжируются по расстоянию от расчетной точки в следующем порядке: если материал среды между фантомами – воздух: если точка находится не в фантоме, то: воздух снаружи фантома – материал стенки фантома – воздух внутри фантома. Если имеется многослойная конструкция, то толщине воздушной прослойки между слоями присваивается нулевое значение.

Логической единицей на траектории для пустотелого фантома, в отличие от полнотелого, является не фантом, а его стенка.

На рис. 1 для иллюстрации приведен набор вариантов для пустотелого сектора тора:



★ – расчетная точка

Число точек пересечения	Траектории
1	1, 15
2	2, 5, 12, 14
3	4, 11, 13
4	3, 18
5	6, 17
6	7, 9, 16
7	8
8	10

Рис. 1. Пустотелый фантом-сектор тора. Источник находится снаружи пустотелого фантома (фантом-барьер), а расчетная точка внутри (в стенке) или снаружи него. Все точки показаны в плоскости  $z=0$ .

Ситуация, когда точки расположены в других углах образующей окружности, приводит к аналогичным вариантам [Fig. 1. Hollow toroidal sector phantom. The source is located outside the hollow phantom (phantom barrier), while the calculation point is either inside (within the wall) or outside. All points are shown in the plane  $z=0$ . Configurations in which the points are located at other angular positions along the generating circle lead to analogous cases]

Для сокращения объема вариантных пространственных расчетов для конкретного состава фантомов в помещении используется тензор траекторий с перечнем фантомов-барьеров для каждой пары фантом – источник – расчетная точка, расчеты которого вынесены на этап подготовки исходных данных.

С увеличением степени дискретизации фантомов в их собственных системах координат качество аппроксимации улучшается, получаемое значение МЭД в расчетных точках по кривой приближается к точному решению. При этом кратно увеличивается количество рассчитываемых траекторий от элементарных ИИИ к расчетным точкам, ведь рассчитываются все траектории от каждого элементарного ИИИ к каждой расчетной точке, а их количество может достигать многих миллионов и даже миллиардов единиц. Все это существенно увеличивает требования к конфигурации расчетного сервера и удлиняет время расчета. Оптимизацией степени дискретизации находится компромисс между точностью решения и количеством элементарных дискретов фантома в уравнениях.

Решение уравнений (5) с найденными коэффициентами позволяет решить задачу оптимизации степени дискретизации фантомов по трем координатам. Для решения задается ненулевой уровень загрязнения фантомов радиоактивными изотопами, а потом для каждого из фантомов решается задача «один фантом – все расчетные точки»: определяется наиболее чувствительная к изменению степени дискретизации в два раза по каждой из трех координат каждого конкретного фантома точка. Далее, для каждого фантома решается задача «один фантом – одна выбранная наиболее чувствительная расчетная точка» при разной степени дискретизации по каждой из трех координат –  $r\varphi z$ , или  $xyz$ , или  $\varphi\psi l$ . Находится такая степень дискретизации, при увеличении которой, например в два раза, уровень МЭД в чувствительной точке изменится не более чем на заданную величину, например 1 %. Поскольку для решения выбиралась наиболее чувствительная расчетная точка, изменения на других, при изменении степени дискретизации, будут в этом случае меньше 1 %.

### Расчет «прямой задачи»

Алгоритмы расчета «прямой задачи» и физических параметров, необходимых для проведения расчета, реализованы в виде набора утилит Расчетного модуля на языке Golang с распараллеливанием

расчетов по потокам всех ядер процессора компьютера, на котором производится решение, осуществляя полную его загрузку в процессе всего решения.

