


РАЗДЕЛ 2. ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Обзорная статья

 УДК 504.3.054, 504.064.36 <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-2-42-64> EDN SNSGBA**Основные математические подходы для оценки процессов рассеяния примеси в атмосферном воздухе****Алсу Валерьевна Семакина**

Удмуртский государственный университет, Ижевск, Россия

alsen13@list.ru

Аннотация. Математическое моделирование, позволяет с теоретической точки зрения объяснить количественные и качественные характеристики состояния атмосферного воздуха, решать диагностические и прогностические задачи, восполнять недостающую информацию о характере рассеяния примеси в атмосферном воздухе. В ходе исследования атмосферных процессов, формировались различные подходы в их оценке и моделировании. Целью данной работы является обзор и анализ существующих подходов к математическому моделированию процессов рассеяния примесей в атмосфере. Для реализации данной цели были сформулированы следующие задачи: выявление классификационных критериев для формирования классификаций математических моделей; анализ существующих подходов к математическому моделированию, в том числе с применением классификационных критериев. В результате проведенного исследования была проведена классификация существующих математических моделей, сделаны выводы о возможности применения математических моделей при оценке процессов рассеяния для разных территорий. Использование моделей на основе аналитического решения уравнения диффузии и гауссовых моделей допустимо только для небольших по площади территорий. В рамках характеристики состояния атмосферного воздуха больших по площади территорий при помощи методов математического моделирования, рекомендуются модели градиентного переноса с учетом химической активности веществ, адаптированные для определения процессов переноса примесей над разными по площади территориями.

Ключевые слова: математическое моделирование, атмосферный воздух, классификация

Для цитирования: Семакина А.В. Основные математические подходы для оценки процессов рассеяния примеси в атмосферном воздухе // Антропогенная трансформация природной среды. 2024. Т. 10. № 2. С. 42-64. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-2-42-64>. EDN SNSGBA.

SECTION 2. POLLUTION

Review Paper

The main mathematical approaches for modelling impurity scattering processes in atmospheric air**Alsu V. Semakina**

Udmurt State University, Izhevsk, Russia

alsen13@list.ru

Abstract. Mathematical modeling allows, from a theoretical point of view, to explain the quantitative and qualitative characteristics of the state of atmospheric air, solve diagnostic and prognostic problems, and fill in the missing information about the nature of the scattering of impurities in atmospheric air. During the study of atmospheric processes, various approaches were formed in their assessment and modeling. The purpose of this work is to review and analyze existing approaches to mathematical modeling of the processes of scattering of impurities in the atmosphere. To achieve this goal, the following tasks were formulated: identification of classification criteria for the formation of classifications of mathematical models; analysis of existing approaches to mathematical modeling, including using classification criteria. As a result of the conducted research, the classification of existing mathematical models was carried out, conclusions were drawn about the possibilities of using mathematical models in assessing scattering processes for different territories. The use of models based on the analytical solution of the diffusion equation and Gaussian models is acceptable only for small areas. Within the framework of characterizing the state of atmospheric air in large areas using mathematical modeling methods, gradient transport models are recommended, taking into account the chemical activity of substances adapted to determine the processes of impurity transfer over territories of different areas.

Keywords: mathematical modeling, atmospheric air, classification

For citation: Semakina, A., 2024. The main mathematical approaches for modelling impurity scattering processes in atmospheric air. *Anthropogenic Transformation of Nature*, 10(2), pp. 43-65. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-2-42-64>. EDN SNSGBA. (in Russian)

Математическое моделирование, позволяет с теоретической точки зрения объяснить количественные и качественные характеристики состояния атмосферного воздуха, решать диагностические и прогностические задачи, восполнять недостающую информацию о характере рассеяния примеси в атмосферном воздухе [85]. В ходе исследования атмосферных процессов, формировались различные подходы в их оценке и моделировании. Основы атмосферной диффузии примеси были сформулированы Дж. Тейлором, Фридрихом, Келлером. Теоретическое обоснование результатов наблюдений процессов турбулентной диффузии в пограничных слоях атмосферы содержится в работах А.С. Мониной, А.М. Обухова, А.М. Яглома [67-70, 77], М.Е. Берлянда [19, 20], Д.Л. Лайхмана [55], С.С. Зилитинкевича [45], Р.В. Озмидова [70]. Одномерная дифференциальная модель диффузии примеси была разработана А.В. Левиным [56]. Статистический подход был развит О.Г. Сеттоном [96]. Численные методы исследования диффузии примеси в турбулентной среде были успешно развиты группой советский ученых под руководством Г.И. Марчука [53, 59]. Основы геофизической теории турбулентности сформулированы в работах [29, 52, 69-72, 106]. К работам по эмпирическому исследованию пограничных слоев атмосферы относятся [5, 104, 164]. Распространение примеси в турбулентной среде рассматривалось в [30, 50, 78, 134].

Можно выделить 4 исторических этапа в развитии моделирования процессов переноса примесей в атмосфере:

I этап (60–70 гг. XX в.). На этом этапе формулируются уравнения переноса веществ в атмосфере, проводятся первые численные эксперименты [59, 62, 63, 82].

II этап (70–80 гг. XX в.). Характеризуется усложнением исходных уравнений с учетом таких факторов как трансформация ЗВ, их химическое взаимодействие [81]. При этом Чернобыльская катастрофа дала значительный толчок в развитии этого направления [15, 22, 31, 48, 92, 122].

III этап (80-е гг. XX в. – 2000-е гг.). Происходит дальнейшее углубление постановок задач для изучаемого явления (рассматриваются сложные сценарии распространения примеси в атмосфере, учитывающие химические реакции между примесями, солнечную радиацию, выбросы автотранспорта в условиях города) [1, 2, 4, 18, 19, 24, 32, 33, 37, 41, 49, 60, 61, 84, 85, 89, 121, 130, 138, 139, 140, 153, 160].

IV этап (2000-е гг. – настоящее время). В связи с совершенствованием компьютерных технологий происходит дальнейшее усложнение численных моделей, их автоматизация, web-визуализация. Происходит интеграция математических моделей, данных натурных наблюдений, геоинформационных систем (ГИС) и данных дистанционного зондирования [79, 93, 125].

Целью данной работы является обзор и анализ существующих подходов к математическому моделированию процессов рассеяния примесей в атмосфере. Для реализации данной цели были сформулированы

следующие задачи: выявление классификационных критериев для формирования классификаций математических моделей; анализ существующих подходов к математическому моделированию, в том числе с применением классификационных критериев.

Значительная часть существующих подходов в математическом моделировании процессов рассеивания примеси в атмосфере являются модификациями и усовершенствованиями ряда базовых моделей. Все известные модели можно классифицировать по ряду критериев:

- по точке проецирования исследования;
- по типу загрязняющих веществ, для которых рекомендуется использовать математическую модель;
- по способу определения положение и перемещения точки;
- по используемым исходным данным (классификация А.Ю. Щербакова);
- по основным процессам рассеивания.

По точке проецирования исследования модели делятся:

1) Рецепторная модель. В рамках рецепторных моделей полученные эмпирическим путем концентрации в заданной точке оцениваются на предмет вклада различных источников в формирование полученных значений. Примером может служить модель LAND USE REGRESSION (LUR) (более раннее название модели Regression mapping (регрессионная картография)), которая строит поля концентраций поллютантов на основании данных о загрязнении воздуха (полученных экспериментальным путем) и данных различных слоев ГИС (характеристика автотранспортной сети, тип землепользования, топологические переменные). Данный подход используется в Европе и США с 1993 г. и позволяет получать оценку загрязнения атмосферного воздуха для больших по площади территорий с высокой степенью разрешения (до 15 м). Учет ограниченного числа предикторов (2-4) является фактором, значительно снижающим себестоимость и трудоемкость процедуры математического моделирования. На основании полученных значений в дальнейшем проводится идентификация источников загрязнения, получение количественных характеристик источников загрязнения атмосферного воздуха. Недостатком использования моделей LUR является отсутствие единой методики в выборе предикторов и погрешности, возникающие в связи с ретроспективным подходом [3, 73, 123].

2) Модели источника. В качестве основных данных, используемых в моделях источника, являются данные об объемах эмиссии поллютантов и условий их рассеивания. В рамках данной модели формируется результирующее поле загрязнения, часто используемое в дальнейшем при формализации ограничений значений выбросов по максимальному заданному значению уровня загрязнения атмосферного воздуха региона. Исходя из специфики источников поступления загрязняющих веществ в атмосферу, выделяют модели для стационарных [66] и передвижных [13] источников.

3) Гибридная модель. При сочетании принципов рецепторной модели и модели источника формируются гибридные модели [123].

По продолжительности функционирования и локализации источника выбросов модели делятся:

1. Математические модели для мгновенных точечных источников (аварийный разовый выброс). Примером может служить модель, используемая в методике «ТОКСИ-3» [110].

