



Компьютерное моделирование распространения в атмосфере антропогенных загрязнений

А.М. Флеер, А.С. Сипаков, Ю.И. Хрипков✉

Федеральное государственное бюджетное учреждение «27 Научный центр имени академика Н.Д. Зелинского» Министерства обороны Российской Федерации,
111024, Российская Федерация, г. Москва, проезд Энтузиастов, д. 19
✉ e-mail: 27nc_1@mil.ru

Основные моменты

- Приоритетное значение имеет моделирование регионального переноса опасных веществ, особенно в контексте угрозы применения химического и биологического оружия, что требует принципиально новых вычислительных подходов.

- Выявлен системный кризис в моделировании: традиционные методы исчерпали потенциал для крупномасштабных задач, а переход к компьютерному прогнозированию сдерживается отсутствием специализированного ПО и методологических решений.

Актуальность. Исследование закономерностей атмосферного рассеяния примесей приобретает критическую важность в условиях роста антропогенного загрязнения и потенциальных угроз применения химического и биологического оружия, аварий на РХБОО, совершения терактов (диверсий). Развитие вычислительных технологий открывает новые возможности для моделирования этих процессов.

Цель работы – комплексный анализ современных методов математического моделирования распространения антропогенных загрязнений в атмосфере.

Источниковая база исследования. Научные публикации из Google Scholar и Российской электронной библиотеки, а также авторские разработки.

Метод исследования. Аналитический.

Обсуждение. Катастрофический рост загрязнения, особенно в урбанизированных зонах, требует совершенствования методов прогнозирования. Особую актуальность это приобретает в контексте возможного применения аэрозольных форм химического и биологического оружия. Компьютерное моделирование позволяет решать ранее недоступные задачи прогнозирования.

Выводы. Существующие модели эффективны для локальных расчетов (до нескольких километров), но требуют развития для региональных масштабов и особенно в условиях большого города. Ключевым ограничением является недостаток специализированного ПО. Исследователям необходимо выбирать между адаптацией существующих методик и разработкой новых решений.

Ключевые слова: антропогенные загрязнения; атмосферная диффузия; источник примеси; компьютерное моделирование; математическое моделирование; масштаб распространения загрязнителя; прогнозирование; система дифференциальных уравнений 2-го порядка в частных производных; численные методы

Для цитирования: Флеер А.М., Сипаков А.С., Хрипков Ю.И. Компьютерное моделирование распространения в атмосфере антропогенных загрязнений. Вестник войск РХБ защиты. 2025;9(3):263–278. EDN:vctcvj.
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2025-9-3-263-278>

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Конфликт интересов: нет.

Использование искусственного интеллекта: авторы не использовали.

Финансирование: федеральное государственное бюджетное учреждение «27 Научный центр имени академика Н.Д. Зелинского» Министерства обороны Российской Федерации (27 НЦ МО РФ).

Поступила 12.03.2025 г. После доработки 20.05.2025 г. Принята к публикации 27.09.2025 г.

Computer simulation of the spread of anthropogenic pollutants in the atmosphere

Aleksandr M. Fleer, Aleksandr S. Sipakov, Yurii I. Khripkov✉

27 Scientific Centre Named after Academician N.D. Zelinsky
of the Ministry of Defence of the Russian Federation
Entuziastov Passage, 19, Moscow 111024, Russian Federation
✉ e-mail: 27nc_1@mil.ru

Highlights

- Modeling the regional transport of hazardous substances is of paramount importance, particularly in the context of chemical/biological weapons threats, necessitating fundamentally new computational approaches.
- The analysis revealed a systemic crisis in modeling: traditional methods have exhausted their potential for large-scale tasks, while the transition to computer-based forecasting is hindered by a lack of specialized software and methodological solutions.

Relevance. The study of atmospheric dispersion patterns of pollutants has become critically important amid increasing anthropogenic pollution and potential threats of chemical/biological weapons use, accidents at nuclear chemical and biological hazardous facilities, terrorist attacks, and sabotage. Advances in computational technologies offer new opportunities for modeling these processes.

Purpose of the study is to a comprehensive analysis of modern mathematical modeling methods for atmospheric dispersion of anthropogenic pollutants.

Study base sources. An analytical review of scientific publications from Google Scholar and the Russian Electronic Library, supplemented by the authors' own developments.

Method. Analytical.

Discussion. The catastrophic increase in pollution, especially in urbanized areas, calls for improved forecasting methods. This is particularly relevant in the context of potential aerosol-based chemical/biological weapons use. Computer modeling enables solutions to previously intractable forecasting challenges.

Conclusions. Existing models are effective for local-scale calculations (up to several kilometers) but require development for regional scales and especially in large city conditions. A key limitation is the shortage of specialized software. Researchers must choose between adapting existing methodologies and developing new solutions..

Keywords: anthropogenic pollution; atmospheric diffusion; computer modeling; forecasting; impurity source; mathematical modeling; numerical methods; scale of pollutant spread; system of 2nd order partial differential equations

For citation: Fleer A.M., Sipakov A.S., Khripkov Yu.I. Computer simulation of the spread of anthropogenic pollutants in the atmosphere. *Journal of NBC Protection Corps.* 2025;9(3):263–278. EDN:/vctcvj.
<https://doi.org/10.35825/2587-5728-2025-9-3-263-278>

Financial disclosure: The authors have no financial interests in the submitted materials or methods.

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

AI use: The authors have not resorted to.

Funding: 27 Scientific Centre Named after Academician N.D. Zelinsky of the Ministry of Defence of the Russian Federation (27 SC MD RF)

Received March 12, 2025. Revised May 20, 2025. Accepted September 27, 2025.

Область исследований, появившаяся на стыке гидромеханики, геофизики, метеорологии, некоторых других наук и названная по предложению академика А.С. Монины «Атмосферная диффузия»¹, как самостоятельное направление развивается уже более 100 лет.

¹ Монин А.С. Атмосферная диффузия. *Успехи физических наук.* 1959;67(1):119–30.

Существует мнение, что ее возникновение связано с необходимостью прогнозирования последствий применения химического оружия, особенно широко распространившегося во время Первой мировой войны. С течением времени сфера использования полученных в данном направлении результатов расширялась, приобретая особую значимость вследствие резкого увеличения загрязнения воздуха различными веществами антропогенного происхождения (выбросы промышленных предприятий, объектов энергетики, выхлопные газы автомобильного транспорта, аварийное поступление вредных примесей в атмосферу и т.п.). Однако за весь период проведения исследований в этой области (а ими занимались как с прикладной, так и с теоретической точек зрения) разрабатываемые математические модели до настоящего времени завершеного вида еще не приобрели. Более того, не устранены разногласия при выборе единого подхода к решению возникающих в данном направлении задач. Важными факторами в сложившейся ситуации являются также недостаточное качество количественных результатов проводимых экспериментов, сложность выбора и получения и полного набора исходных данных для верификации рассчитываемых показателей.

Прогноз обстановки по различным сценариям развития ситуаций при возможной реализации современного комплекса угроз, связанных с внесением в окружающую среду различных загрязнителей, необходим и военным, и гражданским специалистам. Получаемая при этом информация используется, например, для решения следующих задач:

- в военной сфере
 - оптимизация структуры, состава и мест дислокации частей и подразделений войск РХБ защиты ВС РФ;
 - выявление масштабов, опасности и продолжительности последствий возможной реализации угроз;
 - принятие решений на осуществление мероприятий РХБ защиты;
 - оценка потребности в материально-технических ресурсах;
- в гражданской сфере [1, 2]
 - принятие эффективных управленческих решений по обеспечению безопасности в различных областях;
 - обеспечение устойчивости объектов в условиях чрезвычайных ситуаций;
 - обоснование мер защиты;
 - выявление приоритетов при распределении финансовых, материальных, людских ресурсов на обеспечение безопасности (заниженная оценка приведет к возрастанию по-

терь, а завышенная – к снижению экономической эффективности производства);

- решение вопросов размещения радиационно, химически и биологически опасных объектов;

- информирование общественности, обеспечения размещением источников опасности;

- при страховании гражданской ответственности владельца опасного объекта за причинение вреда в результате аварии на нем.

Цель исследования – комплексный анализ современных методов математического моделирования распространения антропогенных загрязнений в атмосфере.

