

УДК: 004.942

DOI: 10.25559/SITITO.15.201904.961-969

Моделирование радиоактивного заражения местности методом случайных сложений

Е. М. Моисеева, В. В. Татаринov*, А. С. Дутов

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия
105005, Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

*tatavictor@bmstu.ru

Аннотация

К настоящему времени атомная энергетика занимает существенное место в топливно-энергетическом балансе мира. Несмотря на существенное улучшение состояния ядерной и радиационной безопасности на радиационных объектах в последнее время, полностью исключить наличие аварийных ситуаций, в том числе и с выбросом радиоактивных веществ за пределы санитарно-защитных зон нельзя. Поэтому необходимо обеспечить своевременный прогноз развития ситуации с распространением радиоактивных веществ в окружающей среде для своевременного реагирования уполномоченных органов на последствия данного рода чрезвычайных ситуаций в целях защиты населения и сотрудников радиационно-опасных объектов.

Наиболее опасным поражающим фактором аварии на радиационно-опасном объекте является радиоактивное загрязнение местности. В процессе аварии радионуклиды различной массы и активности способны распространяться на большие расстояния, что приводит к загрязнению обширных территорий, в том числе и на продолжительное время.

В статье рассмотрена возможность применения метода случайных сложений для моделирования радиоактивного заражения местности, позволяющего построить карту распределения поверхностной активности по нескольким измерениям в различных точках местности.

Метод случайных сложений применим в условиях существенной неопределенности параметров, необходимых для построения модели распределения поверхностной активности зараженной местности известными методами Гаусса или Лагранжа.

В основу метода случайных сложений в задаче моделирования распределения радионуклидов нами положена аналогия между большим числом случайно распределенных факторов, влияющих на формирование итоговой картины рельефа местности и распределением радионуклидов при их распространении в окружающей среде.

В статье описан алгоритм работы программы, позволяющий формировать слой выборочным сложением поверхностей, построенных методом случайных сложений, так, чтобы после каждого включения в слой новой поверхности относительная погрешность построения стремилась к заданной изначально.

По результатам моделирования производится сравнительный анализ полученных данных при различном количестве контрольных точек, оценивается изменение относительной погрешности в зависимости от их увеличения и оценивается возможность применения данного алгоритма работы для моделирования радиационного загрязнения местности в результате аварии на радиационно-опасном объекте.



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



Ключевые слова: метод случайных сложений, фрактальная геометрия, радиоактивное заражение местности, моделирование, радиационно-опасные объекты, радиоактивные вещества, радионуклиды, поверхностная активность.

Для цитирования: *Моисеева Е. М., Татаринов В. В., Дутов А. С.* Моделирование радиоактивного заражения местности методом случайных сложений // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2019. Т. 15, № 4. С. 961-969. DOI: 10.25559/SITITO.15.201904.961-969

© Моисеева Е. М., Татаринов В. В., Дутов А. С., 2019



Simulation of Radioactive Contamination of the Area by Random Additions

E. M. Moiseeva, V. V. Tatarinov*, A. S. Dutov

Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Moscow, Russia

5/1 2nd Baumanskaya St., Moscow 105005, Russia

*tatavictor@bmstu.ru

Abstract

To date, nuclear energy occupies a significant place in the fuel and energy balance of the world. Despite the significant improvement in the state of nuclear and radiation safety at radiation facilities in recent years, it is impossible to completely exclude the presence of emergency situations, including the release of radioactive substances outside the sanitary protection zones. Therefore, it is necessary to provide a timely forecast of the situation with the spread of radioactive substances in the environment for the timely response of the competent authorities to the consequences of this kind of emergency in order to protect the population and employees of radiation-hazardous facilities.

The most dangerous damaging factor of an accident at a radiation-hazardous facility is radioactive contamination of the area. In the event of an accident, radionuclides of different masses and activities can spread over long distances, resulting in extensive contamination, including long-term contamination. The article considers the possibility of using the method of random addition to simulate radioactive contamination of the area, which allows you to build a map of the distribution of surface activity in several dimensions at different points in the area.

The method of random addition is applicable in conditions of significant uncertainty of the parameters necessary to construct a model of surface activity distribution of the contaminated area by known methods of Gauss or Lagrange.

The basis of the method of random addition in the problem of modeling the distribution of radionuclides, we put the analogy between a large number of randomly distributed factors that affect the formation of the final picture of the terrain and the distribution of radionuclides in their distribution in the environment.

The article describes the algorithm of the program, which allows to form a layer by selective addition of surfaces constructed by random addition, so that after each inclusion in the layer of a new surface, the relative error of construction tends to the given initially.