2. Математические модели для непрерывных точечных источников (стационарные источники загрязнения, функционирующие на постоянной основе в штатном режиме). Как правило, к такому типу относятся модели «факела», основанные на предположении о непрерывно действующем источнике. Факельные модели описывают поля концентраций газовых выбросов как функцию метеорологических параметров. При этом, факельные модели могут описывать атмосферный перенос в условиях сложного рельефа, когда допустимо приближение ламинарного обтекания ветровыми потоками пологих орографических элементов. Факельная модель легла в основу ОНД-86 и ее усовершенствованной версии МРР-2017 [66]. Аналогичные модели, используемые за рубежом [44, 149], модель МАГАТЭ [107].

3. Математические модели, для источников мгновенных, распределенных в пространстве (площадной или линейный источник, когда на разных участках происходит разовое поступление ЗВ в атмосферу в результате аварийной ситуации) [94].

4. Математические модели, для источников непрерывно распределенных, но действующих с постоянной мощностью в каждой точке пространства (автодорога с постоянным транспортным потоком). Примером может служить, разработанная модель локальных конвекций (МОЛОКО). В данной модели используется допущение, что механизм динамики воздушных потоков вдоль автомагистрали во многом аналогичен циркуляциям атмосферного воздуха во время пожара (в основу положен учет локальных конвективных потоков) [86]. В действительности каждый распределенный в пространстве и времени источник можно представить, как сумму элементарных источников, действующих в малых объемах пространства и в короткие промежутки времени. В этом случае, итоговое уравнение можно получить интегрированием фундаментального решения уравнения диффузии примеси по соответствующему объему и времени [154].

5. Математические модели, для источников, распределенных по пространству и во времени по определенному закону (автодорога с переменным транспортным потоком [66], дегазация свалочных газов, определяемая характером физико-химических процессов, происходящих как в теле свалки, так и в окружающей среде).

По типу загрязняющих веществ, для которых рекомендуется использовать математическую модель:

1. Модели, используемые для аэрозолей [17, 46, 59];

2. Модели, используемые для газообразных веществ [11, 57];

3. Гибридные модели [66].

По способу определения положение и перемещения точки, модели делятся:

1) Эйлеровы модели, в которых система координат определена относительно земной поверхности;

2) Лагранжевы модели отслеживают процессы в движущихся массах воздуха [123].

По используемым исходным данным (классификация А.Ю. Щербакова) [114]:

1. Эмпирико-статистические модели, основанные на анализе данных натуральных наблюдений за загрязнением атмосферы. Часто используется регрессионный анализ, на основании которого получаются ряд регрессионных уравнений, связывающих анализируемый параметр загрязнения с другими параметрами через эмпирические коэффициенты. Недостатком такого подхода является то, что точность и устойчивость используемых коэффициентов не всегда высоки [54, 64, 97, 157].

2. Аналоговые модели – осуществляют исследование структуры загрязнения атмосферного воздуха города в лабораторных условиях (аэродинамических трубах). Это позволяет получить ряд практических и теоретических результатов, но при этом, возникают сложности с адаптацией полученных результатов к реальным условиям [20].

3. Энергетические модели – анализируются эмпирические поля концентраций примесей в зависимости от синоптических процессов в период наблюдений, распределения источников загрязнения и параметров подстилающей поверхности. Подобные исследования активно проводились в конце XX в. в СССР и за рубежом, однако для такого рода моделей необходимо большое количество фактического материала [7, 8, 12, 54, 88, 97, 126, 131, 148].

4. Физико-математические модели позволяют объяснять количественные и качественные закономерности анализируемых процессов и давать прогноз загрязнения атмосферного загрязнения города с теоретической точки зрения. В общем виде, используя при формировании физико-математической модели загрязнения атмосферы фундаментальные законы сохранения (массы, энергии, количества движения) и интерпретируя их к условиям атмосферы (в уравнения неразрывности, притока тепла и движения, состояния и переноса примеси), используя при выводе уравнений условие баланса, можно получить замкнутую систему дифференциальных уравнений, в которых ранее введенные параметры атмосферы будут рассматриваться как функции координат и времени. Хотя большая часть моделей применяется в условиях идеализированного города, существуют успешные попытки моделирования условий переноса примесей в конкретных городах [20, 118, 142, 162].

По механизмам рассеяния, взятым за основу:

1. Статические модели - учитывает обобщенные региональные характеристики загрязнения воздушной среды. О.Г. Сеттон развивал подход использования «логарифмического нормального закона» в апроксимативной оценке эмпирических распределений [96]. Плотность распределения вероятности выражалась следующим образом (1):

$$F(c) = \frac{1}{ac\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\ln^2(c/b)}{2a^2}\right) \quad (1)$$

где c – концентрация примеси;

a , b – параметры, определяемые по эмпирическим данным [20, 95]. Еще одним примером статичного подхода в моделировании является стационарная Гауссова модель. Гауссовы модели, в соответствии с которыми, распределение концентраций характеризуется как гауссово в горизонтальном и вертикальном направлениях стали применяться с 1936 г. Они являются наиболее часто используемыми при вычислении концентраций загрязняющих веществ [123]. В общем случае, все гауссовы модели рассеяния примесей основаны на принципе сохранения масс для каждого вида загрязняющих веществ (ЗВ). Гауссовым законом описывается распределение примеси вблизи точечного источника в разных направлениях. При этом, концентрация в заданной точке с координатами (x, y, z) , формируемая выбросами источника, расположенного начале координат, пропорциональна произведению вероятностей распределения p_x, p_y, p_z (2):

$$p_x * p_y * p_z = \frac{1}{\sigma_y\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} * \frac{1}{\sigma_x\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}} * \frac{1}{\sigma_z\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}} \quad (2)$$

где σ_y^2 – дисперсия распределения примеси в направлении y ; σ_x^2 – дисперсия распределения примеси в направлении x ; σ_z^2 – дисперсия распределения примеси в направлении z [20, 25, 47]. Таким образом, концентрация зависит от вертикальной и горизонтальной дисперсии координат частиц примеси. Различные подходы в оценке данных величин в значительной степени повлияли на формирование разнообразных гауссовых моделей. Наиболее распространенными являются метод Пасквила-Гриффода (основан на 6 классах устойчивости атмосферы), метод, основанный на учете вертикального градиента температуры в атмосфере, метод, учитывающий флуктуацию ветра, метод «разделенной сигмы» [39]. При этом, в данных подходах используются следующие допущения: направление ветра совпадает с осью x , начало координат лежит в основании источника, ЗВ отражаются от поверхности. Такие гауссовы модели широко используются в ГИС, рекомендованы МАГАТЕ (International Atomic Energy Agency) [141]. В тоже время, в связи с высокой динамичностью атмосферы, такие модели объективно отражают ситуацию только для небольших по площади территорий (рекомендуется использовать для расстояний не более 10 км). При некоторой доработке (учете зависимости концентраций ЗВ от времени присутствия примесей в атмосфере) такие модели можно использовать для больших расстояний (до 120 км) [58]

Кроме гауссового статистического подхода, для отдельных компонентов загрязнений используются методы множественной линейной регрессии. При этом, учитывается степень влияния фактора (определяемого коэффициентом) на процесс переноса примеси. Если c – это концентрация определенного уровня, а δ, φ, \dots и

т.д. – это факторы, определяющие значение c и заданные в некоторых точках пространства и времени, то выражение для c может быть представлено в виде уравнения регрессии (3):

$$c = a_0 + \sum b_i \delta_i + \sum d_j \varphi_j + \dots \quad (3)$$

где δ_i, φ_j – значение переменных i, j , по которым выполняется суммирование;

a_0, b_i, d_j – числовые коэффициенты регрессии, подлежащие определению методом наименьших квадратов (математическим методом, основанным на минимизации суммы квадратов отклонений некоторых функций от экспериментальных входных данных) [95, 98].

2. Модели на основе аналитического решения стационарного уравнения.

В некоторых прикладных задачах используют аналитические решения двухмерного стационарного уравнения турбулентной диффузии. При этом учитываются следующие факторы: степенные вертикальные профили ветра, коэффициент перемешивания, сухое осаждение примеси на подстилающую поверхность. Такой подход используется для решения задач установления функциональной зависимости концентрации от основных действующих факторов. Ограничением использования указанного типа моделей является применяемые значительные упрощения, стилизация реальных условий в атмосфере. [38].

3. Модели численных решений молекулярной и турбулентной диффузии.