Источниковая база исследования. Научные публикации из Google Scholar и Российской электронной библиотеки, а также авторские разработки.

Метод исследования. Аналитический.

Задачи работы:

- определение тенденций развития математического моделирования распространения в атмосфере антропогенных загрязнений;

- исследование практических достижений в области прогнозирования загрязнения атмосферы с использованием современной вычислительной техники.

Основные способы получения аналитических решений

В настоящее время для целей прогнозирования последствий распространения в воздухе паров (газов) и аэрозолей различной природы используются несколько типов уравнений, в разной степени получивших теоретическое и экспериментальное обоснование. При этом убедительных аргументов о предпочтительности того или иного варианта, как правило, не представляется и любой из них может быть обоснованно раскритикован. Ниже рассмотрим основные из существующих подходов к решению этой проблемы.

Широкое распространение на начальных этапах исследования закономерностей распространения различных загрязнителей в атмосфере получило представление о том, что распределение переносимой воздушным потоком примеси вблизи точечного источника в разных направлениях является гауссовским (достигнутые к началу 1950-х гг. в развитие этой гипотезы результаты были обобщены в работе О.Г. Сеттона [3]). В последствии многими специалистами, среди которых особо отметим представителей Института экспериментальной метеорологии, это направление в течение некоторого периода совершенствовало-

лось и в итоге последними была разработана (по их терминологии) «усовершенствованная статистическая модель» [4–6].

Вместе с этим, вследствие, например, недостаточного теоретического обоснования данного направления, получил развитие подход, основанный на решении так называемого полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии. Литературные источники содержат несколько вариантов его записи, но в наиболее общем виде для мгновенного точечного источника монодисперсного аэрозоля оно имеет следующий вид [7, 8]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} - W \frac{\partial C}{\partial z} + \lambda \cdot C = \\ \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_y \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial C}{\partial z} \end{aligned} \quad (1)$$

где C – концентрация примеси;

U, V, W – продольная, поперечная и вертикальная составляющие скорости ветра;

λ – коэффициент, учитывающий разложение примеси;

x, y, z – оси декартовой системы координат;

t – время диффузии;

K_x, K_y, K_z – составляющие коэффициента турбулентной диффузии примеси по соответствующим осям координат.

В научной среде общепризнанным является утверждение, что данное уравнение аналитически не решается. Руководствуясь принципом, что лучше иметь приблизительный прогноз, чем не иметь никакого, исследователи для достижения результата используют различные приемы. Перечислим, например, наиболее часто встречающиеся способы упрощения уравнения (1):

- если рассматривать не мгновенный, а непрерывный источник примеси, то $\partial C / \partial t = 0$ (при обратном переходе после получения решения вместо установившейся концентрации примеси можно рассматривать численно равную ей интегральную концентрацию примеси от мгновенного источника);

- если ось x ориентирована по ветру, то $V=0$;

- подстилающая поверхность ровная и однородная, полностью поглощает или отражает примесь;

- вертикальной составляющей скорости ветра можно пренебречь. В этом случае под W понимают скорость гравитационного оседания (для невесомой примеси она равна 0);

- перенос загрязнителей воздушным потоком по направлению ветра преобладает над турбулентной диффузией вдоль соответствующей оси координат;

$$U \frac{\partial C}{\partial x} \gg \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial C}{\partial x},$$

отсюда следует, что

$$\frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial C}{\partial x} \approx 0;$$

- примесь не разлагается ($\lambda=0$);

- вместо точечного источника рассматривают линейный бесконечной длины, ориентированный перпендикулярно направлению ветра (это позволяет пренебречь рассеянием примеси в поперечном ветру направлении);

- замена реальных профилей скорости ветра и составляющих коэффициента турбулентной диффузии средними величинами.

Перечисленные допущения, как и любые другие, могут использоваться в любом сочетании, наиболее удобном для каждого рассматриваемого случая. Конечным результатом таких действий является получение расчетной формулы, например, для оценки концентрации примеси, создаваемой определенным источником в различных условиях.

Базовой является математическая модель мгновенного точечного источника монодисперсного неоседающего аэрозоля. При этом вариантов аппроксимации реальных источников примеси может быть достаточно много. Пример их классификации представлен в таблице 1.

Кроме указанных в ней признаков, могут быть учтены и некоторые другие – в частности, агрегатное состояние примеси.

Переход от мгновенного точечного источника к другим осуществляется с помощью стандартного приема: представлением любого из них совокупностью мгновенных точечных источников во времени и (или) пространстве и использования принципа суперпозиции, когда суммарная концентрация примеси в точке равна сумме концентраций от отдельных источников [8, 9]. Схема такого перехода от мгновенного точечного источника к стационарному точечному источнику конечного времени действия представлена на рисунке 1, а пояснения к нему – по тексту.

На нем время работы генератора (t_p) разделено на 7 интервалов, продолжительность каждого из которых составляет $\Delta t = t_p / 7$. В середине каждого из этих интервалов происходит срабатывание мгновенного точечного источника мощностью $Q/7$, где Q – общее количество примеси, выбрасываемое источником.

В произвольной точке A на некий заданный момент времени t_3 будет наблюдаться следующая картина: облака аэрозоля, созданные источниками 1, 2, ее уже пройдут; облака, образованные источниками 6, 7, до

Таблица 1 – Классификация источников примеси
Table 1. Classification of Impurity Sources

Признак / Feature	Градации признака / Feature gradations
Размер источника / Source size	Точечный; линейный; плоский; объемный / Point; linear; flat; volumetric
Время действия / Time of action	Мгновенный; конечного времени действия; непрерывный / Instantaneous; finite duration; continuous
Высота образования / Height of formation	Наземный; приземный; высотный / Ground; ground; high-altitude
Природа примеси / Nature of the impurity	Химическая; биологическая; радиоактивная / Chemical; biological; radioactive
Состав примеси / Composition of impurities	Монодисперсный; полидисперсный / Monodisperse; polydisperse
Размер частиц / Particle size	Газ (пар); тонкодисперсный аэрозоль; грубодисперсный аэрозоль / Gas (vapor); fine aerosol; coarse aerosol
Примечание. Таблица составлена авторами. Note. The table was compiled by the authors.	

нее еще не дойдут; концентрация в ней будет равна сумме концентраций, образованных на данный момент времени источниками 3, 4, 5. При увеличении количества мгновенных точечных источников, аппроксимирующих источник конечного времени действия, схема расчета сохранится, а суммирование может быть заменено интегрированием.

Наиболее значимые результаты в направлении, связанном с решением уравнения (1), по нашему мнению, достигнуты специалистами Главной геофизической обсерватории

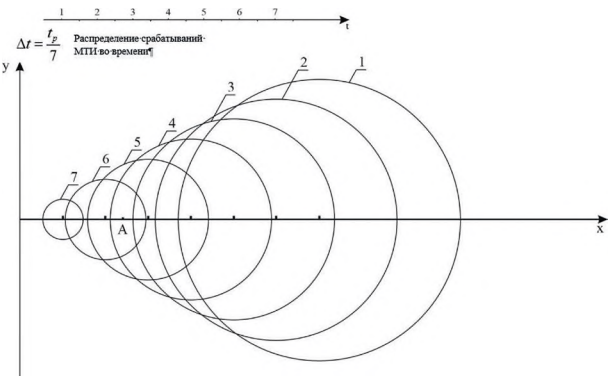


Рисунок 1 – Схема формирования концентрации примеси от источника конечного времени действия при его аппроксимации 7 последовательно срабатывающими мгновенными источниками в момент времени $t_3 > t_p$ (рисунок составлен по данным авторов)
Figure 1: Diagram of pollutant concentration formation from a finite-duration emission source approximated by 7 sequentially activated instantaneous sources at time $t_3 > t_p$ (figure compiled based on the authors' data)

² ОНД-86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. Л.: Гидрометеиздат; 1981. 202 с.

им. А.И. Воейкова [8, 10]. Так, ими разработана методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий, известная как ОНД-86² и до сих пор используемая для проведения официальных расчетов в данной области.

