

М.И. Грачев, С.В. Талдытов, И.Н. Шейно, Л.Э. Карл, А.Г. Цовьянов, В.П. Крючков

НЕКОТОРЫЕ ПОДХОДЫ К ОБОСНОВАНИЮ ДОМИНИРУЮЩЕЙ СЕТИ ПУНКТОВ МОНИТОРИНГА РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ В СЛУЧАЕ АВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ

Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва

Контактное лицо: Михаил Иванович Грачев, e-mail: mig4911@gmail.com,
Виктор Петрович Крючков, e-mail: v_kruchkov@mail.ru

РЕФЕРАТ

Цель: Обоснование сети размещения пунктов измерения мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) γ -излучения от выпадений в результате аварийного выброса учетом метрики населенного пункта, т.е. минимального количества датчиков, при условии максимального охвата территории зонами детектирования. Это позволит сократить время работы и соответственно дозы облучения персонала, осуществляющего радиационный мониторинг.

Материал и методы: Для решения задачи обоснования сети измерения МАЭД был использован принцип максимального покрытия пространства, реализуемый на основе вычисления матрицы видимости (МВ) для всех возможных пар точек (пунктов) наблюдения. **Результаты:** В настоящей работе использовано несколько алгоритмов вычислений. Наиболее ресурсоемким является вычисление МВ множества вертексов, связанное с необходимостью рендеринга изображений в графической программе Cycles Blender 3D. Предложенный алгоритм вычислений позволяет рассчитать расположение и минимальное количество пунктов измерения МАЭД с учетом метрики населенного пункта без предварительной оценки величины выброса и прогноза метеопараметров.

Заключение: Предлагаемый подход может быть использован для обоснования программы проведения радиационного мониторинга в случае радиационной аварии.

Ключевые слова: радиационная авария, выпадения радиоактивных веществ, пункты измерения МАЭД, матрица видимости, графическая программа Cycles Blender 3D

Для цитирования: Грачев М.И., Талдытов С.В., Шейно И.Н., Карл Л.Э., Цовьянов А.Г., Крючков В.П. Некоторые подходы к обоснованию доминирующей сети пунктов мониторинга радиационной обстановки в случае аварийной ситуации // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2026. Т. 71. № 3. С. 34–41. DOI:10.33266/1024-6177-2026-71-3-34-41

M.I. Grachev, S.V. Taldyotov, I.N. Sheyno, L.E. Karl, A.G. Tsovyanov, V.P. Kryuchkov

Certain Approaches to Validation of the Dominant Network of Monitoring Points for Radiation Situation in Case of an Emergency

A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

Contact person: M.I. Grachev, e-mail: mig4911@gmail.com, V.P. Kryuchkov, e-mail: v_kruchkov@mail.ru

ABSTRACT

Purpose: To substantiate the network configuration for the placement of measurement points for ambient dose equivalent rate of γ -radiation (ADER) from fallout resulting from an accidental release, taking into account the settlement's metric – that is, to determine the minimum number of detectors required while ensuring maximum territorial coverage by detection zones. This approach will reduce both the operational time and, consequently, the radiation doses received by personnel conducting radiological monitoring.

Material and methods: To address the problem of substantiating the ADER measurement network, the principle of maximal spatial coverage was employed, implemented through the calculation of a visibility matrix (VM) for all possible pairs of observation points.

Results: Several computational algorithms were used in this study. The most resource-intensive is the calculation of the VM of a set of vertices, due to the need to render images in the Cycles Blender 3D graphics program. The proposed computational algorithm allows for the calculation of the location and minimum number of the ADER measurement points, taking into account the locality metrics, without preliminary emission assessment and meteorological forecasting.

Conclusion: The proposed approach can be used to justify a program for conducting radiation monitoring in the event of a radiation accident.

Keywords: radiation accident, radioactive fallout, DER measurement points, visibility matrix, Cycles Blender 3D graphics program

For citation: Grachev MI, Taldyotov SV, Sheyno IN, Karl LE, Tsovyanov AG, Kryuchkov VP. Certain Approaches to Validation of the Dominant Network of Monitoring Points for Radiation Situation in Case of an Emergency. Medical Radiology and Radiation Safety. 2026;71(3):34–41. DOI:10.33266/1024-6177-2026-71-3-34-41

Введение

В случае радиационной аварии принятие решения о проведении срочных и неотложных защитных мер населения осуществляется на основе идентификации радиационной аварии, прогноза распространения выброса и данных радиационного мониторинга [1–4].

На протяжении ряда лет МАГАТЭ развивает подход по использованию так называемых действующих уровней вмешательства (ДУВ) – измеряемых параметров радиационной обстановки, в частности, мощности амбиентного эквивалента дозы γ -излучения (МАЭД) от выпадений. Предварительно оцениваемые значения МАЭД соответствуют дозовым критериям, устанавливаемым для совокупности защитных мер [5, 6]. Так, например, достижение МАЭД на уровне 1 мЗв/ч может свидетельствовать о необходимости эвакуации населения по критерию прогнозируемой эффективной дозы 100 мЗв в течение недели.

Таким образом, проведение дозиметрических измерений на территории с помощью носимых приборов или передвижных лабораторий радиационного контроля (ПЛРК) связано с повышенным радиационным риском для работников служб, в том числе центров гигиены и эпидемиологии (ЦГиЭ) ФМБА России.

