

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

ИНФОРМАТИКА INFORMATICS

УДК 004.94
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-2-139-145>

Поступило в редакцию 22.03.2021
Received 22.03.2021

П. К. Шалькевич

*Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова
Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь*

КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ Cs-137 В ПОЧВЕ

(Представлено членом-корреспондентом А. В. Тузиковым)

Аннотация. Компьютерное прогнозирование распространения радиоактивных загрязнений в почвах является перспективным научным направлением ввиду того, что прогнозирование развития радиационной обстановки на основе экспериментальных измерений удельной активности радионуклидов требует применения методов математической и компьютерной обработки данных. При этом большинство специализированных программных средств, используемых для прогнозирования распространения радиоактивных загрязнений в почвах, основано на одномерных и двумерных идеализациях этого процесса, тогда как для решения задачи комплексной оценки состояния биосферы требуются данные о пространственном распределении загрязняющих веществ. Для получения таких данных автором был разработан программный модуль в составе ПК (программного комплекса) SPS (Simulation of Processes in Soil) v2.0, позволяющий прогнозировать параметры пространственной миграции радионуклидов в природных дисперсных средах. Для оценки возможности применения разработанного программного обеспечения на практике была проведена верификация результатов прогнозирования с экспериментальными данными. Для этого выполнялось прогнозирование пространственного распределения концентрации Cs-137 на опытной площадке СПК «Новое Полесье» Лунинецкого района Брестской области с использованием данных полевых измерений активностей Cs-137 и почвенных характеристик. Сравнение результатов, полученных на основе экспериментальных измерений и прогнозируемых значений пространственного распределения концентрации Cs-137, показало, что прогнозируемые значения находятся в пределах доверительных интервалов измеряемых величин. Следовательно, разработанные программные средства могут применяться для решения практических задач в области прогнозирования миграции радионуклидов с получением достоверной картины их распространения по объему области моделирования и для осуществления комплексной оценки их влияния на окружающую среду.

Ключевые слова: компьютерное прогнозирование, математическое моделирование, 3D моделирование, миграция радионуклидов, Cs-137

Для цитирования. Шалькевич, П. К. Компьютерное прогнозирование пространственного распределения концентрации Cs-137 в почве / П. К. Шалькевич // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2021. – Т. 65, № 2. – С. 139–145. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-2-139-145>

Pavel K. Shalkevich

International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

COMPUTER PREDICTION OF THE SPATIAL DISTRIBUTION OF THE Cs-137 CONCENTRATION IN SOIL

(Communicated by Corresponding Member Aleksandr V. Tuzikov)

Abstract. Computer prediction of the migration of radioactive contaminants in soil is a promising scientific direction due to the fact that prediction of the radiation situation on the basis of experimental measurements of radionuclides activity requires the use of mathematical and computer methods of data processing. At the same time, most of the specialized software packages for predicting the spread of radioactive contaminants in soil are based on one- and two-dimensional idealizations of

this process, while solving the problem of comprehensive assessment of the biosphere's state requires the data of the contaminant's spatial distribution. To obtain such data, the author has developed a software module as a part of SPS (Simulation of Processes in Soil) v2.0 software package, which allows predicting the parameters of the spatial migration of radionuclides in natural dispersed media. To assess the possibility of using the developed software in practice, the prediction results were verified by the experimental data. For this purpose, the spatial distribution of the Cs-137 concentration in the experimental area in the Luninets district of the Brest region was predicted using the measurement data of the Cs-137 activities and the soil characteristics. The comparison of the results obtained on the basis of experimental measurements and the predicted values of the spatial distribution of the Cs-137 concentration showed that the predicted values are within the confidence intervals of the measured values. Consequently, the developed software can be used to solve practical problems in the field of forecasting the migration of radionuclides with obtaining a reliable picture of their distribution over the volume of the modeling area and to comprehensively assess their impact on the environment.