Перечисленные решения, как и любые другие, им подобные, полученные на сравнительно ранних этапах развития исследований рассеяния примесей в атмосфере, не лишены определенных и хорошо известных недостатков. К последним, в частности, относятся:

- применение упомянутых выше допущений, связанных с упрощением исходного уравнения (1), приводящее к системным ошибкам в расчетах;
- игнорирование случайной природы моделируемых процессов;
- использование вместо профилей скорости ветра и составляющих коэффициента турбулентной диффузии их осредненных величин по некоторому слою или значения на высоте источника;
- отсутствие учета поступления в атмосферу вторичного аэрозоля (за счет испарения, ветрового подъема) совместно с первичным;
- усредненный подход к влиянию элементов рельефа, городской застройки;
- необходимость принятия дополнительных гипотез для учета теплового подъема начального аэрозольного облака;
- недостаточно корректный учет взаимодействия примеси с подстилающей поверхностью,
- а также некоторые другие.

Одним из проблемных вопросов при получении и использовании результатов в рассмотренных вариантах является учет взаимодействия примеси с подстилающей поверхностью. Поскольку данная задача имеет чрезвычайно важное теоретическое значение, ее решение выполнил академик А.С. Монин [11]. Введенный им в рассмотрение параметр β характеризует взаимодействие примеси с подстилающей поверхностью (его иногда называют коэффициентом аккомодации). Данный параметр вошел в разработанную А.С. Мониним математическую модель. Она выгодно отличалась от существующих тем, что учитывала взаимодействие примеси с подстилающей поверхностью в широком диапазоне, а не только лишь крайние случаи – ее полное поглощение или отражение. Однако использование параметра β в расчетах было недоступно в силу его теоретического характера. Такая возможность появилась после того, как И.Л. Кароль [12] получил соотношение для его определения. С учетом данного обстоятельства, были разработаны методики проведения расчета концентраций (доз) и других характеристик при рассеивании в турбулентной атмосфере аэрозолей различной природы³. Здесь важно отметить, что в предельных случаях – полное поглощение или отражение примеси подстилающей поверхностью – модель А.С. Монина принимает вид предшествовавших ей уравнений.

Результатом использования перечисленных выше математических моделей (а также других, им подобных) будет расчетное поле приземных концентраций загрязнителя. Схематично оно будет выглядеть так, как это представлено на рисунке 2.

Вместе с этим, для своего практического использования, а также, что крайне важно, проведения на их основе дальнейших аналитических исследований (которые необходимы, в частности, для нужд войск РХБ защиты ВС РФ) разработанные математические модели являлись чересчур громоздкими. С целью упрощения сотрудники кафедры № 8 ВАХЗ [13] модифицировали базовую модель мгновенного точечного источника, заменив сложную функцию распределения примеси по оси абсцисс логарифмически-нормальным законом. Это дало возможность аналитического определения ряда дифференциальных и интегральных показателей распространения и выседания на

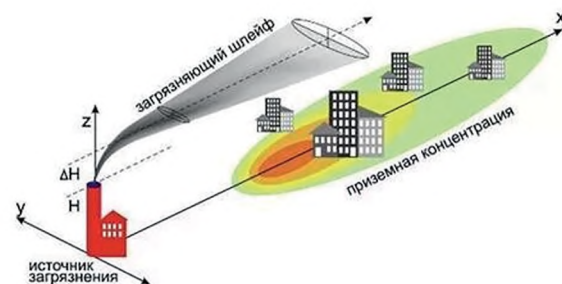


Рисунок 2 – Схематичное изображение поля приземных концентраций, формируемое непрерывным точечным источником (рисунок с сайта. URL: https://yandex.ru/images/search?pos=12&img_url=https%3A%2F%2Fpandia.org%2Ftext%2F78%2F223%2Fimages%2Fimage001_270.jpg&text=численный+расчет+загрязнений+от+точечного+источника+примеси&lr=213&rpt=simage&source=serp; дата обращения: 05.05.2024)

Figure 2: Schematic representation of ground-level concentration field formed by a continuous point source (image source: URL: https://yandex.ru/images/search?pos=12&img_url=https%3A%2F%2Fpandia.org%2Ftext%2F78%2F223%2Fimages%2Fimage001_270.jpg&text=численный+расчет+загрязнений+от+точечного+источника+примеси&lr=213&rpt=simage&source=serp; accessed: 05.05.2024)

подстилающую поверхность аэрозолей различной природы и дисперсности. При этом необходимо пояснить, что упомянутый логарифмически-нормальный закон, а также широко применяемый в рассматриваемых нами моделях нормальный закон (например, для описания продольного, поперечного и вертикального распределений примеси) в данной ситуации не являются собственно законами распределения случайной величины, в частности, концентрации примеси, а формами ее детерминированного описания.

Следует отметить, что модель А.С. Монина и разработанные на ее основе методики для проведения практических расчетов также не лишены ряда недостатков. Часть из них унаследована от более ранних уравнений атмосферной диффузии (например, вследствие непреодолимых до настоящего времени математических трудностей), а другая часть является вновь приобретенными (связанными с предложенным И.Л. Каролем способом расчета параметра β). Основные нарекания связаны с возникающими погрешностями конечных результатов вследствие неизбежных

³ Шукалин П.Н. Методы расчета концентраций (доз) и других характеристик при рассеивании в турбулентной атмосфере аэрозолей различной природы. *Материалы международного аэрозольного симпозиума «Аэрозольные технологии», 21–25 марта 1994 г. М.: НИФХИ; 1994.*

упрощений в процессе математической формулировки решаемой задачи для приведения ее к виду, позволяющему получать аналитические решения с использованием имеющегося математического аппарата.

Численные методы моделирования рассеяния примеси в атмосфере

Для устранения некоторых из перечисленных претензий академик Г.И. Марчук с коллегами в 80-х гг. прошлого века [14, 15] обобщил результаты исследований по поиску нового подхода к решению данной проблемы, основанному на численном решении исходного дифференциального полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии (которая включает в себя атмосферную диффузию). Это стало возможным благодаря развитию электронно-вычислительной техники и появлению высокопроизводительных компьютеров (сегодня мы уже говорим о суперкомпьютерах). Дальнейшее развитие данного подхода представлено, например, в работе [16], выполненной последователями Г.И. Марчука. Вариант его применения в практических приложениях при прогнозировании распространения радиоактивных аэрозолей представлен в работе [17].

Существенным фактором при разработке математической модели и ее параметризации является выбор масштаба ожидаемого распространения загрязнителя. Отсюда вытекает необходимость рассмотрения и учета соответствующих атмосферных процессов – например, из следующих соображений.

Если примесь выброшена в больших количествах и на значительную высоту (извержение вулкана, взрыв сверхкрупного ядерного боеприпаса, глобальная катастрофа), следует ожидать ее макромасштабного распространения (более 1000 км) с участием синоптических процессов.

При рассмотрении чрезвычайных ситуаций регионального масштаба – мезомасштабных (от 10 до 1000 км), кроме синоптических процессов, необходимо учитывать влияние подстилающей поверхности (рельеф, водоемы, растительность, городская застройка). Другими словами, необходим учет метеорологических величин.

Для местных (микромасштабных) – менее 10 км – аварий и других подобных ситуаций достаточно учитывать процессы, обусловленные влиянием подстилающей поверхности и погоды. При этом очевидно, что каждому из перечисленных выше масштабов рассматриваемого процесса можно поставить в соответствие его продолжительность – тогда в первом случае можно говорить о не-

делях, во втором – о сутках, в третьем – о часах. Отметим, что у разных авторов количественные критерии качественной градации масштабов распространения примеси (соответственно, и продолжительности) могут несколько отличаться.

При математическом моделировании микромасштабных процессов без особой погрешности для точности расчетов можно принять, что они протекают в пределах одной воздушной массы. В этом случае появляется основание считать, например, направление и скорость ветра (как и другие метеорологические величины, учитываемые при расчетах) постоянными на всем протяжении распространения облака примеси. Подстилающую поверхность на этой территории можно принять однородной. Другие варианты предполагают необходимость учитывать и вертикальную, и горизонтальную неоднородность атмосферы (например, при переходе примеси из одной воздушной массы в другую существенно изменяются метеорологические величины и их градиенты, влияющие на перенос и турбулентную диффузию загрязнителя), возможное вымывание аэрозоля из атмосферы осадками, наличие или отсутствие инсоляции, некоторые другие факторы. Здесь же отметим, что все перечисленные выше математические модели разработаны именно для микромасштабных процессов.

