



УДК: 629.039.58

DOI: 10.26277/SECNRS.2025.116.2.004

© 2025. Все права защищены.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ВАЛИДАЦИЯ МЕТОДИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ К ГАУССОВОЙ МОДЕЛИ ПЕРЕНОСА ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

Яковлева О. В.* (Yakovleva_OV@nrcki.ru),
Шмельков Ю. Б.*, д-р техн. наук (Shmelkov_YB@nrcki.ru)

Статья поступила в редакцию 16 апреля 2025 г.

Аннотация

В статье представлены результаты сравнительного анализа трех методик, представленных в российской методической документации и описывающих перенос загрязняющих веществ в окружающей среде с помощью гауссовой модели. Проведены анализ и сравнение выражений коэффициентов дисперсии, характеризующих модель Гаусса. Представлено сравнение расчетных и измеренных значений коэффициентов дисперсии и концентраций на примере трех полевых экспериментов.

В результате выявлены ключевые факторы, влияющие на значения коэффициентов дисперсии для каждой из рассмотренных методик, включая класс устойчивости атмосферы и шероховатость подстилающей поверхности. Для каждой из методик оценена точность прогнозирования вертикальной и горизонтальной дисперсии, а также приземной концентрации. Выявлено, что методика, представленная в РБ-134-17 «Рекомендуемые методы оценки и прогнозирования радиационных последствий аварий на объектах ядерного топливного цикла», имеет тенденцию к переоценке коэффициентов дисперсии для данной выборки экспериментальных данных. В рамках проведенного анализа метод, изложенный в ОПБ-84 «Методы расчета распространения радиоактивных веществ с АЭС и облучения окружающего населения», продемонстрировал наилучшую сходимость с экспериментальными данными.

► **Ключевые слова:** атмосферное рассеивание, приземные концентрации, модель Гаусса, коэффициенты дисперсии, радиационные последствия.

* Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия.

COMPARATIVE ANALYSIS AND VALIDATION OF METHODOLOGICAL APPROACHES TO THE GAUSSIAN MODEL OF POLLUTANT TRANSPORT

Yakovleva O. V.*,
Shmelkov Yu. B.*, D. Sc.

The article was received by the editors' crew April 16th, 2025.

Abstract

The paper shows the results of the comparative analysis of three methodologies presented in the Russian methodological documentation and describing the transport of pollutants in the environment using the Gaussian model. An analysis and comparison of the expressions for variance coefficients characterizing the Gaussian model were performed. A comparison of calculated and measured values of dispersion coefficients and concentrations is presented using the example of three field experiments.

As a result, key factors influencing the values of the dispersion coefficients for each of the considered methods were identified, including the stability class of the atmosphere and the roughness of the underlying surface. For each method, the accuracy of predicting vertical and horizontal dispersion, as well as surface concentrations, was evaluated. It was found that the method given in RB-134-17 "Recommended Methods for Assessment and Prediction of Accident Radiological Consequences at Nuclear Fuel Cycle Facilities" tends to overestimate the dispersion coefficients for the experimental dataset. Within the conducted analysis, the method outlined in OPB-84 "Methods for calculation of NPP-generated radioactive substances dispersion and exposure of local population" demonstrated the best agreement with the experimental data.

► **Keywords:** *atmospheric dispersion, surface concentrations, Gaussian model, dispersion coefficients, radiological consequences.*

* National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia.

Введение

Одной из приоритетных задач атомной энергетики является повышение безопасности атомных электростанций (АЭС) на этапах проектирования и эксплуатации. Целями обоснования безопасности АЭС является подтверждение радиационной безопасности с точки зрения воздействия на население и персонал АЭС, а также снижение уровня воздействия до допустимого согласно методической документации [1]. Анализ радиационных последствий аварий подразумевает расчет величины дозы облучения людей на территории загрязнения для определения потенциальных рисков для населения и планирования мероприятий по его защите от радиационного воздействия. Для расчета величины дозы необходимо провести моделирование переноса радиоактивных продуктов деления в окружающей среде и определить концентрацию продуктов деления в конкретной точке местности. При обосновании радиационной безопасности АЭС применяются как консервативные (при проектных авариях), так и реалистические (при запроектных авариях, включая аварии с плавлением топлива) подходы к моделированию [2].

Моделирование атмосферной дисперсии основано на численной реализации моделей физических явлений, которые прогнозируют эволюцию, распространение и осаждение загрязняющих веществ. Такое моделирование является полезным инструментом для оценки распространения и осаждения продуктов деления до начала проведения полевых экспериментов [3]. Результаты моделирования позволяют оценить географию распространения загрязняющих веществ и могут быть использованы в качестве основы для принятия решений и разработки мер защиты населения, среди которых: укрытие, эвакуация, йодная профилактика, ограничение приема пищи [4].

Существует два основных подхода к оценке приземной концентрации, основанных на гауссовой и на лагранжевой моделях рассеивания примесей в атмосфере и различающихся степенью консерватизма. Лагранжево-стохастическая модель реализована в программном средстве «НОСТРАДАМУС» [5], разработанном ИБРАЭ РАН; гауссова модель реализована в программных средствах «SULTAN» (НПО «Тайфун») и «ДОЗА-М» (НИЦ «Курчатовский институт») [6].

Стационарную модель Гаусса отличает широкое применение в области описания атмосферной диффузии загрязняющих веществ. Подход Гаусса

рекомендован в качестве общей модели для расчета атмосферного переноса в серии докладов МАГАТЭ [7], в докладе Научного комитета по действию атомной радиации ООН [8] и в обзорной записке Всемирной метеорологической организации [9]. Основными причинами столь обширного использования моделей гауссовой диффузии являются большой объем использованного при их разработке экспериментального материала и апробация данных моделей практически во всех районах мира. Гауссова модель тестировалась на разнообразных задачах, связанных с атмосферным рассеиванием, подтверждается обширным набором экспериментальных данных, а также является одной из наиболее проверенных моделей дисперсии [10]. Благодаря своей простоте в использовании вариации гауссовой модели являются инструментом, оптимальным для прогнозирования распространения радиоактивных выбросов как в условиях нормальной эксплуатации, так и при нарушениях нормальной эксплуатации, включая запроектные аварии. При этом гауссовы модели включают в себя ряд приближений, основанных на полуэмпирических корреляциях и требующих проверки путем валидации на экспериментах по распространению загрязняющих веществ в окружающей среде.

Одним из наиболее важных и ключевых параметров моделирования распространения загрязняющих веществ является размер шлейфа, который описывается коэффициентами (параметрами) дисперсии σ_y и σ_z , представляющими собой стандартные отклонения гауссового распределения. Данные параметры определяют распространение шлейфа в вертикальном и горизонтальном направлениях. Для их вычисления используются эмпирические соотношения, зачастую различающиеся в зависимости от методического документа, что может вносить в результаты дополнительную неопределенность [11]. Влияние данной неопределенности может быть снижено путем сравнительного анализа применяемых коэффициентов дисперсии из разных литературных источников и их валидации на экспериментальных данных.