Снижение дозовой нагрузки может быть достигнуто за счет сокращения времени на проведение измерений по заранее определенной сети пунктов измерения. При этом объем измерений и результаты их обработки должны быть достаточными и удовлетворять требованию использования оценки МАЭД в качестве ДУВ.

Результаты

Задача формирования доминирующей сети пунктов мониторинга

В качестве примера на рис. 1 приведены результаты интерполяции значений МАЭД от выпадений по расчетным данным прогноза, выполненного по программе RECASS, в масштабе города методом обратно-взвешенных расстояний (ОВР) с использованием геоинформационной системы ArcGis 10.5. Видно, что полученное распределение имеет полосный характер без учета характера застройки. В то же время, результаты измерений МАЭД, выполненные путем аэрогаммасъемки или наземных измерений при имевших место масштабных авариях, свидетельствуют, что формирование радиационной обстановки носит сложный характер и зависит от ряда факторов, трудно учитываемых в модельных расчетах (рис. 2 и 3).

При обосновании размещения постов мониторинга также используются модели переноса радиоактивного облака в форме полубесконечного пространства с равномерно распределенной концентрацией радионуклидов, равной приземной объемной активности [9]. При расчете доз вблизи источника кратковременных выбросов, а также в условиях распространения радиоактивного облака в пределах городской или промышленной застройки такая идеализация не допустима [10].

Приведенные выше положения привели к идее обоснования размещения постов измерения МАЭД в условиях городской застройки без использования моделей и расчетных программ атмосферного переноса радиоактивной примеси. Оцененное количество и размещение точно привязанных к географическим координатам точек измерения позволят использовать результаты измерений и их сравнение с ДУВ.

В отличие от задач поиска семейств распределений выборок содержания нерадиоактивных поллютантов в



Рис. 1. Распределение МАЭД на территории г. Сосновый Бор в масштабе 1:30 000

Fig. 1. Distribution of AEDR in the territory of Sosnovy Bor at a scale of 1:30 000

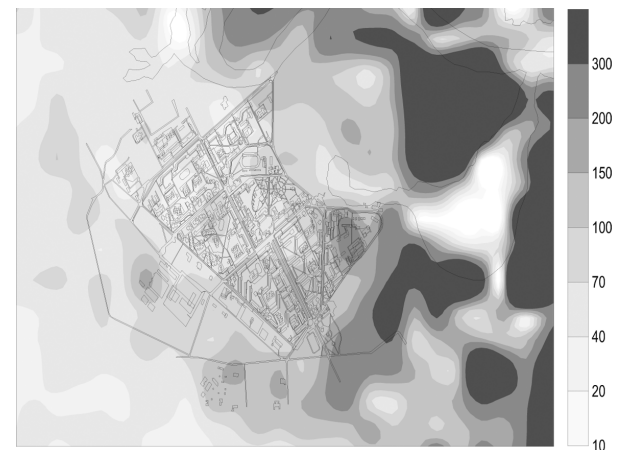


Рис. 2. Карта загрязнения территории г. Прип'ять и ближайшего ареала ¹³⁷Cs полученная с помощью аэрогаммасъемки в 1992 г., Ки/км² (1 Ки/км² = 37 КБк/м²) ([7] цит. по [12])

Fig. 2 Map of contamination of the territory of the city of Prip'yat and the nearest area with ¹³⁷Cs obtained using aerial gamma photography in 1992, Ci/km² (1 Ci/km² = 37 kBq/m²) ([7] cited from [12])

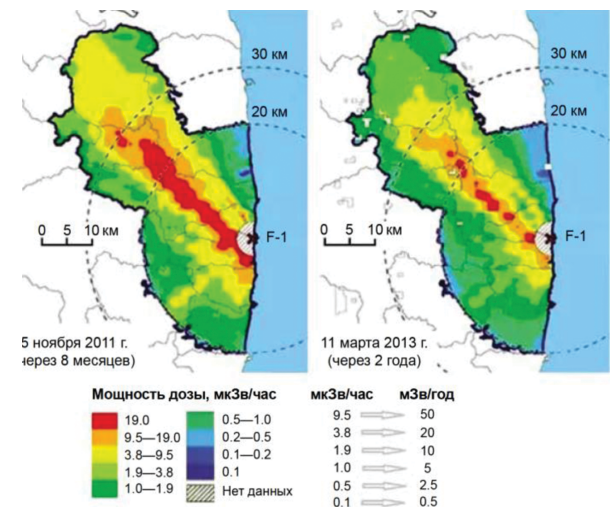


Рис. 3. Карты радиоактивного загрязнения местности от выбросов при аварии на АЭС Фукусима-1 (мощность дозы на высоте 1 м от земли) по [8]

Fig. 3. Maps of radioactive contamination of the area from emissions during the accident at the Fukushima-1 nuclear power plant (dose rate at a height of 1 m from the ground) according to [8]

почве (рис. 4 [11]) мониторинг радиационной обстановки связан со сложным, динамичным характером формированием поля γ -излучения и, соответственно, дозы. Кроме этого, МАЭД в различных точках не всегда может соответствовать расчетному значению плотности выпадения. Как уже было сказано, это обусловлено различными, зачастую трудно учитываемыми факторами. Опыт показывает, что даже многочисленные (избыточные) измерения МАЭД, проведенные в разное время и в различных точках, зачастую не позволяют получать сравнимые результаты [12].