В результате максимально полного использования доступных Расчетному модулю ресурсов и оптимизации алгоритмов удается решать большую часть возможных задач на достаточно скромных конфигурациях оборудования без привлечения серьезных серверных решений. Таким образом получалось за приемлемое время решать задачи с числом фантомов в помещении до тысячи и сотнями расчетных точек на компьютере с процессором, например Intel Core i7-8700K с объемом ОЗУ 64Gb, где расчет «прямой задачи» с разнотипными фантомами в помещении в количестве 262 и 102 точками для расчета МЭД, где фантомы-секторы тора применялись только для труб большого сечения, показал время расчета 5 мин 42 с. Причем из них 1 мин 3 с заняли считывание и промежуточная подготовка исходных данных по фантомам и расчетным точкам, 24 с заняла оптимизация дискретизации, 1 мин 45 с занял расчет барьерного тензора. Уровень дискретизации в результате оптимизации разных фантомов по отдельным координатам, как правило, по длине труб, составил до максимальных 256 дискретов на одну координату фантома, по другим координатам – до 15 дискретов. То есть число траекторий от одного из заданного множества фантома-источника к каждой из расчетных точек могло превышать пятьдесят семь тысяч.

Результирующие радиационные параметры, вычисляемые алгоритмами Расчетного модуля, записываются в источник исходных данных расчета, в нашем случае в СУИД «НЕОСИНТЕЗ» [1], и могут быть представлены в формате сводных отчетов, генерируемых в ПАК DD, визуализированы методом раскраски объектов 3D-модели по диапазонам значений вычисляемых параметров либо отображены на 3D-модели в виде произвольных срезов поля распределения МЭД в трех проекциях в объеме всего помещения. На рис. 2 изображен пример визуализации поля МЭД в виде срезов в плоскостях  $XY$ ,  $XZ$ ,  $YZ$ .

Помимо решения «прямой задачи» для состояния помещения «как есть», поддерживается расчет вариантов последовательностей действий по демонтажу и деактивации технологических элементов, а также после установки защитных барьеров. При этом количество вариантов и шагов действий в них практически не ограничено. По результатам расчета действий на каждом шаге формируется и записывается объемное распределение поля МЭД в помещении.

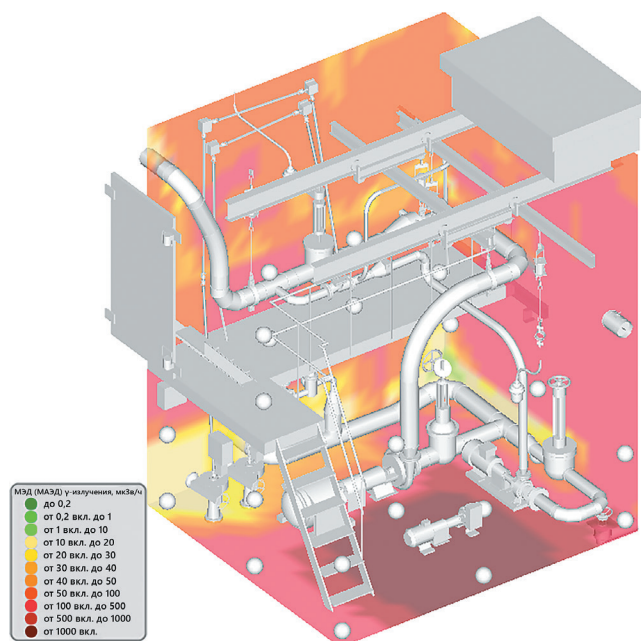


Рис. 2. Визуализация результатов расчета с помощью Расчетного модуля распределения мощности эквивалентной дозы гамма-излучения для одного из помещений объекта использования атомной энергии [Fig. 2. Visualization of the Computational Module results for gamma-radiation ambient dose equivalent rate distribution in a room of a nuclear facility]

Расчетный модуль существует в виде локальной сетевой версии, подключаемой к единичному источнику данных (база данных одного проекта), и в виде облачного сервиса, выполненного на микросервисной архитектуре, с расширенными возможностями. В обоих случаях производится мониторинг базы данных проекта, на расчет забираются помещения с выставленными флагами готовности к расчету, а результаты расчетов записываются обратно в проект вместе с протоколами расчетов.

### Тестирование Расчетного модуля

Для апробации описанного выше алгоритма и реализующих его программ проведены тестовые расчеты со сравнением результатов специальной задачи как Расчетным модулем, так и известными программами-аналогами. В тестовой задаче рассчитываются распределения поля МЭД в помещении с тремя пустотелыми фантомами-параллелепипедами со стенками из железа толщиной 2 см с координатами вершин, приведенными в таблице № 1.