Целью настоящей статьи в рамках разработки и совершенствования кода «МАП-ТА» [12] было определение методики, обладающей наименьшей погрешностью расчета основных параметров гауссовой модели (коэффициенты дисперсии и концентрация), так как более точная оценка позволит получать «реалистичные» результаты моделирования при проведении расчетного обоснования радиационной безопасности при запроектных авариях. Таким

образом, выполнены анализ и сравнение выражений коэффициентов дисперсии, приведенных в российской методической документации [13–15]. Проанализирована зависимость коэффициентов дисперсии от различных факторов, таких как шероховатость подстилающей поверхности и класс устойчивости. Выполнено сопоставление расчетных значений дисперсии и концентраций с экспериментальными данными полевых исследований. Представлены рекомендации по выбору выражений коэффициентов дисперсии при проведении расчетов с использованием подхода Гаусса. Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Методическая часть

Основой гауссовой модели распространения загрязняющих веществ является допущение, что шлейф загрязнителя имеет нормальное распределение, а значение концентрации вещества в определенной точке по направлению ветра определяется с помощью обобщенного уравнения Гаусса. Определение концентраций загрязняющих веществ включает в себя вычисление высоты, на которую поднимется шлейф на заданном расстоянии с подветренной стороны, после чего вычисленный подъем суммируется с геометрической высотой, чтобы получить «эффективную высоту источника» и вычисление коэффициентов дисперсии. Далее данные параметры используются в дисперсионном уравнении Гаусса. Наиболее общий подход к вычислению приземных концентраций на расстоянии до 20 км от точки выброса описывается выражением (1) [16]:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi U \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \left[\exp\left(-\frac{(z - h_e)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z + h_e)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right], \quad (1)$$

где C – концентрация загрязняющих веществ г/м³;

Q – массовый расход, г/с;

U – скорость ветра на высоте выброса по направлению заданной оси x , м/с;

h_e – эффективная высота факела выброса, м;

σ_y и σ_z – коэффициенты дисперсии (стандартные отклонения функции распределения Гаусса в направлении y и z), м.

При анализе гауссовой модели обычно принимаются следующие допущения [17]:

1. Присутствующий в облаке газ сохраняется (известные потери могут быть учтены).

2. За счет турбулентности в атмосфере газ рассеивается согласно гауссову распределению со стандартными отклонениями концентраций. Согласно нормальному распределению предполагается, что 67 % загрязняющего вещества находится в пределах $\pm\sigma_{y,z}$ от центральной линии шлейфа. Величина коэффициентов определяется турбулентностью атмосферы.

Модель также имеет ряд ограничений ввиду своей «идеальности»:

1. Может применяться к плоской и открытой поверхности, при этом учет влияния возможных препятствий на пути распространения загрязняющих веществ требует доработки и усовершенствования модели.

2. Метеорологические условия и условия поверхности земли принимаются постоянными на всем расстоянии, которое проходит облако газа.

3. Может применяться только для газов, имеющих плотность, близкую к плотности воздуха.

4. Плохо подходит для описания процесса рассеивания при штилевых условиях, для кратковременных выбросов в условиях аварии предполагается постоянное наличие ветра.

5. Может применяться только на ограниченном расстоянии (до 20 км), при увеличении расстояния от источника выброса существенно возрастает погрешность определяемой концентрации загрязняющих веществ.

Существуют различные подходы к параметризации вертикального и горизонтального коэффициентов дисперсии шлейфа, которые в большинстве случаев определяются с помощью сопоставления результатов измерения объемных активностей примеси в воздухе от реальных источников выброса с расчетами по теоретическим формулам гауссовой модели атмосферной диффузии на основе той или иной системы классификации погодных условий. Наиболее распространенным подходом к параметризации является использование аппроксимаций Паскуилла – Гиффорда [18], которые были получены в исследованиях рассеивания на открытой местности.

Параметры дисперсии главным образом зависят от времени прохождения облака загрязняющего вещества, источника загрязняющего вещества и турбулентных скоростей движения воздуха, которые вблизи земли зависят от профиля скорости ветра, являющейся функцией длины шероховатости подстилающей поверхности. Шероховатость – динамический параметр подстилающей поверхности, который характеризует степень расчлененности местности

непосредственно вблизи пункта измерений. Под длиной шероховатости подразумевают высоту z_0 , на которой скорость ветра становится равной нулю, если профиль скорости имеет логарифмический характер изменения [19]. Длина шероховатости характеризует не только подстилающую поверхность, но и в определенной степени оказывает влияние на атмосферные процессы [20].

Класс устойчивости атмосферы – совокупность метеорологических факторов (скорость ветра, облачность, вертикальный тепловой поток), создающих определенные условия рассеяния в атмосфере. В РБ-134-17 [13] и ОПБ-84 [14] рассматривается шесть классов устойчивости погоды в соответствии с классификацией Паскуилла [18]. В МПА-98 [15] используется классификация устойчивости атмосферы Тернера [21], и рассматривается семь классов устойчивости с дополнительным классом G , который определяет чрезвычайно стабильные условия атмосферы.

Анализ влияния параметров на коэффициенты дисперсии

В программном средстве «МАП-ТА» [12], разработанном в НИЦ «Курчатовский институт», реализованы три различных подхода к определению вертикального и горизонтального коэффициентов дисперсии гауссового распределения в процессе переноса, представленных в российской методической документации [13–15].

Для каждого из этих подходов проведен анализ зависимости коэффициентов дисперсии от ключевых параметров, таких как шероховатость подстилающей поверхности и класс устойчивости атмосферы. Для определения влияния характера поверхности на коэффициенты дисперсии величина шероховатости изменялась в пределах от 10^{-4} м (что примерно соответствует водной поверхности) до 10 м (что примерно соответствует средней/низкой городской застройке). Расстояние, для которого проводился расчет коэффициентов дисперсии, варьировалось от 100 до 30 000 м.

В РБ-134-17 предложен степенной метод (2) для расчета коэффициента дисперсии радиоактивного облака в горизонтальном направлении его распространения на расстоянии x от точечного источника аварийного выброса для класса устойчивости j атмосферы:

$$\sigma_y^j(x) = \begin{cases} p_y^j \cdot x^{q_y^j}, & 0 \leq x \leq 10\,000 \text{ м} \\ p_y^j \cdot 10\,000^{(q_y^j-0,5)} \cdot x^{0,5}, & 10\,000 < x \leq 50\,000 \text{ м} \end{cases}, \quad (2)$$

где p_y^j, q_y^j – диффузионные коэффициенты, значения которых рекомендованы [13] для расчета коэффициента дисперсии. Данные параметры зависят от класса устойчивости атмосферы j и высоты источника выброса.

В ОПБ-84 коэффициент дисперсии в горизонтальном направлении на расстоянии x от источника определяются по формуле Бриггса (3):

$$\sigma_y(x) = \frac{c_3 \cdot x}{\sqrt{1 + 0,0001 \cdot x}}, \quad (3)$$

где c_3 – табличный коэффициент функции $\sigma_y(x)$, который зависит от класса устойчивости атмосферы.

В МПА-98 рекомендовано определять горизонтальную дисперсию по общему соотношению Эйри (4):

$$\sigma_y(x, z_0, p) = \frac{x}{\sqrt{(a(z_0, p) + b(z_0, p) \cdot x)}}, \quad (4)$$

где x – расстояние от источника выброса, м;

$a(z_0, p)$ и $b(z_0, p)$ – параметры, определяемые по табличным значениям в зависимости от класса устойчивости;

p – табличные значения параметра устойчивости Смита для разных классов устойчивости;

z_0 – длина шероховатости, м.

Как видно из приведенных выражений, от шероховатости зависит только подход, описанный в МПА-98. В качестве примера представлены результаты расчетного анализа выражений для коэффициента горизонтальной дисперсии для класса устойчивости А. На рис. 1 представлены расчеты в соответствии с МПА-98.