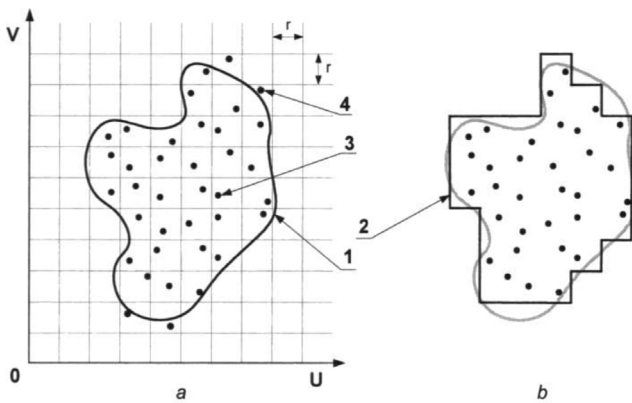


Рис. 4. Шаблон простого случайного отбора проб внутри ячеек [11]: а – случайный отбор внутри ячеек; б – уточнение границы участка; 1 – граница участка; 2 – уточненная граница участка; 3 – точка отбора единичной пробы; 4 – точка, выпавшая на границу участка в результате однократного розыгрыша; r – единица масштаба (ребро ячейки)

Fig. 4. Simple random sampling template within cells [11]: a – random sampling within cells; b – refined plot boundary; 1 – plot boundary; 2 – refined plot boundary; 3 – single sample collection point; 4 – point falling on the plot boundary as a result of a single draw; r – scale unit (cell edge)

Для решения задачи поиска оптимальной сети измерения МАЭД, сформировавшейся в результате выпадений, был использован принцип максимального покрытия пространства [13–15], реализуемый на основе вычисления матрицы видимости (МВ) для всех возможных пар точек (пунктов) наблюдения. Помимо метрики населенного пункта первостепенное значение также имеет дорожная сеть с учетом логистики между пунктами мониторинга для проведения измерений с помощью носимых приборов или ПЛРК.

Моделирование и вычисление матрицы видимости

Моделирование данной задачи и ее решение было выполнено в программной среде Blender 3D версия 4.2² В качестве тестового примера был использован фрагмент города Сосновый Бор. Импорт электронной карты осуществлялся из открытой цифровой карты Open Street Map (OSM) в трех слоях: растровый слой – карта фрагмента города, векторный слой – карта дорожной сети и векторный 3D слой – карта городских строений.

¹ Принцип максимального покрытия пространства (Maximum Coverage Principle) – это концепция, используемая в географии, экологии, статистике и смежных областях для эффективного размещения датчиков, наблюдательных станций, пунктов мониторинга или иных ресурсов таким образом, чтобы максимизировать площадь охвата контролируемой территории при ограниченном количестве устройств или ресурсов.

² Blender Foundation. (2023). Blender – Free and Open Source 3D Creation Software. Retrieved from <https://www.blender.org>.

Для вычисления МВ всех пар вертексов³ был написан код на python. Из всей совокупности вертексов выбиралась одна точка, в координатах которой создавался точечный источник света. Если источник света и выбранная точка «видели» друг друга, то соответствующая сфера была видна на рендере как светящаяся точка, и элементу МВ присваивалось значение 1, в противном случае – 0. Затем процедура повторялась для остальных точек⁴.

Обоснование сети точек измерения МАЭД сводится к следующим процедурам.

1. Получение детальных картограмм населенных пунктов с отдельными слоями дорожной сети и строений.
2. Получение значительного (10^3 – 10^4 и более) множества точек для создания, расположенных на дорожной сети доминирующего множества точек.
3. Построение МВ точек дорожной сети.
4. Построение доминирующего множества точек дорожной сети (пунктов мониторинга).
5. Визуализация доминирующего множества пунктов мониторинга на карте города.

Варианты решения

На рис. 5 приведены последовательные варианты решения.

В результате был получен доминирующий набор пунктов измерений МАЭД, оптимизированный для условий метрики и дорожной сети населенного пункта (часть территории г. Сосновый Бор).

На рис. 6 показана полная блок-схема расчетов, соответствующая 3-му тестовому варианту.

Перечень используемых программ представлен ниже:

- **Vertex.py** – вывод вертексов на диск, без параметров;
- **Coordinates.py** – случайный выбор вертексов, параметр N = 1000 (число вертексов);

³ (Лат. vertex – «вершина», «верхушка») – в компьютерной графике – вершина, структура данных, которая описывает точку в пространстве.

⁴ Математическая постановка задачи: дано множество D вертексов $\{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ и подмножество вертексов $S^* = \{s_1, s_2, s_k\}$ ($k \leq n$) того же множества D. Радиус видимости $R > 0$, определяет область видимости вокруг вертексов из S^* . Целью является максимизировать число вертексов из D, видимых минимальным числом вертексов из S^* . Найденное S^* называется доминирующим множеством. Обозначим через M матрицу видимости, каждый элемент m_{ij} которой равен 1, если вертекс s_i видит вертекс d_j . В противном случае элемент $m_{ij} = 0$. Вертекс s_i видит вертекс d_j , если отрезок соединяющий их не встречает препятствий на своем пути.