Keywords: computer forecasting, mathematical modeling, 3D modeling, migration of radionuclides, Cs-137

For citation. Shalkevich P. K. Computer prediction of the spatial distribution of the Cs-137 concentration in soil. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2021, vol. 65, no. 2, pp. 139–145 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-2-139-145>

Введение. В настоящее время компьютерное прогнозирование распространения радиоактивных загрязнений в почвенных системах является перспективным направлением для решения задач в области радиоэкологии, агроэкологии, решения постчернобыльских и прочих экологических проблем [1; 2]. Это обусловлено тем, что прогнозирование развития радиационной обстановки на основе экспериментальных измерений удельной активности радионуклидов требует применения методов математической и компьютерной обработки данных [3], но не дает возможности прогнозирования развития радиационной обстановки в будущем. При этом большинство современных программных средств, используемых для прогнозирования распространения радиоактивных загрязнений в почвах, основано на одномерных и двумерных идеализациях, которые не только упрощают понимание этого процесса, но и усложняют решение задачи комплексной оценки состояния биосферы, для которого требуются данные о пространственном распределении загрязняющих веществ [2; 4]. Как следствие, создание и применение программных средств для прогнозирования пространственного распределения радиоактивных загрязнений в почвах являются актуальными научными задачами.

Для решения указанных задач автором был разработан программный модуль в составе ПК (программного комплекса) SPS (Simulation of Processes in Soil) v2.0, позволяющий прогнозировать параметры пространственной миграции радионуклидов в природных дисперсных средах [5; 6], к которым относятся почвы [1]. Однако возможность использования разработанных программных средств на практике требует оценки, для проведения которой необходима верификация результатов прогнозирования с экспериментальными данными.

Учитывая изложенное выше, а также то, что одним из особо опасных радиоактивных веществ в Республике Беларусь, распространяющихся по почвенному пути, является радиоактивный нуклид Cs-137 [7], автором было выполнено исследование, результаты которого приводятся в настоящем сообщении.

Цель исследования – прогнозирование пространственного распределения концентрации Cs-137 на опытной площадке СПК «Новое Полесье» Лунинецкого района Брестской области с использованием данных полевых измерений объемной и поверхностной активностей Cs-137 и почвенных характеристик.

Для достижения цели были сформулированы следующие задачи: 1) обработать исходные данные, предоставленные сотрудниками Брестского филиала РНИУП «Институт радиологии»; 2) осуществить прогнозирование пространственного распределения концентрации Cs-137 в почве и оценить возможность использования разработанных программных средств для решения практических задач в рассматриваемой предметной области.

Описание проведенного натурального эксперимента. На опытном участке проводились посе-вы многолетних бобово-злаковых травосмесей, осуществлялось внесение удобрений в несколько этапов, измерение активностей Cs-137 в 2011 и 2012 гг. Все работы по подготовке эксперимента, залужению травосмесей, культивации, осуществлению укосов, измерению активностей Cs-137, а также анализу почвенных образцов проводились сотрудниками Брестского филиала РНИУП

«Институт радиологии» [8]. Исследовались различные сочетания трав, в числе которых травосмесь лядвенец + овсяница + кострец + тимopheевка (травосмесь 1).

Минеральные удобрения (карбамид, суперфосфат, хлористый калий в комбинациях P60K180, P60K180 + Cu100 + Mo50 + B50, N30P60K180, N30P60K180 + Cu100 + Mo50 + B50, N60P60K180 + Cu100 + Mo50 + B50) вносились в соответствии со схемой полевого опыта (рис. 1), где номер в прямоугольной зоне соответствует типу внесенных удобрений (табл. 1). Почва на опытном участке торфяно-глеевая, подстилаемая песком на глубине 0,5 м (в связи с этим гранулометрический состав почв не измерялся). Средняя плотность загрязнения Cs-137 почвы составила 120 кБк/м². Данные измерений активностей Cs-137, данные по количеству выпавших осадков и среднемесячным значениям температуры и относительной влажности воздуха были предоставлены Брестским филиалом РНИУП «Институт радиологии» [8].

