
**ЯДЕРНАЯ, РАДИАЦИОННАЯ И
ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**
NUCLEAR, RADIATION AND
ENVIRONMENTAL SAFETY

<https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-02>

EDN GAORPS

Оригинальная статья / Original paper



**Минимизация дозовых затрат персонала с использованием
маршрутной оптимизации**

О.Л. Ташлыков , А.Н. Сесекин , Д.А. Татарских, Д.И. Завадский 

*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург,
Российская Федерация*

 danilezavadsky@gmail.com

Аннотация. Основные принципы радиационной безопасности, в особенности принцип оптимизации, обеспечивают защиту персонала от ионизирующего излучения на основных стадиях жизненного цикла атомных электрических станций, от проектирования до этапа вывода из эксплуатации. В 2007 г. Международная комиссия по радиологической безопасности (МКРЗ) выпустила рекомендации (Публикация 103), которые усиливают значимость оптимизации радиационной защиты, распространяя успешный опыт внедрения этого требования в практику, включая ситуации планируемого облучения. Проведение эксплуатирующей организацией АЭС России (АО «Концерн Росэнергоатом») последовательной политики, направленной на внедрение и реализацию методологии оптимизации радиационной защиты, в целом на всех АЭС, начиная с 1996 г. (переход на новые дозовые пределы), привело к снижению коллективных доз облучения персонала примерно в 4 раза. Методика работы по оптимизации радиационной защиты персонала АЭС включает в себя: критический подход к организационным и техническим мероприятиям при производстве работ, дезактивацию и выполнение необходимых переключений, проведение измерений радиационной обстановки, снижение продолжительности работ в условиях облучения. Целью представленных в статье исследований является разработка программной системы, позволяющей формировать маршруты перемещения персонала с минимальной суммарной дозовой нагрузкой в помещениях с неоднородными радиационными полями. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: анализ проблемы планирования безопасного перемещения в радиационно-опасных зонах; построение математической модели радиационного поля методом радиальных базисных функций (RBF, Radial Basis Functions); разработка алгоритмов поиска оптимального пути с учетом переменной дозовой нагрузки (A^* , A-star, динамическое программирование). В статье представлены варианты решения задачи минимизации дозовых затрат персонала применительно к реальному радиационно-опасному помещению АЭС с помощью математических методов маршрутной оптимизации. Описаны основные этапы разработки алгоритма, позволяющего автоматически формировать оптимальные маршруты с учетом неоднородности радиационной обстановки в пространстве, размеров помещения и расположения в нем оборудования и других элементов. Научная новизна исследований заключается в применении метода радиальных базисных функций (RBF) в сочетании с алгоритмами маршрутизации на графах, адаптированными под критерий минимизации дозы облучения, а также в использовании модифицированного уравнения Беллмана для оптимального выбора порядка прохождения контрольных точек.

Ключевые слова: доза облучения, неоднородное радиационное поле, оптимизация маршрута, RBF-интерполяция, алгоритм A^* (A^* , A-star), динамическое программирование, граф.

Для цитирования: Ташлыков О.Л., Сесекин А.Н., Татарских Д.А., Завадский Д.И. Минимизация дозовых затрат персонала с использованием маршрутной оптимизации. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(3):14–25. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-02>

For citation: Tashlykov O.L., Seseikin A.N., Tatarskikh D.A., Zavadskii D.I. Minimization of personnel dose costs using route optimization. *Nuclear Safety*. 2025;15(3):14–25. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-03-02>

Minimization of personnel dose costs using route optimization

Oleg L. Tashlykov¹ , Alexander N. Seseikin , Daria A. Tatarskikh, Daniil I. Zavadskii 

*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg,
Russian Federation*

 danilezavadsky@gmail.com

Abstract. The principle of optimization is of great practical importance for ensuring the radiation safety of personnel at all stages of the NPP life cycle, especially, newly designed nuclear power plants. In 2007, the International Commission on Radiological Protection (ICRP) issued recommendations (Publication 103). The recommendations further reinforce the importance of optimizing radiation protection by disseminating successful experiences in implementing this requirement in practice, now including situations of planned exposure. The consistent policy pursued by the operating organization of Russia's nuclear power plants (Rosenergoatom Concern) has been pursuing a consistent policy to introduce and implement a methodology for optimizing radiation protection at all nuclear power plants since 1996 (transition to new dose limits), which has led to a reduction in collective radiation doses for personnel by approximately four times. Areas for further optimization of radiation protection for personnel are determined by individual dose management (improving work organization, improving the radiation environment, reducing time spent in dose fields). The objective of the work is to develop a software system that allows the creation of personnel movement routes with minimal total dose exposure in rooms with heterogeneous radiation fields. The following tasks are accomplished to achieve the goal: analysis of the safety movement problem in radiation-hazardous areas; construction of a mathematical model of the radiation field using the radial basis function (RBF) method; development of pathfinding algorithms taking into account dose load (A^* , A-star, dynamic programming). The article presents problem solutions using mathematical route optimization methods that minimize personnel dose costs in relation to a real radiation-hazardous room at a nuclear power plant. The main stages of developing an algorithm that automatically generates optimal routes, taking into account the heterogeneous radiation environment in the space, the size of the room, and the location of equipment and other elements within it, are described. The scientific novelty of the research lies in the application of the radial basis function (RBF) method in combination with graph routing algorithms adapted to the radiation dose minimization criterion, as well as in the use of a modified Bellman equation for the optimal selection of the order of passing control points.

Keywords: exposure dose, heterogeneous radiation field, route optimization, RBF interpolation, A^* algorithm (A^* , A-star), dynamic programming, graph.