Формальная запись задачи выглядит так:

$$\text{maximize} |\{d_j \in D : \exists s_i \in S^*, (M_{ij} > 0) \wedge (\|d_j - s_i\| \leq R)\}|, \\ S^* \subseteq D, |S^*| = k$$

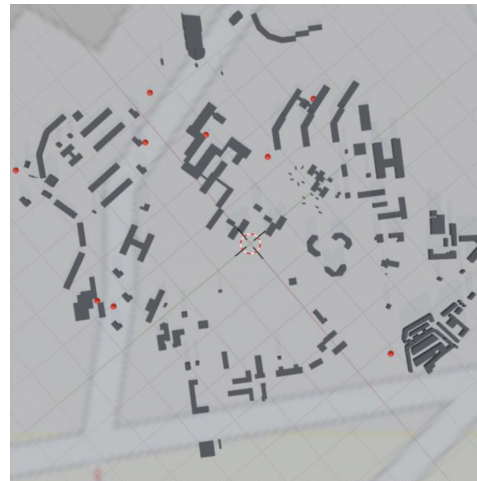
т.е. максимизация количества видимых вертексов множества D из ограниченного набора k вертексов из доминирующего множества S^* .

Полностью интерпретируемая формулировка данного критерия сводится к следующему: нужно выбрать k контрольных точек (датчиков мониторинга) из множества возможных точек D так, чтобы количество покрытых ими точек наблюдения было максимально возможно. Точка наблюдения d_j считается покрытой, если она попадает в зону покрытия некоторого выбранного датчика s_i и имеет ненулевое взаимодействие с ним согласно матрице связности M. Иными словами, решаемая задача – установить минимальное количество датчиков таким образом, чтобы максимум возможного числа точек наблюдения оказался покрыт зонами детектирования установленных датчиков.

Исходное множество точек



Доминантный набор точек



a) Вариант решения: вертексы по дорогам; вычисление MB; алгоритм Greedy Heuristic⁵



b) Вариант решения: равномерное поле точек; вычисление MB с $d_{max} < 300m$; алгоритм Greedy Heuristic



c) Вариант решения: вертексы по дорогам; вычисление MB; алгоритм Greedy Heuristic для MB; вычисление MB с $d_{max} < 300m$; алгоритм Greedy Heuristic для MB

Рис. 5. Результаты последовательных вариантов решения

Fig. 5. Results of successive solution options

⁵ Данная задача относится к классу задач теории графов и алгоритмов дискретной математики. Основная идея состоит в том, чтобы подобрать минимальный набор вершин графа (в данном случае — точек), из которого каждая оставшаяся вершина будет видима хотя бы одной вершине из подобранного набора.

Алгоритм Greedy Heuristic: на каждом шаге выбираем вершину, которая покрывает наибольшее количество не просмотренных вершин, пока не останутся не просмотренные вершины. Алгоритм последовательно выбирает вершину, которая максимизирует охват не просмотренных вершин. Итоговое минимальное доминирующее множество вершин возвращается в виде множества. Основным индикатором алгоритма является MB, которая вычисляется до начала выполнения алгоритма и на элементы которой влияет переменная метрика населенного пункта.

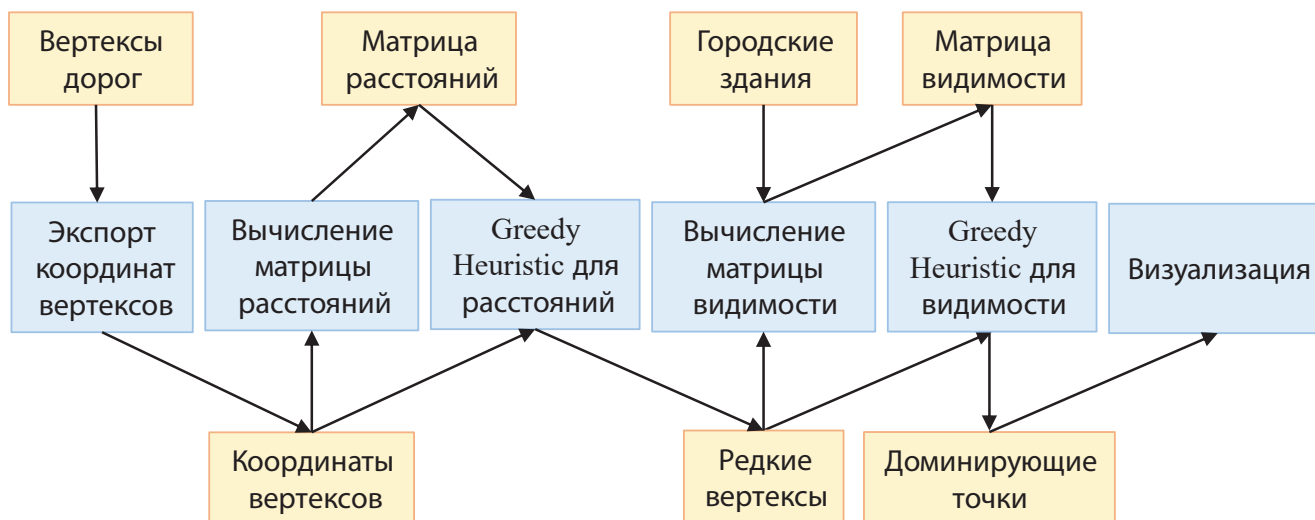


Рис. 6. Совокупность процедур получения оптимального доминантного набора вертексов (голубой цвет – данные; оранжевый цвет – вычислительные программы)

Fig. 6. A set of procedures for obtaining the optimal dominant set of vertices (blue color - data; orange color - computing programs)

- **Seldom.py** – вычисление МР, параметр `max_distance = 140` метров (наибольшая дистанция соседства);
- **Heuristic seldom.py** – алгоритм Greedy Heuristic для МР, `threshold = 2` (число соседей);
- **MVR_new.py** – вычисление МВ, `max_distance = 300` (наибольшая дистанция видимости);
- **Heuristic.py** – алгоритм Greedy Heuristic для МВ, параметр `threshold = 0` (наименьшее число других видимых пунктов мониторинга);
- **Sphere.py** – визуализация пунктов мониторинга, без параметров.

