

ЯДЕРНАЯ, РАДИАЦИОННАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

NUCLEAR, RADIATION AND ENVIRONMENTAL SAFETY

<https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-02>

EDN KRCFHR

Оригинальная статья / Original paper



Результаты моделирования сухого осаждения радиоактивных аэрозолей в условиях арктических районов Крайнего Севера

Д.А. Припачкин , И.Д. Садофьев

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация

 DAPripachkin@mephi.ru

Аннотация. Представлено моделирование сухого осаждения радиоактивных аэрозолей в арктических районах Крайнего Севера с использованием модели сухого осаждения аэрозолей на неоднородные подстилающие поверхности, которая учитывает влияние размеров и плотности аэрозольных частиц, характеристик шероховатости поверхности и динамической скорости трения, определяемой на основе параметризации пограничного и приземного слоя в использованной версии модели WRF-ARW. Получены оценки загрязнения поверхности земли радиоактивными аэрозолями с размерами частиц 0.1, 1 и 10 мкм в арктических районах Крайнего Севера (территории п-ова Ямал и Кольского п-ова) с неоднородными подстилающими поверхностями в реальных метеорологических условиях в летний и зимний периоды. Показано, что загрязнение радиоактивными аэрозолями поверхности земли на территории п-ова Ямал и Кольского п-ова зависит от размеров аэрозольных частиц и типов подстилающей поверхности в летний и зимний периоды. Наибольшая неоднородность загрязнения территории и ее зависимость от типа подстилающей поверхности наблюдается для частиц менее 1 мкм, а для частиц больших размеров определяющими факторами являются рельеф местности и метеорологические условия во время выброса. Результаты численного моделирования позволят снизить неопределённость оценок загрязнения местности радиоактивными аэрозолями и повысить их достоверность в интересах анализа и обеспечения безопасности населения, включая воздействие на окружающую среду радиоактивных аэрозолей, образующихся на объектах использования атомной энергии, которые эксплуатируются и будут использоваться в арктических районах Крайнего Севера.

Ключевые слова: радиоактивные аэрозоли, моделирование сухого осаждения, загрязнение поверхности земли.

Для цитирования: Припачкин Д.А., Садофьев И.Д. Результаты моделирования сухого осаждения радиоактивных аэрозолей в условиях арктических районов Крайнего Севера. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(1):17–23. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-02>

For citation: Pripachkin D.A. Sadofev I.D. Simulation results of dry deposition of radioactive aerosols in the Arctic regions of the Far North. *Nuclear Safety*. 2025;15(1):17–23. (In Rus.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-02>

Simulation results of dry deposition of radioactive aerosols in the Arctic regions of the Far North

Dmitriy A. Pripachkin , Ilya D. Sadofev

National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation

 DAPripachkin@mephi.ru

Abstract. Modeling of dry deposition of radioactive aerosols in the Arctic regions of the Far North is presented using a model of dry deposition of aerosols on heterogeneous underlying surfaces, which takes into account the influence of the size and density of aerosol particles, surface roughness characteristics and dynamic friction velocity, determined based on parameterization of the boundary and surface layers in the used version of the WRF-ARW model. Estimates of contamination of the earth's surface with radioactive aerosols with particle sizes of 0.1, 1 and 10 microns in the Arctic regions of the Far North (territories of Yamal Peninsula and Kola Peninsula) with heterogeneous underlying surfaces under real meteorological conditions in summer and winter periods have been obtained. It is shown that contamination of the earth's surface with radioactive aerosols in the Yamal and Kola Peninsulas depends on the size of aerosol particles

and the types of the underlying surface in summer and winter. The greatest heterogeneity of contamination of the territory and its dependence on the type of underlying surface is observed for particles less than 1 micron, and for large particles, the determining factors are the terrain and meteorological conditions at the time of release. The results of numerical modeling will reduce the uncertainty of estimates of contamination of the area with radioactive aerosols and increase their reliability in the interests of analyzing and ensuring public safety, including the environmental impact of radioactive aerosols generated at nuclear energy facilities that are operated and will be used in the Arctic regions of the Far North.

Keywords: radioactive aerosols, dry deposition modeling, earth surface pollution.