Введение

Принцип оптимизации, как один из основополагающих в обеспечении радиационной безопасности персонала имеет важное практическое значение не только при эксплуатации и выводе из эксплуатации, но и при проектировании новых АЭС и должен реализовываться по всем возможным направлениям [1]. АО «Концерн Росэнергоатом», как эксплуатирующая организация АЭС России, начиная с 1996 г. последовательно проводит политику, направленную на внедрение и реализацию методологии оптимизации радиационной защиты на атомных станциях и в районе расположения АЭС, в целом на всех АЭС. Начиная с 1996 г. (переход на новые дозовые пределы, установленные НРБ-96/99), годовые коллективные дозы облучения персонала снижены примерно в 4 раза. Благодаря проведению комплекса организационных и технических мероприятий за период с 2019 по 2023 гг.

с учетом дополнительных радиационно-опасных работ, в связи с продлением сроков эксплуатации некоторых энергоблоков России, а также восстановительных операций на АЭС с РБМК достигнуты следующие результаты:

- исключено превышение индивидуальной эффективной дозы облучения более 18 мЗв в год;
- максимальная суммарная индивидуальная эффективная доза за 5 лет не превысила 80 мЗв ни на одной АЭС;
- коллективные дозы снижены с 1,15 чел.-Зв/блок до 0,86 чел.-Зв/блок, что составляет примерно 25 %;
- индекс коллективной дозы энергоблоков с реакторами ВВЭР в сравнении с региональными центрами ВАО АЭС снижен в 1,5 раза (с 0,58 чел.-Зв в 2019 г. до 0,36 чел.-Зв в 2023 г.).

При достигнутых результатах дальнейшая оптимизация радиационной защиты персо-

нала на АЭС определяется реализацией комплекса мероприятий, направленных на управление индивидуальными дозами, так как минимизация индивидуальных доз является основной составляющей частью стратегии снижения коллективной дозы АО «Концерн Росэнергоатом».

Неоднородность радиационных полей обусловлена типом и количеством радиоактивных изотопов, загрязняющих поверхности (стены, пол и оборудование), а также удаленностью работника от источника излучения. В результате, суммарная доза облучения персонала во время работы зависит от выбранного маршрута и порядка демонтажа радиоактивных компонентов [2]. Это открывает широкие возможности в части снижения дозовых нагрузок путем оптимизации маршрутов в зонах с нестационарным ионизирующим излучением. Поиск наиболее подходящего пути перемещения или оптимальной последовательности демонтажных работ с радиоактивным оборудованием может существенно уменьшить облучение. Важно отметить, что кратчайший путь не всегда гарантирует наименьшую эффективную дозу [3].

Авторы статьи впервые ввели и использовали понятие «задача дозиметриста» при изучении практического применения автоматизированной системы обработки данных нештатных измерений радиационной обстановки [4,5]. Анализ проводился на остановленных энергоблоках №1 и №2 Белоярской АЭС в рамках реализации Программы оптимизации радиационной защиты, разработанной АО «Концерн Росэнергоатом», и необходимости оптимизации маршрутов дозиметристов при выполнении замеров.

Для достижения поставленной цели был создан алгоритм, определяющий наиболее эффективный маршрут передвижения. Алгоритм учитывает наличие преград и возможность посещения заранее определенных точек в помещении, где требуется выполнение работ по оценке радиационной обстановки (например, измерение мощности дозы излучения, отбор образцов и прочее) [6].

Для нахождения функций стоимостей с учетом возможности обхода препятствий, рассматривался метод Дейкстры, с помощью

которого находились кратчайшие пути в графе. Более подробно эта процедура описана в статье [7].

Объект исследования

Перспективным направлением сокращения времени пребывания персонала в радиационных полях (минимизации дозы облучения) является разработка 3D-моделей помещений энергоблока с РУ БН-600 [8]. Для оптимизации передвижения в разнообразных радиационных средах были созданы трехмерные модели помещений. Они нашли применение в начальном обучении персонала: для операторов и, что особенно важно, для ремонтных бригад. Это решение позволило существенно уменьшить время, затрачиваемое на перемещения, и оперативно обнаруживать нужное оборудование [9].

Эксплуатация АЭС предполагает регулярные регламентные обходы оперативным персоналом по заданным маршрутам для контроля работы оборудования, систем, снятия показаний приборов, в том числе посещение помещений зоны контролируемого доступа с повышенным радиационным фоном. При этом работник должен посетить определенные точки в конкретном помещении, где осуществляются регламентные действия. Особенностью данной задачи, осложняющей ее решение, является применение метода радиальных базисных функций (RBF) в сочетании с алгоритмами маршрутизации на графах, адаптированными под критерий минимизации дозы облучения, а также в использовании модифицированного уравнения Беллмана для оптимального выбора порядка прохождения контрольных точек.

В качестве объекта исследований эффективности минимизации дозовых затрат путем оптимизации маршрута перемещения человека в данной статье рассматривается «реальное» помещение насосов и теплообменников системы охлаждения и очистки воды бассейна выдержки отработавших тепловыделяющих сборок. В помещении располагаются два насоса и два теплообменника, трубопроводы и бак запаса чистого конденсата (рис. 1). Помещение имеет два входа-выхода. Модель помещения рассматривается

в трехмерной системе координат (X, Y, Z – соответственно, ширина, длина и высота помещения). Определены размеры и положение основных элементов.

В помещении зафиксированы 10 точек маршрута, в которых произведены измерения мощности дозы, и производятся регламентные действия оператора (табл. 1).