Таким образом, путем последовательного решения исходная выборка, состоящая из 1000 вертексов, была сокращена до минимально достаточного числа из 27 вертексов (рис. 7). Как можно видеть, пункты мониторинга расположены относительно равномерно по территории городского фрагмента, полностью отсутствуют попарные локации точек из доминирующего набора.

Прямым доказательством того, что из доминантного набора пунктов мониторинга просматривается любая локация в пределах фрагмента города явился следующий тест: все точки из доминирующего набора были заменены на изотропные точечные источники света. Отсутствие темных участков на карте будет говорить об успешном выполнении доминирующим набором своей функции (рис. 8). В этом случае освещенность поверхности, как и в реальности убывает пропорционально квадрату расстоянию от источника света. Поэтому удаленные от точечного источника участки территории выглядят более темными.

В Blender 3D существует возможность использовать альтернативные источники света, освещенность от которых остается практически постоянной несмотря на изменение расстояния от точечного источника. На этом же рисунке представлено альтернативное освещение для всех точечных источников из доминирующего набора точек с тем, чтобы нивелировать изменение освещенности от расстояния до источника. В этом случае освещенность меняется, но не в зависимости от расстояния, а от того, сколько источников освещают данную площадку. Черный цвет участка территории означает, что этот участок не освещается ни одним источником. Как можно видеть, в рассматриваемом случае такие участки отсутствуют.

Таким образом, можно утверждать, что исчерпывающее покрытие территории городского фрагмента доминирующим набором пунктов мониторинга доказано (и показано) напрямую (рис. 8).

Световое моделирование, представленное выше, практически имитирует решение сопряженного уравнения переноса излучений [16] без рассеяния на плоскости в полярных координатах с точечными псевдоисточниками, размещенным в местах расположения детекторов излучений^{6,5}.

Обсуждение результатов

Программная платформа Blender 3D является удобным и самодостаточным инструментом для анализа картографической информации, связанной с поиском оптимального набора пунктов мониторинга в городской среде.

В настоящей работе использовано несколько алгоритмов вычислений. Наиболее ресурсоемким является вычисление МВ множества вертексов, связанное с необходимостью рендеринга изображений в графической программе Cycles Blender 3D. Этот этап обработки данных в предложенной схеме выполняется после процедуры выравнивания пространственного распределения вертексов, связанного со значительной редуцией первичного множества вертексов. Иными словами, вычисление матрицы расстояний и вычисления по алгоритму Greedy Heuristic предшествуют вычислению матрицы видимости. В результате предложенная процедура решения задачи поиска оптимальной сети применима для городских территорий с площадью вплоть до 30 км².

⁶ Решением сопряженного уравнения является сопряженная функция Ψ^+ , которая определяет вклад в показание детектора от точечного источника излучений единичной интенсивности, размещенного на определенном расстоянии от него. Значение сопряженной функции в теории переноса излучений иногда трактуют как ценность (или опасность) по отношению к рассматриваемому процессу [17]. Замечательным свойством сопряженной функции Ψ^+ , которая определяется только способом детектирования поля излучений и свойствами среды, в котором это поле образуется, является возможность рассчитать значение линейного функционала (Ψ, D) на поле излучений Ψ , образуемого источником S , без расчета самого поля: $(\Psi^+, S) = (\Psi^+, D)$, где скобки означают интегрирование по всему фазовому пространству.



а – Исходная выборка вертексов 1000 из 2034

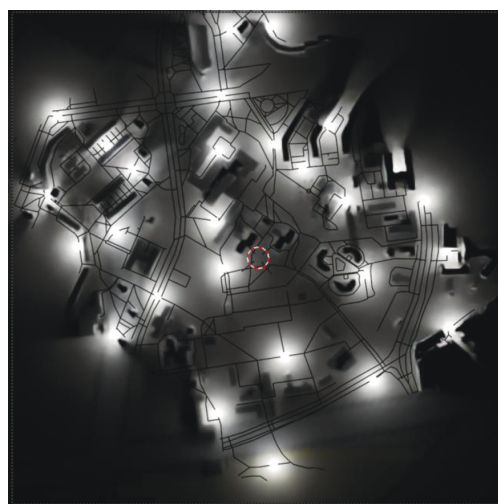


б – Прореженная выборка вертексов 67 из 1000

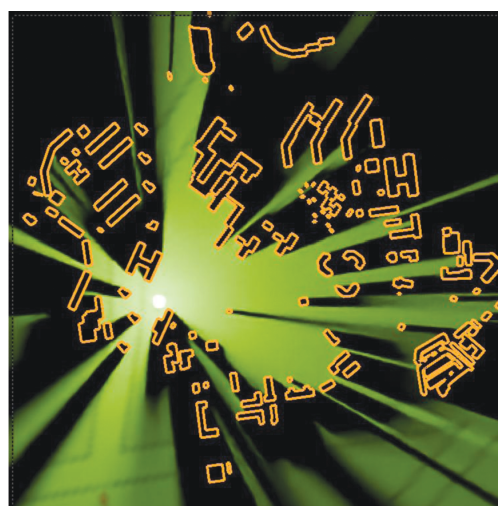


с – Окончательная выборка вертексов из 27 точек

Рис. 7. Решение задачи поиска оптимальной сети пунктов мониторинга
 Fig. 7. Solution to the problem of finding the optimal network of monitoring points