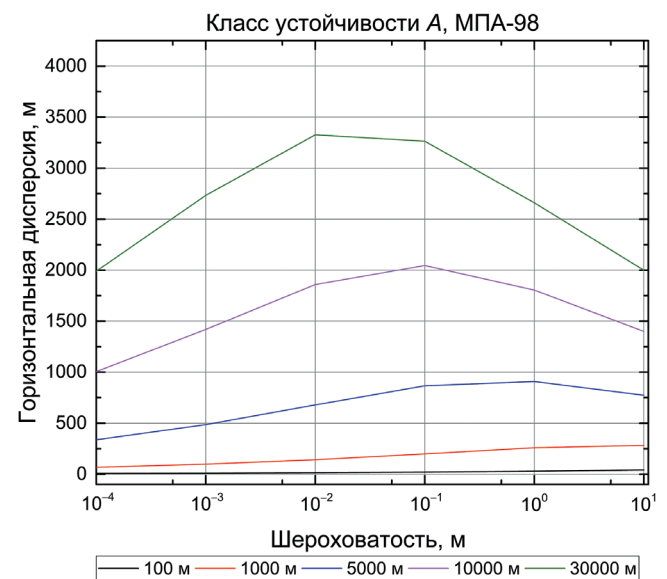


Рис. 1. Зависимость коэффициента горизонтальной дисперсии от шероховатости по МПА-98 [Fig. 1. Dependence of the horizontal dispersion coefficient on roughness according to MPA-98]

Результаты расчетов горизонтального параметра дисперсии в зависимости от шероховатости подстилающей поверхности демонстрируют, что для неустойчивых классов устойчивости атмосферы (A-C) существует максимум величины коэффициента дисперсии в поперечном направлении для расстояний более 5 000 м. Причем максимум смещается в область больших значений шероховатости при уменьшении расстояния точки наблюдения. Расчет горизонтальной дисперсии для нейтральных условий (класс D) продемонстрировал, что при больших значениях шероховатости коэффициент дисперсии не изменяется, а для стабильных классов устойчивости – растет.

Влияние класса устойчивости атмосферы определялось для среднего расстояния 5 000 м с шероховатостью 0,1 м. На рис. 2 представлены результаты расчета горизонтальной дисперсии в зависимости от класса устойчивости атмосферы.

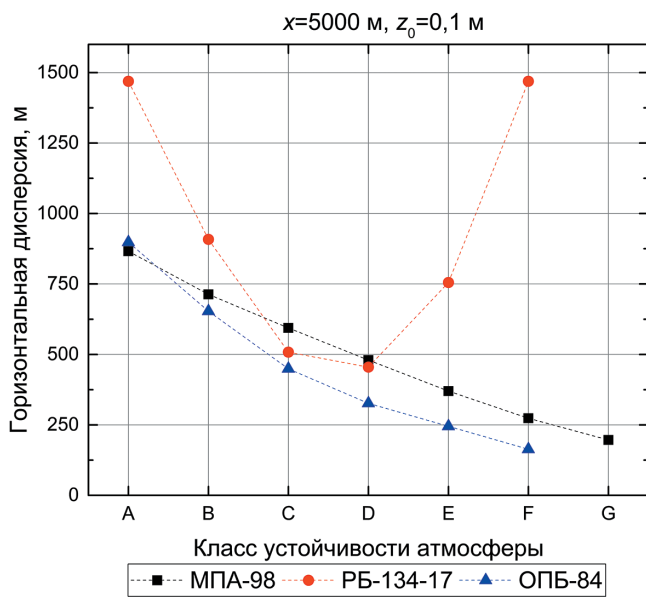


Рис. 2. Зависимость коэффициента горизонтальной дисперсии от класса устойчивости атмосферы для $x = 5\,000$ и $z_0 = 0,1$ м [Fig. 2. Dependence of the horizontal dispersion coefficient on the atmospheric stability class for $x = 5\,000$ m and $z_0 = 0,1$ m]

Как горизонтальная, так и вертикальная дисперсии уменьшаются с увеличением уровня устойчивости атмосферы. Это обусловлено тем, что в стабильной атмосфере ограничено турбулентное перемешивание и, следовательно, диффузия и рассеивание загрязняющих веществ. Однако результаты расчета горизонтальной дисперсии по РБ-134-17 демонстрируют (рис. 2) параболический характер кривой, что объясняется зависимостью данного параметра от коэффициентов p_y^j и q_y^j . Безразмерный параметр p_z^j для источника выше 100 м является

постоянным для всех классов устойчивости, а параметр p_y^j имеет наибольшие значения для классов устойчивости A и F, а наименьшие – для нейтральных условий D.

Вертикальный параметр дисперсии в РБ-134-17 рассчитывается по степенному методу (5):

$$\sigma_z^j(x) = p_z^j \cdot x^{q_z^j}, \quad (5)$$

где p_z^j, q_z^j – диффузионные коэффициенты, значения которых рекомендованы [13] для расчета коэффициентов дисперсии.

В ОПБ-84 параметр дисперсии в вертикальном направлении на расстоянии x от источника определяются по следующим формулам Смита – Хоскера (6):

$$\sigma_z(x, z_0) = F(z_0, x) \cdot g(x), \quad (6)$$

где $F(z_0, x)$ – корректирующий фактор, учитывающий шероховатость поверхности земли z_0 . Выражения для $F(z_0, x)$ и $g(x)$ приведены в [14].

Выражение для определения вертикальной дисперсии $\sigma_z(x, z_0, p)$ в МПА-98 совпадает с (4).

На рис. 3 в качестве примера приведен сравнительный график с кривыми вертикальной дисперсии в зависимости от значения шероховатости подстилающей поверхности для класса устойчивости D, рассчитанными по методикам МПА-98 и ОПБ-84.

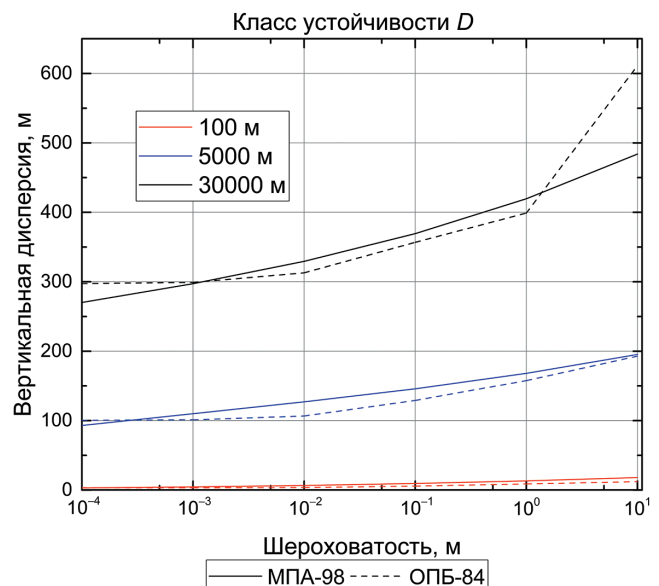


Рис. 3. Зависимость коэффициента вертикальной дисперсии от шероховатости по МПА-98 и ОПБ-84 [Fig. 3. Dependence of the vertical dispersion coefficient on the roughness according to MPA-98 and OPB-84]

Результаты расчетов коэффициентов вертикальной дисперсии для неустойчивых (A-C) и стабильных классов устойчивости (E-G) качественно совпадают с результатами расчета для класса D.

Из рис. 3 видно, что параметр вертикальной дисперсии, определенный в соответствии с методикой МПА-98, демонстрирует равномерный рост для всех классов устойчивости атмосферы. Рассчитанные коэффициенты дисперсии по МПА-98 и ОПБ-84 в вертикальном направлении растут при увеличении значения длины шероховатости, что связано с влиянием длины шероховатости на скорость трения. Механическое взаимодействие происходит из-за сил трения, вызванных ветром, который воздействует на поверхность земли и приводит к возникновению турбулентности. Турбулентное движение атмосферы вызывает перемешивание воздуха, что в свою очередь увеличивает значение коэффициентов дисперсии. Вертикальная дисперсия, рассчитанная по ОПБ-84, в диапазоне значений шероховатости $10^{-4} - 10^{-3}$ м изменяется незначительно, резкое увеличение наблюдается в диапазоне 1–10 м. Таким образом, учитывается большее влияние на значение вертикальной дисперсии от высоких объектов, расположенных на подстилающей поверхности, которые вносят вклад в турбулентное перемешивание в атмосфере.