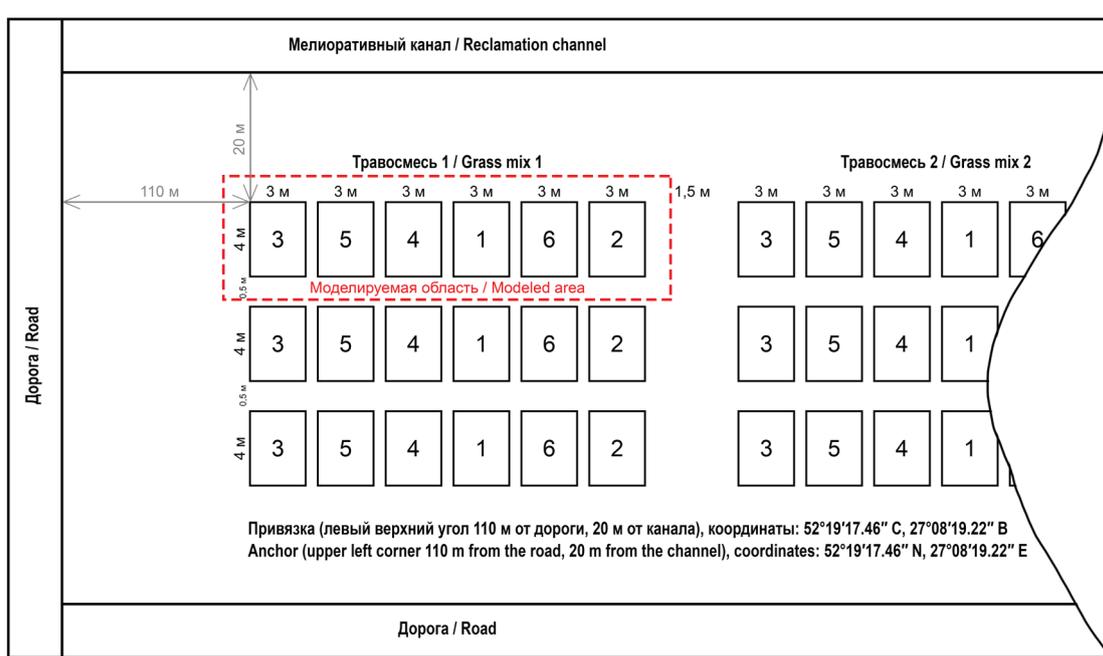


Рис. 1. Схема внесения комбинаций удобрений

Fig. 1. Fertilization scheme

Т а б л и ц а 1. Комбинации внесенных удобрений

Table 1. Fertilizer combinations

Номер участка Area number	Вид удобрений Fertilizer type
1	Контроль
2	P60K180
3	P60K180 + Cu100 + Mo50 + B50
4	N30P60K180
5	N30P60K180 + Cu100 + Mo50 + B50
6	N60P60K180 + Cu100 + Mo50 + B50

Учитывая, что активность одного грамма Cs-137 составляет 3,2 ТБк [9], был произведен перерасчет поверхностной активности Cs-137 в поверхностную концентрацию. Данные измерений активностей Cs-137 и расчетные данные концентрации Cs-137 на поверхности почвы приведены в табл. 2.

Модель, алгоритмы и методы, используемые для прогнозирования пространственного распределения концентрации Cs-137 в почве. Программный модуль для прогнозирования па-

Т а б л и ц а 2. Данные измерений активностей Cs-137 и расчетные данные концентрации Cs-137 на поверхности почвы

Table 2. Measured data of Cs-137 activity and calculated data of Cs-137 concentration on the soil surface

Вариант опыта Experiment variant	Активность почвы, кБк/м ² Soil activity, kBq/m ²		Концентрация Cs-137 в почве, кг/м ² ·10 ⁻⁹ Cs-137 concentration in soil, kg/m ² ·10 ⁻⁹	
	2011 г.	2012 г.	2011 г.	2012 г.
<i>Травосмесь 1 (Лядвенец + овсяница + кострец + тимофеевка)</i>				
Без удобрений	148 ± 40	108 ± 22	46 ± 13	34 ± 7
P60K180	127 ± 37	108 ± 22	40 ± 12	34 ± 7
P60K180 + Cu100 + Mo50 + B50	110 ± 32	82 ± 16	34 ± 10	26 ± 5
N30P60K180	101 ± 29	98 ± 20	32 ± 9	31 ± 6
N30P60K180 + Cu100 + Mo50 + B50	123 ± 35	113 ± 23	38 ± 11	35 ± 7
N60P60K180 + Cu100 + Mo50 + B50	140 ± 39	83 ± 17	44 ± 12	26 ± 5

раметров пространственной миграции радионуклидов в природных дисперсных средах, вошедший в состав ПК SPS v2.0, реализован на основе разработанных автором математической модели неизоотермического переноса влаги и растворимых в ней радиоактивных веществ в природных дисперсных средах и вычислительных алгоритмов, позволяющих применять технологии параллельных вычислений для численного решения этой модели [2]. Численное решение осуществляется методом конечных элементов (МКЭ) в трехмерной постановке с предварительной аналитической аппроксимацией коэффициентов теплопроводности и давления жидкости. При этом расчет коэффициентов формы в узлах конечноэлементной сетки, определяющей геометрию области моделирования, выполняется параллельно на всех ядрах центрального процессора используемой ЭВМ.