Введение

Загрязнение поверхности земли аэрозольными частицами, содержащими радиоактивные вещества, поступившими в атмосферу вследствие техногенных аварий и катастроф, является наиболее значимым фактором, определяющим их последствия для окружающей среды и человека. Основным механизмом загрязнения поверхности земли является сухое осаждение [1].

В большинстве существующих моделей переноса для прогнозирования загрязнения поверхности земли радиоактивными аэрозолями [2–5] и при решении некоторых практических задач [6], используют подход, основанный на «средних» параметрах аэрозольных частиц (размер – d_p , плотность – ρ_p) и фиксированных условиях осаждения (шероховатость поверхности – z_0 , скорость сухого осаждения – V_d), что приводит к ряду неопределенностей при оценке интенсивности их выпадений в реальных условиях.

Модель сухого осаждения радиоактивных аэрозолей на неоднородные поверхности, предложенная в [7], которая учитывает влияние размеров d_p и плотности ρ_p частиц, характеристик шероховатости поверхности z_0 и динамической скорости трения u^* , определяемой на основе параметризации пограничного и приземного слоя в использованной версии модели WRF-ARW [8], на величину скорости сухого осаждения V_d в более широком диапазоне ее изменений. Модель [7] отражает современные научные тенденции в моделировании сухого осаждения [1], но за счет учета большего количества факторов и локальных особенностей осаждения, и поз-

воляет оценить загрязнение поверхности земли радиоактивными аэрозолями более детально, по сравнению с другими подходами.

Целью настоящих исследований является оценка влияния неоднородности подстилающих поверхностей, на основе модели сухого осаждения [7], на загрязнение поверхности земли радиоактивными аэрозолями в летний и зимний периоды в арктических районах Крайнего Севера, связанных с интенсивным освоением региона и развитием Северного Морского Пути (СМП).

Результаты моделирования, полученные на основе модели [7] и программного средства ПАРРАД [9] были использованы для исследования и оценки сухого осаждения радиоактивных аэрозолей в арктические районы, включающих Кольский полуостров и полуостров Ямал в летний и зимний периоды.

Исходные данные для моделирования

В процессе численных исследований влияния неоднородностей подстилающих поверхностей на сухое осаждение аэрозолей рассматривались арктические районы, включающие Кольский полуостров (Мурманская область) и полуостров Ямал (Ямало-Ненецкий автономный округ). Источники гипотетического выброса радиоактивных аэрозолей располагались в районах г. Мурманск и п. Сабетта. При моделировании учитывалось влияние подстилающей поверхности в летний и зимний периоды (рис. 1, табл. 1).