From the simulation results, the comparative analysis of the obtained data with different number of control points, we estimate the relative error depending on magnification and assessed the possibility of using this algorithm for simulation of radiation contamination in the accident at radiation-hazardous object.

Keywords: Method of random additions, fractal geometry, radioactive contamination of the area, modeling, radiation-hazardous objects, radioactive substances, radionuclides, surface activity.

For citation: Moiseeva E.M., Tatarinov V.V., Dutov A.S. Simulation of Radioactive Contamination of the Area by Random Additions. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie* = Modern Information Technologies and IT-Education. 2019; 15(4):961-969. DOI: 10.25559/SITITO.15.201904.961-969



Введение

В настоящее время атомная энергетика занимает существенное место в топливно-энергетическом балансе мира. Несмотря на высказываемые скептические суждения, безопасность объектов атомной энергетики для населения и окружающей среды в ходе нормальной эксплуатации существенно ниже многих других промышленных производств [1-5]. Преимущество атомной энергетики состоит в том, что она требует существенно меньших количеств исходного сырья и земельных площадей, чем тепловые станции; не загрязняет атмосферу дымом и сажей; при закрытом ядерно-топливном цикле задействует отработавшее ядерное топливо, что сокращает количество радиоактивных отходов; на данный момент существуют способы грамотного использования радиоактивных отходов без дальнейшего захоронения¹ [4-6]; очистные сооружения и камеры выдержки способны обеспечить нормированный выброс радиоактивных веществ в окружающую среду.

Одна из немногих значимых опасностей состоит в возможном возникновении аварии на любом из объектов ядерного топливного цикла, которая может привести к загрязнению территории и поражению людей [5-7].

Несмотря на существенное улучшение состояния ядерной и радиационной безопасности на радиационных объектах в последнее время, полностью исключить наличие аварийных ситуаций, в том числе и с выбросов радиоактивных веществ за пределы санитарно-защитных зон нельзя. Поэтому необходимо обеспечить своевременное реагирование уполномоченных органов на последствия данного рода чрезвычайных ситуаций [8-11].

Наиболее опасным поражающим фактором аварии на радиационно-опасном объекте является радиоактивное загрязнение местности. В процессе аварии радионуклиды различной массы и активности способны распространяться на большие расстояния, что приводит к загрязнению территории, в том числе и на продолжительное время [12-14].

Для моделирования зон радиоактивного заражения местности используют различные программные средства, построенные на основе решения уравнения Гаусса [15-17] или же уравнения адвекции-диффузии (метод Лангранжа). К сожалению, существующие расчетные модели, особенно работающие по лагранжу методу, требуют большой объем входных данных для построения зон РЗМ. В условиях аварии, или же отсутствия информации о параметрах, необходимых для построения модели распределения поверхностной активности радионуклидов использование данного рода программных средств становится затруднительным [18-20].

Поэтому разработан новый алгоритм применения метода случайных сложений для моделирования радиоактивного заражения местности, позволяющий построить карту распределения поверхностной активности зараженной местности по нескольким измерениям в различных точках местности [21].

Цель исследования

Оценить возможность применения созданного алгоритма метода случайных сложений для моделирования радиоактивного заражения местности, установить зависимость относительной погрешности построения модели от количества контрольных точек.

Радиоактивное заражение местности после аварии на АЭС «Фукусима-1»

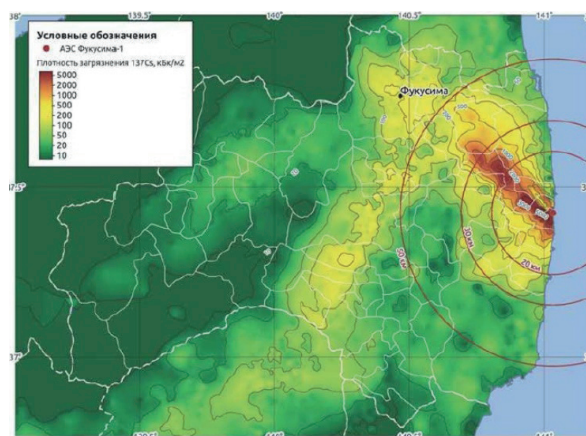
Радиационно-опасный объект - научный, промышленный или оборонный объект, при авариях или разрушении которого могут произойти массовые поражения людей, животных и растений ионизирующими излучениями, а также радиоактивное загрязнение среды.

Радиоактивное загрязнение местности является основным и длительно действующим радиационным поражающим фактором радиационных аварий и ядерных взрывов [22-24].

При авариях на радиоактивно-опасном объекте характерно радиоактивное заражение атмосферы и местности легколетучими радионуклидами (йод, цезий, стронций), цезий и стронций обладают длительным периодом полураспада. При авариях на атомных электростанциях значительная часть продуктов деления ядерного топлива находится в парообразном и аэрозольном состоянии. Поэтому резкого спада уровней радиации нет [23-24].