Радиоактивное загрязнение задавалось для одной из внутренних поверхностей Фантома 3 при поверхностной активности 807 440 Бк/см<sup>2</sup>, что соответствовало суммарной активности 1 Ки. В качестве

источника был задан изотоп  $^{137}\text{Cs}$  с выходом 0,85 гамма-квантов на распад.

Точки расчета МЭД располагались параллельно трем осям системы координат (таблица № 2).

Таким образом, в качестве барьеров на пути прохождения гамма-излучения от источника до крайних точек расчета МЭД выступали пять, три или одна из стенок фантомов.

Коэффициенты амбиентного эквивалента дозы на единичный флюенс были взяты из табличных данных Рекомендаций Международной комиссии по радиационной защите (ICRP) [5].

Для проведения сравнительного анализа алгоритма расчета «прямой задачи» по условиям указанного теста были проведены расчеты с использованием программного обеспечения (таблица № 3):

- комплекса TDMCC разработки Российского федерального ядерного центра – Всероссийский НИИ экспериментальной физики (РФЯЦ ВНИИЭФ),

основанного на точном решении уравнений переноса гамма-квантов с использованием статистического математического аппарата [15];

- программы Mercurad разработки компании Canberra Industries Inc. с применением метода линейного ослабления с интегрированием по точкам методом Монте-Карло в трехмерной геометрии [16].

Из представленных в таблице № 3 данных видно, что разница в результатах Расчетного модуля с результатами аттестованной Советом по аттестации программных средств при Ростехнадзоре (рег. № 452 от 24.10.18) программы TDMCC в среднем составляет – 4,8 % и во всех точках не превышает – 17,9 %, что можно считать отличным результатом для инженерных алгоритма и программы Расчетного модуля при существующих погрешностях исходных данных по сравнению со считающимися прецизионными алгоритмами и программой TDMCC.

Таблица № 1

**Координаты вершин параллелепипедов  
Coordinates of the vertices of parallelepipeds**

Вершины	Фантом 1	Фантом 2	Фантом 3
Главная вершина, x, y, z, см	490,152,0	370,152,0	610,152,0
Вершина 2, x, y, z, см	535,152,0	415,152,0	655,152,0
Вершина 3, x, y, z, см	490,447,0	370,447,0	610,447,0
Вершина 4, x, y, z, см	490,152,161	370,152,161	610,152,161

Таблица № 2

**Координаты точек расчета мощности эквивалентной дозы  
Coordinates of the ambient dose equivalent rate calculation points**

Точка	Координаты x, y, z, см	Точка	Координаты x, y, z, см	Точка	Координаты x, y, z, см	Точка	Координаты x, y, z, см
s13	313,300,80.6	s21	596,300,80.6	s35	550,415,80.6	s49	550,276.5,57.6
s14	336,300,80.6	s22	670,300,80.6	s36	550,438,80.6	s50	550,276.5,80.6
s15	359,300,80.6	s23	693,300,80.6	s37	550,461,80.6	s51	550,276.5,103.6
s16	430,300,80.6	s24	716,300,80.6	s38	550,484,80.6	s52	550,276.5,126.6
s17	453,300,80.6	s31	550,323,80.6	s39	550,507,80.6	s53	550,276.5,149.6
s18	476,300,80.6	s32	550,346,80.6	s40	550,530,80.6	s54	550,276.5,172.6
s19	550,300,80.6	s33	550,369,80.6	s47	550,276.5,11.6	s55	550,276.5,195.6
s20	573,300,80.6	s34	550,392,80.6	s48	550,276.5,34.6	s56	550,276.5,218.6