Основные различия представленных в методической документации соотношений для коэффициентов дисперсии заключаются не только в разных эмпирических константах, но и их зависимостях от таких параметров, как класс устойчивости, длина шероховатости подстилающей поверхности. Коэффициенты дисперсии гауссова распределения и в горизонтальном, и в вертикальном направлениях в МПА-98 зависят от шероховатости подстилающей поверхности, в методике ОПБ-84 от шероховатости зависит только вертикальный коэффициент дисперсии, а в РБ-134-17 коэффициенты дисперсии не зависят от характера поверхности, при этом учитывается зависимость от высоты источника.

Валидация методик на экспериментальных данных

В данном разделе представлены результаты валидации трех рассматриваемых методик на экспериментальных данных, полученных в ходе полевых исследований атмосферной диффузии. Расчеты выполнялись с помощью программного средства «МАП-ГА» [12].

В экспериментах с рассеиванием веществ в атмосфере для удобства часто измеряемые концентрации веществ представляют в виде нормированных величин ($с/м^3$ или $1/м^2$). Данный подход исключает необходимость учитывать массу исследуемого вещества.

Исследование атмосферного переноса ^{85}Kr (Франция)

В ходе работы [22] исследователями был проведен ряд полевых кампаний экспериментов вокруг завода по переработке отработавшего топлива «АРЕВА» (AREVA NC La Hague) с целью количественной оценки процессов распространения радионуклидов в атмосфере и снижения неопределенности моделей переноса. Устойчивость атмосферы определялась в соответствии с классификацией Паскуилла на основе измерения скорости ветра и наблюдения облачного покрова. Местность характеризовалась как немного холмистая, и шероховатость поверхности авторы исследования определили как 0,15 м, а класс устойчивости атмосферы изменялся от слабой неустойчивости к нейтральным условиям. Подъем факела выброса не наблюдался. Параметры эксперимента, по которым велся расчет, представлены в таблице № 1.

Таблица № 1

Исходные данные для расчета АРЕВА- ^{85}Kr The initial data for the calculation of AREVA- ^{85}Kr

Параметр	Значение
Выбрасываемое вещество	^{85}Kr
Высота источника, м	100
Класс устойчивости	C, D
Длина шероховатости, м	0,15
Скорость ветра на высоте 100 м, м/с	5

Расчет проводился для обоих классов устойчивости атмосферы. На рис. 4 представлены сравнительные графики для экспериментальных данных и рассчитанного коэффициента горизонтальной дисперсии для класса устойчивости D.

Концентрации на уровне земли, нормированные на объем выброса, представлены на рис. 5.

Рис. 5 представлен в виде зависимости нормированной приземной концентрации от расстояния от источника. Это связано с тем, что в данном исследовании не изменялись параметры источника и метеорологические условия во время исследования атмосферного переноса и рассеивания, что позволило наглядно отобразить распределение дисперсии и концентрации. Результаты для остальных исследований представлены в виде диаграммы рассеяния «эксперимент – расчет» для каждого параметра.

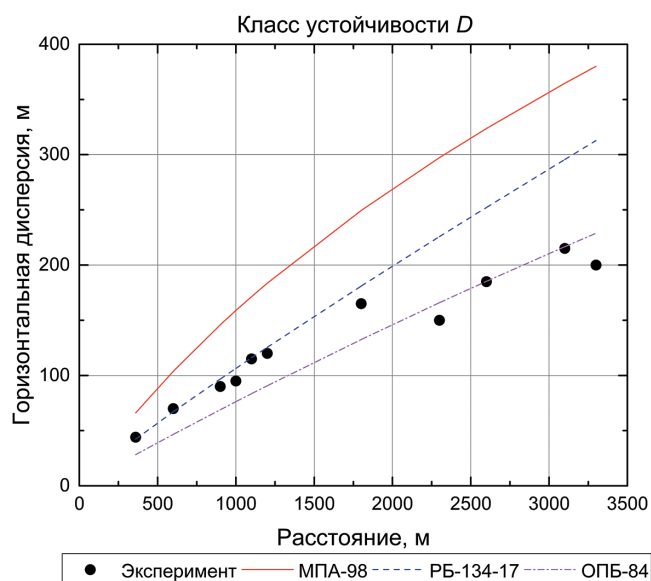


Рис. 4. Наблюдаемые и рассчитанные коэффициенты горизонтальной дисперсии для класса устойчивости D АРЕВА- ^{85}Kr

[Fig. 4. Observed and calculated coefficients of horizontal dispersion for stability class D of AREVA- ^{85}Kr]

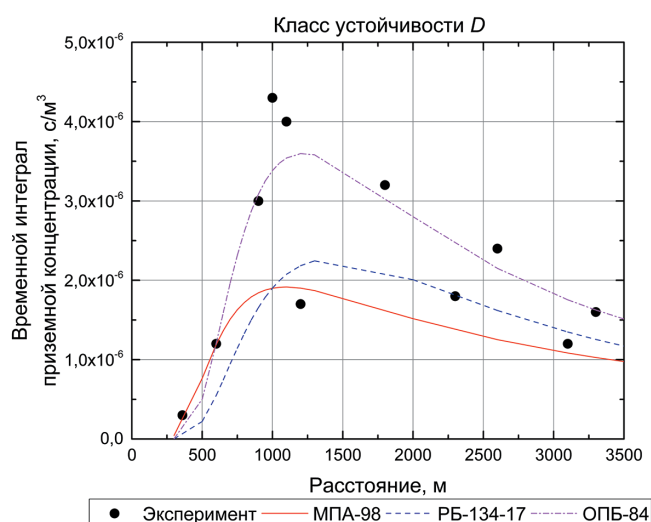


Рис. 5. Наблюдаемые и рассчитанные концентрации для класса устойчивости D АРЕВА- ^{85}Kr

[Fig. 5. Observed and calculated concentrations for stability class D of AREVA- ^{85}Kr]

Анализ полученных результатов показывает хорошее согласие коэффициента поперечной дисперсии, рассчитанного в соответствии с методикой ОПБ-84, с измеренными значениями дисперсии. На расстояниях до 2 000 м наблюдается более высокая степень сходимости между расчетами и экспериментальными данными для слабо неустойчивого класса атмосферы. Однако на расстояниях более 2 000 м лучшее согласие с измеренными коэффициентами дисперсии имеет расчет, в котором класс устойчивости принимается нейтральным (D). Такие результаты обуславливаются изменением состояния

атмосферы в пределах указанных классов устойчивости в ходе проведения исследования. Расчет по остальным методикам переоценивает коэффициент дисперсии по сравнению с измеренными значениями, особенно на расстояниях от 2 000 м от источника, а наибольшие отклонения наблюдаются для класса устойчивости C расчета по МПА-98.

Исследование атмосферного переноса SF_6 (Дания)

Эксперименты проводились Национальной лабораторией «Рисо» (Riso) [23] и включали в себя исследование дисперсии в атмосфере в районе Копенгагена в нейтральных и неустойчивых условиях атмосферы. В ходе эксперимента были собраны пробы на приземном уровне на расстоянии от 2 до 6 км от места выброса. Авторы оценили длину шероховатости на основе двух независимых методов: с помощью выражения для профиля ветра и измерения вертикального отклонения ветра на высоте 115 м. Оба подхода определили данный параметр равным 0,6 м. Исходные данные представлены в таблице № 2.

Таблица № 2

Исходные данные для расчета Рисо- SF_6 The initial data for the calculation of Riso- SF_6

Параметр	Значение
Выбрасываемое вещество	SF_6
Высота источника, м	115
Класс устойчивости	B, C, D
Длина шероховатости, м	0,6
Скорость ветра на высоте 100 м, м/с	2,1–7,2

На рис. 6 и 7 изображены результаты расчетов горизонтального и вертикального коэффициентов дисперсии, основанных на рассматриваемых методиках.