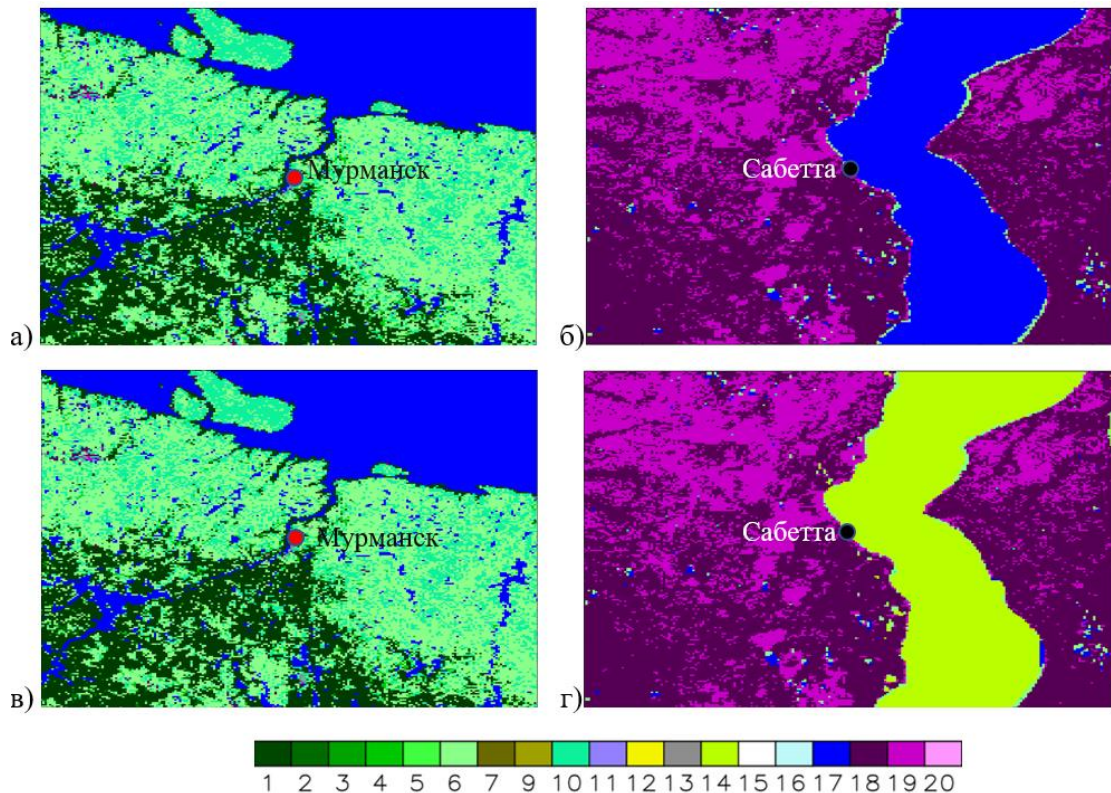


Рисунок 1. Типы подстилающей поверхности на Кольском полуострове (а – лето, в – зима) и полуострове Ямал (б – лето, г – зима) в соответствии со шкалой в таблице 1

Figure 1. Types of the underlying surface on the Kola Peninsula (a – summer, в – winter) and the Yamal Peninsula (б – summer, г – winter) according to the scale in Table 1

Таблица 1. Характеристики типов подстилающей поверхности по данным [8]

Table 1. Characteristics of surface land use types according to data [8]

№	Тип подстилающей Поверхности	Альbedo, (%)		Доля влаги, (%)		Шероховатость, z_0 (см)	
		Лето	Зима	Лето	Зима	Лето	Зима
1	Вечнозелёные леса (хвойные)	12	12	30	60	50	50
2	Вечнозелёные леса (лиственные)	12	12	50	50	50	50
3	Листопадные леса (хвойные)	14	14	30	60	50	50
4	Листопадные леса (лиственные)	16	16	30	60	50	50
5	Смешанные леса	13	13	30	60	50	50
6	Плотные кустарники	22	22	10	20	10	10
7	Редкие кустарники	20	20	15	25	10	10
8	Лесистые саванны	20	20	10	20	15	15
9	Саванна	20	20	15	15	15	15
10	Луга (пастбища)	19	19	15	30	7.5	7.5
11	Постоянные болота	14	14	42	72.5	30	30
12	Пашни	18	18	30	60	7.5	7.5
13	Город, застроенные территории	18	18	10	10	50	50
14	Пашни попеременно с естественной растительностью	16	16	25	40	6.5	6.5
15	Снег и лёд	55	55	95	95	1	1
16	Редкая растительность на оголённой почве	25	25	2	5	6.5	6.5
17	Вода	8	8	100	100	0.01	0.01
18	Лесотундра	15	15	50	60	15	15
19	Смешанная тундра	15	15	50	60	10	10
20	Тундровая полупустыня (гренландского типа)	15	15	2	5	6	6

Для оценки осаждения на неоднородные поверхности рассматривали монодисперсные радиоактивные аэрозоли с $d_p = 0.1$; 1 и 10 мкм и $\rho_p = 2.5$ г/см³. Источник выброса, содержал ¹³⁷Cs и характеризовался как мгновенный и точечный на высоте 100 метров. Оценки загрязнения поверхности земли радиоактивными аэрозолями на территории Кольского полуострова и полуострова Ямал в реальных погодных условиях получены с использованием метеорологических полей из прогнозов по модели WRF-ARW [8] для летнего и зимнего периодов с учетом однородности и разнонаправленности поля ветра.

Результаты моделирования

Рассмотрим загрязнение поверхности земли радиоактивными аэрозолями ¹³⁷Cs, полученные с помощью ПАРРАД [9], на основе модели осаждения аэрозолей [7], учитывающей неоднородности подстилающей поверхности, динамической скорости трения, плотности и размера аэрозольных частиц, на Кольском полуострове и полуострове Ямал до 60 км от источника для реальных погодных условий в летний и зимний периоды с учетом высокой изменчивости направлений ветров и их скоростей.