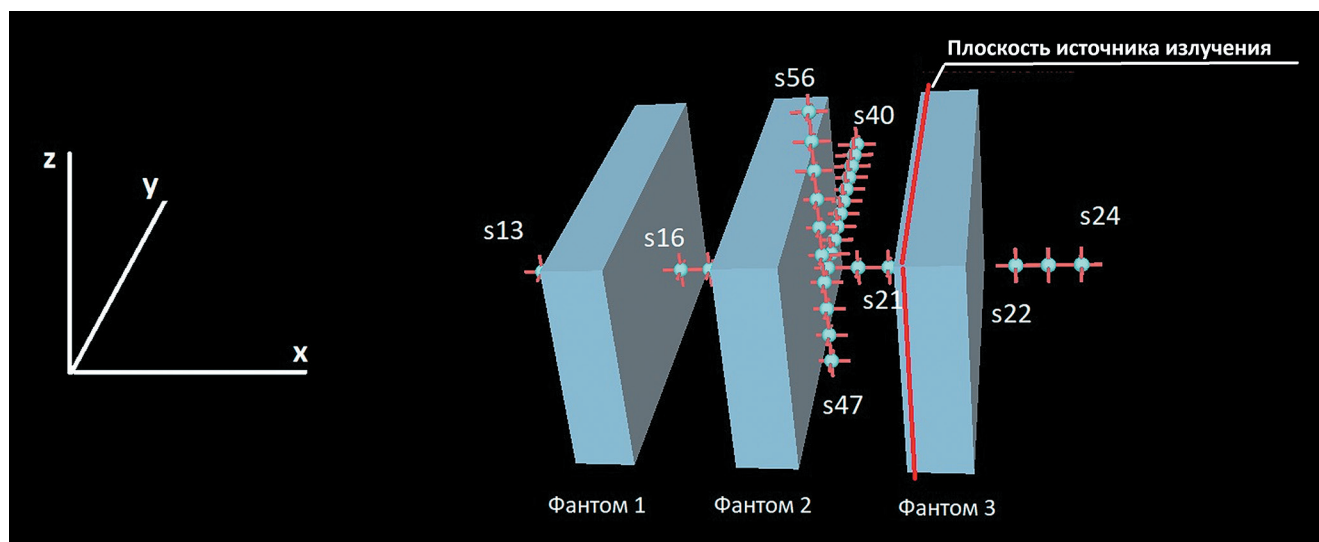


Рис. 3. Схема расположения фантомов и расчетных точек  
 [Fig. 3. Schematic representation of the phantom layout and calculation points]

Таблица № 3

**Результаты теста, полученные с помощью программ Расчетный модуль, TDMCC, MERCURAD**  
**Results of the test calculations obtained by the Computational Module, TDMCC, and MERCURAD**

Точка	TDMCC, мкЗв/ч	MERCURAD, мкЗв/ч	Расчетный модуль, мкЗв/ч	Отклонение от TDMCC, %	Отклонение от MERCURAD, %
s13	12	10	11	- 11 %	6 %
s14	12	11	12	0 %	9 %
s15	13	12	14	5 %	13 %
s16	101	117	110	9 %	- 6 %
s17	116	136	130	12 %	- 5 %
s18	136	157	154	13 %	- 2 %
s19	1 545	1 703	1 421	- 8 %	- 17 %
s20	1 802	2 147	1 823	1 %	- 15 %
s21	2 000	2 455	2 103	5 %	- 14 %
s22	1 547	1 606	1 486	- 4 %	- 7 %
s23	1 241	1 261	1 138	- 8 %	- 10 %
s24	992	990	879	- 11 %	- 11 %
s31	1 537	1 688	1 410	- 8 %	- 16 %
s32	1 506	1 652	1 377	- 9 %	- 17 %
s33	1 449	1 573	1 314	- 9 %	- 16 %
s34	1 344	1 444	1 210	- 10 %	- 16 %
s35	1 168	1 255	1 039	- 11 %	- 17 %
s36	913	998	827	- 9 %	- 17 %
s37	627	722	589	- 6 %	- 18 %
s38	411	483	389	- 5 %	- 20 %
s39	274	310	248	- 10 %	- 20 %
s40	192	195	158	- 18 %	- 19 %
s47	1 147	1 206	1 008	- 12 %	- 16 %

Точка	TDMCC, мкЗв/ч	MERCURAD, мкЗв/ч	Расчетный модуль, мкЗв/ч	Отклонение от TDMCC, %	Отклонение от MERCURAD, %
s48	1 363	1 471	1 229	- 10 %	- 16 %
s49	1 497	1 632	1 366	- 9 %	- 16 %
s50	1 537	1 692	1 411	- 8 %	- 17 %
s51	1 481	1 630	1 365	- 8 %	- 16 %
s52	1 324	1 474	1 227	- 7 %	- 17 %
s53	1 061	1 205	1 005	- 5 %	- 17 %
s54	748	906	744	0 %	- 18 %
s55	503	625	511	2 %	- 18 %
s56	344	415	337	- 2 %	- 19 %