а – Зависимость освещенности пропорционально квадрату расстояния от источника света



б – Источники альтернативного света, освещенность от которых остается практически постоянной несмотря на изменение расстояния



с – Зависимость освещенности от количества источников, освещающих данную площадку

Рис. 8. Решение задачи поиска оптимального количества источников освещения
 Fig. 8. Solution to the problem of finding the optimal number of light sources

Варьируя указанные выше параметры, можно подобрать количество пунктов в сети мониторинга, соразмерное выделенным на их обслуживание ресурсам. При уменьшении числа пунктов в доминирующем множестве в первую очередь будут исчезать пункты мониторинга с нулевым числом видимых соседних пунктов. Это, как правило, точки, плотно окруженные зданиями. Результаты исследований [18] свидетельствуют, что в таких местах наблюдаются наименьшие значения МАЭД (рис. 9).

Предлагаемый подход по обоснованию сети пунктов измерения МАЭД в условиях городской застройки может быть использован для оперативной оценки радиационной обстановки и принятия решения о защите населения в случае радиационной аварии, сопровождающейся выбросом РВ в атмосферу.

Решение данной задачи было направлено на сокращение времени и объема измерений с целью минимизации дозы облучения сотрудников, осуществляющих

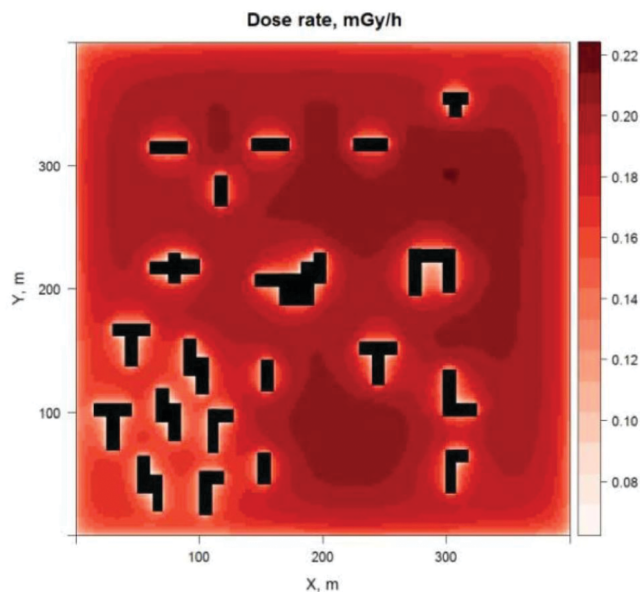


Рис. 9. Распределение МАЭД (мЗв/ч) при равномерном поверхностном загрязнении радионуклидом $^{137}\text{Cs} + ^{137m}\text{Ba}$ ($0,4 \text{ MBq/m}^2$) [18]

Fig. 9. Distribution of the AEDR (mSv/h) with uniform surface contamination by the radionuclide $^{137}\text{Cs} + ^{137m}\text{Ba}$ (0.4 MBq/m^2) [18]