Практические решения задач по математическому моделированию распространения примеси от различных источников тем или иным способом должны учитывать, что в начальном аэрозольном облаке могут присутствовать частицы широкого диапазона размеров (полидисперсная примесь) – как, например, при ядерном взрыве. Однако со временем самые крупные из них выседают на подстилающую поверхность под действием силы тяжести и в воздухе остается так называемая неоседающая примесь (частицы размером до 5–10 мкм). Одновременно необходимо принять во внимание, что в процессе витания по тем или иным причинам находящиеся в воздухе вещества могут распадаться, вступать в химические реакции (например, с атмосферной влагой), конденсироваться, коагулировать, испаряться. Это особенно заметно при мезо- и макромасштабных процессах.

В зависимости от конечной цели прогнозирования, математическое моделирование процесса распространения примеси от заданного источника может быть направлено на:

– сравнение создаваемой источником максимальной концентрации загрязнителя с предельно допустимой;

- оценку показателей масштабов, опасности и продолжительности заражения (определение пространственно-временных границ созданной в результате реализации угрозы опасности);
- сравнение между собой по заданному критерию нескольких чрезвычайных ситуаций и выбор из них, например, наиболее опасной, масштабной или продолжительной;
- получение исходных данных для проведения специальной обработки местности, вооружения и военной техники; РХБ разведки; разработки средств индивидуальной и коллективной защиты.

В рамках каждой из перечисленных задач должны быть рассчитаны свои показатели (или комплексы показателей), которые в том или ином виде будут использованы в практической работе – как это делается, например, при оценке влияния загрязнения на здоровье населения [18].

Компьютеризация процесса моделирования распространения в атмосфере антропогенных загрязнений является требованием времени и, несомненно, содержит в себе ряд очевидных достоинств. Наиболее простым вариантом реализации данного подхода в рамках микромасштабного процесса, по нашему мнению, является следующий. Выбирается из существующих или разрабатывается собственная аналитическая модель источника примеси и на ее основе составляется компьютерная программа для расчета необходимого набора показателей. Возможно использование дополнительных функций – таких как учет с помощью введения соответствующих поправок влияния рельефа,

городской застройки, осадков, наличия приподнятой инверсии. В качестве подпрограмм при необходимости могут быть использованы различные программные продукты – например, для расчетов термодинамических параметров атмосферных химических реакций. Такой вариант был реализован, например, С.А. Чернявским⁴. Для графического представления распространения примесей в атмосфере, привязанного к конкретной местности (так называемые геоинформационные системы), используют стандартные или специализированные компьютерные программы. В ряде случаев, при необходимости, такая операция может быть выполнена вручную.

Вместе с этим, аналитические и численные способы определения концентрации примеси имеют свои как преимущества, так и недостатки – в обобщенном виде они представлены в таблице 2.

Анализ материалов таблицы 2 показывает, что численные методы расчета концентрации загрязнителей позволяют существенно расширить область проводимых исследований. Это выражается в возможности получения результатов при переходе примеси из одной воздушной массы в другую, учете влияния некоторых ранее игнорируемых (или учитываемых посредством грубых приближений) факторов. При этом они требуют определенных затрат.

Первый шаг в использовании численных методов очевиден – исходные данные для решения задачи и параметры остаются прежними, задаются начальные и граничные условия и осуществляется процесс решения

Таблица 2 – Преимущества и недостатки рассматриваемых способов определения концентрации примеси
Table 2. Advantages and limitations of impurity concentration determination methods

Критерий / Criterion	Способ определения концентрации примеси / Method for Determining Impurity Concentration	
	Аналитический / Analytical numerical	Численный / Numerical
Преимущества / Advantages	- наглядность полученных решений / clarity of the obtained solutions; - простота расчетов и отсутствие потребности в сложной вычислительной технике / simplicity of calculations and no need for complex computing equipment; - возможность последующего дифференцирования и интегрирования полученных уравнений / possibility of subsequent differentiation and integration of the obtained equations	- уменьшение системной ошибки в расчетах / reduction of system error in calculations; - учет параметров и процессов, которые из упрощенных аналитических решений были исключены / taking into account parameters and processes that were excluded from simplified analytical solutions; - получение результата в областях, где аналитическое решение невозможно / obtaining results in areas where analytical solutions are impossible

⁴ Чернявский С.А. Исследование трансформации химических примесей в атмосфере и оценка экологического риска как условие повышения информативности системы мониторинга. Дис. ... канд. техн. наук. М.; 2015. 136 с.

Продолжение таблицы 2

Критерий / Criterion	Способ определения концентрации примеси / Method for Determining Impurity Concentration	
	Аналитический / Analytical numerical	Численный / Numerical
Недостатки / Disadvantages	– невозможность получения точного решения (для мезо- и макромасштабных процессов) и приближенного / impossibility of obtaining an exact solution (for meso- and macro-scale processes) even an approximate one; – трудность учета неоднородности подстилающей поверхности (в том числе городской застройки) / difficulty in accounting for the heterogeneity of the underlying surface (including urban development); – ограниченная область применения (определяется набором упрощений и допущений, принятых в процессе получения решения) / limited scope of application (determined by the set of simplifications and assumptions made in the solution process)	– особые требования к вычислительной технике / special requirements for computing hardware; – необходимость постоянного совершенствования (обновления) вычислительной техники и программного обеспечения / need for continuous improvement (upgrading) of computing hardware and software; – необходимость структурной перестройки задействованных подразделений и учреждений / necessity for structural reorganization of involved departments and institutions; – повышение финансовых затрат / increased financial costs
Примечание. Таблица составлена авторами. Note. The table was compiled by the authors.		

исходного уравнения. Отметим, что численные методы решения такого рода задач начали разрабатываться еще в середине прошлого века, постоянно развиваясь и совершенствуясь. Однако неизменным остается то, что вначале осуществляется так называемая дискретизация задачи – разбиение пространства и времени на ячейки и интервалы. Здесь имеется закономерность: чем меньше элементарный участок, тем больше точность расчетов, но и одновременно растет затрачиваемое машинное время. Это – общая тенденция, но для современных, в том числе и персональных, компьютеров время проведения большинства расчетов для процессов местного масштаба достаточно мало.

Следующий шаг – рассмотрение переноса и турбулентной диффузии примеси совместно с изменением метеорологических величин и рассчитываемых на их основе параметров во времени и пространстве. При проведении расчетов, в зависимости от поставленной задачи, могут быть использованы метеорологические условия – текущие или прогнозируемые, осредненные за некоторый период времени, благоприятные, неблагоприятные или какие-либо другие. При таком подходе рассмотрения только лишь выражения (1) оказывается недостаточно и требуется дополнительное привлечение комплекса основных дифференциальных уравнений гидро- и газодинамики потоков: неразрывности, сохранения импульса и энергии. Зачастую этого также не хватает и специалисты вводят учет дополнительных процессов, происходящих в

реальных условиях – таких как фазовые переходы диффундирующей примеси, химические реакции и некоторые другие. Другими словами, рассмотрению подлежит не отдельное дифференциальное уравнение 2-го порядка в частных производных, а система уравнений, которая в зависимости от конкретной задачи может быть представлена по-разному.

Численные методы решения таких систем также постоянно совершенствуются. При этом вводимые новшества направлены на улучшение существующих и разработку новых алгоритмов действий с учетом непрерывного роста возможностей вычислительной техники. В качестве примера отдельно можно выделить параллельные компьютерные технологии, когда в расчетах одновременно участвуют несколько ЭВМ.

Личные предпочтения авторов, их финансовые возможности, используемая вычислительная техника, существование различных методов решения систем уравнений, стремление повысить точность расчетов и сократить их время привели к тому, что в настоящее время существует большое число программных продуктов для решения такого класса задач [19–27] и других. При этом, разумеется, прогноз погоды имеет не только вспомогательное, но и самостоятельное значение [28–30]. Упростить получение конечного результата помогает рассмотрение источника примеси (группы источников) в конкретных топографических, климатических и метеорологических условиях. Одновременно разработчики по большей части предусматри-

вают возможность интегрировать в свои комплексы различные дополнительные программы, разработанные в том числе и другими специалистами. Пример численного расчета изолиний концентрации сероводорода при аварийных выбросах из разрывов трубопроводов, заимствованный из работы [31], представлен на рисунке 3.