Количественным показателем наличия поллютанта в атмосферном воздухе является концентрация C (отношение массы поллютанта dm к заданному объему dV (или $C = dm / dV$). Таким образом, поток примеси A – это масса примеси dm , прошедшая через элементарную площадку $dx dy$ за время dt (4):

$$dA = \frac{dm}{(dx, dy, dt)} \quad (4)$$

Если с одной стороны площадки концентрации примеси больше, чем с другой стороны, то в результате хаотичных молекулярных движений, в целом будет существовать поток примеси через площадку в сторону меньшей концентрации. При этом считается, что поток пропорционален перепаду значений концентраций примеси (5.5):

$$Ax = -D \frac{dc}{dx} \quad (5)$$

где D – это коэффициент молекулярной диффузии. Может быть выражен через среднюю скорость движения молекул газа среды и среднюю длину пробега молекул. Он зависит от типа примеси, температуры среды, давления и прочих факторов.

Если считать, что поток изотропен во всех направлениях, то формула может быть представлена (5.6):

$$A = -D \nabla C \quad (6)$$

где ∇ – знак градиента.

К сожалению, атмосферный воздух не характеризуется изотропностью (постоянностью физических величин), поэтому правильнее реализовывать уравнение атмосферной диффузии с применением адвективных членов (учитывающих изменчивость физических свойств окружающей среды). Учет изменчивости параметров среды можно произвести при помощи уравнения турбулентной диффузии примеси. В турбулентном типе движения среды скорость течения испытывает хаотичные флуктуации, создаваемые существующими в потоке многочисленными вихрями различных размеров. В каждый момент времени в каждой точке концентрация примеси определяется совокупным влиянием турбулентных вихрей. В тоже время, разовые точечные значения концентраций не обладают большой информационной репрезентативностью. Больше внимание необходимо уделять сведениям об осредненных полях концентраций и статистической характеристике флуктуирующего поля $c(x, y, z, t)$. При этом, в связи с невозможностью использовать детерминированный подход к значениям таких параметров атмосферного воздуха как скорость в уравнении для турбулентного потока, уравнение диффузии необходимо усреднить с применением правил осреднения Рейнгольда. Метод осреднения Рейнгольда заключается в замене случайно изменяющихся характеристик потока (скорость, давление, плотность) суммами осредненных и пульсационных составляющих. Поскольку турбулентные потоки являются неизвестными величинами, то уравнение турбулентной диффузии является незамкнутым. Для выражения неизвестных величин через искомую функцию концентрации, используют коэффициенты турбулентности. Для определения коэффициентов турбулентности, допускается предположение, что турбулентные потоки пропорциональны градиенту средней концентрации примеси. Для одномерного случая выражения такого типа были предложены Дж. Тэйлором в 1915 г. [156] и В. Шмидтом в 1917 г. [155].

Аналогичный подход можно использовать и при решении уравнений для трехмерного пространства. При этом, на вертикальную турбулентную диффузию и, соответственно, на значения коэффициентов вертикальной диффузии должна существенно влиять плоскостная стратификация атмосферы. В устойчиво стратифицированной среде, вертикальные турбулентные пульсации должны быть «угнетены», так как перенос частиц в этом случае требует значительных затрат энергии. Демпфирующее влияние (подавляющее турбулентные вихри) устойчивого градиента плотности среды может привести к тому, что турбулентность в вертикальном направлении не разовьется. Критерием наличия турбулентности в среде, плотность которой дифференцирована по вертикали является градиентное (кинематическое) число Ri [165] (7):

$$Ri = \frac{g}{\rho_0} * \frac{dp/dz}{(du/dz)^2 + (dv/dz)^2} \quad (7)$$

где g – ускорение свободного падения;
 ρ – плотность среды,
 ρ_0 – плотность внешнего слоя среды;
 u – скорость движения.

Так, для горизонтального движения с устойчивым вертикальным градиентом, должно выполняться условие $Ri \geq 1$ [18]. При росте стратификации атмосферного воздуха будет возрастать влияние неровностей подстилающей поверхности. Эмпирическим путем получено, что в большей части случаев турбулентный перенос на несколько порядков превосходит молекулярный перенос примеси. Поэтому часто в полуэмпирических упрощенных вариантах турбулентной диффузии опускают члены с молекулярной диффузией. Теории турбулентной диффузии, использующие такой подход, получили название К-теории [135].

В настоящее время к наиболее распространенным на практике моделям относятся [20, 30, 103, 115, 143, 152, 159]. Так, например, Лагранжева модель определяет перенос загрязняющих веществ по траекториям движения одиночных частиц под воздействием ветра и турбулентности. В рамках данной модели рассматривается бесконечно малая частица в фиксированный момент времени с координатами x, y, z . Перемещаясь за данной частицей, в последующие моменты ее координаты принимаются как функции начальных координат. Таким образом, скорости частиц – это производные от координат и времени. В дальнейшем траектории частиц усредняются по флуктуациям среды. Если рассматривать примесь, поступившую от источника как ансамбль дискретных клубов и частиц (со своими траекториями, изменяющимися в пространстве и времени), то для каждого клуба можно рассчитать траекторию движения, диффузионный перенос (при помощи стохастических моделей, при чем часто турбулентная структура принимается гауссовой). Таким образом, совокупность вкладов от каждого лагранжевого элемента формирует концентрацию примеси в заданной точке [14, 51]. Подход Лагранжа является продуктивным и используется для оценки турбулентного обмена. В тоже время, данный подход является очень трудоемким и нецелесообразен при использовании для больших территорий. Так же существуют сложности при учете химической трансформации.

Эйлерова модель опирается на уравнение «конвекции-диффузии», которое интегрируется на конечно-разностной эйлеровой сетке. Эйлерово представление турбулентности задает поле случайных величин в пространстве и времени через систему усредненных уравнений (например, на базе уравнений гидродинамики) [70, 109]. При этом, аргументом являются совокупность координат точек пространства. Функциями этих координат и времени являются компоненты вектора скорости, концентрации примеси в данной точке. Эйлерова модель атмосферной диффузии хорошо подходит к решению задач мезомасштабного переноса и химической трансформации, требует меньшего объема эмпирических данных. Но в связи с использованием относительно грубой сетки (шаг сетки может достигать нескольких километров по горизонтали) сложно адекватно представить концентрационные градиенты от точечных источников. [30]. В настоящее время существует большое количество эйлеровых моделей переноса 3В в атмосфере [2, 13, 16, 18, 23, 27, 28, 59, 76, 92, 109]. В тоже время, значительная часть такого типа моделей подходит только для территорий протяженностью несколько десятков км [16, 18]. Есть модели,

которые подходят только для низких холодных выбросов [18]. В некоторых моделях влияние подстилающей поверхности определяется через эмпирические данные о региональных характеристиках скоростей ветра [16]. Влияние подстилающей поверхности может и вовсе не учитываться [18, 91].

Часто методы Лагранжа и Эйлера используются совместно, для решения различных задач в описании турбулентности [30, 43, 70, 109, 127, 132, 159], где на начальном этапе распространения выброса используется дисперсионно-стохастический подход Лагранжа, в последующем периоде – Эйлера модель атмосферной диффузии. Такой подход оправдан при мезомасштабном подходе.

4. Уравнения гидротермодинамики атмосферы

Уравнения гидродинамики основываются на законах сохранения импульса, массы, первого начала термодинамики и представляют собой замкнутую систему для определения вектора скорости движения, вектора угловой скорости вращения Земли, плотность среды, потенциальной температуры. Исследование вопросов корректности математических моделей гидротермодинамики атмосферы началось с работ Г.В. Демидова [40], в дальнейшем эти работы получили развитие под руководством В.В. Пененко и В.Ф. Рапута [83]. В.И. Сухоносом доказана разрешимость и единственность решения нелинейных уравнений гидродинамики атмосферы [101]. В работах В.В. Пененко и М.Г. Короткова представлены уравнения гидродинамики атмосферы и переноса поллютантов в атмосфере промышленных регионов (на примере Томска) [84].

Уравнения Навье-Стокса относятся к наиболее значимым уравнениям в гидродинамике, однако для

получения приемлемой точности результата необходимо применять такую расчётную сетку, ячейки которой меньше самого мелкого вихря [103].

Учет химического преобразования примеси в математических моделях зачастую осуществляется посредством включения в формулу переменной, зависящей от химической активности веществ [129, 161]. Повышение точности результата так же достигается посредством гибридизации моделей.

В таблице 1 / table 1 представлены модели рассеяния примесей, которые используются для учета процессов рассеивания примеси в мире.

Все существующие модели рассеивания примеси в атмосфере по рекомендуемому применению можно разделить на 3 группы:

1) Расчеты, проводимые на локальном уровне при постоянном во времени источнике [6, 13, 44, 59, 66, 86, 115].

2) Расчеты, проводимые на локальном и региональном уровне, направленные на определение последствий залповых выбросов (аварийных ситуаций) [110, 115].

3) Расчеты, проводимые на региональном уровне и направленные на оценку дальнего и трансграничного переноса примеси от источников [102, 111, 151].

На современном этапе развития, совершенствование ПК, развитие ГИС и Web-картографии послужило новым толчком в расширении применения методов математического моделирования. Примеры программных комплексов, в автоматическом режиме моделирующих процесс переноса примеси в атмосферном воздухе представлены в таблице 2 // table 2.