Необходимо отметить, что среди различных численных методов решения задачи прогнозирования миграции загрязняющих веществ МКЭ показывает наилучший результат [1]. При этом в ряде современных исследований для моделирования миграции радионуклидов [10–12] используются конечно-разностные методы, которые обладают меньшей гибкостью в характеристиках расчетной сетки, чем МКЭ [13], что указывает на преимущество используемых программных средств перед их зарубежными аналогами и на перспективность применения ПК SPS v2.0 для решения задач в рассматриваемой предметной области.

Прогнозирование пространственного распределения концентрации Cs-137 в почве. С использованием разработанных автором программных средств было проведено моделирование изменения концентрации Cs-137 за 365 дней на участке почвы с посевом травосмеси 1, показанном на рис. 1 и обозначенном как моделируемая область. В качестве исходных данных были использованы размеры моделируемой области $20,75 \times 4,25 \times 1$ м, данные о концентрациях Cs-137 в зонах, соответствующих номерам согласно схеме внесения удобрений, данные о месячных суммах осадков и среднемесячных значениях температуры и относительной влажности воздуха. Распределение концентрации Cs-137 в начальный момент времени задавалось равномерным по объему каждой зоны.

Полученные результаты прогнозирования пространственного распределения концентрации Cs-137 в почве через 365 дней показаны на рис. 2.

Сравнение результатов, полученных на основе экспериментальных измерений и прогнозируемых значений концентрации Cs-137, определенных путем моделирования пространственного распределения концентрации этого радионуклида в почве в течение 365 дней с использованием разработанных программных средств, приведено в табл. 3.

Результаты и их обсуждение. По данным, представленным в табл. 3, видно, что погрешность расчетов прогнозируемых параметров не превышает 20 %. Необходимо отметить, что средние значения этих параметров в каждой из зон находятся в пределах доверительных интервалов измеряемых величин: неопределенность измерений для активностей Cs-137 составляет 30 % [14], что обусловлено экспериментальной, методической и операторной погрешностями съема данных. Кроме того, методики измерения концентрации Cs-137 не позволяют учитывать характер