Необходимо отметить, что свои особенности имеет исследование распространения примеси в условиях города. Это конкретный рельеф местности, наличие так называемого «острова тепла», особого микроклимата города, зачастую уникальная конфигурация застройки и многие другие. Особого внимания требуют к себе рассматриваемые в этих условиях источники примеси. Так, при оценке общего качества атмосферного воздуха необходимо учитывать все основные варианты поступления в него загрязнений, к которым могут быть отнесены генерация вредных веществ трубами промышленных предприятий и объектов энергетики (при моделировании описываются непрерывными точечными источниками), автомобильным транспортом, движущимся по улицам города (непрерывные линейные источники), промышленными площадками (непрерывные плоские источники), любые другие, актуальные в рассматриваемой конкретной ситуации. Однако, если изучению подлежит отдельный аварийный выброс особо опасного загрязнителя или другая подобная чрезвычайная ситуация, такой источник может быть исследован обособленно. В связи с указанными обстоятельствами, специалисты зачастую решают данную задачу как самостоятельную. Примером здесь может служить работа [32], где

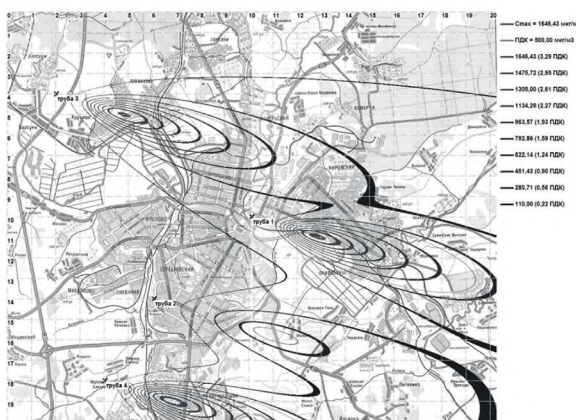


Рисунок 3 – Пример расчета полей концентраций для точечных источников (рисунок адаптирован из [31])
Figure 3: Example of concentration field calculations for point sources (figure adapted from [31])

описана разработанная авторами программа математического моделирования возможного распространения аэрозольных частиц, содержащих вирус SARS-CoV-2, в атмосфере вокруг госпиталей с учетом различных метеорологических условий, сложного рельефа местности, городской застройки различной этажности, лесных массивов, водоемов, изменяющихся метеорологических условий и множества других факторов. Некоторые варианты расчетов по ней представлены на рисунке 4.

Наибольший практический интерес, однако, представляют собой задачи, связанные с мезомасштабным переносом формируемой многими источниками примеси. Сюда, например, относится прогнозирование загрязнения атмосферы в крупном городе и окружающей его территории. Именно там проживает основная часть населения многих развитых стран и чье здоровье может подвергаться опасности. Так, например, в декабре 1930 г. в долине реки Маас (Бельгия), где концентрированно располагались предприятия тяжелой промышленности, как результат стечения нескольких обстоятельств было отмечено сильное трехдневное задымление, в продолжение которого сотни людей заболели, а 60 человек скончались (норма смертности была превышена более чем в 10 раз) [33]. Подобные случаи были отмечены и в других районах: Манчестер и Солфорд (Англия, 1931 г.), Донор (США, 1948 г.) – этот список можно было бы продолжить. Детальные исследования показали, что почти все из тех, кто умер неожиданно, страдали от бронхита, сердечных и некоторых других заболеваний.

Очевидно, что причины роста загрязненности окружающей среды кроются в создании человечеством на Земле индустриальной цивилизации. Это выражается через непрерывный рост потребления энергии, развитие промышленности, распространение автомобильного транспорта. Особенно важно то, что вся эта деятельность осуществляется непосредственно в местах компактного проживания большого количества людей или возле них. При этом загрязнение среды обитания человека в XXI в. приобретает качественно новый характер, продолжая расти количественно [34, 35]. Так, если в начале XX в. промышленность использовала 19 химических элементов, то в середине того же века – около 50, а в 1970-х гг. – практически все из известных на тот момент времени. При этом зачастую они применялись не только по отдельности, но и в составе различных химических и биохимических соединений,

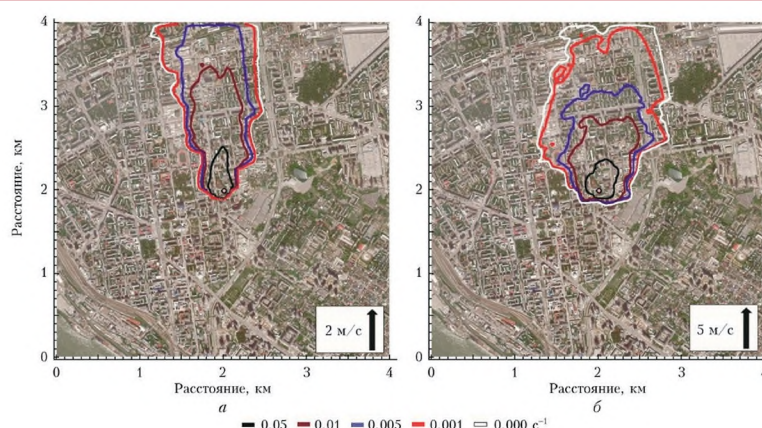


Рисунок 4 – Изолинии концентрации вируса 10^{-3} усл. ед. для коэффициентов скорости инактивации: 0,000; 0,001; 0,005; 0,010 и 0,050 s^{-1} , южное направление ветра (день): а – скорость ветра 2 м/с (январь); б – 5 м/с (июль) (по данным работы [32])

Figure 4: Virus concentration isolines (10^{-3} conv. units) for different inactivation rate coefficients: 0.000, 0.001, 0.005, 0.010, and 0.050 s^{-1} , southern wind direction (daytime conditions): а, wind speed 2 m/s (January); б, wind speed 5 m/s (July) (according to [32])

количество которых учесть практически невозможно.

Решения задачи мезомасштабного переноса примеси применительно к своим странам, а то и к конкретным городам (регионам) выполнены многими коллективами авторов [19–22, 36]. Как правило, переход к рассмотрению переноса примеси в региональном масштабе осуществляется путем совместного использования численного прогноза погоды (как исходных данных для количественного описания качества атмосферного воздуха) и математических моделей распространения загрязнителей от их источников. По мнению авторов работы [37], некоторое время назад использование таких моделей специалистами нашей страны в научной и практической работе по определенным объективным причинам имело ограниченный характер. Однако работа в этом направлении была налажена и, например, в Томском университете и Институте оптики атмосферы им. В.В. Зуева СО РАН разработана и активно развивается мезомасштабная негидростатическая модель высокого разрешения (0,5–1 км) краткосрочного прогноза погоды и качества атмосферного воздуха над крупным городом, адаптированная для г. Томска, TSUNM3 (Tomsk State University Nonhydrostatical Mesoscale Meteorological Model) [37]. Она позволяет прогнозировать, в частности, составляющие скорости ветра и температурно-влажностные характеристики в тропосфере (до 10000 м) для площади 100×100 км (горизонтальный шаг сетки $\Delta x = \Delta y = 1$ км) на 24 ч. Задание начальных условий модели проводится на основе результатов численного прогноза опе-

ративной глобальной модели ПЛАВ Гидрометцентра РФ [38].

Особого рассмотрения требуют задачи, связанные с глобальным атмосферным переносом загрязнений. Их решение необходимо, например, для оценки развития ситуаций при выбросе большого количества примеси (как правило, опасной) источником, находящимся практически в любой точке земного шара. Именно такой, в частности, была авария на японской АЭС «Фукусима-1» [39]. Следует отметить, что исследования в этой области дали возможность предсказать последствие массового применения ядерного оружия, получившего в литературе название «ядерная зима». Принято считать, что именно полученные этим способом результаты позволили политикам понять, что победителя в неограниченной ядерной войне не будет. При этом очевидно, что, несмотря на важность получаемых таким образом результатов, использование соответствующих моделей будет гораздо менее интенсивным, чем мезомасштабных. Ведь ситуации, требующие применения последних, наблюдаются гораздо чаще.