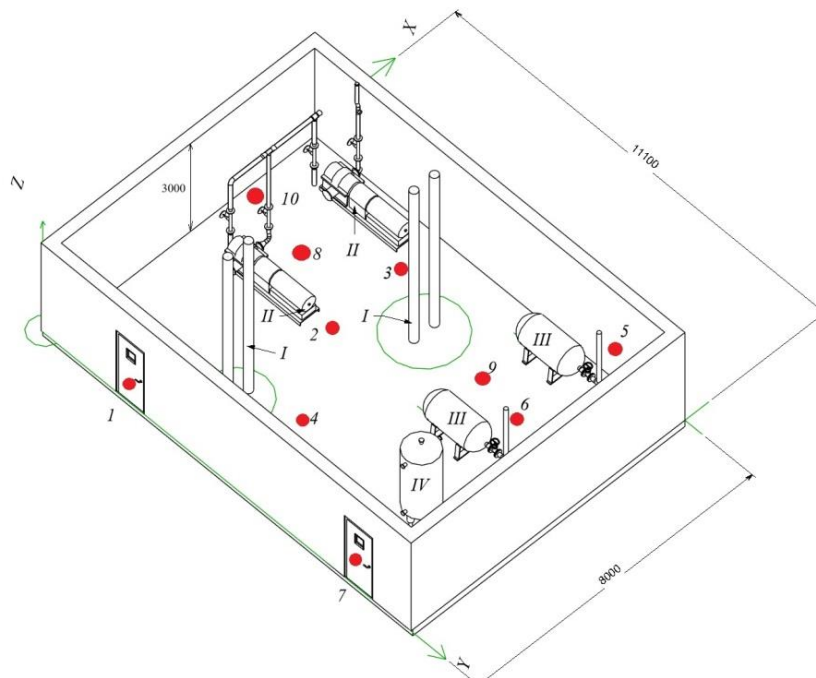


Рисунок 1. Модель помещения насосов и теплообменников: I – трубопроводы; II – насосы; III – теплообменник; IV – бак чистого конденсата; 1-10 – точки обслуживания оборудования; 1, 7 – точки входа-выхода (двери)

Figure 1. Model of the pump and heat exchanger room: I – pipelines; II – pumps; III – heat exchanger; IV – clean condensate tank; 1-10 – equipment maintenance points; 1, 7 – entry/exit points (doors)

Определенный порядок посещения указанных точек отсутствует, но конечной должна быть точка 1 или 7 (выход из помещения). Время нахождения в каждой точке принимается равным 10 секундам.

Таблица 1. Координаты и радиационные параметры (мощность дозы) посещаемых точек маршрута
Table 1. Coordinates and radiation parameters (dose rate) of points visited along the route

№	Координаты точек посещения			Мощность дозы, мкЗв/ч
	X (мм)	Y (мм)	Z (мм)	
1	0	3000	1600	150
2	4250	4350	1600	450
3	7000	4350	1600	1500
4	700	5550	1600	300
5	7000	10000	1600	800
6	4200	10000	1600	800
7	0	9800	1600	200
8	5900	2900	1600	600
9	5800	8250	1600	600
10	5700	800	1600	1600

Необходимо разработать оптимальный маршрут посещения 10-ти точек оператором, при котором полученная индивидуальная доза (мкЗв) будет наименьшей.

Особенность данной задачи, заключается в том, что радиационные параметры (мощность дозы) известны (измерены) только в отдельных точках помещения. Это требует построения карты распределения радиационных параметров с помощью интерполяции. Кроме того, при планировании пути перемещения необходимо учитывать геометрию помещения, включая стены, технические зоны и другие препятствия, через которые невозможно пройти, места расположения обязательных для посещения точек, например, для контроля и обслуживания оборудования [3].

Таким образом, задача построения оптимального маршрута сводится к поиску такого пути перемещения, вдоль которого будет накапливаться минимальная доза при задан-

ной модели радиационного поля, ограничениях движения и наличии препятствий [10]. Рассматриваемая задача значительно сложнее классического поиска кратчайшего пути, так как требует учета непрерывного изменения мощности дозы; пространственного анализа окружающей среды; расчета времени прохождения по маршруту.

Решение этой задачи требует объединения методов интерполяции, численного анализа и алгоритмов на графах [11].

Теоретические основы маршрутизации, включая формализацию задач, методы построения и критерии оптимальности, подробно изложены в работах [12,13], и легли в основу математической части настоящей работы.

Методы и технологии

Интерполяция параметров радиационного поля методом радиальных базисных функций (RBF)

Для решения задачи построения маршрута с минимальной дозой облучения необходимо знать значение мощности дозы излучения во всех точках помещения. В реальных условиях невозможно произвести замеры в каждой расчетной ячейке, поскольку это потребовало бы значительных дозовых затрат дозиметристов. Поэтому первым шагом является построение непрерывного распределения значений мощности дозы в помещении по известным дискретным значениям в отдельных точках с помощью интерполяции [14].

В представленной работе использовался метод радиальных базисных функций (Radial Basis Functions, RBF), являющийся одним из наиболее эффективных методов интерполяции в многомерных пространствах [15]. Он обладает преимуществами по сравнению с простыми методами вроде линейной или билинейной интерполяции: обеспечивает гладкость, устойчивость к шуму и пригоден для обработки неравномерно распределенных данных. Как показывают представленные в работах [6] и [15] результаты исследования эффективности использования различных методов RBF (Cubic, Linear, Quintic, ThinPlate) при различном количестве точек с известными значениями мощности

дозы на основании сравнения расчетных значений, полученных при вычислительном эксперименте на суперкомпьютере «УРАН», и результатов измерения в помещениях остановленных энергоблоков №1 и №2 Белоярской АЭС, максимальное отклонение расчетных данных от «реальных» составляет 9,56% (метод Cubic), 5,46% (метод Linear) 9,99% (метод Quintic), 5,88% (метод ThinPlate).