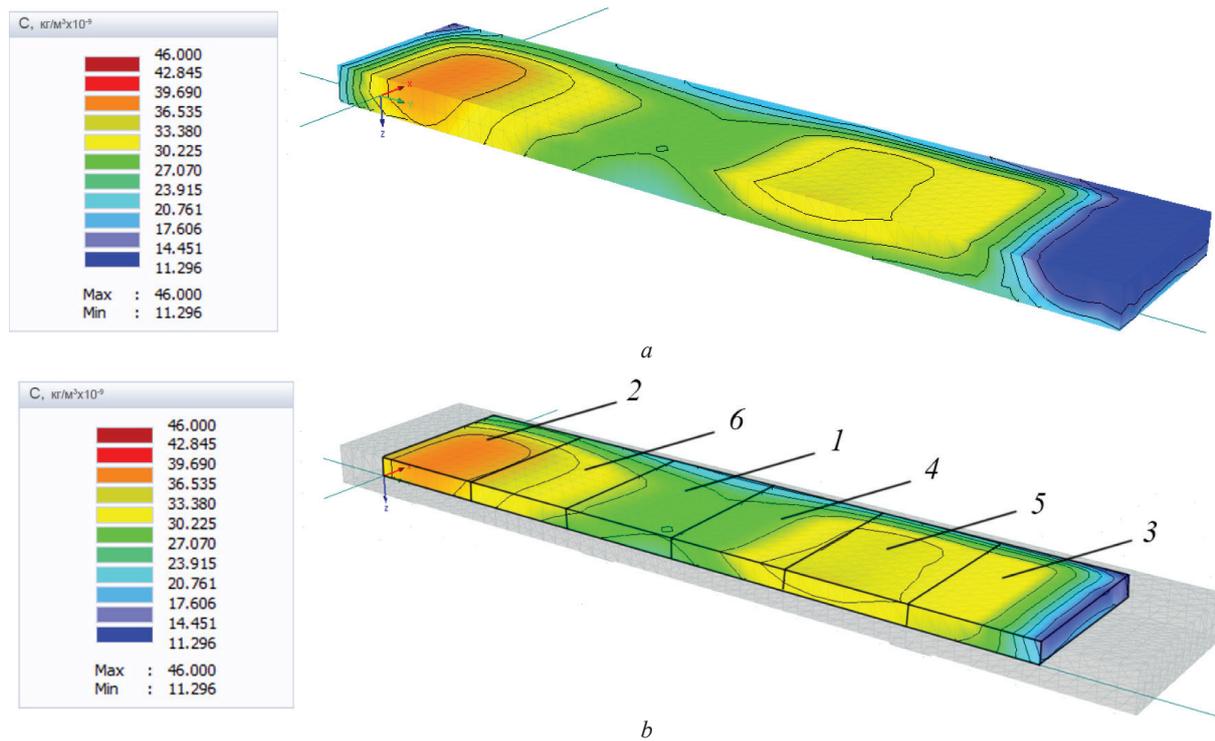


Рис. 2. Результаты прогнозирования пространственного распределения концентрации Cs-137 в почве через 365 дней: *a* – для всей моделируемой области; *b* – для исследуемых зон

Fig. 2. The results of prediction for the spatial distribution of Cs-137 concentration in soil after 365 days: *a* – in the whole modeled area; *b* – in the researched zones

Т а б л и ц а 3. Сравнение результатов, полученных на основе экспериментальных измерений и прогнозируемых значений концентрации Cs-137 на поверхности почвы исследуемого участка

Table 3. Comparison of the results obtained on the basis of experimental measurements and the predicted values of the concentration of Cs-137 on the soil surface of the researched area

Характеристика зоны Area characteristic	Концентрация Cs-137 в почве, кг/м ² ·10 ⁻⁹ в 2012 г. Cs-137 concentration in soil, kg/m ² ·10 ⁻⁹ in 2012		
	Значения, полученные на основе экспериментальных измерений Experimental measurement-based values	Прогнозируемые значения Predicted values	
		Диапазон значений в зоне Value range in the area	Среднее значение по зоне Area-average value
<i>Травосмесь 1 (Лядвенец + овсяница + кострец + тимофеевка)</i>			
Без удобрений	34 ± 7	23–33	34
P60K180	34 ± 7	27–39	31
P60K180 + Cu100 + Mo50 + B50	26 ± 5	17–33	25
N30P60K180	31 ± 6	20–36	27
N30P60K180 + Cu100 + Mo50 + B50	35 ± 7	23–36	30
N60P60K180 + Cu100 + Mo50 + B50	26 ± 5	20–36	25

его распределения по площади и объему загрязненной территории, в отличие от разработанных программных средств.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что удобрения N60P60K180 + Cu100 + Mo50 + B50 и P60K180 + Cu100 + Mo50 + B50, вносимые в почву, способствуют значительному снижению радиоактивности почвы (на 40 %). Следует также отметить, что внесение в почву удобрения P60K180 позволяет снизить ее активность, однако миграционные способности Cs-137 в зоне внесения этого удобрения ухудшаются по сравнению с неудобренной зоной, и через год средняя

радиоактивность почв в таких зонах становится одинаковой. Учитывая, что исследуемые почвы, в зависимости от их компонентного состава, влияют на параметры миграции радионуклидов, полученные результаты могут быть использованы в целях оптимизации использования загрязненных радионуклидами сельскохозяйственных земель [15], а также в целях поиска потенциальных геохимических барьеров на пути распространения радионуклидов и оценки влияния этих барьеров на параметры миграции радиоактивных загрязнений.

Заключение. С помощью разработанных автором программных средств и на основе данных, предоставленных Брестским филиалом РНИУП «Институт радиологии», выполнено прогнозирование пространственного распределения концентрации Cs-137 в почве, результаты которого находятся в пределах доверительных интервалов измеряемых величин, что показывает верификация результатов прогнозирования с экспериментальными данными. Следовательно, разработанные программные средства могут применяться для решения практических задач в области прогнозирования миграции загрязняющих веществ с получением достоверной картины их распространения по всему объему области моделирования, что позволит осуществлять комплексную оценку их влияния на окружающую среду в заданном регионе.