На рисунках 2 и 3 представлены оценки загрязнения территории Кольского полуострова (летний – август 2020 г. и зимний – январь 2021 г.) и полуострова Ямал (летний – июль 2022 г. и зимний – февраль 2022 г.) за счет сухого осаждения аэрозолей с диаметром 0.1, 1 и 10 мкм и плотностью частиц 2.5 г/см³. Метеорологические данные получены с помощью прогнозов модели WRF-ARW [8]: длительность 24 часа, шаг по времени 1 час; разрешение по горизонтали – 2x2 км, по вертикали – 24 уровня с переменным шагом от 0 до 20000 м, условный выброс – 1 Бк на высоту 100 м.

При моделировании переноса и осаждения радиоактивных аэрозолей на территории Кольского полуострова использовали следующие метеорологические условия: лето – направление ветра изменялось в течение суток в пределах от южного до юго-западного, что формировало преимущественно устойчивый северо-восточный перенос (рис. 2а, 2б, 2в) в условиях отсутствия осадков; зима – направление ветра изменялось сильнее, чем для летнего периода в пределах от южного до северо-западного, что формировало перенос в северном, восточном и даже юго-восточном направлении (рис. 2г, 2д, 2е) также в условиях отсутствия осадков.

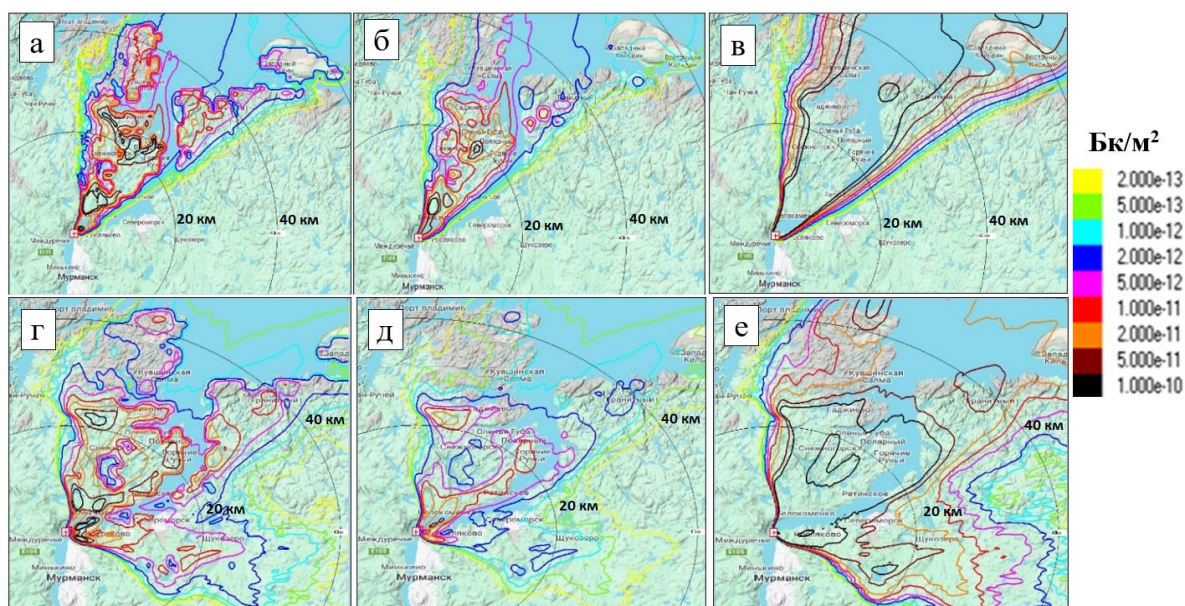


Рисунок 2. Плотность загрязнения территории Кольского полуострова для летнего ($d_p = 0.1$ мкм (а), 1 мкм (б) и 10 мкм (в)) и зимнего ($d_p = 0.1$ мкм (г), 1 мкм (д) и 10 мкм (е)) периодов года

Figure 2. Pollution density of the Kola Peninsula for the summer ($d_p = 0.1$ microns (a), 1 microns (б) and 10 microns (в)) and winter ($d_p = 0.1$ microns (г), 1 microns (д) and 10 microns (е)) periods of the year

Из рисунка 2 следует, что загрязнение радиоактивными аэрозолями территории Кольского полуострова (см. рис. 1) как в летний, так и зимний периоды обусловлено влиянием размеров частиц, неоднородностью подстилающей поверхности и реальной метеорологической обстановкой.