В качестве исследуемого объекта была взята авария на радиационно-опасном объекте – атомной электростанции «Фукусима – 1». Данная авария отличается от остальных характером распространения РЗМ. Так как в процессе разрушения реакторов не было горения, как, например, на Чернобыльской АЭС, а произошел взрыв водорода – распределение радиоактивного облака после аварии уже не описывается стандартным гауссовским распределением [25-26].

Исходные данные значений контрольных точек, необходимых для моделирования взяты из массива, построенного по карте плотности загрязнения местности радионуклидом ^{137}Cs (рисунок 1).



Р и с. 1. Плотность загрязнения местности радионуклидом ^{137}Cs [27]

Fig. 1. The density of contamination of the area with a radionuclide ^{137}Cs [27]

¹ Faust S., Fleck I., Jendrich U., Michel F. Studies on the safety relevant aspects of reactor cooling circuit decontamination in nuclear power plants (GRS--492). Germany, 2018 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.grs.de/sites/default/files/pdf/grs-492.pdf> (дата обращения: 23.07.2019).



Метод случайных сложений

Выбирается площадь местности с равной шириной и длиной, таким образом, чтобы в вершинах квадрата значение уровней было равно нулю – первое поколение точек (точки 1 на картинке).

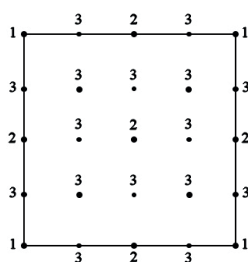
Значения уровней у второго поколения точек складываются из среднего арифметического близлежащих точек (описывающих квадрат) и случайно сгенерированного гауссовского числа с нулевым средним и единичной дисперсией.

Затем проводится интерполяция и строится третье поколение точек с новой дисперсией, пересчитанной по следующей формуле:

$$\sigma_n^2 = r^{2nH}, \text{ где } r = \frac{1}{\sqrt{2}} - \text{ масштабный коэффициент;}$$

H – показатель Херста, характеризует изрезанность моделируемой поверхности, принимается равным 0.9 для данной задачи².

Далее аналогичным образом плоскость разбивается на меньшие квадраты и проводится перерасчет дисперсии для каждого нового поколения точек до тех пор, пока каждой точке из области не будет присвоено значение уровня.



Р и с. 2. Схема расположения точек первого, второго и третьего поколений на исследуемой области зараженной местности

Fig. 2. Map of the sites of the first, second and third generations on the contaminated area under study

Алгоритм

Первый этап алгоритма – построение базовой поверхности по методу случайных сложений.

Второй этап алгоритма – расчет относительной погрешности построения базовой поверхности от исходно задаваемых нескольких контрольных точек производится по формуле:

$$P = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n |X_{i,j}^{расч} - X_{i,j}|}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n X_{i,j}}$$

где m, n – количество столбцов и строк в массиве значений поверхностной активности зараженной местности;

$X_{i,j}^{расч}$ – смоделированное значение поверхностной активности в точке с координатами i, j , кБк/м²;

$X_{i,j}$ – исходные значения поверхностной активности, замеренной в точке с координатами i, j , кБк/м².

Третий этап алгоритма – сравнение полученной относительной погрешности построения базовой поверхности с заданным значением, характеризующим точность построения будущей карты распределения.

Если погрешность построения меньше заданной, то: четвертый этап – завершение построения, вывод на экран смоделированной карты распределения поверхностной активности.

Если погрешность построения больше заданной, то: пятый этап – построение следующей поверхности методом случайных сложений.

Шестой этап алгоритма – формирование слоя: сложение базовой поверхности с построенной.

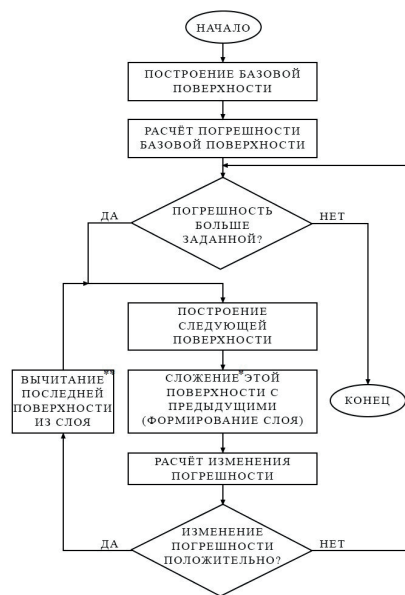
Седьмой этап алгоритма – расчет относительной погрешности построения слоя от исходно задаваемых нескольких контрольных точек.