### Заключение

Описан и апробирован программный алгоритм, реализующий с некоторыми допущениями физическую и математическую модель расчета радиационной обстановки в помещении на основании принципа аддитивности МЭД в точке от различных источников с использованием в качестве исходных данных геометрии технологических объектов, расположенных в помещении ОИАЭ, и физических свойств их материалов. В алгоритме применена векторно-табличная модель геометрических примитивов, представляющих физические объекты, с множеством пространственных преобразований. Реализованный алгоритм позволяет за приемлемое время получать распределение МЭД в объеме одного помещения с допустимой для большинства практических задач точностью от фактически любого количества фантомов, расположенных под любыми углами к осям помещения. Причем количество источников излучения в помещении ограничено

только количеством фантомов в решаемой задаче и возможностями компьютера. На практике успешно выполнялись расчеты с несколькими сотнями разнотипных фантомов из разных материалов в помещении, большинство из которых являлись источниками излучения вследствие загрязнения радиоактивными изотопами. В алгоритме учтены как поглощение излучения в барьерах между источниками и расчетными точками, так и рассеяние излучения в барьерах.

Применяемый для расчета радиационной обстановки программный алгоритм в составе ПАК DD играет одну из ключевых ролей в создании цифровой исполнительной инженерно-радиационной модели (ЦИИРМ) вывода из эксплуатации ОИАЭ.

Авторы выражают глубокую признательность сотрудникам ИБРАЭ РАН и особенно Юрию Евгеньевичу Ванею за постановку задачи тестового примера, проведенные расчеты с применением комплекса TDMCC и ценные рекомендации по совершенствованию алгоритма Расчетного модуля.

### Литература

1. Система управления инженерными данными – СУИД. Официальный сайт «НЕОСИНТЕЗ». – URL: <https://www.neolant-srv.ru/neosynte3/> (дата обращения: 15.05.2026).
2. Тихоновский В. Л., Кононов П. В., Мендельбаум М. А., Юшицин К. В. Способ построения цифровой исполнительной инженерно-радиационной модели остановленного для вывода из эксплуатации объекта использования атомной энергии при выполнении комплексного инженерного и радиационного обследования указанного объекта и система для реализации указанного способа. Патент № 2815600С1 РФ. – ООО «НЕОСФЕРА». – № 2022131569; Заявл. 02.12.2022. – Опубл. 19.03.2024.
3. Новый справочник химика и технолога // Радиоактивные вещества. Вредные вещества. Гигиенические нормативы (п. 3.3. Расчет доз, создаваемых внешними источниками ионизирующих излучений) / под ред. А. В. Москвина, В. В. Семеновой, В. Ф. Теплых. – СПб.: АНО НПО «Профессионал», 2004. – 1142 с.
4. Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009»: утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 7 июля 2009 г. № 47.
5. Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publication 74. Ann. ICRP 26 (3-4). ICRP, 1996.