Алгоритмы поиска пути в графах

Задача построения маршрута между двумя точками с учетом минимизации определенного критерия – это классическая задача теории графов [16]. В классическом виде она сводится к нахождению пути с наименьшей длиной или стоимостью переходов между вершинами графа. В случае данной работы задача усложняется тем, что есть промежуточные точки, обязательные для посещения, и стоимость перехода между двумя точками определяется не геометрическим расстоянием, а дозой облучения, получаемой при прохождении отрезка пути. Это требует модификации известных алгоритмов под новые условия.

В данной работе рассматриваются два алгоритмических подхода:

- эвристический алгоритм A^* , который обеспечивает быстрый поиск маршрута, близкого к оптимальному;
- итерационный алгоритм, основанный на уравнении Беллмана (динамическое программирование), который обеспечивает глобально оптимальный результат.

Целью алгоритмов поиска является нахождение такого пути $P = \{p_0, p_1, \dots, p_n\}$, соединяющего начальную точку $p_0 = \text{start}$ и конечную точку $p_n = \text{end}$, при котором накопленная доза облучения вдоль маршрута минимальна.

После нахождения интерполирующей RBF функции $F(p) = F((x, y))$, мы можем построить модель нашего пространства в виде двумерной сетки D (grid $N \times M$), каждая ячейка которой D_{ij} имеет постоянную мощность дозы радиации (мкЗв/с), найденной через координаты этой точки и интерполирующей RBF функции:

$$D_{ij} = F(x_i, y_j), \begin{cases} i = 1, \dots, M \\ j = 1, \dots, N \end{cases}$$

Алгоритм A^* (англ. A-star) – это эвристический алгоритм поиска пути, сочетающий элементы жадного поиска и метода Дейкстры. Он широко используется за счет своей эффективности и способности учитывать приближение к цели. Основная идея алгоритма A^* заключается в оценке каждого возможного пути на основе двух составляющих:

$g(n)$ – фактическая стоимость пути от начальной точки до текущей;

$h(n)$ – эвристическая оценка расстояния от текущей точки до цели (чаще всего используется евклидово расстояние).

Суммарная функция стоимости:

$$f(n) = g(n) + h(n)$$

Поиск маршрута осуществляется с учетом необходимости прохода через все обязательные точки, заданные пользователем. Последовательность прохождения этих точек формируется с помощью жадного алгоритма (greedy algorithm), который минимизирует приблизительную интегральную дозу на отрезке, рассчитываемую как произведение евклидова расстояния между точками на среднюю мощность дозы облучения. Затем для каждого отрезка между выбранными точками с использованием алгоритма A^* строится оптимальный маршрут по сетке [17].

Алгоритм A^* выбирает для обработки те точки, для которых значение $f(n)$ минимально, постепенно приближаясь к цели.

В рамках данной работы алгоритм был адаптирован к задаче с воздействием на человека излучения, в качестве $g(n)$ используется накопленная доза на пройденном маршруте $g(n) = \sum_{k=1}^n Dose(p_{k-1}, p_k)$, где $Dose(p_{k-1}, p_k)$ – доза облучения на отрезке между точками p_{k-1} и p_k .

Кроме алгоритма A^* , учитывающего радиационную обстановку, реализован также метод, называемый далее «произвольный» маршрут, который предполагает действия человека, не имеющего информации о радиационной обстановке в отдельных точках

помещения. Выбор порядка посещения точек производится по ближайшему евклидовому расстоянию, а перемещение между точками осуществляется с помощью классического алгоритма A^* с учетом только евклидова расстояния и обходом препятствий [18]. Этот метод реализован только для сравнения его результатов с основными алгоритмами.

Вторым используемым методом является итерационный алгоритм на основе уравнения Беллмана – динамическое программирование [19]. В классической формулировке уравнение Беллмана описывает оптимальную стоимость достижения цели из любой точки пространства через локальное минимальное обновление (1):

$$V(x) = \min_{x'} \{C(x, x') + V(x')\}, \quad (1)$$

где $V(x)$ – минимальная стоимость достижения цели из точки x ;

$C(x, x')$ – стоимость перехода от x к соседу x' , минимум берется по всем допустимым соседним точкам.

Для задачи построения маршрута с минимальной дозой в условиях неоднородного радиационного поля используется метод динамического программирования на основе уравнения Беллмана, адаптированный к следующей постановке: заданы начальная точка S , конечная точка E , а также множество обязательных промежуточных точек $P = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}$, через которые необходимо пройти в произвольном порядке.

Цель алгоритма – найти маршрут, начинающийся в точке S , проходящий через все точки множества P ровно один раз и заканчивающийся в точке E , при котором суммарная доза облучения будет минимальна [20].

Для решения задачи используется следующая рекурсия Беллмана (2) по подмножествам:

$$V(m, K) = \begin{cases} 0, & \text{если } K = \emptyset \text{ и } m = S \\ \min_{k \in K} (V(k, K \setminus \{k\}) + A_{m,k}), & m < S, \end{cases} \quad (2)$$

где $V(m, K)$ – минимальная накопленная доза при достижении точки m из начальной точки S , пройдя все точки множества $K \subseteq P$;

$A_{k,m}$ – доза облучения при оптимальном перемещении из точки k в точку m , определяемая как суммарная доза вдоль кратчайшего безопасного маршрута по сетке (с учетом препятствий), найденного с использованием итерационного алгоритма Беллмана.

Для каждой пары соседних ячеек вдоль маршрута доза оценивается по формуле (3):

$$a_{i,i+1} = \frac{d_{i,i+1}}{v} \cdot \frac{D(i)+D(i+1)}{2}, \quad (3)$$

где $d_{i,i+1}$ – длина шага между ячейками;

$D(i)$ – мощность дозы в ячейке,

v – скорость перемещения.