Таблица 1

Обзор основных работ по моделированию загрязнения атмосферы

Table 1

Review of the main works on atmospheric pollution modeling

Год // Year	Авторы публикаций // Authors of publications	Содержание используемой модели, ее достоинства и недостатки // Content of the model used, its advantages and disadvantages	Рекомендуемое применение // Recommended application	Тип модели (согласно ряду предл. класс. критериев) // Type of model (according to a number of proposed classification criteria)	Практическое прим. и верификация // Practical application and verification
1971	Лэмб Р.Г., Найбург М. [137]	В модели нанесенных твердых частиц Лагранжа центр масс участков выбросов отслеживается во время перемещения при локальной скорости ветра, в то время как диффузия вокруг этого центра масс моделируется дополнительным случайным перемещением, соответствующим скорости атмосферной диффузии.	Рекомендуется для определения влияния источников, на расстоянии не более 20 км.	Модель стационарного источника, система координат Лагранжа, Гауссова модель рассеяния в сочетании с моделью ветрового переноса.	Информация о проводимой верификации отсутствует.
1982	Берлянт М.Е. [6, 59]	Математическая модель, разработана на основе гауссова рассеяния. Учитывает отражение от подстилающей поверхности и диффузное расширение факела по горизонтали и вертикали.	Рекомендуется для определения влияния источников, на расстоянии не более 20 км.	Модель стационарного источника, система координат Эйлера, Гауссова модель рассеяния.	Для проведения расчетов, носящих нормативный характер, подобная методика была рекомендована Агентством по охране окружающей среды США (EPA-US) [44].
1992	Гаврилов А.С. [115]	Гидротермодинамическая модель А.С. Гаврилова (ГДМ+МК) основана на построении пограничного слоя с учетом коэффициента турбулентности. При этом используется метод Монте-Карло. При этом учитываются процессы ветрового переноса, турбулентной диффузии, гравитационного оседания частиц примеси, вымывания их осадками, взаимодействия с подстилающей поверхностью (обтекание и параметризация зданий).	Рекомендуется для оценки рассеяния примеси в результате мгновенного и продолжительного выбросов, предназначена для оценки предельно допустимых концентраций. Рекомендуется для оценки рассеяния ЗВ в условиях городско застройки.	Модель стационарного источника, система координат Лагранжа, метод Монте-Карло.	На базе данной модели создан программный комплекс «Zone» [115].
1994	Едигаров А.С., Сулейманов В.А. [42]	Физико-математические модели процессов звукового и дозвукового истечения сжимаемого газа и последующего струйно-диффузионного рассеивания основаны на численном интегрировании одномерных и двумерных уравнений сохранения массы, импульса и энергии.	Рекомендуется для определения последствий аварийных выбросов.	Модель стационарного источника, система координат Эйлера, модель Гауссова рассеяния.	Верификация проводилась посредством тестирования численных алгоритмов в сравнении с экспериментальными данными (результаты не приведены).
2000	Белов И.В., Беспалов М.С., Клочкова Л.В., Кулешов А.А., Сузан Д.В., Тишкин В.Ф. [13]	Математическая модель, разработанная для расчета поля ветра в урбанизированной местности – URBAN, развитая на основе транспортно-диффузионной модели.	Рекомендуется для оценки рассеяния ЗВ в условиях городско застройки.	Модель стационарного источника, система координат Эйлера, модель Гауссова рассеяния в сочетании с уточненной моделью ветрового поля в условиях застройки.	Результаты расчетов для экспериментальной площадки представлены графически.
2000	Муратова Г.В., Крукиер Л.А., Дацок В.Н., Дацок О.В., Чикин А.Л., Зубов В.Н. [74]	В качестве математической модели исследуемых процессов рассматривается транспортно-диффузионное уравнение распространения примесей в ветровом поле над местностью со сложным рельефом. Создаваемая модель состоит из двух частей, одна из которых описывает динамику атмосферы, а вторая – непосредственное распределение концентраций примесей при уже определенном поле скоростей. Для определения поля скоростей движения воздушных потоков в зависимости от рельефа была рассмотрена модель «URBAN».	Рекомендуется для оценки возможного рассеяния примеси на локальном уровне.	Модель стационарного источника, система координат Лагранжа, Гауссова модель рассеяния в сочетании с моделью ветрового переноса.	Апробирована для района Волго-Донской АЭС.

Год // Year	Авторы публикаций // Authors of publications	Содержание используемой модели, ее достоинства и недостатки // Content of the model used, its advantages and disadvantages	Рекомендуемое применение // Recommended application	Тип модели (согласно ряду предл. класс. критериев) // Type of model (according to a number of proposed classification criteria)	Практическое прим. и верификация // Practical application and verification
2000	Шварц Г.К., Шкляев В.А. [111]	Представлена квазидвумерная модель, описывающая процессы переноса и диффузии примеси в свободной атмосфере, полученная с помощью усреднения поперек слоя трехмерных уравнений гидротермодинамики атмосферы и переноса примеси.	Рекомендуется для проведения мезомасштабных исследований оценки возможного рассеяния примеси.	Модель стационарного источника, система координат Эйлера, Модель Гауссова рассеяния в сочетании с моделью ветрового переноса.	Полученные концентрации хорошо согласуются с данными наблюдения на станциях фонового мониторинга для европейской части России (приведены примеры).
2001	Гевлич И.Г. [35]	Дифференциальное уравнение, описывающее конвективное и турбулентное движения в атмосфере и их влияние на рассеяние атмосферной примеси. Математическая схема теории градиентного переноса заимствована из физики тепло- и электропроводности.	Рекомендуется для проведения краткосрочных локальных расчетов рассеяния ЗВ в условиях городской застройки.	Модель стационарного источника, система координат Эйлера, модель градиентного переноса.	Сравнение экспериментальных исследований с натурными замерами показывает достаточную достоверность (данные не приведены).
2001	Тургумбаева Р.Х. [106]	Эмпирическая модель Паскуилла-Гиффорда, основанная на предположении постоянного точечного источника определенной мощности без помех от земной поверхности и гомогенности характеристик атмосферной дисперсии. В ее основе лежит представление концентрации примеси, выбрасываемой непрерывным точечным источником, в атмосфере, как струи с гауссовыми распределениями по вертикали и в поперечном к ветру направлении.	Рекомендуется для определения влияния источников, на расстоянии не более 20 км.	Модель стационарного источника, система координат Эйлера, модель Гауссова рассеяния.	Апробирована для Жамбылского региона Республики Казахстан.
2002	Швыряев А.А., Меньшиков В.В. [112]	Расчет среднегодовых концентраций сводится к интегрированию всех возможных концентраций загрязняющих веществ в заданной точке пространства (х,у), которые могут возникнуть в течение года с учетом вероятности реализации определенного из шести характерных классов устойчивости атмосферы при заданной скорости ветра и предполагается, что в пределах сектора М-румбовой розы ветров направление ветра распределено равномерно.	Рекомендуется для определения влияния источников, на расстоянии не более 20 км.	Модель стационарного источника, система координат Эйлера, модель Гауссова рассеяния.	Положена в основу практического пособия оценки риска от систематического загрязнения региона. Приведен пример расчета для г. Усть-Каменогорска.
2003	Бесчастнов С.П. [21]	Решение основана на результатах численного моделирования рассеяния примеси с помощью модели на основе метода Монте-Карло. Модели этого типа учитывают пространственно-временную неоднородность поля ветра и турбулентную диффузию в предположении нормального закона распределения пульсаций компонентов скорости ветра. Исходными для них являются уравнения движения Лагранжа.	Рекомендуется для определения влияния источников, на расстоянии не более 20 км.	Модель стационарного источника, система координат Лагранжа, метод Монте-Карло в сочетании с моделью ветрового переноса.	Результаты расчетов проверены по данным станций Багуми и Кривой Рог (данные не приведены).
2003	Пекунов В.В., Ясинский Ф.Н. [80]	Модель состоит из кинетической (дифференциальные уравнения первого порядка) и динамической (уравнения Навье-Стокса для трех компонентов вектора скорости газа, уравнение распространения тепла, уравнение слабой сжимаемости газа, уравнения диффузии (с учетом скорости витания) газообразных веществ, уравнения для трех компонентов вектора скорости пыли, уравнение неразрывности для пыли, уравнение модели турбулентности Абрамовича-Секундова) подсистем.	Рекомендуется для оценки возможного рассеяния примеси на локальном уровне.	Модель стационарного источника, система координат Эйлера, сочетание модели Гаусса и Навье-Стокса.	Проведена проверка с натурными измерениями для перекрестка улиц г. Лондона, в окрестности предприятия British Steel.
2004	Шаталов А.А., Лисанов М.В., Печеркин А.С., Пчельников А.В., Сумской С.И. [110]	Приведенная модель (методика ТОКСИ-3) описывает следующие процессы: движение облака при переменной по высоте скорости ветра; гравитационное растекание; рассеяние облака в вертикальном направлении за счет атмосферной турбулентности (подмешивание воздуха в облако), а также в горизонтальном – за счет подмешивания воздуха в облако (атмосферная турбулентность, гравитационное растекание); вовлечение в облако паров воды из атмосферы; нагрев или охлаждение облака из-за подмешивания воздуха; теплообмен облака с подстилающей поверхностью.	Рекомендуется для определения последствий аварийных выбросов.	Модель стационарного источника, система координат Эйлера, модель ветрового переноса, в сочетании с гауссовым рассеянием и учетом гравитационного растекания.	Была проверена верификация по ряду экспериментальных данных, также проведено сравнение с другими методиками и моделями. Результаты представлены графически.