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Модель мезомасштабного переноса радиоактивных веществ в атмосфере: Руководство пользователя. Обнинск: НПО «Тайфун», 2000.
2. Программное средство «SULTAN» оперативного прогнозирования радиационной обстановки за пределами станции в случае аварии на АЭС: Инструкция пользователя. М.: Росэнергоатом, 2000.
3. Нострадамус. Компьютерная система прогнозирования и анализа радиационной обстановки на ранней стадии аварии на АЭС: Инструкция пользователя. М.: ИБРАЭ РАН, 2001.
4. Киселев А.А. Сравнительный анализ размеров зон планирования защитных мероприятий для двух гипотетических радиационных аварий // Ядерная и радиационная безопасность. 2023. Т.3. №109. С. 36-49.
5. Царина А.Г., Алексанян Е.Г., Хачатурова Л.М., Стогова И.В., Фреймундт Г.Н. Технология моделирования распространения радиоактивных загрязняющих веществ в условиях сложной застройки // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2025. №2. С. 100-113. Doi: 10.26583/npe.2025.2.09.
6. Varyakhtar V.G., Bondarkov M.D., Gaschak S.P., Ivanov Yu.F., N.P. Arkhipov N.P. The Radioecology of an Urban Landscape, Using the Example of Pripjat. Environmental Sciences and Pollution Research // Special Issue. 2003. No.1. P. 63-72.
7. Арутюнян Р. В., Большой Л.А., Боровой А.А., Велихов Е.П. Системный анализ причин и последствий аварии на АЭС «Фукусима-1». М.: Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 2018. 408 с. ISBN 978-5-9907220-5-7.
8. Operational Intervention Levels for Reactor Emergencies and Methodology for their Derivation. Vienna: IAEA, 2017. EPR-NPP-OILs (2017). ISSN 2518-685X.
9. Антоний Е.В., Арутюнян Р.В., Богатов С.А., Воронов С.И., Гаврилов С.Л., Долгов В.Н., Егорова М.Е., Киселёв В.П., Князев А.Н., Коноплев А.В., Кудешов Е.А., Меркушов В.П., Одинов Б.В., Осипьянц И.А., Пименов А.Е., Пронин Д.А., Сёмин Н.Н., Сиротинский С.Е., Шикин С.А., Яковлев В.Ю., Нурлыбаев К.Н. Территориальные системы автоматизированного контроля радиационной обстановки // Труды ИБРАЭ РАН: Развитие систем аварийного реагирования и радиационного мониторинга. Вып. 15 / Под общ. ред. Л.А.Большова. М.: Наука, 2014. С. 24-42.
10. Оборудование автоматизированных систем контроля радиационной обстановки в районе размещения атомных электростанций. Технические требования эксплуатирующей организации: Стандарт организации. СТО 1.1.01.001.0875-2013. Введен приказом от 02.04.2014. №9/366-17.
11. Богатов С.А., Киселёв А.А., Пименов А.Е., Шведов А.М. Развитие существующих систем АСКРО в концепции «гибридного» мониторинга // Труды ИБРАЭ РАН: Развитие систем аварийного реагирования и радиационного мониторинга. Вып. 15 / Под общ. ред. Л.А.Большова. М.: Наука, 2007. С. 101-113.
12. Елохин А.П., Рау Д.Ф. Система контроля радиационной обстановки в зонах размещения объектов атомной промышленности. Патент РФ №2042157. Бюллетень №23 от 20.08.95. М., 1995.
13. Грубич А.О. Загрязнение почвы атмосферными выпадениями. Статистические свойства. Минск: ИВЦ Минфина, 2017. 230 с. ISBN 978-985-7168-47-7.
14. Панченко С.В. Уровни радиоактивного загрязнения городской среды при аварии на Чернобыльской АЭС (на примере г.Припять). М.: ИБРАЭ РАН, 2006. 68 с.
15. Руководство по пакету. Электронный ресурс: <https://cran.r-project.org/web/packages/fields/vignettes/fields.pdf>.
16. Географический анализ и статистические методы с использованием R. Электронный ресурс: http://spatial-econometrics.com/pdf_files/SDTMEcourse_R.pdf.
17. Применение пространственного анализа в биологии и экологии. Электронный ресурс: https://www.bioinformatics.ucdavis.edu/sites/g/files/dgvnks1336/files/intro_spatial_analysis_with_R.pdf.
18. Панин М.П. Моделирование переноса излучения. М.: МИФИ, 2008. 212 с.
19. Льюинс Дж. Ценность. Сопряженная функция / Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1972. 176 с.
20. Chizhov K., Bragin Yu., Sneve M.K., Shandala N., Siegien K., Smith G.M., Ksenofontov A., Kryanev A., Tesnov I., Koukhta B., Shimansky Yu., Goncharenko G., Drozdovitch V., Kryuchkov V. Further Development and Application of a Method for As-

sessing Radionuclide Surface Activity Distribution and Source Location Based on Measurements of Ambient Dose Equivalent Rate // J. Radiol. Prot. 2023. No.43. P. 041-505

21. Доклад МАГАТЭ о Фукусимской аварии и реализация Плана действий МАГАТЭ по ядерной безопасности // Без-

опасность, эффективность и экономика ядерной энергетики: 9-я Международная научно-техническая конференция, Москва, 21-23 мая 2014 г. Электронный ресурс: <https://inis.iaea.org/records/xbwt4-94t96/files/47104665.pdf>.