Общая доза $A_{k,m}$ – это сумма всех таких $a_{i,i+1}$ вдоль маршрута от k до m .

После завершения рекурсивного построения функции стоимости $V(m, K)$ итоговая минимальная доза для маршрута с обязательным завершением в E вычисляется по формуле (4):

$$Total\ Dose = \min_{p \in P} (V(p, P \setminus \{p\}) + A_{p,E}). \quad (4)$$

Формализация задачи построения маршрута с минимальной дозой

Для реализации программной системы, решающей задачу построения оптимального маршрута в условиях радиационного воздействия, необходимо строго формализовать исходные данные, ограничения и целевую функцию задачи.

В рамках данной работы пространство, в котором перемещается исполнитель, представлено в виде двумерной дискретной сетки [21]. Каждая ячейка этой сетки соответствует фиксированной позиции в помещении (например, квадрат $0,2 \times 0,2$ метра), и может содержать следующие параметры: мощность дозы облучения в данной точке (мкЗв/с); признак проходимости; координаты в сетке: (i, j) .

Также задаются начальная $S = (i_s, j_s)$ точка, конечная точка $E = (i_e, j_e)$, набор из K промежуточных обязательных точек $\{P_k\}$, время обслуживания в каждой точке t , скорость перемещения v (м/с), вводимая пользователем.

Целевая функция задачи – минимизация интегральной дозы вдоль маршрута T , проходящего по множеству ячеек (5):

$$D(T) = \sum_{(i,j) \in T} D_{ij} \frac{d_{ij}}{v}, \quad (5)$$

где D_{ij} – мощность дозы в ячейке (мкЗв/с);

d_{ij} – длина перехода между соседними точками;

v – скорость перемещения (м/с).

Для учета времени обслуживания используется формула (6):

$$D_{\text{обслуж}} = \sum_{i=1}^K P_i \cdot t, \quad (6)$$

где P_i – мощность дозы в i -й обязательной к посещению точке;

t – время обслуживания.

Эта доза не влияет на построение пути, но учитывается в итоговой сумме при посещении помещения.

Таким образом, задача состоит в том, чтобы среди всех допустимых путей от S до E , проходящих только по проходимым ячейкам и (при необходимости) через обязательные точки $\{P_k\}$, найти такой маршрут T , для которого суммарная доза $D(T)$ будет минимальной.

Визуально это эквивалентно поиску кратчайшего пути на взвешенном ориентированном графе, где:

- каждая вершина соответствует ячейке сетки;

- ребра соединяют соседние ячейки (8-связность (возможность перемещения по 8 направлениям: 4 ортогональным и 4 диагональным));

- вес ребра соответствует дозе, получаемой при переходе между ячейками.

Таким образом, задача маршрутизации в неоднородном радиационном поле сводится к классической задаче поиска пути в графе, но с особенностями:

- поле весов задано функцией (интерполяцией);

- стоимость перехода определяется дозой, а не расстоянием;

- возможны дополнительные ограничения (непроходимые зоны, скорость, промежуточные точки).

Эта формализация позволяет использовать алгоритмические подходы и создавать адаптируемые решения, гибко реагирующие на структуру конкретного помещения и конфигурацию радиационного поля [5].

Результаты и их обсуждение

На основании формализации, задача построения маршрута с минимальной дозой в условиях радиационного воздействия может быть сформулирована как поиск допустимого пути на сетке, при котором:

- суммарная интегральная доза будет минимальной;
- маршрут начинается в начальной точке и заканчивается в конечной;
- при необходимости, маршрут проходит через заранее заданные промежуточные точки;
- не допускается проход через ячейки, помеченные как непроходимые (стены, оборудование, технические зоны и т.п.).

Архитектура программной системы построена по принципу модульной декомпозиции, при котором каждая функциональная задача реализуется отдельным логическим блоком, и состоит из моделей пользовательского интерфейса (ввод параметров, отображение результатов), интерполяции поля (построение радиационной карты помещения), алгоритмического (построение маршрутов с помощью алгоритма A* и итерационного алгоритма Беллмана), расчета дозы, визуализации (отображение радиационной карты, препятствий, построенных маршрутов).

Данные по рассматриваемому помещению (рис. 1, табл. 1) были адаптированы с учетом условий использования их в программе (учитывается ячейка сетки $0,2 \times 0,2$ м, препятствия были перенесены на сетку с помощью окна ввода препятствий).

На итоговых визуализациях маршрутов отчетливо видны различия в поведении алгоритмов (рис. 2).