Год // Year	Авторы публикаций // Authors of publications	Содержание используемой модели, ее достоинства и недостатки // Content of the model used, its advantages and disadvantages	Рекомендуемое применение // Recommended application	Тип модели (согласно ряду предл. класс. критериев) // Type of model (according to a number of proposed classification criteria)	Практическое прим. и верификация // Practical application and verification
2006	Редикульцева Н.И. [86]	При разработке «Модели локальных конвекций» (МОЛОКО) в качестве основного принято предположение, что явление образования локальных атмосферных циркуляций целиком и полностью обусловлено силами Архимеда, действующими на воздушные объемы, плотность которых отличается от плотностей окружающей среды. В модели МОЛОКО рассматривается распространение загрязнений от одиночной автомагистрали в условиях плоской симметрии. Система уравнений модели включает уравнения Навье-Стокса для несжимаемых газов и уравнения переноса для энтальпии и загрязнения. Предполагается, что механизм динамики воздушных потоков вдоль автомагистрали во многом аналогичен циркуляциям атмосферного воздуха во время пожара (в основу положен учет локальных конвективных потоков).	Рекомендуется для оценки загрязнения атмосферного воздуха выбросами автомагистрали.	Модель передвижного источника, система координат Эйлера, метод Навье Стокса.	Проведена верификация модели на примере территорий лесных массивов, расположенных вблизи автомагистралей Национального парка «Лосиный остров» Московской области. Проведено теоретическое и экспериментальное исследование влияния локальных атмосферных циркуляций на загрязнение выбросами автотранспорта.
2007	Юдин М.С. [117]	Перенос температуры реализуется полу-лагранжевым методом, а расчет адвекции примесей осуществляется с помощью простой модели случайных блужданий частиц. Сочетание полу-лагранжева метода с методом лагранжевой диффузии.	Рекомендуется для оценки возможного рассеяния примеси на локальном уровне.	Модель стационарного источника, система координат Лагранжа, метод Монте-Карло.	Информация о проводимой верификации отсутствует.
2009	Габдуллин В.М., Семакина А.В., Шкляев М.Е. [34]	Для характеристики среднегодового загрязнения использовалась модель распределения средних значений концентраций загрязняющих веществ по слою перемешивания Петрухина-Вишенского, в которой учитывались данные о выбросах этих веществ, скорости и повторяемости ветров различных направлений, продолжительности присутствия отдельных примесей в атмосфере.	Рекомендуется для проведения региональных исследований.	Модель стационарного источника, система координат Эйлера, модель градиентного переноса с учетом химической активности.	Проведена сверка с натурными данными, представлена в табличном виде. Расчет проводился для территории Удмуртской Республики.
2009	Степаненко С.Н., Волошин В.Г., Типпов С.В. [100]	Представлено новое решение уравнения турбулентной диффузии, которое учитывает взаимодействие коэффициента турбулентной диффузии и скорости ветра в направлении осей декартовой системы координат. Основано на модели Эйлера.	Рекомендуется для определения влияния источников, на расстоянии не более 20 км.	Модель стационарного источника, система координат Эйлера, сочетание моделей ветрового переноса и гауссова распределения.	Информация о проводимой верификации отсутствует.
2010	Галерко Н.Н., Гарагер Е.К., Кузьменко Г.Г. [102]	Лагранже-Эйлерова диффузионная модель переноса радиоактивной примеси в атмосфере «LEDI» учитывает следующую входную информацию: метеопараметры, характеристики источника, неоднородность подстилающей поверхности. Вычисление горизонтальной траектории частицы – на основе системы координат Лагранжа. Вертикальное и поперечное рассеяния – опирается на процессы турбулентной диффузии. Источник моделируется в виде последовательности клубов.	Рекомендуется для расчета переноса примесей на расстоянии до 1000 км от газозольного точечного источника.	Модель стационарного источника, система координат Лагранжа и Эйлера, сочетание модели Гауссова рассеяния и метода Монте-Карло.	Модель протестирована на основе данных экспериментальных замеров для зоны Чернобыльского отчуждения.
2017	Берлянд М.Е. [66]	Методика МРР-2017 (разработанная на базе ОНД-86), использует способ задания профиля коэффициента турбулентности в виде «модели излома», то есть учитываются коэффициенты стратификации и расчеты приземных концентраций проводятся для наихудших условий, как для отдельного вещества, так и с учетом групп суммации. Учитываются параметры выброса. В тоже время, данная методика не учитывает дальние источники, устойчивость атмосферы учитывается в весьма обобщенной форме. Не применима для оценки максимально возможной наземной концентрации примеси при наихудших условиях рассеяния.	Рекомендуется для оценки максимально возможной концентрации ЗВ при неблагоприятных метеоусловиях, для территорий с удаленностью от источника не более 100 км.	Модель стационарного источника, система координат Эйлера, модель градиентного переноса.	Рекомендована для проведения нормативных расчетов на территории РФ. На базе методики МРР-2017 разработаны программные комплексы «Чистый воздух – расчет рассеяния» [9]; «Гарант-Универсал», [75]; программный комплекс «Призма», [90], программа «Эфир-6» [65].

Таблица 2

Программные комплексы для оценки рассеяния примеси в атмосферном воздухе

Table 2

Software packages for assessing the dispersion of impurities in atmospheric air

№	Название	Разработчики	Комментарии
1	Программный комплекс «VITECON» [26]	Южно-российский государственный технический университет, Новочеркасск, Россия	Может быть использован для сезонных долгосрочных прогнозов загрязнения
2	BUO-FMI [124]	Finnish Metrological Institute, Air Quality Research	Реализация гауссовой модели и градиентной К-модели (одномерная модель)
3	GASTER Dense Gas Dispersion Model [120]	Cambridge Environmental Research Consultants Ltd.	Моделирование эволюции облака при его рассеивании (одномерная модель)
4	DETRACT [158]	Environmental Research Laboratory, Institute of Nuclear Technology and Radiation Protection. National Centre for Scientific Research DEMOKRITOS Athens Greece	Двухмерная модель приземного слоя
5	United Kingdom Photo*chemical Trajectory Model [133]	United Kingdom Metrological Office University of Leeds NETCEN	Двухслойная траекторная модель
6	TNO – Isaksen model [140]	TNO Institute of Environmental Science, Energy Research and Process Innovation	Модификационная двухмерная модель Isaksen и Rodhe 1978 г.
7	PolluMap [145]	METEOTEST Fabrikstr. 14CH-3012 Bern Switzerland	Двухмерная эмпирическая модель для оценки загрязнения атмосферного воздуха
8	Tropos Verson D [166]	UK Meteorological Office Global Two-dimensional Chemistry Model	Двухмерная Эйлерова модель для химических источников
9	АИРОС [147]	Laboratory of Aerodynamics Department of Mechanical Engineering National Technical University of Athens (NTUA)	Статистическая модель, описывающая временное изменение концентрации примеси (боксовая стохастическая модель)
10	AEROPOL [136]	Tartu Oservatory, Aruka Ltd.	Гауссова модель, опирающаяся на классификацию Пэскуила
11	ISC3ST [163]	EPA-US (U.S. Environmental Protection Agency), USA	Основана на статистической гауссовой модели. Приняты следующие допущения: скорость ветра постоянна по горизонтали и вертикали, коэффициент диффузии не зависит от местоположения, примеси отражаются от поверхности, но не осаждаются, используется стратификация по Пэскуилу–Гиффорду (6 классов). Подходит для расчета в приземном слое для расстояний до 100 м.
12	PLUME [144]	Institute of Geophysics, Bulgarian Academy of Sciences	Гауссова модель факела от источника
13	SPRAY [157]	ENEL-SRI-Area Ambiente	Стохастическая Лагранжева модель распространения примеси
14	«Эколог» [36]	«Интеграл», Россия	Нормативная методика от подстилающей поверхности, влияние МРР-2017. Учета неоднородностей вертикальных профилей скорости ветра нет. Не подходит для больших территорий (более 100 км).
15	ЭПК «Zone» [116]	ЛЕНЭКОСОФТ	Математическая модель основана на сочетании трехмерной гидродинамической модели атмосферного пограничного слоя и методе Монте-Карло.
16	LED [146]	National Institute of Meteorology and Hydrology Bulgarian Academy of Sciences	Объединенная модель Лагранжевого факела с Эйлеровым рассеянием примеси
17	Модель прогнозирования состояния городской воздушной среды с применением нейронной сети [87]	Южный федеральный университет (г. Ростов-на-Дону), ФБГОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» (Рязань)	В качестве входных переменных выбраны скорость ветра (U, м/с), направление ветра (W, град.), температура воздуха (T, °C), концентрация загрязнителя, рассчитанная по программе УПРЗА «Эколог» (Ср, мг/м ³). Нейронная сеть обучалась по данным мониторинга атмосферного воздуха г. Таганрога. Моделирование было проведено только в условиях ясной погоды, так как измерения концентраций загрязнителей при наличии осадков не производились. Получена прогностическая модель распределения загрязнителей в атмосферном воздухе при учете различных метеорологических условий и вклада промышленных предприятий в загрязнение воздушного бассейна города.
18	CALPUFF [128]	Sigma Research Corporation (SRC), California Air Resources Board	Многослойная нестационарная Лагранжа–Гауссова модель распространения загрязняющих веществ, которая имитирует влияние метеорологических условий, изменяющихся во времени и пространстве, на перенос, трансформацию и удаление поллютантов из атмосферы. Данная модель учитывает следующие переменные: орография, учет специфики прибрежных районов, изменение уровня воды, изменение влажности воздуха, химические преобразования ЗВ. При расчете текущих концентраций, учитывает данные о концентрациях ЗВ за предыдущие несколько часов.