Благодарности. Автор выражает благодарность Брестскому филиалу РНИУП «Институт радиологии» за предоставленные экспериментальные данные.

Acknowledgments. The author expresses gratitude to the Brest branch of the “Institute of Radiology” for the provided experimental data.

Список использованных источников

1. Компьютерное моделирование миграции загрязняющих веществ в природных дисперсных средах / С. П. Кундас [и др.]. – Минск, 2011. – 212 с.
2. Шалькевич, П. К. Модель и алгоритмы для прогнозирования миграции радионуклидов в природных дисперсных средах с применением технологий параллельных вычислений / П. К. Шалькевич. – Минск, 2019. – 136 с.
3. Макаревич, Т. А. Радиоэкология / Т. А. Макаревич. – Минск, 2013. – 136 с.
4. Авдони́на, А. Б. Прогнозирование миграции трития из хранилищ радиоактивных отходов / А. Б. Авдони́на // Комплексные и отраслевые проблемы науки и пути их решения: сб. ст. по итогам Междунар. науч.-практ. конф. (Ижевск, 13 июля 2020 г.). – Стерлитамак, 2020. – С. 20–23.
5. Шалькевич, П. К. Программный модуль для 3D анализа миграции загрязняющих веществ в природных дисперсных средах / П. К. Шалькевич, С. П. Кундас, А. Г. Яскевич // Сахаровские чтения 2015 года: экологические проблемы XXI века: материалы 15-й Междунар. науч. конф., Минск, 21–22 мая 2015 г. – Минск, 2015. – С. 316–317.
6. Кундас, С. П. Методы долгосрочного прогнозирования взаимосвязанного теплообмена и миграции загрязняющих веществ в природных дисперсных средах с применением технологии параллельных вычислений / С. П. Кундас, П. К. Шалькевич, И. А. Гишкелюк // Материалы респ. науч.-практ. конф. «Радиация, экология и техносфера = Radiation, environment and man-risk factor». Гомель, 3–4 дек. 2015. – Минск, 2015. – С. 153–157.
7. Международный чернобыльский проект. Технический доклад. Оценка радиологических последствий и защитных мер. Доклад МКК- IAEA. – Вена, 1992. – 740 с.
8. Хилько, О. С. Алгоритмы и программные средства прогнозирования латеральной миграции радионуклидов с речных водосборов на основе нейросетевых технологий / О. С. Хилько. – Минск, 2014. – 190 с.
9. Мироненко, В. А. Проблемы гидрогеоэкологии. Прикладные исследования / В. А. Мироненко, В. Г. Румынин. – М., 2002. – 504 с.
10. Conceptual and numerical modelling of radionuclide transport in near-surface systems at Forsmark. SR-Site Biosphere. Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB R-10-30: Report / Å. Piqué [et al.]. – Stockholm, 2010. – 147 p.
11. Conceptual and Numerical Modeling of Radionuclide Transport and Retention in Near-Surface Systems / Å. Piqué [et al.] // AMBIO. – 2013. – Vol. 42, N 4. – P. 476–487. <https://doi.org/10.1007/s13280-013-0399-1>
12. Miracapillo, C. Numerical Simulation of Radionuclides Migration in the Far Field of a Geological Repository / C. Miracapillo, L. Ferroni // Energy Procedia. – 2015. – Vol. 82. – P. 848–854. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.823>
13. Segerlind, L. J. Applied Finite Element Analysis / L. J. Segerlind. – New York; London; Sydney; Toronto, 1976. – 422 p.
14. Создание и обеспечение функционирования единой системы мониторинга радиоактивного загрязнения на территории Днепроовско-Сожского водосбора. – Минск, 1999. – 50 с.
15. Цыбулько, Н. Н. Оптимизация использования загрязненных радионуклидами сельскохозяйственных земель и агрохимических защитных мероприятий в отдаленный период чернобыльской аварии / Н. Н. Цыбулько. – Минск, 2017. – 47 с.