Восьмой этап алгоритма – сравнение относительных погрешностей поверхности до сложения и слоя после сложения.

Если погрешность до сложения меньше, чем после него, то: этап девятый – вычитание предыдущей поверхности из слоя, а затем формирование цикла: повторение этапов 5 – 8.

Если погрешность до сложения больше, чем после него, то: формирование цикла: повторение этапов 3 – 8.

Таким образом, программа будет формировать слой выборочным сложением поверхностей построенных методом случайных сложений, так, чтобы после каждого включения в слой новой поверхности относительная погрешность уменьшалась. Данный процесс будет повторяться до тех пор, пока ее величина не достигнет заданной.



* – под сложением поверхностей в данной работе подразумевается: сложение значений уровней радиоактивного заражения каждой точки одного сгенерированного массива данных с другим;

** – под вычитанием – вычитание значений уровней радиоактивного заражения каждой точки одного сгенерированного массива данных из другого.

Р и с. 3. Алгоритм работы программы

* – the addition of surfaces in a given work means the addition of the values of the levels of radioactive contamination of each point of one generated data set with another;

** – subtraction is the subtraction of the radioactive contamination levels of each point in one generated data set from another.

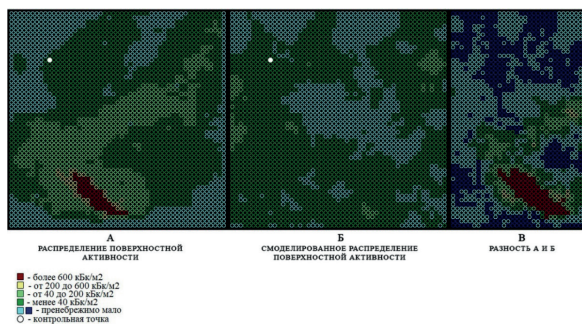
Fig. 3. Program Operation Algorithm

² Федер Е. Фракталы: Пер. с англ. М.: Мир, 1991. 254 с.



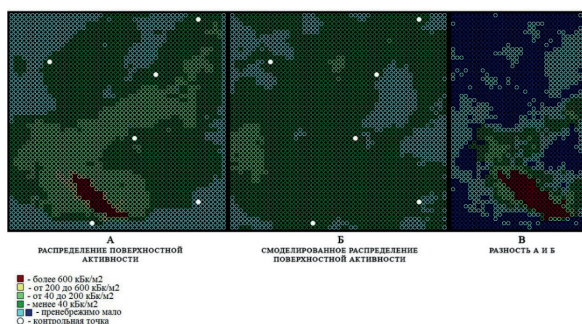
Полученные результаты

В общей сложности было смоделировано двенадцать карт распределения поверхностной активности после аварии на радиационно-опасном объекте - АЭС «Фукусима – 1» по различному количеству контрольных точек. При этом относительная погрешность отклонения значений от контрольных не превышала 20.



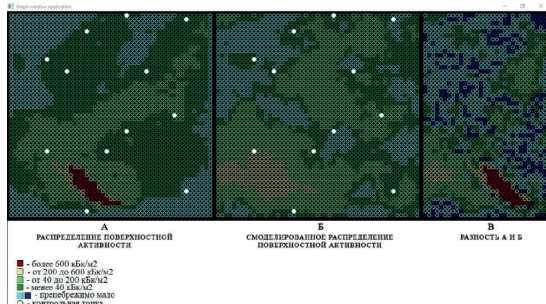
Р и с. 4. Модель, построенная методом случайных сложений по одной контрольной точке

Fig. 4. Model by random addition method with a single reference point



Р и с. 5. Модель, построенная методом случайных сложений по шести контрольным точкам

Fig. 5. Model by random addition method with six reference points

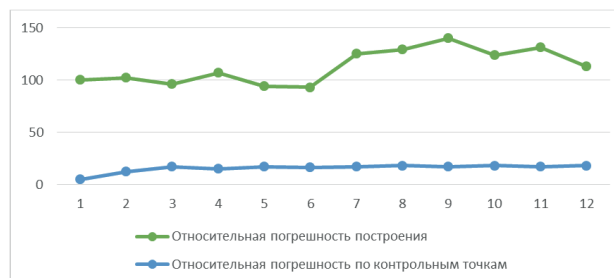


Р и с. 6. Модель, построенная методом случайных сложений по двенадцати контрольным точкам

Fig. 6. Model by random addition method with a twelve reference points

На рисунках 4 - 6 наглядно показано формирование следа распространения радиоактивного облака при возрастании числа контрольных точек. На последней модели начинает формироваться очаг следа.