В научной литературе периодически появляются обобщения достижений по данному направлению применительно к рассматриваемому авторами моменту времени (см., например, работы [15, 16, 37, 40]). В частности, специалисты отмечают, что лишь немногие страны развивают собственные технологии моделирования глобальной атмосферы – к ним относятся США, Великобритания, Канада, Франция, Япония, Германия, Австралия, Китай и Россия. При этом выявлено как расширение, так и сокращение данного

списка. Программные продукты такого рода получили у специалистов особое наименование – Computational fluid dynamics (CFD) или вычислительная гидродинамика. Они относятся к отдельно рассматриваемому классу моделей. Это совокупность физических, математических или численных методов, предназначенных для компьютерного моделирования процессов, происходящих в жидкой или газообразной среде (атмосфера, океан). Их использование возможно только при наличии суперкомпьютера и, несмотря на это, требует значительных временных ресурсов.

Для полноты картины в рассматриваемой области считаем необходимым отметить тот факт, что при проведении натурных испытаний в области рассеяния примесей в атмосфере результаты однотипных экспериментов могут существенно различаться между собой, будучи полученными в, казалось бы, практически одинаковых условиях. Это связано с тем, что по своей природе исследуемые величины – как определяемые в ходе полигонных работ, так и рассчитываемые на их основе – являются случайными. Следовательно, для их описания необходимо использовать соответствующий математический аппарат. Поисковые работы такого рода проводятся в различных научно-исследовательских организациях [41–45]. Отметим, что первые научные материалы по данному направлению появились еще в 1950-х гг. [46–49]. Вместе с этим, следует признать, что полученные в этой области результаты по различным причинам еще не доведены до рабочих методик, которые нашли бы свое применение в практических приложениях.

Заключение

Анализ приведенных материалов позволяет заключить, что к настоящему времени специалистами разработано большое количество различающихся между собой по многим признакам математических моделей распространения примесей в атмосфере. Определенные результаты в данном направлении достигнуты как в нашей стране, так и за рубежом. Если некоторое время назад это были так называемые «гауссовские модели»

или аналитические решения исходного дифференциального уравнения 2-го порядка в частных производных, полученные с использованием некоторого набора приближений и допущений, то на сегодняшний день сюда добавилось значительное число программных продуктов, основанных на численных методах расчета концентрации загрязнителей от различных источников. Последние позволяют оценивать последствия не только локального, но и регионального или глобального распространения загрязнителей в окружающей среде. Выбор оптимального для проведения вычислений варианта осуществляется, исходя из предъявляемых требований к конечному результату и имеющихся возможностей для его получения. Наиболее перспективными для практической реализации, несомненно, являются численные методы расчета.

В зависимости от поставленной цели исследования распространения в атмосфере антропогенных загрязнений, специалисты изучают, по необходимости, микро-, мезо- и макромасштабные процессы. Наиболее изученными являются задачи, связанные с локальными выбросами загрязнителей. Расчету подлежат как дифференциальные, так и интегральные характеристики полей концентраций (интегральных концентраций) различных примесей, формируемых как единичными, так и множественными источниками. При этом наибольший практический интерес у специалистов вызывают ситуации, когда перенос опасных для людей газов и аэрозолей осуществляется на региональном уровне. Здесь в качестве основного варианта рассматривается большой город и его окрестности.

Таким образом, для решения практических задач в области прогнозирования последствий распространения в атмосфере загрязнений при организации РХБ защиты войск ВС РФ и населения необходимо определить цель проводимых исследований, выбрать или разработать соответствующую математическую модель и ее реализацию на ЭВМ, установить порядок получения исходных данных для ее использования и обеспечить наличие необходимой компьютерной техники.

Ограничения исследования / Limitations of the study

Данная работа имеет ряд ограничений, а именно: 1) в работе были использованы источники, доступные через базы данных Google Scholar, Российской электронной библиотеки. Это может привести к смещению выборки, поскольку соответствующие исследования из других баз данных или на других языках не были включены; 2) выводы основаны на собственных материалах авторов. / This research has several inherent limitations that should be acknowledged: (1) the analysis relied exclusively on publications available through: Google

Scholar database; Russian Electronic Library collections; (2) this may introduce selection bias as relevant studies from other databases or in other languages were not included.

Список источников / References

1. Ляшенко НВ, Лепихова ВА, Вяльцев АВ. *Безопасность в чрезвычайных ситуациях, вызванных авариями с АХОВ*. Новочеркасск: Лик; 2021. 112 с.
Lyashenko NV, Lepikhova VA, Vyaltsev AV. *Safety in emergency situations caused by accidents with AHS*. Novocherkassk: Lik; 2021. 112 p. (in Russian).
2. Нафикова ЭВ, Елизарьев АН, Мусина СА, Терпигорева ИВ. *Обеспечение безопасности населения и территорий при авариях на химически опасных объектах*. Уфа: РИК УГАТУ; 2020. 126 с.
Nafikova EV, Elizariev AN, Musina SA, Terpigoreva IV. *Ensuring the safety of the population and territories in case of accidents at chemically hazardous facilities*. Ufa: RIK UGATU; 2020. 126 p. (in Russian).
3. Сеттон ОГ. *Микрометеорология*. Л.: Гидрометеиздат; 1958. 355 с.
Sutton OG. *Micrometeorology*. New York: McGraw-Hill; 1953.
4. Бызова НЛ. *Методическое пособие по расчету рассеяния примесей в пограничном слое атмосферы по метеорологическим данным*. М.: Гидрометеиздат; 1973. 46 с.
Byzova NL. *Methodological guide for calculating the scattering of impurities in the boundary layer of the atmosphere based on meteorological data*. Moscow: Gidrometeoizdat; 1973. 46 p. (in Russian).
5. Бызова НЛ. *Рассеяние примеси в пограничном слое атмосферы*. М.: Гидрометеиздат; 1974. 191 с.
Byzova NL. *Scattering of impurities in the boundary layer of the atmosphere*. Moscow: Gidrometeoizdat; 1974. 191 p. (in Russian).
6. Бызова НЛ, Гаргер ЕК, Иванов ВН. *Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси*. Л.: Гидрометеиздат; 1991. 280 с.
Byzova NL, Garger EK, Ivanov VN. *Experimental studies of atmospheric diffusion and calculations of impurity scattering*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1991. 280 p. (in Russian).
7. Монин АС, Яглом АМ. *Статистическая гидромеханика. Ч. 1*. М.: Наука; 1965. 638 с.
Monin AS, Yaglom AM. *Statistical hydromechanics. Part 1*. Moscow: Nauka; 1965. 638 p. (in Russian).
8. Берлянд МЕ. *Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы*. Л.: Гидрометеиздат; 1975. 448 с.
Berland ME. *Modern problems of atmospheric diffusion and atmospheric pollution*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1975. 448 p. (in Russian).
9. Вителис ВМ., Каинов Ю.Н., Киреев В.А. *Методы расчетного определения ущерба при применении вероятным противником химического и зажигательного оружия. Часть 2. Методы оценки характеристик поражающего действия химических боеприпасов и приборов вероятного противника*. М.: ВАХЗ; 1985. 135 с.
Witelis VM, Kainov YuN, Kireev VA. *Methods for calculating damage caused by the use of chemical and incendiary weapons by a likely enemy. Part 2. Methods for assessing the characteristics of the damaging effect of chemical munitions and devices of a likely enemy*. Moscow: VACHZ; 1985. 135 p. (in Russian).
10. Берлянд МЕ. *Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы*. Л.: Гидрометеиздат; 1985. 272 с.
Berland ME. *Forecast and regulation of atmospheric pollution*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1985. 272 p. (in Russian).
11. Монин АС. Полуэмпирическая теория турбулентной диффузии. *Труды Геофизического института АН СССР*. 1956;(33):3–47.
Monin AS. Semi-empirical theory of turbulent diffusion. *Proceedings of the Geophysical Institute of the USSR Academy of Sciences*. 1956;(33):3–47 (in Russian).
12. Кароль ИЛ. О влиянии приземного слоя атмосферы на распространение тяжелой однородной примеси из высотного мгновенного точечного источника. *Изв АН СССР, сер. геофиз.* 1959;(7):1079–84.
Karol IL. On the influence of the surface layer of the atmosphere on the spread of a heavy homogeneous admixture from a high-altitude instantaneous point source. *Izvestiya AN SSSR, ser. geofiz.* 1959;(7):1079–84 (in Russian).
13. Гагарин МВ, Кармишин АМ, Кравченко ОП. *Теория поражающего действия ОМП*. М.: ВАХЗ; 1995. 152 с.
Gagarin MV, Karmishin AM, Kravchenko OP. *Theory of the destructive effect of weapons of mass destruction*. Moscow: VACHZ; 1995. 152 p. (in Russian).
14. Марчук ГИ. *Математическое моделирование в проблеме окружающей среды*. М.: Наука; 1982. 320 с.
Marchuk GI. *Mathematical modeling in the problem of the environment*. Moscow: Nauka; 1982. 320 p. (in Russian).