Для частиц с $d_p = 0.1$ мкм наблюдается наибольшая степень неоднородности загрязнения поверхности земли как для летнего (рис. 2а), так и зимнего (рис. 2г) периодов, что связано с разницей в скорости их сухого осаждения для поверхностей – кустарники, лес, вода (для лета – 1:2:0.1, а, для зимы 1:1:0.1 (Кольский залив и Баренцево море не замерзают)). Для частиц с $d_p = 0.1$ мкм картина загрязнения в большей степени определяется неоднородностью подстилающей поверхности, чем рельефом и метеоусловиями (направлением и скоростью ветра, динамической скоростью трения).

Для частиц с $d_p = 1$ мкм (рис. 2б и 2д) наблюдается уменьшение неоднородности загрязнения поверхности, по сравнению с частицами 0.1 мкм, это связано с разницей в скорости их сухого осаждения для поверхностей – кустарники, лес, вода (для лета – 1:5:0.5, а, для зимы 1:1:0.5).

Для частиц с $d_p = 1$ мкм картина загрязнения в большей степени определяется сочета-

нием неоднородности подстилающей поверхности и рельефа, влияющего на поле концентрации, чем метеоусловиями.

Для частиц с $d_p = 10$ мкм наблюдается отсутствие неоднородности загрязнения поверхности (рис. 2в, 2е), т. к. это связано с существенным ростом скорости их сухого осаждения по сравнению с частицами 0.1 и 1 мкм и с уменьшением разницы в скорости осаждения частиц с $d_p = 10$ мкм для поверхностей – кустарники, лес, вода (для лета – 1:10:1, а, для зимы – 1:1:1). Для частиц с $d_p = 10$ мкм загрязнение в большей степени определяется метеоусловиями, чем неоднородностью поверхности и рельефом местности.

Метеорологические условия для оценки загрязнения в реально наблюдаемых погодных условиях для полуострова Ямал были следующие: лето – направление ветра изменялось резко в течение суток с восточного на западное, что формировало перенос как в западном, так и в восточном направлении (рис. 3а, 3б, 3в) в условиях отсутствия осадков; зима – направление ветра изменялось в течение суток в пределах от западного до северо-западного, что формировало устойчивый юго-восточный перенос (рис. 3г, 3д, 3е) также в условиях отсутствия осадков.