На рисунке 7 представлено изменение относительной погрешности моделирования радиоактивного заражения местности при увеличении числа контрольных точек.



Р и с. 7. Зависимость относительной погрешности от количества контрольных точек

Fig. 7. The dependence of relative error on number of control points

Заключение

Анализ результатов работы позволяет выделить следующее:

- алгоритм моделирования методом случайных сложений позволяет построить поверхности радиоактивного загрязнения местности для произвольного числа контрольных точек (данных радиационного мониторинга) с заданной относительной погрешностью по контрольным точкам;
- относительная погрешность построения модели в целом носит статистический характер, и слабо зависит от числа контрольных точек;
- зоны с относительно высокими, по сравнению со средними значениями поверхностной активности, моделируются с существенно более высокой погрешностью, что связано с различными значениями показателя Херста для разных участков территории.

Список использованных источников

- [1] Яковлева Е. А. Безопасность атомной энергетики // *Advanced Science*. 2019. С. 58-60. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36757962> (дата обращения: 23.07.2019).
- [2] Муравьев Е. В. Развитие ядерной энергетики России на новой технологической платформе с реакторами на быстрых нейтронах и замкнутым ядерным топливным циклом // *Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность-2018. Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции* / Под ред. Л. И. Лукиной, Н. А. Бежина, Н. В. Ляминой. Севастополь: СевГУ, 2018. С. 841-846. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37061863> (дата обращения: 23.07.2019).
- [3] Машин В. А. Культура безопасности: методы предупреждения неверных действий человека // *Электрические станции*. 2018. №. 2. С. 2-12. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32559893> (дата обращения: 23.07.2019).
- [4] Берела А. И., Томилин С. А., Федотов А. Г. Возможности логистики в обеспечении эффективности и радиационной безопасности производственного процесса вывода из эксплуатации блоков атомных станций // *Глобальная ядерная безопасность*. 2019. № 2. С. 68-75. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38472290> (дата обращения: 23.07.2019).
- [5] Амерханов Р. А., Кириченко А. С., Армаганян Э. Г., Дворный В. В. Проблемы использования возобновляемых источ-