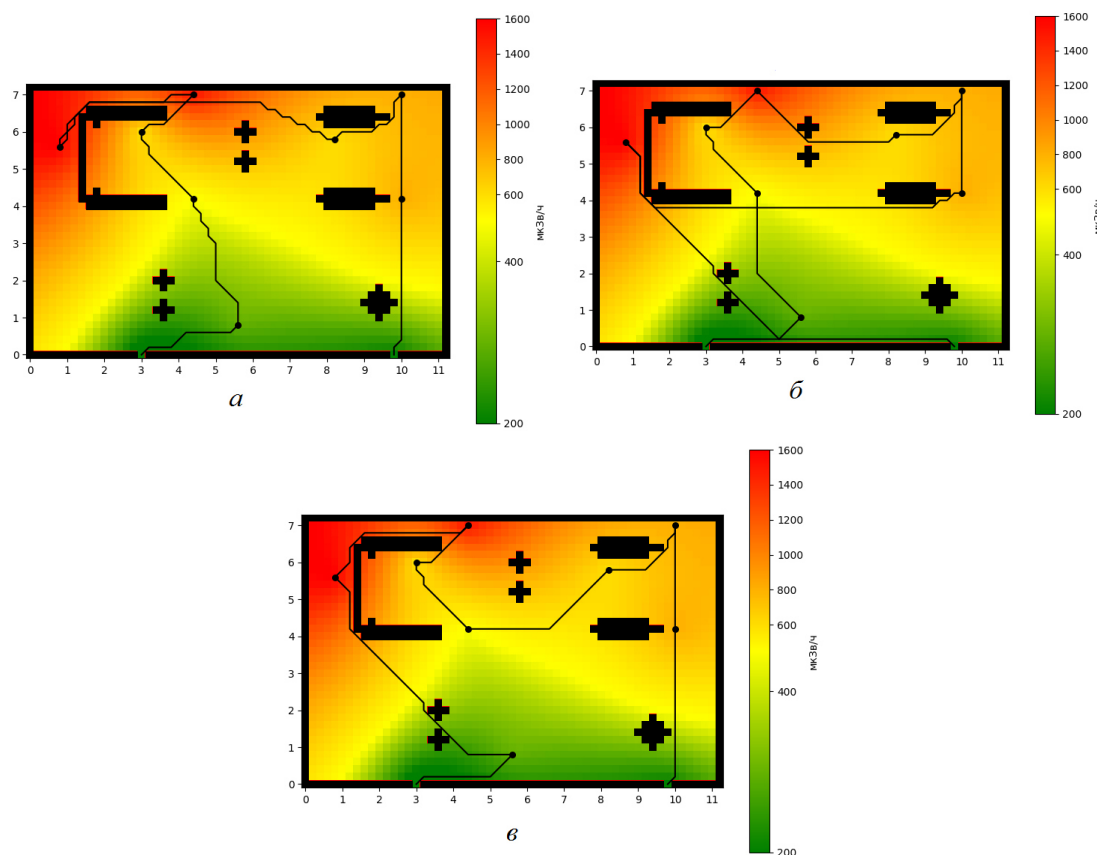


Рисунок 2. Визуализация маршрутов: а – произвольный маршрут; б – оптимальный, определенный с помощью алгоритма A*; в – оптимальный, определенный с помощью итерационного алгоритма на основе уравнения Беллмана

Figure 2. Visualization of routes: a – random route; b – optimal route determined using the A* algorithm; c – optimal route determined using an iterative algorithm based on Bellman's equation

Преимуществами алгоритма А* являются высокая скорость поиска, а также возможность управления балансом между скоростью и точностью через эвристику. Недостатки алгоритма:

- результат может не быть строго оптимальным;
- качество решения зависит от выбранной эвристической функции;
- не всегда подходит для задач с высокой сложностью поля стоимости.

Так как алгоритм А* использует жадную стратегию: он выбирает ближайшую следующую промежуточную точку, это приводит к появлению петель, возвратов.

Алгоритм на основе уравнения Беллмана – динамическое программирование – отли-

чается не только методом расчета, но и подходом к выбору порядка обхода точек [3],[12]. Он перебирает все возможные последовательности промежуточных точек и оценивает дозу для каждого маршрута, выбирая среди них оптимальный с точки зрения суммарной дозы. Таким образом, алгоритм Беллмана нашел глобально оптимальный маршрут.

Как следует из полученных результатов оптимизации маршрутов при регламентных работах в помещении (рис.3), алгоритм А* дает снижение дозовых затрат на перемещение оператора на 1 %, а метод динамического программирования – на 14,5 % по сравнению с произвольным маршрутом.

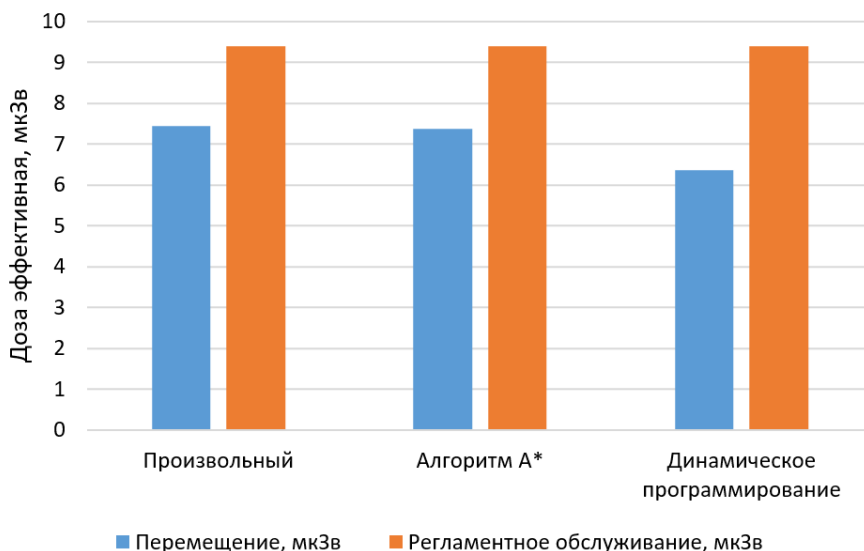


Рисунок 3. Дозовые затраты на регламентное обслуживание и перемещение в помещении
Figure 3. Dose costs for routine maintenance and indoor movement

Поскольку произвольный маршрут может быть близок к оптимальному и наоборот, для оценки эффективности нахождения оптимального пути, соответствующего минимальным дозам, был проведен расчет максимальных дозовых затрат на перемещение с посещением всех 10 точек. Как показывают результаты, максимальные дозовые затраты на перемещение, определенные с помощью алгоритма А* на 53,8%, а метода динамического программирования – на 81,6% больше, чем при найденных с помощью соответствующих алгоритмов поиска оптимальных маршрутов.