6. Машкович В. П., Кудрявцева А. В. Защита от ионизирующих излучений: справочник / под ред. В. П. Машкович, А. В. Кудрявцева. – 4-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – С. 259.
7. XCOM Element / Compound / Mixture Selection / National Institute of Standards and Technology / Physical Meas, Laboratory – USA, 2010.
8. EXABCal: A program for calculating photon exposure and energy absorption buildup factors. – URL: [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844019356774](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844019356774) (дата обращения: 15.05.2026).
9. Ванеев Ю. Е. Результаты расчетов факторов накопления для бесконечной среды по прецизионной программе в сравнении со справочными данными. Препринт ИБРАЭ № ИВРАЕ-2022-01. – Москва: ИБРАЭ РАН, 2022. – 13 с.
10. Справочник Химика 21 / Гл. IX Радиохимические методы анализа. – С. 364. – URL: <https://chem21.info/page/058246148020065008172101136138037217175097151020> (дата обращения: 15.05.2026).
11. Бенецкий Б. А., Плотникова М. В. Факторы накопления гамма-излучения для композиционных материалов и защит // Краткие сообщения по физике ФИАН РАН. 2012. № 4. С. 29–36.
12. Решение уравнений четвертой степени. – URL: <https://ru.intemodino.com/equations/quartic-equation/> (дата обращения: 15.05.2026).
13. Резольвента алгебраического уравнения. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Резольвента\\_алгебраического\\_уравнения](https://ru.wikipedia.org/wiki/Резольвента_алгебраического_уравнения) (дата обращения: 15.05.2026).
14. Формула Кардано для решения кубических уравнений. – URL: <https://ru.intemodino.com/equations/cubic-equation/> (дата обращения: 15.05.2026).
15. Житник А. К., Рослов В. И., Семенова Т. В. и др. Программа TDMCC (Time Dependent Monte Carlo Code). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010614412 от 07.07.2010.
16. Программа расчета мощности дозы MERCURAD. CPR009MN001 Редакция 1.0. Официальный сайт MERCURAD. – URL: <http://mercurad.software.informer.com/> (дата обращения: 15.05.2026).

## References

1. Sistema upravleniya inzhenernymi dannymi – SUID [Engineering data management system – EDMS]. Ofitsial'nyi sait “NEOSINTEZ” – NEOSYNTEZ official website. URL: <https://www.neolant-srv.ru/neosynte/> (reference date: 15.05.2026).
2. Tikhonovskii V. L., Kononov P. V., Mendelbaum M. A., Yushitsin K. V. (2024). Sposob postroeniya tsifrovoi ispolnitel'noi inzhenerno-radiatsionnoi modeli ostanovlennogo dlya vyvoda iz ehkspluatatsii ob"ekta ispol'zovaniya atomnoi ehnergii pri vypolnenii kompleksnogo inzhenernogo i radiatsionnogo obsledovaniya ukazannogo ob"ekta i sistema dlya realizatsii ukazannogo sposoba [A method for constructing a digital executive engineering and radiation model of a nuclear facility shut down for decommissioning when performing a comprehensive engineering and radiation survey of the specified facility and a system for implementing the specified method]. Patent No. 2815600C1 RF. No. 2022131569; Announced 02.12.2022; Published 19.03.2024. LLC “NEOSFERA”. [in Russian].
3. Moskvina A. V., Semenova V. V., Teplykh V. F. (Eds). (2004). Novyi spravochnik khimika i tekhnologa / Radioaktivnye veshchestva. Vrednye veshchestva. Gigienicheskie normativy (p. 3.3. Raschet doz, sozdavaemykh vneshnimi istochnikami ioniziruyushchikh izluchenii) [New Chemist's and Technologist's Handbook / Radioactive materials. Hazardous materials. Hygienic standards (item 3.3. Calculation of doses generated by external ionizing radiation sources)]. SPb.: ANO NPO “Professional”, 1142 p. [in Russian].
4. Sanitarnye pravila i normativy SanPiN 2.6.1.2523-09 “Normy radiatsionnoi bezopasnosti NRB-99/2009” [Sanitary rules and regulations SanPiN 2.6.1.2523-09 “Radiation safety standards NRB-99/2009”]. 2009.
5. Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publication 74. Ann. ICRP 26 (3-4). ICRP, 1996.
6. Mashkovich V. P., Kudryavtseva A. V. (1995). Zashchita ot ioniziruyushchikh izluchenii [Protection against ionizing radiation]. Spravochnik – The handbook. 4th edition. Moscow: Energoatomizdat, p. 259. [in Russian].
7. XCOM Element / Compound / Mixture Selection / National Institute of Standards and Technology / Physical Meas. Laboratory – USA, 2010.
8. EXABCal: A program for calculating photon exposure and energy absorption buildup factors. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844019356774> (reference date: 15.05.2026).

9. Vaneev Yu. E. (2022). Rezul'taty raschetov faktorov nakopleniya dlya beskonechnoi sredy po pretsizionnoi programme v sravnenii so spravochnymi dannymi [The results of calculations of buildup factors for an infinite medium using a precision program in comparison with reference data]. IBRAE preprint № IBRAE-2022-01. Moscow: IBRAE RAN, 13 p. [in Russian].