- ников энергии // Технический оппонент. 2018. № 1. С. 46-53. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36580686> (дата обращения: 23.07.2019).
- [6] Kumar M. Social, Economic, and Environmental Impacts of Renewable Energy Resources // Wind Solar Hybrid Renewable Energy System / K. E. Okedu, A. Tahour, A.G. Aissaou (Eds.) IntechOpen, 2019. DOI: 10.5772/intechopen.89494.
- [7] Sierchula J. Analysis of passive residual heat removal system in AP1000 nuclear power plant // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 214, No. 1. Article number: 012095. DOI: 10.1088/1755-1315/214/1/012095
- [8] Limac S. X., Costa K. P. S., Lima Z. R., Rother F. C., Araujo O. M. O., Vital H. C., Brum T., Junior W. F. R. S., Amorim J. C. C., Healy M. J. F., Andrade E. R. Simulated nuclear contamination scenario, solid cancer risk assessment, and support to decision // Nukleonika. 2019. Vol. 64, Issue 2. Pp. 41-48. DOI: 10.2478/nuka-2019-0005
- [9] Matsuda N., Fukuda N., Yamauchi M., Tsunoyama Y., Tomita S., Kita M. High Background Area For Radiation Education // Radiation Protection Dosimetry. 2019. Vol. 184, Issue 3-4. Pp. 294-297. DOI: 10.1093/rpd/ncz084
- [10] Chen-Yu Hao, Mei-Shin Chen, Tien-Yin Chou, Chia-Cheng Lin, Kim Kyoungsook, Nguyen Xuan Linh Developing an OGC Standard-Based Platform for Integration of Radiation Monitoring Data from Fukushima Area, Japan // Radiation Science and Technology. 2018. Vol. 4, Issue 3. Pp. 12-21. DOI: 10.11648/j.rst.20180403.11
- [11] Steinhäuser G. Anthropogenic radioactive particles in the environment // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2018. Vol. 318, Issue 3. Pp. 1629-1639. DOI: 10.1007/s10967-018-6268-4
- [12] Korir G., Karam P. A. A Novel Method for Quick Assessment of Internal And External Radiation Exposure in the Aftermath of a Large Radiological Incident // Health Physics. 2018. Vol. 115, Issue 2. Pp. 235-251. DOI: 10.1097/HP.0000000000000858
- [13] Benito G., Sáez J. C., Blázquez J. B., Quiñones J. Advanced surveillance of environmental radiation in automatic networks // Radiation protection dosimetry. 2017. Vol. 179, Issue 4. Pp. 299-302. DOI: 10.1093/rpd/ncx280
- [14] Lundgren R. E., McMakin A. H. Risk Communication: A Handbook for Communicating Environmental, Safety, and Health Risks. Wiley-IEEE Press, 2018. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?bknumber=8434159> (дата обращения: 23.07.2019).
- [15] Ксенофонтов А. И., Елохин А. П., Алалем Е. А. Примененные расчетных методов для анализа характеристик γ -излучения радиоактивного объекта при выбросах АЭС // Глобальная ядерная безопасность. 2018. № 3. С. 7-16. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36334632> (дата обращения: 23.07.2019).
- [16] Бонах А. Э., Данейкин Ю. Моделирование гамма-сканирующего детектора с коллиматором для исследования дифференциального радиоактивного загрязнения // Глобальная ядерная безопасность. 2018. № 2. С. 66-73. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35450040> (дата обращения: 23.07.2019).
- [17] Ksenofontov A. I., Elokhin A. P., Alalem E. A. Application of simulation modelling approaches for analyzing γ -radiation characteristics of a plume induced by a Nuclear Accident at NPP // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 487, No. 1. Article number: 012009. DOI: 10.1088/1757-899X/487/1/012009
- [18] Vali R., Adelikhah M. E., Fegghi S. A. H., Noorikalkhoran O., Ahangari R. Simulation of radionuclide atmospheric dispersion and dose assessment for inhabitants of Tehran province after a hypothetical accident of the Tehran Research Reactor // Radiation and Environmental Biophysics. 2019. Vol. 58, Issue 1. Pp. 119-128. DOI: 10.1007/s00411-018-0761-6
- [19] Salbu B., Kashparov V., Lind O. C., Garcia-Tenorio R., Johansen M. P., Child D. P., Roos P., Sancho C. Challenges associated with the behaviour of radioactive particles in the environment // Journal of environmental radioactivity. 2018. Vol. 186. Pp. 101-115. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2017.09.001
- [20] Tsitsimpelis I., Taylor C. J., Lennox B., Joyce M. J. A review of ground-based robotic systems for the characterization of nuclear environments // Progress in Nuclear Energy. 2019. Vol. 111. Pp. 109-124. DOI: 10.1016/j.pnucene.2018.10.023
- [21] Moiseeva E., Tatarinov V., Dutov A. Application of the method of random additions for the simulation of radioactive contamination // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 492, No. 1. Article number: 012008. DOI: 10.1088/1757-899X/492/1/012008
- [22] Иноземцев В. А., Ковба В. И., Чугунов Е. А., Шишко Н. А. Аварии на радиационно, химически и биологически опасных объектах: прошлое, настоящее, будущее // Современные проблемы гражданской защиты. 2018. № 2. С. 45-55. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35467527> (дата обращения: 23.07.2019).
- [23] Babenko S. P., Badin A. V., Ovchinnikov A. V. Estimation of the permissible time for human presence in the zone of an emergency release of uranium hexafluoride with inhalation // Moscow University Physics Bulletin. 2016. Vol. 71, Issue 5. Pp. 514-519. DOI: 10.3103/S0027134916050039
- [24] Thakur P., Runyon T. Ongoing environmental monitoring and assessment of the long-term impacts of the February 2014 radiological release from the waste isolation pilot plant // Environmental Science and Pollution Research. 2018. Vol. 25, Issue 17. Pp. 17038-17049. DOI: 10.1007/s11356-018-1795-7
- [25] Murakami M. Importance of risk comparison for individual and societal decision-making after the Fukushima disaster // Journal of Radiation Research. 2018. Vol. 5, No. suppl_2. Pp. ii23-ii30. DOI: 10.1093/jrr/rrx094
- [26] Davis S., Hayes-Conroy J. Invisible radiation reveals who we are as people: environmental complexity, gendered risk, and biopolitics after the Fukushima nuclear disaster // Social & Cultural Geography. 2018. Vol. 19, Issue 6. Pp. 720-740. DOI: 10.1080/14649365.2017.1304566
- [27] Арутюнян Р. В., Большов Л. А., Боровой А. А., Велихов Е. П. Системный анализ причин и последствий аварии на АЭС «Фукусима-1». М.: Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 2018. 408 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35137438> (дата обращения: 23.07.2019).

Поступила 23.07.2019; принята к публикации 22.10.2019;
опубликована онлайн 23.12.2019.