15. Пененко ВВ, Алоян АЕ. *Модели и методы для задач охраны окружающей среды*. Новосибирск: Наука; 1985. 256 с.
- Penenko VV, Aloyan AE. *Models and methods for environmental protection tasks*. Novosibirsk: Nauka; 1985. 256 p. (in Russian).
16. Алоян АЕ. *Моделирование динамики и кинетики газовых примесей и аэрозолей в атмосфере*. М.: Наука; 2008. 415 с.
- Aloyan AE. *Modeling of dynamics and kinetics of gas impurities and aerosols in the atmosphere*. Moscow: Nauka; 2008. 415 p. (in Russian).
17. Лоборев ВМ, ред. Т. 1. Развитие взрыва. В: Анисимов АВ, ред. *Физика ядерного взрыва. В 5 т.* М.: Физматлит; 2009. 832 с.
- Loborev VM, Vol. 1. The development of the explosion, Eds. In: Anisimov AV, Ed. *The physics of a nuclear explosion. In 5 vol.* Moscow: Fizmatlit; 2009. 832 p. (in Russian).
18. Игнатьева ЛП, Потапова МО, Чирцова МВ и др. *Эколого-гигиенические критерии оценки загрязнения атмосферного воздуха*. Иркутск: ИГМУ; 2022. 79 с.
- Ignatieva LP, Potapova MO, Chirtsova MV, et al. *Ecological and hygienic criteria for assessing atmospheric air pollution*. Irkutsk: IGMU; 2022. 79 p. (in Russian).
19. Амосов ПВ, Бакланов АА, Макаров ДВ, Маслобоев ВА. Численное моделирование загрязнения атмосферы в подходах случайного выбора дискретных участков пыления и поинтервального распределения размера пыли. *Вестник МГТУ*. 2022;25(1):61–73.
<https://doi.org/10.21443/1560-9278-2022-25-1-61-73>
- Amosov PV, Baklanov AA, Makarov DV, Masloboev VA. 2022. Numerical modeling of atmospheric pollution in the approaches of random selection of discrete dusting sites and interval distribution of dust size. *Vestnik of MSTU*. 2022;25(1):61–73 (in Russian).
<https://doi.org/10.21443/1560-9278-2022-25-1-61-73>
20. Добровольская Л.А., Ключев Д.С. Прогнозирование степени загрязнения атмосферного воздуха в промышленном регионе. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2018;(36):216–23.
<https://doi.org/10.31498/2225-6733.36.2018.142552>
- Dobrovolskaya LO, Kluev DS. Forecasting the degree of air pollution in the industrial region. *Bulletin of Priazovsky State Technical University. Ser. Techn Science*. 2018;(36):216–23 (in Russian).
<https://doi.org/10.31498/2225-6733.36.2018.142552>
21. Шалыгина ИЮ, Кузнецова ИН, Нахаев МИ, Коновалов ИБ, Захарова ПИ. Прогнозирование метеорологических условий и загрязнения воздуха с применением данных численной модели атмосферы и химической транспортной модели. *Труды Гидрометцентра России*. 2017;365:81–93.
- Shalygina IYu, Kuznetsova IN, Nakhaev MI, Konovalov IB, Zaharova PV. Forecasting of weather conditions and air pollution with application of data of the numerical model of the atmosphere and a chemical transport model. *Proceedings of the Hydrometcentre of Russia*. 2017;365:81–93 (in Russian).
22. Айдосов А, Айдосов ГА, Заурбеков НС. *Модельная оценка экологической обстановки компонентов природной среды с учетом атмосферных процессов*. М.: Академия Естествознания; 2018. 342 с.
- Aidosov A, Aidosov GA, Zaurbekov NS. *Model assessment of the ecological situation of the components of the natural environment taking into account atmospheric processes*. Moscow: Akademia Estestvoznania; 2018. 342 c. (in Russian).
23. Семакин АН. Оценка масштабируемости программы расчета движения примесей в атмосфере средствами симулятора gem5. *Компьютерные исследования и моделирование*. 2020;12(4):773–94.
<https://doi.org/10.20537/2076-7633-2020-12-4-773-794>
- Semakin AN. Evaluation of the scalability property of the program for the simulation of atmospheric chemical transport by means of the simulator gem5. *Computer Research and Modeling*. 2020;12(4):773–94 (in Russian).
<https://doi.org/10.20537/2076-7633-2020-12-4-773-794>
24. Powers JG, Klemp JB, Skamarock WC, Davis C, Dudhia J, Gill DO, et al. The Weather Research and Forecasting model: Overview, system efforts, and future directions. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2017;98(8):1717–37.
25. Sportisse B. *Fundamentals in air pollution: from processes to modelling*. Springer; 2010. 299 p.
26. Thakur P, Ballard S, Nelson R. Radioactive fallout in the United States due to the Fukushima nuclear plant accident. *Journal of Environmental Monitoring*. 2012;14(5):1317–24.
27. Sandberg A, Nikoleris N, Carison TE, Hagersten E. *Kaxiras detailed architectural simulation at near-native speed workload characterization*. 2015. P. 183–92.
28. Розинкина ИА, Ривин ГС, Багров АН, Блинов ДВ, Быков ФЛ, Васькова ДВ и др. Конфигурация COSMO-Ru2By модели COSMO: успешность и методология оценки численных прогнозов β- и γ-мезомасштабных атмосферных процессов. *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2023;(2):6–34.