10. Spravochnik Khimika 21 / Gl. IX Radiokhimicheskie metody analiza [Chemist's Handbook 21 / Ch. IX Radiochemical methods of analysis]. P. 364. URL: <https://chem21.info/page/058246148020065008172101136138037217175097151020> (reference date: 15.05.2026).

11. Benetsky B. A. Plotnikova M. V. (2012). Faktory nakopleniya gamma-izlucheniya dlya kompozitsionnykh materialov i zashchit [Gamma-radiation buildup factors for composite materials and protections]. Kratkie soobshcheniya po fizike FIAN RAN – Brief reports on physics of LPI RAN, No. 4, pp. 29–36. [in Russian].

12. Reshenie uravnenii chetvertoi stepeni [Solution to quartic equation]. URL: <https://ru.intemodino.com/equations/quartic-equation/> (reference date: 15.05.2026).

13. Rezol'venta algebraicheskogo uravneniya [Resolvent of algebraic equation]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Резольвента\\_алгебраического\\_уравнения](https://ru.wikipedia.org/wiki/Резольвента_алгебраического_уравнения) (reference date: 15.05.2026).

14. Formula Kardano dlya resheniya kubicheskikh uravnenii [Cardano's formula for solving cubic equations]. URL: <https://ru.intemodino.com/equations/cubic-equation/> (reference date: 15.05.2026).

15. Zhytnik A. K., Roslov V. I., Semenova T. V. et. al. Programma TDMCC (Time Dependent Monte Carlo Code) [Software TDMCC (Time Dependent Monte Carlo Code)]. A certificate of state registration for computer programs No. 2010614412 dated 07.07.2010.

16. Programma rascheta moshchnosti dozy MERCURAD [Software for Dose Rate Calculation MERCURAD]. CPR009MN001 Edition 1.0. MERCURAD official website. URL: <http://mercurad.software.informer.com/> (reference date: 15.05.2026).

### Сведения об авторах

*Брединин Антон Сергеевич*, главный программист цифровой платформы Digital Decommissioning, АО Группа компаний «НЕОЛАНТ» (109028, Москва, Подколокольный пер., д. 13, стр. 1).

*Бундин Андрей Александрович*, руководитель R&D направления, АО Группа компаний «НЕОЛАНТ» (109028, Москва, Подколокольный пер., д. 13, стр. 1).

*Гуралев Сергей Сергеевич*, заместитель руководителя Дивизиона ИТ-сопровождения эксплуатации и вывода из эксплуатации промышленных комплексов, АО Группа компаний «НЕОЛАНТ» (109028, Москва, пер. Подколокольный, д. 13 стр. 1).

*Кононов Павел Витальевич*, заместитель генерального директора, АО Группа компаний «НЕОЛАНТ» (109028, Москва, Подколокольный пер., д. 13, стр. 1).

*Мендельбаум Михаил Абрамович*, главный программист-математик цифровой платформы Digital Decommissioning, АО Группа компаний «НЕОЛАНТ» (109028, Москва, Подколокольный пер., д. 13, стр. 1).

*Терещенко Вячеслав Николаевич*, руководитель разработки цифровой платформы Digital Decommissioning, АО Группа компаний «НЕОЛАНТ» (109028, Москва, Подколокольный пер., д. 13, стр. 1).

*Тихоновский Владислав Леонидович*, первый заместитель генерального директора, АО Группа компаний «НЕОЛАНТ» (109028, Москва, Подколокольный пер., д. 13, стр. 1).

*Тынянский Иван Александрович*, заместитель руководителя управления развития цифровой платформы Digital Decommissioning, АО Группа компаний «НЕОЛАНТ» (109028, Москва, Подколокольный пер., д. 13, стр. 1).

*Чуйко Даниил Вадимович*, руководитель управления цифровизации эксплуатации, АО Группа компаний «НЕОЛАНТ» (109028, Москва, Подколокольный пер., д. 13, стр. 1).

*Юшицын Константин Владимирович*, главный технолог по выводу из эксплуатации, АО Группа компаний «НЕОЛАНТ» (109028, Москва, Подколокольный пер., д. 13, стр. 1).