Об авторах:

Моисеева Екатерина Михайловна, магистрант, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет) (105005, Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1), ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6897-5603>, kat-menshiko@yandex.ru

Татаринов Виктор Викторович, доцент кафедры экологии и промышленной безопасности, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет) (105005, Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1), кандидат физико-математических наук, доцент, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6261-6156>, tataavictor@bmstu.ru

Дутов Алексей Сергеевич, старший преподаватель кафедры экологии и промышленной безопасности, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет) (105005, Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6360-523X>, dutovas@bmstu.ru

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

References

- [1] Yakovleva E.A. Safety of Nuclear Reactors. *Advanced Science*. 2019, pp. 58-60. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36757962> (accessed 23.07.2019). (In Russ., abstract in Eng.)
- [2] Muraviev E.V. Russia's Nuclear Power Development on the New Technological Platform with Fast Neutron Reactors and Closed Nuclear Fuel Cycle. In: Lukina L.I., Bezgina N.A., Laymina N.V. (Eds.) *Proceedings of the international conference "Environmental, Industrial and Energy Security-2018"* SevSU, Sevastopol, 2018, 841-846. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37061863> (accessed 23.07.2019). (In Russ., abstract in Eng.)
- [3] Mashin V. Safety culture: Human Performance Tools. *Electrical stations*. 2018; (2):2-12. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32559893> (accessed 23.07.2019). (In Russ., abstract in Eng.)
- [4] Berela A.I., Tomilin S.A., Fedotov A.G. Possibilities of Logistics in Ensuring Efficiency and Radiation Safety of Production Process of Nuclear Power Stations Unit Decommissioning. *Global Nuclear Safety*. 2019; (2):68-75. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38472290> (accessed 23.07.2019). (In Russ., abstract in Eng.)
- [5] Amerkhanov R.A., Kirichenko A.S., Armaganyan E.G., Dvorniy V.V. Problems of Renewable Energy Sources Application. *Technical Opponent*. 2018; (1):46-53. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36580686> (accessed 23.07.2019). (In Russ., abstract in Eng.)
- [6] Kumar M. Social, Economic, and Environmental Impacts of Renewable Energy Resources. In: Okedu K.E., Tahour A., Aissaou A.G. (Eds.) *Wind Solar Hybrid Renewable Energy System*. IntechOpen, 2019. (In Eng.) DOI: 10.5772/intechopen.89494.
- [7] Sierchuła J. Analysis of passive residual heat removal system in AP1000 nuclear power plant. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 214(1):012095. (In Eng.) DOI: 10.1088/1755-1315/214/1/012095
- [8] Limac S.X., Costa K.P.S., Lima Z.R., Rother F.C., Araujo O.M.O., Vital H.C., Brum T., Junior W.F.R.S., Amorim J.C.C., Healy M.J.F., Andrade E.R. Simulated nuclear contamination scenario, solid cancer risk assessment, and support to decision. *Nukleonika*. 2019; 64(2):41-48. (In Eng.) DOI: 10.2478/nuka-2019-0005
- [9] Matsuda N., Fukuda N., Yamauchi M., Tsunoyama Y., Tomita S., Kita M. High Background Area For Radiation Education. *Radiation Protection Dosimetry*. 2019; 184(3-4):294-297. (In Eng.) DOI: 10.1093/rpd/ncz084
- [10] Chen-Yu Hao, Mei-Shin Chen, Tien-Yin Chou, Chia-Cheng Lin, Kim Kyoungsook, Nguyen Xuan Linh Developing an OGC Standard-Based Platform for Integration of Radiation Monitoring Data from Fukushima Area, Japan. *Radiation Science and Technology*. 2018; 4(3):12-21. (In Eng.) DOI: 10.11648/j.rst.20180403.11
- [11] Steinhäuser G. Anthropogenic radioactive particles in the environment. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2018; 318(3):1629-1639. (In Eng.) DOI: 10.1007/s10967-018-6268-4
- [12] Korir G., Karam P. A. A Novel Method for Quick Assessment of Internal And External Radiation Exposure in the Aftermath of a Large Radiological Incident. *Health Physics*. 2018; 115(2):235-251. (In Eng.) DOI: 10.1097/HP.0000000000000858
- [13] Benito G., Sáez J. C., Blázquez J. B., Quiñones J. Advanced surveillance of environmental radiation in automatic networks. *Radiation protection dosimetry*. 2017; 179(4):299-302. (In Eng.) DOI: 10.1093/rpd/ncx280
- [14] Lundgren R.E., McMakin A.H. Risk Communication: A Handbook for Communicating Environmental, Safety, and Health Risks. Wiley-IEEE Press, 2018. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?bknumber=8434159> (accessed 23.07.2019). (In Eng.)
- [15] Ksenofontov A.I., Elokhin A.P., Alalem E.A. Applications of Monte Carlo Simulation for Analyzing γ -Radiation Characteristics of Radioactive Cloud Radiation in NPP Emissions. *Global Nuclear Safety*. 2018; (3):7-16. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36334632> (accessed 23.07.2019). (In Russ., abstract in Eng.)
- [16] Bonah A.E., Daneykin Yu. Modelling of Gamma-scan Detector with Collimator for Investigating Differential Radioactive Contamination. *Global Nuclear Safety*. 2018; (2):66-73. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35450040> (accessed 23.07.2019). (In Eng., abstract in Russ.)
- [17] Ksenofontov A.I., Elokhin A.P., Alalem E.A. Application of simulation modelling approaches for analyzing γ -radiation characteristics of a plume induced by a Nuclear Accident at NPP. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 487(1):012009. (In Eng.) DOI: 10.1088/1757-899X/487/1/012009
- [18] Vali R., Adelikhah M.E., Feghi S.A.H., Noorikalkhoran O., Ahangari R. Simulation of radionuclide atmospheric dispersion and dose assessment for inhabitants of Tehran province after a hypothetical accident of the Tehran Research Reactor. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2019; 58(1):119-128. (In Eng.) DOI: 10.1007/s00411-018-0761-6
- [19] Salbu B., Kashparov V., Lind O.C., Garcia-Tenorio R., Johansen