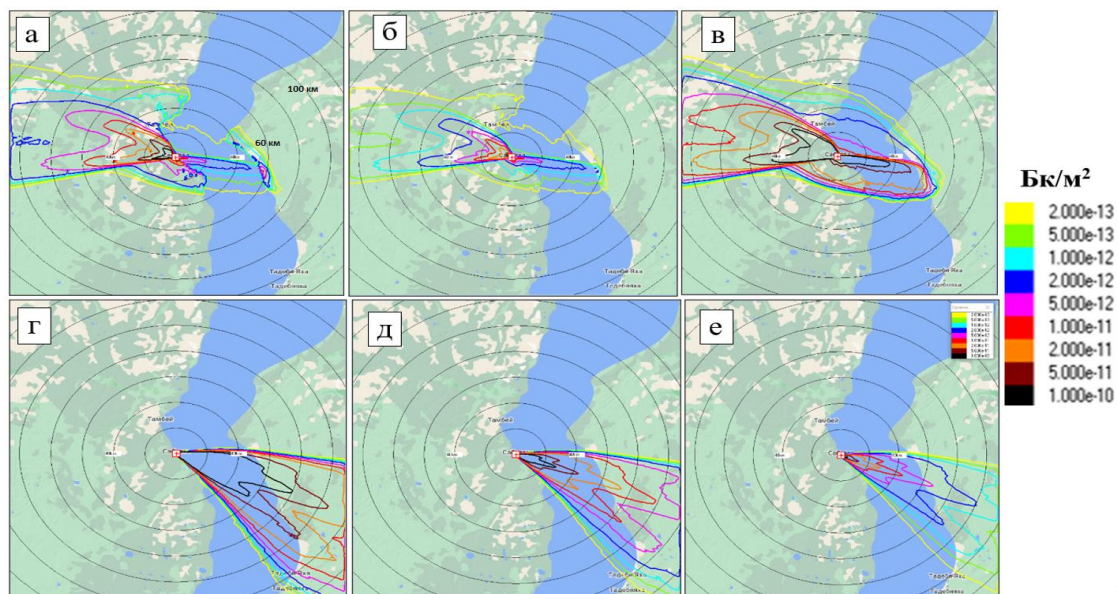


Рисунок 3. Плотность загрязнения территории полуострова Ямал для летнего ($d_p = 0.1$ мкм (а), 1 мкм (б) и 10 мкм (в)) и зимнего ($d_p = 0.1$ мкм (г), 1 мкм (д) и 10 мкм (е)) периодов года

Figure 3. Pollution density of the Yamal Peninsula for the summer ($d_p = 0.1$ microns (a), 1 microns (b) and 10 microns (c)) and winter ($d_p = 0.1$ microns (g), 1 microns (d) and 10 microns (e)) periods of the year

Из рисунка 3 следует, что загрязнение радиоактивными аэрозолями территории полуострова Ямал в арктической зоне обусловлено влиянием размеров аэрозолей, реальной метеорологической обстановкой и в незначительной степени неоднородностью подстилающей поверхности, характеризующейся следующими типами: тундра и вода (рис.1, табл. 1) для летнего периода; заснеженной тундрой в зимний период (*водные поверхности замерзают и рассматриваются как тундра*).

Для частиц с $d_p = 0.1$ мкм (рис. 3а и 3г) наблюдается наибольшая степень неоднородности загрязнения поверхности земли только в летнем периоде, что связано с разницей в скорости сухого осаждения аэрозолей на поверхность – тундра, вода (лето – 1:0.1), а для зимнего периода, скорости сухого осаждения одинаковы для тундры и воды (1:1). Применительно к частицам с $d_p = 0.1$ мкм картина загрязнения территории полуострова Ямал определяется неоднородностью подстилающей поверхности только в летний период, а в зимний – в основном метеорологическими условиями (направлением и скоростью ветра, динамической скоростью трения).

Для частиц с $d_p = 1$ мкм (рис. 3б и 3д) наблюдается уменьшение степени неоднородности загрязнения поверхности, это связано с уменьшением разницы в скоростях сухого осаждения аэрозолей по сравнению с частицами 0.1 мкм (рис. 3а). В летний период разница в скоростях сухого осаждения для частиц 1 мкм для поверхностей тундра и вода – (1:0.5), а для зимнего периода – (1:1). Загрязнение частицами с $d_p = 1$ мкм территории полуострова Ямал в большей степени зависит от метеорологических условий, чем от неоднородности подстилающей поверхности.

Моделирование показал, что для частиц с $d_p = 10$ мкм (рис. 3в и 3е) неоднородность

загрязнения поверхности за счет неоднородности подстилающей поверхности минимальна. Это связано как с существенным ростом скорости их сухого осаждения по сравнению с частицами 0.1 и 1 мкм, так и с равенством скоростей осаждения частиц с $d_p = 10$ мкм для поверхностей – тундра, вода (лето и зима – 1:1), поэтому картина загрязнения п-ва Ямал частицами с $d_p = 10$ мкм в основном определяется только метеорологическими условиями.

Заключение

На основе численного моделирования с помощью ПАРРАД [9] и модели сухого осаждения [7] показано, что загрязнение радиоактивными аэрозолями поверхности земли на территории п-ова Ямал и Кольского п-ова зависит от размеров аэрозольных частиц и типов подстилающей поверхности в летний и зимний периоды. Наибольшая неоднородность загрязнения территории и ее зависимость от типа подстилающей поверхности наблюдается для частиц менее 1 мкм, а для частиц больших размеров определяющими факторами являются рельеф местности и метеорологические условия во время выброса.