References

1. Kundas S. P., Gishkelyuk I. A., Kovalenko V. I., Hilko O. S. *Computer simulation of the migration of pollutants in natural dispersed environments*. Minsk, 2011. 212 p. (in Russian).
2. Shalkevich P. K. *Model and algorithms for forecasting the migration of radionuclides in natural dispersed media using parallel computing technologies*. Minsk, 2019. 136 p. (in Russian).

3. Makarevich T. A. *Radioecology*. Minsk, 2013. 136 p. (in Russian).
4. Avdonina A. B. Forecasting of tritium migration of radioactive wastes from storages. *Kompleksnye i otraslevye problemy nauki i puti ih resheniya: sbornik statej po itogam Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii (Izhevsk, 13 iyulya 2020 g.)* [Complex and industrial problems of science and ways of their solution: collection of articles on the results of the International Scientific and Practical Conference (Izhevsk, July, 13, 2020)]. Sterlitamak, 2020, pp. 20–23 (in Russian).
5. Shalkevich P. K., Kundas S. P., Yaskевич A. G. Software module for 3D analysis of migration of pollutants in natural dispersed media. *Sakharovskie chteniya 2015 goda: ekologicheskie problemy XXI veka: materialy 15-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, Minsk, 21–22 maya 2015 g.* [Sakharov Readings of 2015: Environmental Problems of the XXI Century: Proceedings of the 15th International Scientific Conference, Minsk, May 21–22, 2015]. Minsk, 2015, pp. 316–317 (in Russian).
6. Kundas S. P., Shalkevich P. K., Gishkelyuk I. A. Methods of long-term forecasting of interconnected heat and moisture transfer and migration of pollutants in natural dispersed media using parallel computing technology. *Materialy respublikanskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Radiatsiya, ekologiya i tekhnosfera = Radiation, environment and man-risk factor».* Gomel, 3–4 dekabrya 2015 [Proceedings of the republican scientific-practical conference “Radiation, ecology and technosphere = Radiation, environment and man-risk factor”, Gomel, December, 3–4, 2015]. Minsk, 2015, pp. 153–157 (in Russian).
7. *International Chernobyl project. Technical report. Assessment of radiological consequences and protective measures. Report of the IWC-IAEA.* Vienna, 1992. 740 p. (in Russian).
8. Khilko O. S. *Algorithms and software for predicting the lateral migration of radionuclides from river catchments based on neural network technologies.* Minsk, 2014. 190 p. (in Russian).
9. Mironenko V. A., Rumynin V. G. *Problems of hydrogeoecology. Applied research.* Moscow, 2002. 504 p. (in Russian).
10. Piqué À., Grandia F., Sena C., Arcos D., Molinero J., Duro L., Bruno J. *Conceptual and numerical modelling of radionuclide transport in near-surface systems at Forsmark. SR-Site Biosphere. Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB R-10-30: Report.* Stockholm, 2010. 147 p.
11. Piqué À., Arcos D., Grandia F., Molinero J., Duro L., Berglund S. Conceptual and Numerical Modeling of Radionuclide Transport and Retention in Near-Surface Systems. *AMBIO*, 2013, vol. 42, no. 4, pp. 476–487. <https://doi.org/10.1007/s13280-013-0399-1>
12. Miracapillo C., Ferroni L. Numerical Simulation of Radionuclides Migration in the Far Field of a Geological Repository. *Energy Procedia*, 2015, vol. 82, pp. 848–854. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.823>
13. Segerlind L. J. *Applied Finite Element Analysis.* New York, London, Sydney, Toronto, 1976. 422 p.
14. *Creation and maintenance of a unified system for monitoring radioactive contamination on the territory of the Dnieper-Sozh catchment area: report on research (conclusion).* Minsk., 1999. 50 p. (in Russian).
15. Tsybulko N. N. *Optimization of the use of agricultural lands contaminated with radionuclides and agrochemical protective measures in the remote period of the Chernobyl accident.* Minsk, 2017. 47 p. (in Russian).

Информация об авторе

Шалькевич Павел Константинович – канд. техн. наук, доцент. Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова БГУ (ул. Долгобродская, 23, 220070, Минск, Республика Беларусь). E-mail: pavel.shalkevich@gmail.com.

Information about the author

Shalkevich Pavel K. – Ph. D. (Engineering), Associate Professor. International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University (23, Dolgobrodskaya Str., 220070, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pavel.shalkevich@gmail.com.