- M.P., Child D.P., Roos P., Sancho C. Challenges associated with the behaviour of radioactive particles in the environment. *Journal of environmental radioactivity*. 2018; 186:101-115. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.jenvrad.2017.09.001
- [20] Tsitsimpelis I., Taylor C.J., Lennox B., Joyce M.J. A review of ground-based robotic systems for the characterization of nuclear environments. *Progress in Nuclear Energy*. 2019; 111:109-124. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.pnucene.2018.10.023
- [21] Moiseeva E., Tatarinov V., Dutov A. Application of the method of random additions for the simulation of radioactive contamination. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 492(1):012008. (In Eng.) DOI: 10.1088/1757-899X/492/1/012008
- [22] Inozemtsev V.A., Kovba V.I., Chugunov E.A., Shishko N.A. Accidents at Radiation, Chemically and Biologically Hazardous Facilities: Past, Present and Future. *Modern problems of civil protection*. 2018; (2):45-55. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35467527> (accessed 23.07.2019). (In Eng., abstract in. Russ.)
- [23] Babenko S.P., Badin A.V., Ovchinnikov A.V. Estimation of the permissible time for human presence in the zone of an emergency release of uranium hexafluoride with inhalation. *Moscow University Physics Bulletin*. 2016; 71(5):514-519. (In Eng.) DOI: 10.3103/S0027134916050039
- [24] Thakur P., Runyon T. Ongoing environmental monitoring and assessment of the long-term impacts of the February 2014 radiological release from the waste isolation pilot plant. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018; 25(17):17038-17049. (In Eng.) DOI: 10.1007/s11356-018-1795-7
- [25] Murakami M. Importance of risk comparison for individual and societal decision-making after the Fukushima disaster. *Journal of Radiation Research*. 2018; 5(suppl_2):ii23-ii30. (In Eng.) DOI: 10.1093/jrr/rrx094
- [26] Davis S., Hayes-Conroy J. Invisible radiation reveals who we are as people: environmental complexity, gendered risk, and biopolitics after the Fukushima nuclear disaster. *Social & Cultural Geography*. 2018; 19(6):720-740. (In Eng.) DOI: 10.1080/14649365.2017.1304566
- [27] Arutyunyan R.V., Bolshov L.A., Borovoi A.A., Velikhov E.P. *Sistemnyj analiz prichin i posledstvij avarii na AES «Fukushima-1»* [System analysis of causes and consequence of the Fukushima-1 NPP accident]. IBRAE RAS, Moscow, 2018. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35137438> (accessed 23.07.2019). (In Russ.)

Alexey S. Dutov, Senior Lecturer of the Department of Ecology and Industrial Safety, Bauman Moscow State Technical University (National Research University) (5/1 2nd Baumanskaya St., Moscow 105005, Russia), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6360-523X>, dutovas@bmstu.ru

All authors have read and approved the final manuscript.

*Submitted 23.07.2019; revised 22.10.2019;
published online 23.12.2019.*

About the authors:

Ekaterina M. Moiseeva, Master's degree student, Bauman Moscow State Technical University (National Research University) (5/1 2nd Baumanskaya St., Moscow 105005, Russia), ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6897-5603>, kat-menshiko@yandex.ru

Victor V. Tatarinov, Associate Professor of the Department of Ecology and Industrial Safety, Bauman Moscow State Technical University (National Research University) (5/1 2nd Baumanskaya St., Moscow 105005, Russia), Ph.D. (Phys.-Math.), Associate Professor; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6261-6156>, tatavictor@bmstu.ru