Также моделировалась концентрация для данного эксперимента, результаты сравнения с экспериментом представлены на рис. 8.

Из результатов расчетов для данного исследования следует, что методики МПА-98 и ОПБ-84 демонстрируют наилучший прогноз как горизонтальной, так и вертикальной дисперсии. В то же время методика РБ-134-17 существенно завышает расчетные дисперсии. Например, четыре точки вертикальной дисперсии находятся в диапазоне от 1 000 до 4 000 м и не вошли в график. Таким образом,

результаты показывают, что данная методология переоценивает дисперсии, что, в свою очередь, приводит к занижению расчетных концентраций. Методика МПА-98 также немного занижает концентрации из-за завышения горизонтальной дисперсии. Результаты расчетов по методике ОПБ-84 отличаются тем, что они в большей степени сгруппированы относительно центральной линии тренда по сравнению с другими методиками.

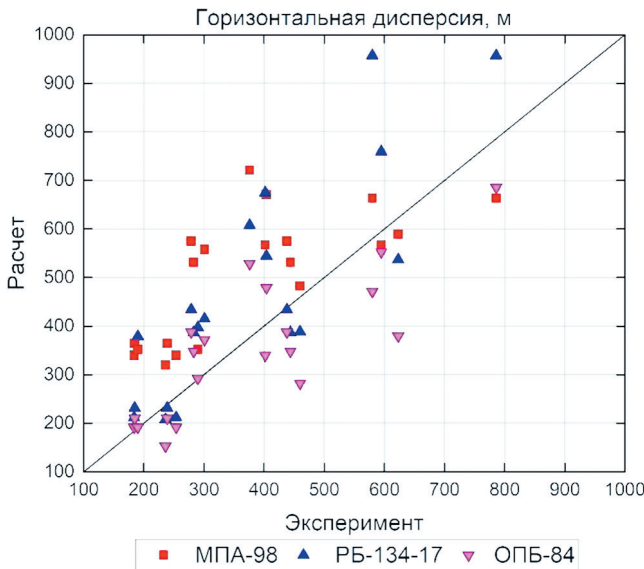


Рис. 6. Наблюдаемые и рассчитанные коэффициенты горизонтальной дисперсии Ризо-SF₆
 [Fig. 6. Observed and calculated coefficients of horizontal dispersion of Riso-SF₆]

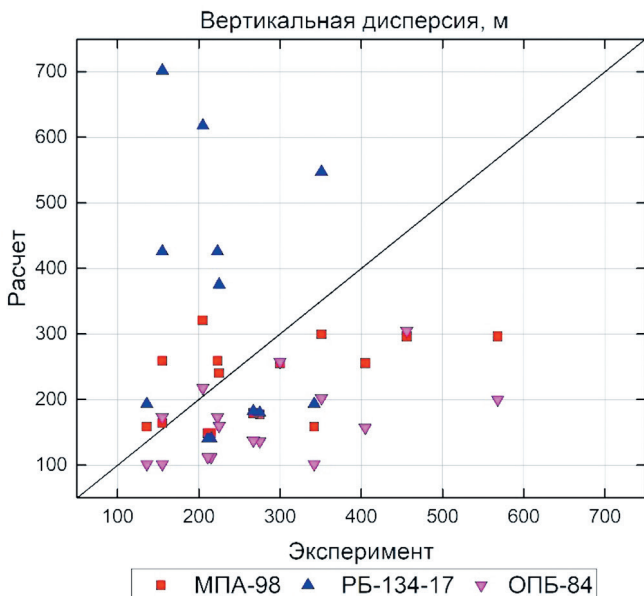


Рис. 7. Наблюдаемые и рассчитанные коэффициенты вертикальной дисперсии Ризо-SF₆
 [Fig. 7. Observed and calculated coefficients of vertical dispersion of Riso-SF₆]

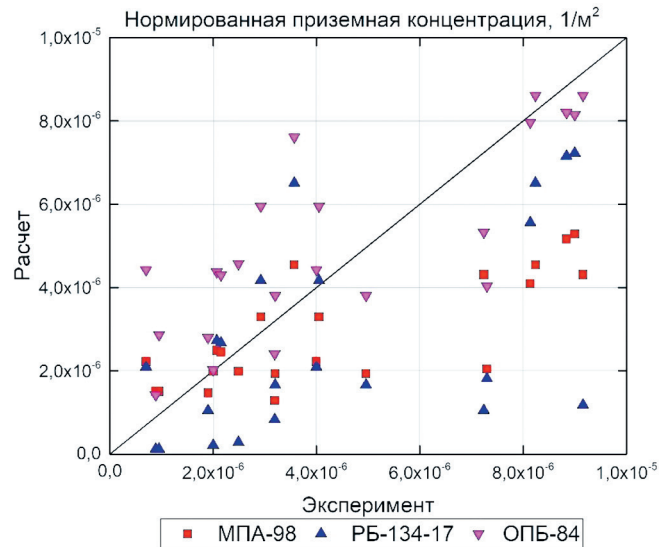


Рис. 8. Наблюдаемые и рассчитанные концентрации Ризо-SF₆
 [Fig. 8. Observed and calculated concentrations of Riso-SF₆]

Исследование атмосферного переноса SF₆ (США)

Исследование проводилось на тепловой электростанции (ТЭС) «Кинкейд» (Kincaid), в ходе которого были собраны пробы на расстоянии от 1 до 50 км от источника выброса [24]. Местность характеризовалась как равнинная и сельская, а метеорологические данные были получены с помощью приборной вышки, при этом условия варьировались от нейтральных до конвективно-нестабильных. Анализ проведен на основе 208 экспериментов с учетом факела выброса. Исходные данные приведены в таблице № 3.

Таблица № 3

**Исходные данные для расчета Кинкейд-SF₆
 The initial data for the calculation of Kincaid-SF₆**

Параметр	Значение
Выбрасываемое вещество	SF ₆
Высота источника, м	187
Класс устойчивости	A, B, C, D
Длина шероховатости, м	0,09–0,15
Скорость ветра на высоте 10 м, м/с	1,43–11,23
Расход выброса, г/с	8–20
Температура окружающей среды, К	284,2–302,5
Температура выброса, К	369–457

На рис. 9–11 представлены диаграммы рассеяния для расчета по МПА-98, РБ-134-17 и ОПБ-84. Неопределенность экспериментальных данных обозначена пунктирной линией и принималась равной 50 % [11].

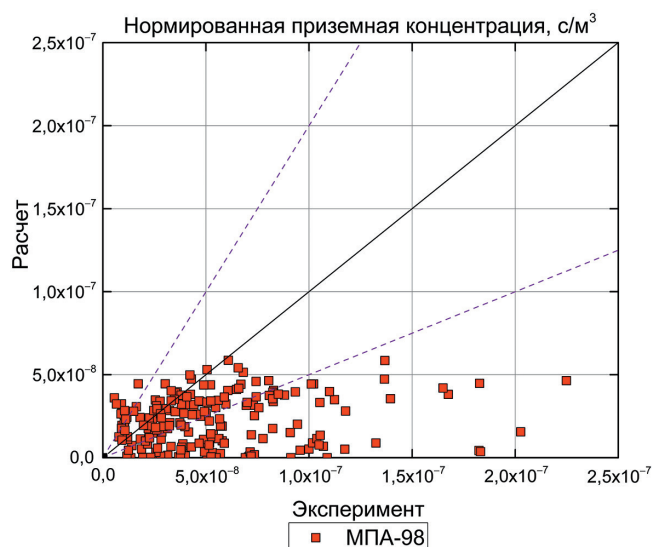


Рис. 9. Наблюдаемые и рассчитанные концентрации Кинкейд-SF₆ по МПА-98
 [Fig. 9. Observed and calculated concentrations Kincaid-SF₆ according to MPA-98]