- Rozinkina IA, Rivin GS, Bagrov AN, Blinov DV, Bykov FL, Vaskova DV, et al. The COSMO-Ru2By configuration of the COSMO model: skill and methodology for estimating of the forecasts of β - and γ -mesoscale processes. *Hydrometeorological research and forecasts*. 2023;(2):6–34 (in Russian).
29. Старченко АВ, Беликов ДА, Вражнов ДА, Есаулов АО. Применение мезомасштабных моделей MM5 и WRF к исследованию атмосферных процессов. *Оптика атмосферы и океана*. 2005;18(5-6):455–61.
- Starchenko A.V., Belikov D.A., Vrazhnov D.A., Yesaulov A.O. Application of MM5 and WRF mesoscale models to research of regional atmospheric processes. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2005;18(5-6):455–61 (in Russian).
30. Danabasoglu G, Lamarque J-F, Bacmeister J, Bailey D, Duvivier A, Edwards J, et al. The Community Earth System Model version 2 (CESM2). *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2020;12(2). <https://doi.org/10.1029/2019MS001916>
31. Кантюков РА, Мешалкин ВП, Панарин ВМ, Горюноква АА, Гимранов РК, Рыженков ИВ, Кантюков РР. Компьютерное моделирование загрязнения атмосферы при разрыве газопроводов. *Нефтегазовое дело*. 2015;13(1):90–6. EDN: VEDWKJ.
- Kantyukov RA, Meshalkin VP, Panarin VM, Goryunkova AA, Gimranov RK Rizhenkov IV, Kantyukov RR. Computer simulation of pollution in atmosphere ruptured pipeline. *Petroleum engineering*. 2015;13(1):90–6. EDN: VEDWKJ (in Russian).
32. Лаптева НА, Сафатов АС, Агафонов АП. Моделирование распространения аэрозольных частиц, содержащих вирус SARS-COV-2, вокруг госпиталя. *Оптика атмосферы и океана*. 2023;36(6):443–7. <https://doi.org/10.15372/AOO20230603>
- Lapteva NA, Safatov AS, Agafonov AP. Simulation of the sars-cov-2 virus containing aerosol particles spread around a hospital. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2023;36(6):443–7 (in Russian). <https://doi.org/10.15372/AOO20230603>
33. Уорк К, Уорнер С. Загрязнение воздуха. Источники и контроль. Пер. с англ. Под ред. Е.Н. Тевверовского. М.: Мир; 1980. 544 с.
- Wark K, Warner S. *Air pollution. Sources and controls*. Moscow: Mir; 1980. 544 p. (in Russian).
34. Яблоков АВ. О концепции «популяционного груза» (Обзор). *Гигиена и санитария*. 2015;(6):11–5. EDN: UXZQRD.
- Yablokov AV. On the concept of "population load" (Review). *Hygiene and Sanitation*. 2015;(6):11–5. EDN: UXZQRD (in Russian).
35. Макоско АА, Матешева АВ. Загрязнение атмосферы и качество жизни населения в XXI веке: угрозы и перспективы. М.: Российская академия наук; 2020. 258 с.
- Makosko AA, Matesheva AV. *Atmospheric pollution and the quality of life of the population in the 21 century: threats and prospects*. Moscow: RAS; 2020. 258 p. (in Russian).
36. Бородулин АИ, Десятков БМ, Ярыгин АА. Модель распространения атмосферных примесей в пограничном слое атмосферы. Программа для ЭВМ. 2006. Зарегистрирована Федеральным Институтом промышленной собственности РОСПАТЕНТа. Рег. номер 2007610293. 16.01.2007.
- Borodulin AI, Desyatov BM, Yarygin AA. *A model for the propagation of atmospheric impurities in the boundary layer of the atmosphere*. A computer program. Reg. No 2007610293. 16.01.2007 (in Russian).
37. Старченко АВ, Кижнер ЛИ, Данилкин ЕА и др. Численное моделирование погоды и качества атмосферного воздуха в городах. Томск: Изд-во Том. ун-та; 2022. 138 с.
- Starchenko AV, Kizhner LI, Danilkin EA, et al. *Numerical modeling of weather and atmospheric air quality in cities*. Tomsk: Tomsk University Press; 2022. 138 p. (in Russian).
38. Толстых МА. Система моделирования атмосферы для бесшовного прогноза. М.: Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, 2017. 166 с.
- Tolstykh MA. *Atmospheric modeling system for seamless forecasting*. Moscow: Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation. 2017. 166 p. (in Russian).
39. Арутюнян РВ, Большов ЛА, Боровой АА, Велихов ЕП. Системный анализ причин и последствий аварии на АЭС «Фукусима-1». М.; 2018. 408 с.
- Arutyunyan RV, Bolshov LA, Borovoy AA, Velikhov EP. *System analysis of the causes and consequences of the accident at the "Fukushima-1" nuclear power plant*. Moscow; 2018. 408 p. (in Russian).
40. Бабков ВС, Ткаченко ТЮ. Анализ математических моделей распространения примесей от точечных источников. *Наукові праці ДонНТУ. Серія «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка»*. 2011;(13):147–55.
- Babkov VS, Tkachenko TYu. Analysis of mathematical models of distribution of impurities from point sources. *Scientific works of DonNTU. Series "Computer Science, cybernetics and computer engineering"*. 2011;(13):147–55 (in Russian).
41. Дунский ВФ, Никитин НВ, Соколов МС. Пестицидные аэрозоли. М.: Наука; 1982. 288 с.
- Dunsky VF, Nikitin NV, Sokolov MS. *Pesticide aerosols*. Moscow: Nauka; 1982. 288 p. (in Russian).

42. Бородулин АИ, Майстренко ГМ, Чалдин БМ. *Статистическое описание распространения аэрозолей в атмосфере. Метод и приложения*. Новосибирск: Изд-во Новосибирского университета; 1992. 124 с.
Borodulin A.I., Maistrenko G.M., Chaldin B.M. *Statistical description of aerosol propagation in the atmosphere. Method and applications*. Novosibirsk: Novosibirsk University Press; 1992. 124 p. (in Russian).
43. Бородулин АИ, Десятков БМ. *Моделирование распространения примесей в атмосферном пограничном слое*. Новосибирск: Изд-во Новосибирского университета; 2007. 376 с.
Borodulin A.I., Tens B.M. *Modeling of the propagation of impurities in the atmospheric boundary layer*. Novosibirsk: Novosibirsk University Press; 2007. 376 p. (in Russian).
44. Хрипков ЮИ. *Математическое моделирование в эпидемиологии при аэрозольном механизме передачи инфекции (количественная эпидемиология)*. М.: ВУ РХБЗ; 2003. 274 с.
Khripkov YuI. *Mathematical modeling in epidemiology with the aerosol mechanism of infection transmission (quantitative epidemiology)*. Moscow: VU RChBZ; 2003. 274 p. (in Russian).
45. Семенчин ЕА, Кузякина МВ. *Стохастические методы решения обратных задач в математической модели атмосферной диффузии*. М.: Физматлит; 2012. 176 с.
Semenchin EA, Kuzyakina MV. *Stochastic methods for solving inverse problems in a mathematical model of atmospheric diffusion*. Moscow: Fizmatlit; 2012. 176 p. (in Russian).
46. Csanady GT. Dispersion of particles from elevated sources. Part. I. *Aust J Phus*. 1955(8):545–50.
47. Csanady GT. Dispersion of dust particles from elevated sources. Part. II. *Aust J Phus*. 1957;(10):558–64.
48. Csanady GT. Variance of local concentration fluctuations. *Phys Fluids*. 1967;10(9):76–78.
49. Csanady GT. Turbulent diffusion: elementary statistical theory and atmospheric applications. *Turbulent Diffusion in the Environment. Geophysics and Astrophysics Monographs, v. 3*. Boston (USA): Reidol Publishing Company; 1973. P. 46–81.

Вклад авторов / Authors' contributions

Все авторы подтверждают соответствие своего авторства критериям ICMIE. Наибольший вклад распределен следующим образом: А.М. Флеер – формирование концепции статьи, сбор, анализ и систематизация информации; А.С. Сипаков – критический пересмотр и коррекция рукописи; Ю.И. Хрипков – написание текста; критический пересмотр и коррекция рукописи, доработка рукописи, разработка иллюстративного материала All the authors confirm that they meet the ICMJE criteria for authorship. The most significant contributions were as follows. A.M. Fleer – elaboration of the concept of the paper; collection, analysis and systematization of scientific literature; A.S. Sipakov – critical discussion of the article; Yu.I. Khripkov – writing and editing of the article, critical discussion of the article, preparation of drawings.

Сведения о рецензировании / Peer review information

Статья прошла двустороннее анонимное «слепое» рецензирование двумя рецензентами, специалистами в данной области. Рецензии находятся в редакции журнала и в РИНЦе / The article has been doubleblind peer reviewed by two experts in the respective field. Peer reviews are available from the Editorial Board and from Russian Science Citation Index database.

Об авторах/ Authors

Федеральное государственное бюджетное учреждение «27 Научный центр имени академика Н.Д. Зелинского» Министерства обороны Российской Федерации, 111024, Российская Федерация, г. Москва, проезд Энтузиастов, д. 19.

Хрипков Юрий Иванович. Ведущий научный сотрудник отдела, д-р тех. наук, доцент.

Флеер Александр Михайлович. Начальник отдела.

Сипаков Александр Сергеевич. Зам. начальника отдела, канд. тех. наук, доцент.

Контактная информация для всех авторов: 27nc_l2@mil.ru

Контактное лицо: Хрипков Юрий Иванович; ; 27nc_l2@mil.ru

27 Scientific Centre Named after Academician N.D. Zelinsky of the Ministry of Defence of the Russian Federation. Entuziastov Passage, 19, Moscow 111024, Russian Federation.

Yurii I. Khripkov. Senior researcher. Dr Sci. (Techn.).

Aleksandr M. Fleer. Head of the Department.

Aleksandr S. Sipakov. Deputy head of the department. Cand. Sci. (Techn.).

Contact information for all authors: 27nc_l2@mil.ru

Contact person: Yurii I. Khripkov; 27nc_l2@mil.ru