№	Название	Разработчики	Комментарии
19	AERMOD [10]	The American Meteorological Society, U.S. Environmental Protection Agency	Система моделирования атмосферного рассеяния включает три модуля: стационарная модель рассеивания, разработанная для рассеивания выбросов атмосферы на небольшие расстояния (до 50 км); модуль собирающий и систематизирующий данные об характере атмосферных процессов (характеристики турбулентности, высота слоя перемешивания, поверхностный тепловой поток), модуль учитывающий влияние рельефа и поведение шлейфа загрязнения воздуха. Является одним из наиболее широко используемых инструментов моделирования рассеивания в воздухе загрязняющих веществ от промышленных источников. На основе AERMOD оценивается риск для здоровья. Комплекс содержит микрометеорологическую модель, основанную: а) на наблюдениях с местных метеорологических станций; б) альбедо, параметре Боуэна (описывает процесс теплопередачи от влажной поверхности) и шероховатости поверхности; в) данных о вертикальном профиле атмосферы, полученных с ближайшего радиозонда.
20	HIWAY2 [150]	U.S. Environmental Protection Agency	При оценке концентраций загрязняющих веществ для шоссе с «нормальным» уровнем выбросов выбросы с шоссе считаются эквивалентными ряду линейных источников с конечным значением. Каждая полоса движения моделируется так, как если бы это был прямой, непрерывный, конечный линейный источник с равномерным уровнем выбросов.
21	ADMS5 [119]	Environmental Tectonics Corporation (USA)	Модель рассеивания воздуха в шлейфе Гаусса нового поколения. ADMS5 учитывает следующие факторы модели: сухое и влажное осаждение; химический состав NO _x ; воздействие холмов, различной шероховатости, зданий и береговых линий; турбулентность; изменяющиеся во времени источники и включение фоновых концентраций.
22	Система «ЭкоГИС» [113]	ООО Предприятие «ЛиДа инж.»	Нормативная методика МРР-2017

Выводы. Опираясь на имеющийся опыт применения математических моделей при прогнозировании процессов переноса примеси в атмосферном воздухе, можно сформулировать следующие выводы:

- Использование моделей на основе аналитического решения уравнения диффузии и гауссовых моделей допустимо только для небольших по площади территорий. Применение такого рода моделей при мезомасштабном подходе требует их доработки (одной стороны – аппроксимации, с другой стороны – внесения дополнительных коэффициентов, учитывающих дифференциацию физико-химических свойств атмосферы на больших по площади территориях).

- В процессе прогноза распространения примеси в атмосферном воздухе при использовании наиболее распространенных моделей значительную сложность представляет получение информации, базирующейся на специальных экспериментальных исследованиях и входящей в математическую модель: распределение пространственного турбулентного поля скорости ветра, температурной стратификации и влагосодержания в исследуемой области. Использование более сложных математических моделей может позволит снизить потребность в использовании результатов натурных измерений.

- Главными факторами в процессе переноса примеси являются направление и скорость ветра. Снижению уровня загрязнения атмосферного воздуха способствует: усиление ветра при неустойчивой стратификации, выпадение осадков [20, 99]. На приземное поле ветра значительное влияние оказывают циркуляционные процессы, а также физико-географические условия (особенности подстилающей поверхности, в том числе рельеф, наличие водоема).

- В рамках характеристики состояния атмосферного воздуха больших по площади территорий при по-

мощи методов математического моделирования, рекомендуются модели градиентного переноса с учетом химической активности веществ, адаптированные для определения процессов переноса примесей над разными по площади территориями. В целях проведения региональных исследований влияния выбросов от стационарных источников на состояние атмосферного воздуха, достаточно эффективной может быть методика, предложенная В.А. Петрухиным и В.А. Вишенским. Преимуществом данной модели перед моделями аналогичного рода, предназначенными для региональных исследований, является упрощенный вид учета параметров источника (в качестве источника загрязнения можно рассматривать населенные пункты). В тоже время наряду с упрощенным учетом характеристик источников выброса, можно отметить попытку оценить химическую активность примесей (введение показателя продолжительности присутствия их в атмосфере) и учет метеопараметров переноса примеси в атмосфере (высота слоя перемешивания, скорость и направление ветра в слое перемешивания). Простота расчета позволяет оценить влияние выбросов на состояние атмосферного воздуха в заданной точке множества источников на значительном удалении (до 1000 км) [151]. Для оценки процессов рассеяния на небольших по площади территориях будет применяться методика, реализованная в «Методах расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе» [66], утвержденная Приказом Министерства природных ресурсов и экологии РФ.

Список источников

1. Аверин Г.В., Павлий В.А. Алгоритмы моделирования полей загрязнения атмосферы над промышленным городом по экспериментальным данным // Вестник Донецкого университета. Серия естественные науки. 2007. № 2. С. 338-346.