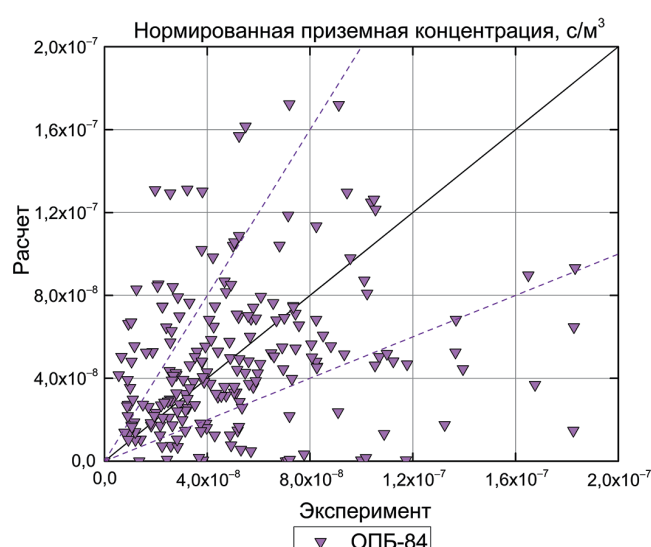


Рис. 11. Наблюдаемые и рассчитанные концентрации Кинкейд-SF₆ ОПБ-84
 [Fig. 11. Observed and calculated concentrations Kincaid-SF₆ according to OPB-84]

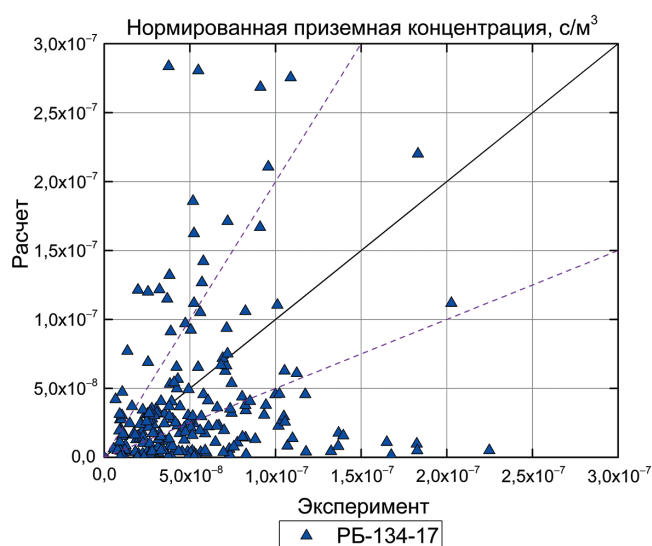


Рис. 10. Наблюдаемые и рассчитанные концентрации Кинкейд-SF₆ по РБ-134-17
 [Fig. 10. Observed and calculated concentrations Kincaid-SF₆ according to RB-134-17]

Дополнительная неопределенность при сравнении валидационных расчетов с экспериментальными данными может вноситься из-за отбора проб на расстоянии 20 км и более от источника выброса индикаторного вещества ввиду ограниченности применения модели Гаусса.

На диаграммах рассеяния значений концентраций видно, что большая плотность и симметричность положения точек относительно линии тренда наблюдается для концентраций, рассчитанных по методике ОПБ-84. Это указывает на более точное соответствие расчетных данных этой методики измеренным значениям.

С одной стороны, точки для МПА-98 располагаются достаточно равномерно относительно линии тренда, что показывает хорошую прогностическую способность метода на расстояниях более 10 км. Однако для расстояний менее 10 км наблюдается занижение концентраций. Недооценка концентраций, согласно расчетам по методике МПА-98, обусловлена тем, что горизонтальная и вертикальная дисперсии растут медленно, и максимум концентрации находится на большем расстоянии. Поэтому данный подход демонстрирует хорошее согласие с экспериментом на расстояниях от 10 км, а на расстояниях менее 10 км наблюдается занижение концентраций.

С другой стороны, для методики РБ-134-17 наблюдается обратная картина. Данный метод имеет тенденцию к переоценке дисперсии и прогнозирует, что максимальная концентрация вещества наблюдается на меньших расстояниях, в то время как на расстоянии 10 км шлейф уже значительно рассеивается.

Таким образом, по методике МПА-98 в диапазон варьирования попадает 91 точка, по РБ-134-17 – 77, а по ОПБ-84 – 124 из 208. Значит, ОПБ-84 дает более реалистичное представление о распространении фторида серы в данном исследовании.

Обсуждение результатов

Для анализа и сравнения расчетных и измеренных значений коэффициентов дисперсии и приземных концентраций определены средние отклонения, представленные в таблицах № 4 и 5.

Таблица № 4

Средние отклонения расчетных и экспериментальных дисперсий
The average deviation between the calculated and experimental dispersions

Название исследования	Параметр	Среднее отклонение, %		
		МПА-98	РБ-134-17	ОПБ-84
AREVA- ⁸⁵ Kr	σ_y класс C	83,9	32,6	21,5
	σ_y класс D	64,9	20,3	19,1
Riso-SF ₆	σ_y	49,2	33	20
	σ_z	33,9	174	40,8

Таблица № 5

Средние отклонения расчетных и экспериментальных концентраций
The average deviation between the calculated and experimental concentrations

Название исследования	Параметр	Среднее отклонение, %		
		МПА-98	РБ-134-17	ОПБ-84
AREVA- ⁸⁵ Kr	C/Q класс C	72	93,1	60,6
	C/Q класс D	33,4	38,8	30,6
Riso-SF ₆	Cu/Q	47,1	60,9	49,7
Kincaid-SF ₆	C/Q	66	87,6	74,8

Анализ полученных результатов показывает хорошее согласие коэффициентов поперечной и вертикальной дисперсии, рассчитанных в соответствии с методикой ОПБ-84, и измеренными значениями дисперсии. В среднем отклонение не превышает 40,8 %, тогда как методики, изложенные в МПА-98 и РБ-134-17, имеют отклонения более 80 и 170 %, соответственно. На рассматриваемом наборе экспериментальных данных методика РБ-134-17 демонстрирует переоценку параметров дисперсии, что в последующем приводит к более низким расчетным концентрациям относительно экспериментальных данных. Возможность учитывать шероховатость в подходах, изложенных в МПА-98 и ОПБ-84, позволяет более точно производить оценку горизонтальных и вертикальных коэффициентов дисперсии.

Анализ средних отклонений приземных концентраций для каждой кампании полевых экспериментов показывает, что наилучшее согласие с экспериментальными данными наблюдается у методик МПА-98 и ОПБ-84. В то время как методика РБ-134-17 для рассматриваемой выборки исследований демонстрирует большую погрешность при моделировании и склонна к занижению приземных концентраций. Однако, как показала валидация

моделей на эксперименте Kincaid-SF₆, методика МПА-98 также склонна к недооценке концентрации.

Выводы

Общее сходство между методами определения горизонтальной и вертикальной дисперсии при расчетах концентрации загрязнений с помощью модели Гаусса, в соответствии с тремя методическими документами, проявляется в зависимости коэффициентов дисперсии от расстояния с подветренной стороны источника и условий устойчивости атмосферы в момент рассеивания. Отмечены различия в методах:

- дисперсии в двух направлениях по МПА-98 зависят от шероховатости подстилающей поверхности, тогда как по ОПБ-84 это характерно только для вертикального коэффициента;
- коэффициенты по методике РБ-134-17 не зависят от шероховатости, но при этом учитывается зависимость от высоты источника выброса.

Выполнены вариационные расчеты для определения влияния шероховатости и класса устойчивости атмосферы на коэффициенты дисперсии. Показано, что рост шероховатости приводит

к росту вертикальной дисперсии. Для большинства зависимостей значения коэффициентов дисперсии уменьшаются с увеличением устойчивости атмосферы от *A* до *F* (РБ-134-17, ОПБ-84) и *G* (МПА-98) из-за снижения интенсивности перемешивания. Однако горизонтальная дисперсия, полученная по методике РБ-134-17, заметно увеличивается для стабильных классов устойчивости, что может быть обусловлено эмпирически определенными коэффициентами.