Заключение

Разработанные алгоритмы поиска оптимального пути перемещения в неоднородных радиационных полях с учетом обхода препятствий позволяют минимизировать дозовые затраты персонала и могут использоваться на АЭС, а также других радиационно-опасных объектах. Система обеспечивает гибкость конфигурации, визуализацию маршрутов и возможность интеграции в более широкие системы мониторинга.

Оптимальный маршрут оператора может быть обозначен нанесением на пол помещения линий или реперных точек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Mikhailova A.F., Tashlykov O.L. The ways of implementation of the optimization principle in the personnel radiological protection. *Physics of atomic nuclei*. 2024;83:1718–1726. <https://doi.org/10.1134/S1063778820100154>
2. Ташлыков О.Л. Дозовые затраты персонала в атомной энергетике. Анализ. Пути снижения. Оптимизация. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. RG, 2011. 232 с. ISBN: 978-3-8443-5472-0
Tashlykov O.L. Dose costs of personnel in nuclear power engineering. Analysis. Ways of reduction. Optimization. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. RG, 2011; 232 p. (in Russ.). ISBN: 978-3-8443-5472-0
3. Коробкин В. В., Сесекин А. Н., Ташлыков О. Л., Ченцов А. Г. Методы маршрутизации и их приложения в задачах повышения безопасности и эффективности эксплуатации атомных станций. Москва: Новые технологии, 2012. 234 с. ISBN: 978-5-94694-027-6
Korobkin V.V., Sesekin A.N., Tashlykov O.L., Chentsov A.G. Routing methods and their applications in improving the safety and efficiency of nuclear power plant operation. Moscow: New Technologies Publishing House, 2012. 234 p. (in Russ.). ISBN: 978-5-94694-027-6
4. Кропачев Ю.А., Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е. Оптимизация радиационной защиты на этапе вывода энергоблоков АЭС из эксплуатации. *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. 2019;(1):119–130. <https://doi.org/10.26583/npe.2019.1.11>
Kropachev Y.A., Tashlykov O.L., Shcheklein S.E. Optimization of radiation protection at the stage of nuclear power plant units decommissioning. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2019;(1):119–130. (in Russ.). <https://doi.org/10.26583/npe.2019.1.11>
5. Кропачев Ю.А., Ташлыков О.Л., Сесекин А.Н., Щеклеин С.Е., Хомяков А.П. Подсистема автоматизированной обработки данных нерегулярных измерений радиационной обстановки. *Ядерная и радиационная безопасность*. 2019;3(93):26–35. <https://doi.org/10.26277/SECNRS.2019.93.3.003>
Kropachev Y.A., Tashlykov O.L., Shcheklein S.E. Subsystem for automated processing of non-routine radiation measurements. *Yadernaya i radiacionnaya bezopasnost'*. 2019;3(93):26–35. (in Russ.). <https://doi.org/10.26277/SECNRS.2019.93.3.003>
6. Tashlykov O.L., Grigoryev A.M., Kropachev Y.A. Reducing the exposure dose by optimizing the route of personnel movement when visiting specified points and taking into account the avoidance of obstacles. *Energies*. 2022;15(21):11. <https://doi.org/10.3390/en15218222>
7. Grigoryev A.M., Tashlykov O.L. Solving a routing optimization of works in radiation fields with using a supercomputer. *AIP Conference Proceedings*. 2019;020028; <https://doi.org/10.1063/1.5055101>
8. Завадский Д.И., Ташлыков О.Л. Возможности использования ТИМ в атомной энергетике (на примере АЭС с энергоблоком БН-600). *Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений*. 2023;6-2(67):65–70. Режим доступа: https://ptrbs.ru/2023_6-1.php?ysclid=mfdh3o3583375769388 (дата обращения: 09.06.2025)
Zavadskii D.I., Tashlykov O.L. The role of virtual technologies in the optimization of radiation protection of personnel (by the example of NPP unit with BN-600). *Prirodnye i tehnogennye riski. Bezopasnost' sooruzhenij*. 2023;6-2(67):65–70 (in Russ.). Available at: https://ptrbs.ru/2023_6-1.php?ysclid=mfdh3o3583375769388 (accessed: 09.06.2025)
9. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е. Опыт подготовки специалистов для атомной отрасли в Уральском федеральном университете «через науку». *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2024;4:202–218. <https://doi.org/10.26583/npe.2024.4.17>
Tashlykov O.L., Shcheklein S.E. Experience of «via science» personnel training for nuclear industry at the Ural Federal University. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2024;4:202–218. (in Russ.). <https://doi.org/10.26583/npe.2024.4.17>
10. Grigoryev A.M., Tashlykov O.L. Solving a routing optimization of works in radiation fields with using a supercomputer. *AIP Conference Proceedings* 2015. 2018. 020028. <https://doi.org/10.1063/1.5055101>
11. Татарских Д. А., Завадский Д.И., Сесекин А. Н., Ташлыков О. Л. Универсальная программа построения маршрута перемещения дозиметриста в помещениях АЭС с целью минимизации суммарной дозы облучения. Физика. Технологии. Инновации. ФТИ–2025: Тезисы докладов XII Международной молодежной научной конференции. Екатеринбург: УрФУ. 2025. С. 71–72. Режим доступа: https://fizteh.urfu.ru/fileadmin/user_upload/site_19855/Conference/2025/Sbornik_tezisov_konferencii_FTI-2025.pdf (дата обращения: 09.06.2025).
Tatarskikh D.A., Zavadskii D.I., Sesekin A.N., Tashlykov O.L. A universal program for planning the route of a dosimetrist's movement within nuclear power plant premises with the aim of minimizing the total radiation dose. *Fizika. Tekhnologii. Innovacii. FTI–2025. XII Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya konferenciya*. Yekaterinburg: UrFU. 2025. P. 71–72. (in Russ.). Available at: https://fizteh.urfu.ru/fileadmin/user_upload/site_19855/Conference/2025/Sbornik_tezisov_konferencii_FTI-2025.pdf (accessed: 08.08.2025).