REFERENCES

1. Model of Mesoscale Transport of Radioactive Substances in the Atmosphere. User's Guide. Obninsk, NPO Tayfun Publ., 2000 (In Russ.).
2. Sultan Software for Operational Forecasting of Radiation Conditions Outside the Plant in the Event of an Accident at a Nuclear Power Plant. User's Manual. Moscow, Rosenergoatom Publ., 2000. (In Russ.).
3. Nostradamus. Computer System for Forecasting and Analyzing the Radiation Situation at the Early Stage of a Nuclear Power Plant Accident. User's Manual. Moscow Publ., 2001 (In Russ.).
4. Kiselev A.A. Comparative Analysis of the Sizes of Protective Measures Planning Zones for Two Hypothetical Radiation Accidents. *Yadernaya i Radiatsionnaya Bezopasnost'* = Nuclear and Radiation Safety. 2023;3;109:36-49 (In Russ.).
5. Tsarina A.G., Aleksanyan E.G., et al. Modeling Technology of the Radioactive Pollutants Propagation in Densely Built and Populated Areas. *Izvestiya Vuzov. Yadernaya Energetika* = Universities News. Nuclear Energy. 2025;2:100-113 (In Russ.). Doi: 10.26583/npe.2025.2.09.
6. Baryakhtar V.G., Bondarkov M.D., Gaschak S.P., Ivanov Yu.F., N.P. Arkhipov N.P. The Radioecology of an Urban Landscape, Using the Example of Pripjat. *Environmental Sciences and Pollution Research. Special Issue.* 2003;1:63-72.
7. Arutyunyan R. V., Bol'shov L.A., Borovoy A.A., Velikhov Ye.P. *Sistemnyy Analiz Prichin i Posledstviy Avarii na AES Fukushima-1* = Systems Analysis of the Causes and Consequences of the Accident at the Fukushima-1 NPP. Moscow, Institut Problem Bezopasnogo Razvitiya Atomnoy Energetiki RAN Publ., 2018. 408 p. (In Russ.). ISBN 978-5-9907220-5-7.
8. Operational Intervention Levels for Reactor Emergencies and Methodology for their Derivation. Vienna, IAEA, 2017. EPR-NPP-OILs (2017). ISSN 2518-685X.
9. Antoniy Ye.V., Arutyunyan R.V., Bogatov S.A., Voronov S.I., Gavrilov S.L., Dolgov V.N., Yegorova M.Ye., Kiselov V.P., Knyazev A.N., Konoplev A.V., Kudeshov Ye.A., Merkushev V.P., Odinov B.V., Osip'yants I.A., Pimenov A.Ye., Pronin D.A., Somin N.N., Sirotinskiy S.Ye., Shikin S.A., Yakovlev V.Yu., Nurlybayev K.N. Territorial Systems for Automated Monitoring of the Radiation Situation. *Trudy IBRAE RAN: Razvitiye Sistem Avariynogo Reagirovaniya i Radiatsionnogo Monitoringa* = Proceedings of the Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences: Development of Emergency Response and Radiation Monitoring Systems. Issue 15. Ed. L.A.Bol'shov. Moscow, Nauka Publ., 2014. P. 24-42 (In Russ.).
10. Equipment for Automated Radiation Monitoring Systems in the Area of Nuclear Power Plants. Technical Requirements of the Operating Organization: Organization Standard STO 1.1.01.001.0875-2013. Introduced by Order No. 9/366-17 of April 2, 2014 (In Russ.).
11. Bogatov S.A., Kiselev A.A., Pimenov A.Ye., Shvedov A.M. Development of Existing Automated Radiation Monitoring Systems in the Concept of "Hybrid" Monitoring. *Trudy IBRAE RAN: Razvitiye Sistem Avariynogo Reagirovaniya i Radiatsionnogo Monitoringa* = Proceedings of the Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences: Development of Emergency Response and Radiation Monitoring Systems. Issue 15. Ed. L.A.Bol'shov. Moscow, Nauka Publ., 2007. P. 101-113 (In Russ.).
12. Yelokhin A.P., Pay D.F. *Sistema Kontrolya Radiatsionnoy Obstanovki v Zonakh Razmeshcheniya Ob'yektov Atomnoy Promyshlennosti* = Radiation Monitoring System in Nuclear Industry Facility Areas. Russian Federation Patent No.2042157. Bulletin No.23 of August 20, 1995. Moscow Publ., 1995 (In Russ.).
13. Grubich A.O. *Zagryazneniye Pochvy Atmosfernymi Vypadeniyami. Statisticheskiye Svoystva* = Soil Pollution by Atmospheric Fallout. Statistical Properties. Minsk, Informatsionno-Vychislitel'nyy Tsentri Minfina Publ., 2017. 230 p. (In Russ.). ISBN 978-985-7168-47-7.
14. Panchenko S.V. *Urovni Radioaktivnogo Zagryazneniya Gorodskoy Sredy pri Avarii na Chernobyl'skoy AES (na Primere g. Pripyat')* = Levels of Radioactive Contamination of the Urban Environment during the Accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant (Using the City of Pripjat as an Example). Moscow, Institut Problem Bezopasnogo Razvitiya Atomnoy Energetiki RAN Publ., 2006. 68 p. (In Russ.).
15. Package Manual (In Russ.). URL: <https://cran.r-project.org/web/packages/fields/vignettes/fields.pdf>.
16. Geographical Analysis and Statistical Methods Using R (In Russ.). URL: http://spatial-econometrics.com/pdf_files/SDTMEcourse_R.pdf.
17. Applications of Spatial Analysis in Biology and Ecology (In Russ.). URL: https://www.bioinformatics.ucdavis.edu/sites/g/files/dgvnsk1336/files/intro_spatial_analysis_with_R.pdf.
18. Panin M.P. *Modelirovaniye Perenosa Izlucheniya* = Modeling of Radiation Transfer. Moscow, MIFI Publ., 2008. 212 p. (In Russ.).
19. L'yuins Dzh. *Tsennost'. Sopryazhennaya Funktsiya* = Value. The Conjugate Function. Translated from English. Moscow, Atomizdat Publ., 1972. 176 p. (In Russ.).
20. Chizhov K., Bragin Yu., Sneve M.K., Shandala N., Siegien K., Smith G.M., Ksenofontov A., Kryanev A., Tesnov I., Koukhta B., Shimansky Yu., Goncharenko G., Drozdovitch V., Kryuchkov V. Further Development and Application of a Method for Assessing Radionuclide Surface Activity Distribution and Source Location Based on Measurements of Ambient Dose Equivalent Rate. *J. Radiol. Prot.* 2023;43:041-505.
21. IAEA Report on the Fukushima Accident and Implementation of the IAEA Nuclear Safety Action Plan. *Bezopasnost', Effektivnost' i Ekonomika Yadernoy Energetiki* = Safety, Efficiency, and Economics of Nuclear Energy. IX International Scientific and Technical Conference, Moscow, May 21-23, 2014 (In Russ.). URL: <https://inis.iaea.org/records/xbwt4-94t96/files/47104665.pdf>.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Поступила: 20.02.2026. Принята к публикации: 25.03.2026.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Financing. The study had no sponsorship.

Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.

Article received: 20.02.2026. Accepted for publication: 25.03.2026.