Проведено сравнение результатов расчета коэффициентов горизонтальной и вертикальной дисперсии гауссовой модели, а также приземных концентраций с данными трех кампаний полевых исследований. Выявлено, что для рассматриваемых в статье исследований по рассеиванию веществ в атмосфере методика РБ-134-17 имеет тенденцию к переоценке как горизонтальной, так и вертикальной дисперсии, что сказывается на расчетных приземных концентрациях – они могут значительно отличаться от экспериментальных. Однако данный результат может быть обусловлен выбором экспериментов, с помощью которых были проведены расчеты. Для уточнения выводов следует выполнить

валидацию на расширенном наборе экспериментальных данных. Принимая во внимание возможность учета характера подстилающей поверхности с помощью введения в расчет величины шероховатости, можно более точно определить параметры дисперсии. Так, наилучшую сходимость для коэффициентов дисперсии можно наблюдать для методик МПА-98 и ОПБ-84. Хотя среднее отклонение приземных концентраций ниже у МПА-98, этот метод в целом может недооценивать фактические значения концентраций. Таким образом, для рассматриваемой в работе выборки экспериментальных исследований подход, изложенный в ОПБ-84, характеризуется лучшей точностью в оценке рассеивания выбросов в атмосфере. Для более обоснованного выбора наименее консервативной методики, которая может использоваться при анализе запроектных аварий и позволит оптимизировать использование ресурсов, требуется проведение дополнительных валидационных расчетов на более обширном наборе экспериментальных данных.

На основе полученных результатов можно усовершенствовать моделирование распространения загрязнений с использованием гауссовой модели.

Литература

1. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): постановление Главного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 № 47.
2. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (НП-001-15): утв. приказом Ростехнадзора от 17.12.2015 № 522.
3. Connan O., Smith K., Organo C., Solier L., Maro D., Hebert D. (2013). Comparison of RIMPUFF, HYSPLIT, ADMS atmospheric dispersion model outputs, using emergency response procedures, with ⁸⁵Kr measurements made in the vicinity of nuclear reprocessing plant. *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 124, pp. 266–277.
4. Le N. B. T., Korsakissok I., Mallet V., Perillat R., Mathieu A. (2021). Uncertainty study on atmospheric dispersion simulations using meteorological ensembles with a Monte Carlo approach, applied to the Fukushima nuclear accident. *Atmospheric Environment: X*, Vol. 10, Article 100112.
5. Арутюнян Р. В., Беликов В. В., Беликова Г. В., Головизнин В. М., Киселёв В. П., Семёнов В. Н. и др. Компьютерная система «НОСТРАДАМУС» для поддержки принятия решений при аварийных выбросах на радиационно-опасных объектах // *Известия Академии Наук / Сер.: Энергетика*. 1995. № 4. С. 19–30.
6. Попов Е. В., Пантелеев В. А., Сегаль М. Д., Гаврилов С. Л., Седнев В. А., Лысенко И. А. Анализ информационно-моделирующих систем поддержки принятия решений при реагировании на чрезвычайные ситуации радиационного характера // *Технологии техносферной безопасности*. 2019. № 2 (84). С. 119–131.
7. IAEA. (2001). Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment.
8. UNSCEAR. (2000). Sources and effects of ionizing radiation.
9. WMO (2020). Guidelines on Meteorological and Hydrological Aspects of Siting and Operation of Nuclear Power Plants (WMO-No. 550).
10. Abdel-Rahman, A. (2008). On the atmospheric dispersion and Gaussian plume model. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Waste Management, Water Pollution, Air Pollution, Indoor Climate (WWAI 08)*, pp. 31–39.

11. Korsakissok I., Mallet V. (2009). Comparative study of gaussian dispersion formulas within the polyphemus platform: evaluation with prairie grass and Kincaid experiments. *Journal of applied meteorology and climatology*, vol. 48, pp. 2459–2473. DOI: 10.1175/2009JAMC2160.1.

12. Яковлева О. В., Шмельков Ю. Б. «МАП-ТА». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024614004 от 19.02.2024.

13. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Рекомендуются методы оценки и прогнозирования радиационных последствий аварий на объектах ядерного топливного цикла (РБ-134-17): утв. приказом Ростехнадзора от 16.11.2017 № 479.

14. НТД 38.220.56-84. Методы расчета распространения радиоактивных веществ с АЭС и облучения окружающего населения (ОПБ-84) / Часть 1: Приложения. МХО «Интератомэнерго». – М.: Энергоатомиздат, 1984.

15. Методические указания по расчету радиационной обстановки в окружающей среде и ожидаемого облучения населения при кратковременных выбросах радиоактивных веществ в атмосферу (МПА-98). – М.: Минатом России, 1998.

16. Leelőssy, Á., Molnár, F., Izsák, F., Havasi, Á., Lagzi, I., & Mészáros, R. (2014). Dispersion modeling of air pollutants in the atmosphere: A review. *Central European Journal of Geosciences*, No. 6 (3), pp. 257–278.

17. Мешалкин В. П., Бутусов О. Б. Компьютерная оценка воздействия на окружающую среду магистральных трубопроводов: учебное пособие. – М.: ИНФРА-М, 2022.

18. Hunter, C. (2012). A recommended Pasquill-Gifford stability classification method for safety basis atmospheric dispersion modeling at SRS.

19. Малявая Г. В. Влияние параметров шероховатости подстилающей поверхности на скорость ветра // *Ecologia și Geografia, Buletinul AȘM. Științele vieții*. 2014. Nr. 2 (323). С. 181–187.

20. Shen C., Shen A., Cui Y., Chen X., Liu Y., Fan Q., Chan P., Tian C., Wang C., Lan J., Gao M., Li X., Wu J. (2022). Spatializing the roughness length of heterogeneous urban underlying surfaces to improve the WRF simulation-part 1: a review of morphological methods and model evaluation. *Atmospheric environment*, vol. 270, article 118874.

21. МТ 1.2.5.0110-2012. Методика определения размеров зон планирования защитных мероприятий в случае аварии на атомной станции: утв. приказом ОАО «Концерн Росэнергоатом» от 16.07.2013 № 9/656-П.

22. Maro D. (2013). Transfert des radionucléides sous forme de gaz et d'aérosols dans les environnements complexes: études expérimentales de dispersion atmosphérique et d'échanges aux interfaces, pp. 75–92. ISBN 987-2-9545237-0-5.

23. Gryning S. E., Lyck E. (2002). The Copenhagen tracer experiments: Reporting of measurements. *Riso National Laboratory, Forskningscenter Riso. Riso-R No. 1054*. 74 p.

24. Bowne N. E., Londergan R. J., Murray D. R., Borenstein H. S. (1983). Overview, Results, and Conclusions for the EPRI Plume model validation and development project: plains site. EPRI EA-3074, Project 1616-1. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute.

References

1. Sanitariye pravila i normativy SanPiN 2.6.1.2523-09 “Normy radiacionnoy bezopasnosti” (NRB-99/2009) [Sanitary rules and regulations SanPiN 2.6.1.2523-09 “Radiation safety standards” (NRB-99/2009)]. 2009.

2. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoi ehnergii “Obshchie polozheniya obespecheniya bezopasnosti atomnykh stantsii” (NP-001-15) [Federal rules and regulations in the field of atomic energy use “General provisions for nuclear power plant safety assurance” (NP-001-15)]. 2015.