12. Tashlykov O.L., Seseikin A.N., Chentsov A.G., Chentsov A.A. Development of methods for route optimization of work in inhomogeneous radiation fields to minimize the dose load of personnel. *Energies*. 2022;15(13):4788. 11 p. <https://doi.org/10.3390/en15134788>
13. Сесекин А.Н., Ченцов А.А., Ченцов А.Г. Задачи маршрутизации перемещений. Санкт-Петербург. Лань. 2022. 240 с. ISBN: 978-5-8114-9999-1
- Seseikin A.N., Chentsov A.G., Chentsov A.A. Routing tasks for movements: a textbook for universities. SpB.: Lan', 2022. 240 p. (in Russ.). ISBN: 978-5-8114-9999-1
14. Bishop C.M. Pattern recognition and machine learning. New York: Springer, 2006. 738 p. Available at: <https://link.springer.com/book/9780387310732> (accessed: 08.08.2025).
15. Grigoryev A.M., Tashlykov O.L., Popel A.A., Kropachev Yu.A. Determination of radiation field parameters for the problems of routing optimization based on interpolation with radial basis functions. AIP Conference Proceedings 2020;2313. <https://doi.org/10.1063/5.0032248>
16. Wilson R.J. Introduction to Graph Theory. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1972. Available at: <https://webhomes.maths.ed.ac.uk/~v1ranick/papers/wilsongraph.pdf> (accessed: 08.08.2025).
17. Ларичев О.И. Вербальный анализ решений. Москва: Наука, 2006. 181 с. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_002862845/ (дата обращения: 08.08.2025).
- Larichev O.I. Verbal Decision Analysis. Moscow: Nauka, 2006. 181 p. (in Russ.). Available at: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_002862845/ (accessed: 08.08.2025).
18. Hart P.E., Nilsson N.J., Raphael B. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, 1968; 4(2):100–107. <https://doi.org/10.1109/TSSC.1968.300136>
19. Большакова Е. И., Мальковский М. Г., Пильщиков В. Н. Искусственный интеллект. Алгоритмы эвристического поиска: учебное пособие. М.: Изд-во факультета ВМК МГУ, 2002. 83 с. ISBN 5-89407-150-X. Режим доступа: <https://rusist.info/book/386838> (дата обращения: 14.09.2025).
- Bolshakova E.I., Malkovskii M.G., Pilshchikov V.N. Artificial Intelligence. Algorithms of heuristic search: textbook. Moscow: Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Lomonosov Moscow State University Publishing House; 2002. 83 p. ISBN 5-89407-150-X. (in Russ.). Available at: <https://rusist.info/book/386838> (accessed: 14.09.2025).
20. Junhao Zhang, Weiwei Chen, Bingyu Ni, Jing Zheng, Kaixin Zhao, Wanyi Tian, Chao Jiang. Optimization of Personnel Work Paths During Decommissioning of Nuclear Facilities. *Nuclear Science and Engineering* 2024;198(8):1668-1681. <https://doi.org/10.1080/00295639.2023.2257508>
21. Nour AbuJaba, Mohammed Baziyad, Raouf Fareh, Brahim Brahmi, Tamer Rabie, Maamar Bettayeb. A Comprehensive Study of Recent Path-Planning Techniques in Dynamic Environments for Autonomous Robots. *Sensors*. 2024;24(24):8089. <https://doi.org/10.3390/s24248089>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Ташлыков О.Л. – руководитель, разработка методологии исследований, редактирование;

Сесекин А.Н. – руководитель, разработка методологии исследований, редактирование.

Татарских Д.А. – написание первоначального варианта; разработка алгоритмов и программы для моделирования, проверка устойчивости расчетной системы.

Завадский Д.И. – сбор исходных данных по радиационным и геометрическим характеристикам исследуемого объекта (помещения АЭС) для постановки задачи, построение 3D-моделей, обработка, верификация результатов и их графическая визуализация, оформление рукописи.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Tashlykov O.L. – Head, development of research methodology, editing.

Seseikin A.N. – Head, development of research methodology, editing.

Tatarskikh D.A. – writing the initial version; development of algorithms and simulation software, checking for stability of the settlement system.

Zavadskii D.I. – designing of initial data on the radiation and geometric characteristics of the object under study (NPP premises), designing 3D-models, handling, verification of results and their graphical visualization, manuscript formatting.

FUNDING:

The authors state that there are no sources of funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Олег Леонидович Ташлыков, доктор технических наук, профессор, Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0001-6397-015X>

e-mail: o.l.tashlykov@urfu.ru

Александр Николаевич Сесекин, доктор физико-математических наук, профессор, Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-1339-9044>

e-mail: sesekin@list.ru

Дарья Александровна Татарских, магистр, Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация.

e-mail: tatarskikh.dasha@gmail.com

Даниил Игоревич Завадский, аспирант, Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация.

e-mail: danilezavadsky@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Oleg L. Tashlykov, Dr. Sci. (Engin), Professor, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0001-6397-015X>

e-mail: o.l.tashlykov@urfu.ru.

Alexander N. Sesekin, Dr. Sci. (Phys. Math.), Professor Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-1339-9044>

e-mail: sesekin@list.ru

Daria A. Tatarskikh, Master, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation.

e-mail: tatarskikh.dasha@gmail.com

Daniil I. Zavadskii, post-graduate student, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation.

e-mail: danilezavadsky@gmail.com

Поступила в редакцию / Received 20.06.2025

После доработки / Revision 25.08.2025

Принята к публикации / Accepted 02.09.2025