Используемая в настоящем исследовании модель сухого осаждения аэрозолей [7], за счет увеличения количества исходных данных и микрофизического описания сухого осаждения, хотя и требует дополнительного экспериментального подтверждения, позволит снизить неопределённость получаемых оценок и повысить их достоверность в интересах анализа и обеспечения безопасности населения, включая воздействие на окружающую среду радиоактивных аэрозолей, образующихся на объектах использования атомной энергии, которые эксплуатируются и будут использоваться в арктических районах Крайнего Севера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Seinfeld J.H., Pandis S.N. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. Wiley. 2016. 152 p. <https://www.wiley.com/en-us/Atmospheric+Chemistry+and+Physics%3A+From+Air+Pollution+to+Climate+Change%2C+3rd+Edition-p-9781118947401>.
2. Гусев Н.Г., Беляев В.А. Радиоактивные выбросы в биосфере: справочник. Москва: Энергоатомиздат, 1991. 256 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001609468?ysclid=m7xi6gmxfp339437018> (дата обращения: 09.01.2025).

3. AERMOD: description of model formulation. EPA-454/R-03-004. 2004. Available at: https://elsmar.com/pdf_files/EPA%20aermod_mfd.pdf (accessed: 10.01.2025).

4. Korsakissok I., Mathieu A., Didier D. Atmospheric dispersion and ground deposition induced by the Fukushima Nuclear Power Plant accident: A local-scale simulation and sensitivity study. *Atmospheric Environment* 70 (2013), 267–279. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.01.002>

5. Рекомендуемые методы оценки и прогнозирования радиационных последствий аварий на объектах ядерного топливного цикла. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Москва: «НТЦ ЯРБ», 2017. 40 с. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/555856678?section=status> (дата обращения: 09.01.2025).

6. Губеладзе О.А., Губеладзе А.Р. Заражение местности вследствие сухого оседания и вымывания осадками продуктов выброса из точечного источника. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;(1):14–22. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-01-02>

Gubeladze O.A., Gubeladze A.R. Area contamination due to dry settling and point source stack effluents wash-out by precipitates. *Global nuclear safety*. 2023;(1):14–22. (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-01-02>

7. Припачкин Д.А., Высоцкий В.Л., Будыка А.К. Влияние условий моделирования на оценку скорости сухого осаждения аэрозольных частиц на сильно неоднородные подстилающие поверхности. *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2024;60(2):173–182. <https://doi.org/10.31857/S0002351524020048>

Pripachkin D.A., Vysotsky V.L., Budyka A.K. Influence of modeling conditions on the estimation of the dry deposition velocity of aerosols on highly inhomogeneous surfaces. *Izvestiâ Akademii nauk SSSR. Fizika atmosfery i okeana*. 2024;60(2):173–182. (In Rus.) <https://doi.org/10.31857/S0002351524020048>

8. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O. et al. Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR. 2008. 520 p. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2310.6645>

9. Арутюнян Р.В., Припачкин Д.А., Сороковикова О.С., Семенов В.Н. и др. Система ПАРРАД и ее испытания на реальных выбросах радиоактивных веществ в атмосферу. *Атомная энергия*. 2016;121(3):169–173. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/448/440> (дата обращения: 10.01.2025).

Arutyunyan R.V., Pripachkin D.A., Sorokovikova O.S., Semenov V.N. et al. PARRAD system and its testing on real radioactive emissions into the atmosphere. *Atomic energy*. 2017;121(3):220–226. (In Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/xnegnl> (accessed: 10.01.2025).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Припачкин Д.А. – разработка подходов к моделированию и анализ результатов;

Садофьев И.Д. – подготовка исходных данных и моделирование осаждения радиоактивных аэрозолей.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Pripachkin D. A. – development of modeling approaches and analysis of results;

Sadofev I.D. – preparation of initial data and modeling of radioactive aerosol deposition.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без дополнительных источников финансирования.

FUNDING:

No additional funding.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликта интересов нет.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ:

Дмитрий Александрович Припачкин, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация. <https://orcid.org/0000-0002-3412-6475>

e-mail: DAPripachkin@mephi.ru

Илья Дмитриевич Садофьев, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», инженер, г. Москва, Российская Федерация.

e-mail: IDSadofev@mephi.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR:

Dmitriy A. Pripachkin, Dr. Sci. (Phys. and Math), head of department National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0002-3412-6475>

e-mail: DAPripachkin@mephi.ru

Ilya D. Sadofev, engineer, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation.

e-mail: IDSadofev@mephi.ru

Поступила в редакцию / Received 09.01.2025

После доработки / Revision 10.03.2025

Принята к публикации / Accepted 13.03.2025