3. Connan O., Smith K., Organo C., Solier L., Maro D., Hébert D. (2013). Comparison of RIMPUFF, HYSPLIT, ADMS atmospheric dispersion model outputs, using emergency response procedures, with ⁸⁵Kr measurements made in the vicinity of nuclear reprocessing plant. *Journal of Environmental Radioactivity*, No. 124, pp. 266–277.

4. Le N. B. T., Korsakissok I., Mallet V., Périllat R., Mathieu A. (2021). Uncertainty study on atmospheric dispersion simulations using meteorological ensembles with a Monte Carlo approach, applied to the Fukushima nuclear accident. *Atmospheric Environment: X*, Vol. 10, Article 100112.

5. Arutyunyan R. V., Belikov V. V., Belikova G. V., Goloviznin V. M., Kiselev V. P., Semenov V. N., et. al. (1995). Komp'yuternaya sistema "NOSTRADAMUS" dlya podderzhki prinyatiya reshenii pri avariinykh vybrosakh na radiatsionno-opasnykh ob'ektakh ["NOSTRADAMUS" computer system for supporting decisions during accidental emissions at radiation hazardous objects]. *Izvestiya Akademii Nauk – News of the Academy of Sciences. Seriya: Ehnergetika – Series: Energy*, No. 4, pp. 19–30. [in Russian].

6. Popov E. V., Panteleev V. A., Segal M. D., Gavrilov S. L., Sednev V. A., Lysenko I. A. (2019). Analiz informatsionno-modeliruyushchikh sistem podderzhki prinyatiya reshenii pri reagirovanii na chrezvychnyye situatsii radiatsionnogo kharaktera [Analysis of information and modeling systems to support decision-making in responding to radiation emergencies]. *Tekhnologii tekhnosfernoi bezopasnosti – Technosphere security technologies*, No. 2 (84), pp. 119–131. [in Russian].

7. IAEA. (2001). Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment.

8. UNSCEAR. (2000). Sources and effects of ionizing radiation.

9. WMO (2020). Guidelines on meteorological and hydrological aspects of siting and operation of nuclear power plants (WMO-No. 550).

10. Abdel-Rahman, A. (2008). On the atmospheric dispersion and Gaussian plume model. In proceedings of the 2nd International conference on waste management, water pollution, air pollution, indoor climate (WWAI 08), pp. 31–39.

11. Korsakissok I., Mallet V. (2009). Comparative study of gaussian dispersion formulas within the polyphemus platform: evaluation with prairie grass and Kincaid experiments. *Journal of applied meteorology and climatology*, vol. 48, pp. 2459–2473. DOI: 10.1175/2009JAMC2160.1.

12. Yakovleva O. V., Shmel'kov Yu. B. "MAP-TA". Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EHVM № 2024614004 ot 19.02.2024 [Certificate of state registration of computer programs No. 024614004, 19.02.2024]. 2024.

13. Rukovodstvo po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoi ehnergii "Rekomenduemye metody otsenki i prognozirovaniya radiatsionnykh posledstviy avarii na ob'ektakh yadernogo toplivnogo tsikla" (RB-134-17) [Safety guide in the use of atomic energy "Recommended methods for assessment and prediction of accident radiological consequences at nuclear fuel cycle facilities" (RB-134-17)]. 2021.

14. NTD 38.220.56-84. (1984). Metody rascheta rasprostraneniya radioaktivnykh veshchestv s AEHS i oblucheniya okruzhayushchego naseleniya. Chast' 1. Prilozheniya. MKHO Interatomehnergo (OPB-84) [Methods for calculating the spread of radioactive substances from nuclear power plants and exposure of the surrounding population. Part 1: Applications. Interatomenergo MHO]. Moscow: Ehnergoatomizdat. [in Russian].

15. Metodicheskie ukazaniya po raschetu radiatsionnoi obstanovki v okruzhayushchei srede i ozhidaemogo oblucheniya naseleniya pri kratkovremennykh vybrosakh radioaktivnykh veshchestv v atmosferu (MPA-98) [Guidelines for calculating the radiation situation in the environment and the expected exposure of the population during short-term releases of radioactive substances into the atmosphere (MPA-98)]. 1998.

16. Leelőssy, Á., Molnár, F., Izsák, F., Havasi, Á., Lagzi, I., & Mészáros, R. (2014). Dispersion modeling of air pollutants in the atmosphere: A review. *Central European Journal of Geosciences*, No. 6 (3), pp. 257–278.

17. Meshalkin V. P., Butusov O. B. (2022). Komp'yuternaya otsenka vozdeistviya na okruzhayushchuyu sredu magistral'nykh truboprovodov: uchebnoe posobie [Computer assessment of the environmental impact of main pipelines: a textbook]. – Moscow: INFRA-M. [in Russian].

18. Hunter, C. (2012). A recommended Pasquill-Gifford stability classification method for safety basis atmospheric dispersion modeling at SRS.

19. Malyavaya G. V. (2014). Vliyanie parametrov sherokhovatosti podstilayushchei poverkhnosti na skorost' vetra [Influence of the roughness parameters of the underlying surface on the wind speed]. *Ecologia și Geografia, Buletinul AȘM. Științele vieții*. Nr. 2 (323), pp. 181–187.

20. Shen C., Shen A., Cui Y., Chen X., Liu Y., Fan Q., Chan P., Tian C., Wang C., Lan J., Gao M., Li X., Wu J. (2022). Spatializing the roughness length of heterogeneous urban underlying surfaces to improve the WRF simulation-part 1: A review of morphological methods and model evaluation. *Atmospheric Environment*, vol. 270, article 118874.

21. МТ 1.2.5.0110-2012. Metodika opredeleniya razmerov zon planirovaniya zashchitnykh meropriyati v sluchae avarii na atomnoi stantsii [Methodology for determining the size of planning zones for protective measures in the event of an accident at a nuclear power plant]. 2012.

22. Maro D. (2013). Transfert des radionucléides sous forme de gaz et d'aérosols dans les environnements complexes: études expérimentales de dispersion atmosphérique et d'échanges aux interfaces, pp. 75–92. ISBN 987-2-9545237-0-5.

23. Gryning S. E., Lyck E. (2002). The Copenhagen tracer experiments: Reporting of measurements. Riso National Laboratory, Forskningscenter Riso. Riso-R No. 1054. 74 p.

24. Bowne N. E., Londergan R. J., Murray D. R., Borenstein H. S. (1983). Overview, results, and conclusions for the EPRI plume model validation and development project: plains site. EPRI EA-3074, Project 1616-1. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute.

Сведения об авторах

Яковлева Оксана Валерьевна, младший научный сотрудник, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1).

Шмельков Юрий Борисович, заместитель начальника отдела по техническим вопросам, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1).

Authors credentials

Yakovleva Oksana Valer'evna, Junior Researcher, National research center “Kurchatov Institute” (bld. 1, Academician Kurchatov sqr., Moscow, 123182), e-mail: Yakovleva_OV@nrcki.ru.

Shmelkov Yury Borisovich, Deputy Head of Department for Technical Issues, National research center “Kurchatov Institute” (bld. 1, Academician Kurchatov sqr., Moscow, 123182), e-mail: Shmelkov_YB@nrcki.ru.

Для цитирования

Яковлева О. В., Шмельков Ю. Б. Сравнительный анализ и валидация методических подходов к гауссовой модели переноса загрязняющих веществ // Ядерная и радиационная безопасность. 2025. № 2 (116). С. 57–71. DOI: 10.26277/SECNRS.2025.116.2.004.

For citation

Yakovleva O. V., Shmelkov Yu. B. (2025). Sravnitel'nyi analiz i validatsiya metodicheskikh podkhodov k gaussovoi modeli perenosa zagryaznyayushchikh veshchestv [Comparative analysis and validation of methodological approaches to the Gaussian model of pollutant transport]. Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' – Nuclear and Radiation Safety Journal, No. 2 (116), pp. 57–71. [in Russian]. DOI: 10.26277/SECNRS.2025.116.2.004.