### Authors credentials

*Bredinin Anton Sergeevich*, Senior Developer of Digital Decommissioning Platform, NEOLANT Group of Companies (13 bld. 1, Podkolokolny ln., Moscow, 109028), e-mail: [bredinin@neolant.com](mailto:bredinin@neolant.com).

*Bundin Andrei Aleksandrovich*, Head of R&D, NEOLANT Group of Companies (13 bld. 1, Podkolokolny In., Moscow, 109028), e-mail: bundin@neolant.com.

*Guralev Sergei Sergeevich*, Deputy Director of the Division for Digital Twins, NEOLANT Group of Companies (13 bld. 1, Podkolokolny In., Moscow, 109028), e-mail: guralev@neolant.group.

*Kononov Pavel Vital'evich*, Deputy Director General, NEOLANT Group of Companies (13 bld. 1, Podkolokolny In., Moscow, 109028), e-mail: pavel.kononov@neolant.group.

*Mendelbaum Mikhail Abramovich*, Senior developer-mathematician of Digital Decommissioning Platform, NEOLANT Group of Companies (13 bld. 1, Podkolokolny In., Moscow, 109028), e-mail: mendelbaum@neolant.group.

*Tereshchenko Vyacheslav Nikolaevich*, Head of Digital Decommissioning Development Platform, NEOLANT Group of Companies (13 bld. 1, Podkolokolny In., Moscow, 109028), e-mail: tereshchenko@neolant.com.

*Tikhonovskii Vladislav Leonidovich*, First Deputy Director, NEOLANT Group of Companies (13 bld. 1, Podkolokolny In., Moscow, 109028), e-mail: tikhonovsky@neolant.group.

*Tynyanskii Ivan Aleksandrovich*, Deputy Head of Digital Decommissioning Platform, NEOLANT Group of Companies (13 bld. 1, Podkolokolny In., Moscow, 109028), e-mail: tynyanskij@neolant.group.

*Chuiko Daniil Vadimovich*, Head of Industrial Operational Digital Solutions, NEOLANT Group of Companies (13 bld. 1, Podkolokolny In., Moscow, 109028), e-mail: chuyko@neolant.com.

*Yushitsin Konstantin Vladimirovich*, Head of Decommissioning Engineering, NEOLANT Group of Companies (13 bld. 1, Podkolokolny In., Moscow, 109028), e-mail: ukv@dcmt.ru.

#### Для цитирования

*Брединин А. С., Бундин А. А., Гуралев С. С., Кононов П. В., Мендельбаум М. А., Терещенко В. Н., Тихоновский В. Л., Тынянский И. А., Чуйко Д. В., Юшицин К. В.* Моделирование радиационной обстановки загрязненных радиоактивными изотопами помещений в трехмерной геометрии на отечественной цифровой платформе сопровождения вывода из эксплуатации объекта использования атомной энергии Digital Decommissioning: часть 1 – решение «прямой задачи» // Ядерная и радиационная безопасность. 2026. № 2 (120). С. 28–40. DOI: 10.26277/SECNRS.2026.120.2.003.

#### For citation

*Bredinin A. S., Bundin A. A., Guralev S. S., Kononov P. V., Mendelbaum M. A., Tereshchenko V. N., Tikhonovskii V. L., Tynyanskii I. A., Chuiko D. V., Yushitsin K. V.* (2026). Modelirovanie radiatsionnoi obstanovki zagryaznennykh radioaktivnymi izotopami pomeshchenii v trekhmernoi geometrii na otechestvennoi tsifrovoi platforme soprovozhdeniya vyvoda iz ehkspluatatsii ob"ekta ispol'zovaniya atomnoi ehnergii Digital Decommissioning: chast' 1 – reshenie “pryamoi zadachi” [Modeling the radiation environment in rooms contaminated with radioactive isotopes using three-dimensional geometry in the domestic Digital Decommissioning Platform for decommissioning support of nuclear facilities: Part 1 – “Forward problem” solution]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' – Nuclear and Radiation Safety Journal*, No. 2 (120), pp. 28–40. [in Russian]. DOI: 10.26277/SECNRS.2026.120.2.003.