2. Алоян А.Е. Численное моделирование дальнего переноса примесей в атмосфере // Численные методы в задачах физики атмосферы и охраны окружающей среды. Новосибирск, 1985. С. 59-72.
3. Антропов К.М., Казмер Ю.И., Вараксин А.Н. Описание пространственного распределения загрязнения атмосферного воздуха промышленного центра методом LAND USE REGRESSION (обзор) // Экологические системы и приборы. № 1. 2010. С. 28-41.
4. Аргучинцев В.К. Численное моделирование распространения аэрозолей в пограничном слое атмосферы // Оптика атмосферы и океана, 1994. Т.7, № 8. С. 1106-1111.
5. Ариель Н.З., Егоров Б.Н., Мурашева А.В. О характеристиках профиля ветра в нижнем слое воздуха над океаном. // Тр. ГГО. 1987. Вып. 506. С. 183-191.
6. Атмосферная диффузия и загрязнение воздуха. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 129 с.
7. Ахметжанов Х.А., Дегтярев В.И. Об оценке факторов, формирующих микроклимат Алма-Аты. Метеорология и гидрология, № 1, 1979. С. 66-71.
8. Ахметов М.С. Метеорологические аспекты загрязнения атмосферы в районах размещения предприятий угольной промышленности // Методы изучения, расчетов и прогнозов водных и климатических ресурсов. Пермь, 1978. С. 111-126.
9. Бакин Р.И., Зарянов А.В., Киселев А.А., Красноперов С.Н., Меркушов В.П., Припачкин Д.А., Шведов А.М., Шикин А.В. Концепция разработки расчётно-прогностического комплекса RELTRAN для анализа безопасности при выбросах радиоактивных веществ в атмосферу // Вопросы радиационной безопасности, 2018. № 3(91). С. 27-38.
10. Балтер Б.М., Балтер Д.Б., Егоров В.В., Стальная М.В., Фаминская М.В. Данные космических наблюдений параметров поверхности в модели рассеяния промышленных загрязнений воздуха AERMOD. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 97-111. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-2-97-111>
11. Барт А.А., Беликов Д.А., Страченко А.В. Математическая модель для прогноза качества воздуха в городе с использованием суперкомпьютеров // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. № 3(15). 2011. С.15-24.
12. Бахарева Г.И. Гербурт-Гейбович А.А. Первые результаты мезометеорологических наблюдений в Москве и ближайших пригородах // Труды ЦВГМО. 1978. Вып. 12. С. 59-67.
13. Белов И.В., Беспалов М.С., Клочкова Л.В., Кулешов А.А., Сузан Д.В., Тишкин В.Ф. Транспортная модель распространения газообразных примесей в атмосфере города // Математическое моделирование. 2000. Т. 12. № 11. С. 56-82.
14. Белов П.Н., Карлова З.Л. Траекторная модель переноса зарядов // Метеорология и гидрология. 1990. № 12. С. 67-74
15. Белолипецкий В.М., Шокин Ю.И. Математическое моделирование в задачах окружающей среды. Новосибирск: «ИНФОЛИО-пресс», 1997. 240 с.
16. Беляев И.И., Хрущ В.К. Математическая модель нестационарного пространственного переноса загрязнения в атмосфере // Известия ВУЗов. Энергетика. 1993. № 11-12. С. 134-141.
17. Береснев С.А., Грязин В.И. Вертикальный ветровой перенос аэрозолей в стратосфере // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20. № 6. С. 537-543.
18. Берлянд М.Е. Генрихович Е.Л., Оникул В.И. Моделирование загрязнения атмосферного воздуха из низких и холодных источников // Метеорология и гидрология. 1990. № 5. С. 5-17.
19. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование состояния атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 272 с.
20. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 448 с.
21. Бесчастнов С.П. Влияние сдвигов ветра на поперечное рассеяние струи газоаэрозольной примеси на больших расстояниях от источника // Метеорология и гидрология. 2003. № 12. С. 39-45.
22. Борзилов В.А., Клепикова Н.В. и др. Метеорологические условия дальнего переноса радиоактивных продуктов аварии на Чернобыльской атомной электростанции // Метеорология и гидрология. 1989. № 11. С. 5-11.
23. Борзилов В.А., Велтищева Н.С., Клепикова Н.В., Новицкий М.А., Бурков А.И., Метелкина Л.М. Региональная модель переноса полидисперсной примеси в атмосфере // Метеорология и гидрология. 1988. № 4. С. 57-65.
24. Бородулин А.И., Майстренко Г.М., Чалдин Б.М. Статистическое описание распространения аэрозолей в атмосфере. Новосибирск: НГУ, 1992. 124 с.
25. Бриль А.И., Другаченок М.А., Кабашников В.П. и др. Исследования рассеивания соляной пыли в Солигорском промышленном районе // Метеорология и гидрология. 1998. № 12. С. 64-71.
26. Бузало Н.С. Математическое моделирование переноса примеси в мезометеорологическом пограничном слое атмосферы: дис. канд. техн. наук: 05.13.18. Новочеркасск, 2003. 174 с.
27. Бузало Н.С. Численное моделирование распространения загрязняющей примеси в атмосфере // Научно-техническое творчество молодых – возрождению университета: Тез. докл. науч.-техн. конф. Студентов и аспирантов ЮРГТУ. Новочеркасск: ЮРГТУ, 1999. С. 30-31.
28. Бузало Н.С., Никифоров А.Н. Результаты численного исследования загрязнения г.Новочеркаска диоксидом азота и бен(а)пиреном // Интеллектуальный резерв университета – решению проблем Северо-Кавказского региона: Материалы 48-й сессии науч.-техн. конф. студ. и асп. ЮРГТУ (НПИ). Новочеркасск: ЮРГТУ, 1999. С. 29-30.
29. Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер Е.К. Турбулентность в пограничном слое атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 262 с.
30. Бусингер Дж.А., Теннекес Х., Вингаард Дж.К. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 351 с.
31. Велтищева Н.С. Моделирование трансграничного переноса двуокиси серы с учетом вертикальных движений // Метеорология и гидрология, 1980. № 7. С. 12-19.

32. *Владимиров С.А.* Численное моделирование распространения пассивной примеси в атмосфере // Метеорология и гидрология. 1999. № 7. С. 22-35.
33. *Воронина П.В., Климова Е.Г., Куликов А.И., Медведев С.Б., Ивин Г.С., Фомин В.М.* Региональная схема математического моделирования процессов в атмосфере для проведения экологических экспертиз // Вычислительные технологии. 1994. Т.3. № 8. С. 27-44.
34. *Габдуллин В.М., Семакина А.В., Шкляев М.Е.* Моделирование распределения примесей в атмосфере (на примере Удмуртской Республики) // Вестник Удмуртского Университета. Биология. Науки о Земле. 2009. Вып. 1. С. 117-126.
35. *Гевлич И.Г.* Численное моделирование переноса газообразных выбросов на основе методологии искусственного интеллекта // Штучний інтелект. 2001. № 4. С. 13-17.
36. ГК «Интеграл». URL: <https://integral.ru> (дата обращения 31.07.2023).
37. *Григорьев Ю.Н., Шокин Ю.И.* Статистические модели и методы в задачах миграции аэрозолей // Вычислительные технологии. 1993. Т. 2. № 4. С. 117-140.
38. *Громов В.П., Горматюк Ю.К.* Рассеяние примеси от стационарных источников в приземном слое атмосферы // Метеорология и гидрология. 1989. № 2. С. 37-47.
39. *Гусев Н.Г.* Радиоактивные выбросы в биосфере: справочник. Москва: Энергоатомиздат, 1986. С. 64-66.
40. *Демидов Г.В., Марчук Г.И.* Теорема существования решения задачи краткосрочного прогноза погоды // ДАН СССР. 1966. Т. 170. № 5. С. 1006-1008.
41. *Довгалоук Ю.А., Ивлев Л.С.* Физика водных и других атмосферных аэрозолей. СПб.: Изд. СПбГУ, 1998. 320 с.
42. *Едигаров А.С., Сулейманов В.А.* Математическое моделирование аварийного истечения и рассеивания природного газа при взрыве газопровода // Математическое моделирование, 1995. № 4. С. 23-45.
43. *Елохин А.П., Талерко Н.Н., Буйков М.В.* и др. Сравнение экспериментальных и расчетных данных приземной концентрации примеси в атмосфере // Метеорология и гидрология. 1996. № 2. С. 41-47.
44. Защита атмосферы от промышленного загрязнения. М.: Металлургия, 1988. 711 с.
45. *Зилитинкевич С.С.* Динамика пограничного слоя атмосферы. Л.: Гидрометеозидат, 1970. 290 с.
46. *Иваницкий М.С.* Статистическое моделирование распределение концентраций твердых частиц в атмосфере района, сжигающей непроектное топливо // Известия ВУЗов. Энергетика. 2018. Т. 20. № 3-4. С. 129-135.
47. *Иванов А.П., Бриль А.И., Другаченов М.А.* Математическое моделирование рассеяния примеси в воздушном бассейне промышленного региона. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных // Труды международной конференции «ENVIRONMENT 2000» «Измерение, моделирование и информационные системы как средства реабилитации окружающей среды на городском и региональном уровне». Издательство ЦНТИ, 2000. С. 156-162.
48. *Израэль Ю.А., Петров В.Н., Северов Д.А.* и др. Моделирование выпадения радиоактивных осадков в окрестности Чернобыльской АЭС // Метеорология и гидрология. 1987. № 2. С. 5-10.
49. *Катков В.Л.* Региональная модель переноса загрязнений // Доклады Первой международной конференции «Цифровая обработка информации и управления в чрезвычайной ситуации», Минск, 1998. Т. 2. С. 140-147.
50. *Качурин Л.Г.* Физические основы воздействия на атмосферные процессы. Л.: Гидрометеозидат, 1990. С. 463.
51. Кислотные дожди / под ред. Ю.А.Израэля. Л.: Гидрометеозидат, 1987. 276 с.
52. *Китайгородский С.А.* Физика взаимодействия атмосферы и океана. Л.: Гидрометеозидат, 1970. 284 с.
53. *Кочергин В.П., Сухоруков В.А., Цветова Е.А.* Моделирование процессов вертикальной турбулентной диффузии в океане // Численные методы расчета океанических течений. Новосибирск: ВЦ Сиб. Отд. АН СССР, 1974. С.129-153.
54. *Кратцер П.А.* Климат города. М.: Иностранная литература, 1958. 236 с.
55. *Лайхтман Д.Л.* Физика пограничного слоя атмосферы. Л.: Гидрометеозидат, 1970. 290 с.
56. *Левин А.В.* К вопросу об уравнениях, описывающих турбулентную диффузию в атмосфере. // Тр. Укр.НИГМИ. 1971. Вып.103. С. 102-107.
57. *Ложкин В.Н.* Новый метод прогнозирования загрязнения воздуха в районе автомагистрали при горении торфа // Пожаровзрывобезопасность. 2017. № 6, Т. 26. С. 60-69. <https://doi.org/10.18322/PVB.2017.26.06.60-69>
58. *Маркванд В., Иле П.* Зависимость выпадений диоксида серы и сульфатов на подстилающую поверхность от метеорологических условий, параметров выброса и расстояния до источника выброса Метеорологические аспекты загрязнения атмосферы: итоги сотрудничества социалистических стран / ред. М.Е. Берлянд. Ленинград: Гидрометеозидат, 1988. 239 с.
59. *Марчук Г.И.* Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука, 1982. 319 с.
60. *Марчук Г.И., Алоян А.Е.* Глобальный перенос примеси в атмосфере // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1995. Т. 31. № 5. С. 597-606.
61. *Марчук Г.И., Кузин В.И., Скиба Ю.Н.* Проекционно-разностный метод расчета сопряженных функций для модели переноса тепла в системе атмосфера-океан-почва // Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики. Новосибирск: Наука, 1983. С. 149-154.
62. *Марчук Г.И., Пененко В.В., Алоян А.Е., Лазриев Г.Л.* Численное моделирование микроклимата города // Метеорология и гидрология. 1979. № 8. С. 5-15.
63. *Марчук Г.И., Ривин Г.С., Юдин М.С.* Численные эксперименты с балансовыми схемами // Изв. АН ССР. Физика Атмосферы и океана. 1973. Т. 9. № 11. С. 1186-1190.
64. Метеорология и атомная энергия: / под ред. Н.Л. Бызовой, К.П. Махонько. Л.: Гидрометеозидат, 1971. 648 с.
65. Методология системного экологического картографирования / отв. ред. В.В. Воробьев, В.А. Снытк. Иркутск: Издательство Института географии СО РАН, 2002. 194 с.

66. Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе, утв. приказом Минприроды России от 06.06.2017 № 273.
67. Монин А.С. О структуре пограничного слоя атмосферы. // Изв. АН СССР, ФАО. 1965. Т. 2. № 3, С. 252-265.
68. Монин А.С. Обухов А.М. Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы. // Тр. Геофиз. Инт-та АН СССР. 1954. № 24(151).
69. Монин А.С. Полуэмпирическая теория турбулентной диффузии // Тр. Геофиз. ин-та АН СССР. 1956. № 33(160).
70. Монин А.С. Яглом А.М. Статическая гидромеханика. М.: Наука, 1965, С. 639.
71. Монин А.С., Озмидов Р.В. Океанская турбулентность. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. С.320.
72. Монин А.С., Обухов А.М. Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы // Тр. Геофиз. Инт-та АН СССР. 1954. № 24(151).
73. Мониторинг качества атмосферного воздуха для оценки воздействия на здоровье человека. // Региональная публикация ВОЗ, Европейская серия. 2001. № 85. 316 с.
74. Муратова Г.В., Крукиер Л.А., Дацюк В.Н., Дацюк О.В., Чикин А.Л., Зубов В.Н. Моделирование процессов распространения примесей воздушной среде в районе объектов энергетики // Труды 15 научно-практической конференции Телематика, СПб., 2008. Т. 1, 536 с.
75. Научно-практический портал «Экология производства» (01.01.2007) URL: <https://www.ecoindustry.ru/magazine/archive/viewdoc/2007/1/872.html> (дата обращения 02.06.2023).
76. Никифоров А.Н., Бузало Н.С. Прогнозирование загрязнения воздушной среды промышленного центра на основе уравнения турбулентного переноса // Сб. науч. Тр. 4 Всерос. симпозиума «Математическое моделирование и компьютерные технологии». Кисловодск, 2000. Т. 2. Ч. 2. С. 5-7.
77. Обухов А.М. Турбулентность в температурно-неоднородной атмосфере. // Тр. Ин-та теор. Геофиз. АН СССР. 1946. Вып. 1. С. 95-115.
78. Озмидов Р.В. Диффузия примесей в океане. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 279 с.
79. Онлайн карта «Breezometer». URL: <https://www.breezometer.com/air-quality-map/ru/air-quality/united-states/new-york> (дата обращения 06.06.2023).
80. Пекунов В.В., Ясинский Ф.Н. Параллельное решение задачи численного моделирования распространения загрязнений в воздушном бассейне большого города в окрестности предприятия. М., 2003. 78 с.
81. Пенек В.В., Алюян А.Е. Модели и методы для задач окружающей среды. Новосибирск: Наука, 1985. 256 с.
82. Пененко В.В. Методы численного моделирования атмосферных процессов. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. 350 с.
83. Пененко В.В. Рапут В.Ф. О единственности решения задачи прогноза погоды в сфере // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1974. Т.10. № 8. С. 891-894.
84. Пененко В.В., Коротков М.Г. Математическое моделирование гидродинамики и загрязнения атмосферы городов и промышленных регионов // В Сб. «Математические проблемы экологии» СО РАН, Новосибирск.: ИМ СО РАН, 1994. С.81-96.
85. Переведенцев Ю.П., Салахова Р.Х. Введение в геоэкологию атмосферы. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2007. 112 с.
86. Пикус И.М., Бутусов О.Б. Моделирование загрязнения лесов в районе автомагистралей // материалы науч.- практ. конф. «Пути повышения качества обучения в ВУЗах и конкурентоспособности молодых специалистов на рынке труда», 24 июня 2008 г., Тверь, 2008. 114 с.
87. Плуготаренко Н.К., Варнавский А.Н. Применение нейронных сетей для построения модели прогнозирования состояния городской воздушной среды // Инженерный вестник Дона. 2012. № 4(часть 2).
88. Расторгуева Г.В. Некоторые результаты экспериментальных исследований термического режима Запорожья. Труды ГГО. 1974. Вып.332., С. 24-29.
89. Ривин Г.С., Воронина П.В. Перенос аэрозоля в атмосфере: имитационные эксперименты // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. № 7. С. 744-747.
90. Сайт НПП «Логус». URL: <http://www.logus.ru/catalog/info45.htm> (дата обращения 02.06.2023).
91. Самарская Е.В., Сузан Д.В., Тишкин В.Ф. Построение математической модели распространения загрязнений в атмосфере // Математическое моделирование. 1997. Т. 9. № 11. С. 59-71
92. Седунов Ю.С., Борзилов В.А., Клепикова Н.В. и др. Физико-математическое моделирование переноса в атмосфере радиоактивных веществ в результате аварии на Чернобыльской АЭС // Метеорология и гидрология. 1989. № 9. С. 6-13.
93. Семакина А.В., Воронов И.А., Ренкез Г.Б., Коробейникова А.А. Данилов П.Я., Зуев А.М. Разработка интеллектуального геосервиса для мониторинга экологической обстановки // Формирование научного и кадрового потенциала развития Удмуртской Республики 8-10 ноября: сб. конф. Ижевск: Удмуртский университет, 2022. 645 с.
94. Семенчин Е.А., Кузякина М.В. Стохастические методы решения обратных задач в математической модели диффузии. М.: ООО Издательская фирма «Физико-математическая литература», 2012. 173 с.
95. Семченко Б.А., Белов П.Н. Метеорологические аспекты охраны природной среды. М.: Издательство МГУ, 1984. 96 с.
96. Сеттон О.Г. Микрометеорология. Л.: Гидрометеоиздат, 1958. 352 с.
97. Смит К. Основы прикладной метеорологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 424 с.
98. Сонькин Л.Р. Вопросы прогнозирования фоновое загрязнения атмосферы в городах // Труды ГГО. 1974. Вып. 314. С. 40-45.
99. Сонькин Л.Р. Синоптико-статистический анализ и краткосрочный прогноз загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. С. 224.

100. Степаненко С.Н., Волошин В.Г., Тупцов С.В. Новая формула оценки уровня загрязнения атмосферы промышленными выбросами // Український гідрометеорологічний журнал. 2009. № 4. С. 227-237.
101. Сухонос В.И. О дифференциальных свойствах обобщенного решения стационарной задачи динамики атмосферы // Динамика неоднородной жидкости. 1980. Вып.44. С. 106-120.
102. Талерко Н.Н., Гарагер Е.К., Кузьменко Г.Г. Программный комплекс для оценки и прогнозирования радиационной ситуации в Чернобыльской зоне отчуждения // Ядерная и радиационная безопасность. 2010. Вып. 3. С. 45-49.
103. Темам Р. Уравнения Навье–Стокса. Теория и численный анализ. 2-е изд. М.: Мир, 1981. 408 с.
104. Типовые характеристики нижнего 300-метрового слоя атмосферы по измерениям на высотной мачте / под ред. Н.Л. Бызовой. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 69 с.
105. Турбулентность. Принципы и применения / под ред. У. Фроста, Т. Моулдена. М.: Мир, 1980. 535 с.
106. Тургумбаева Р.Х. Оценка и прогнозирование загрязнения приземного слоя атмосферы выбросами химического предприятия. Казахский национальный педагогический университет им. Абая, 2001. 65 с.
107. Учет дисперсионных параметров атмосферы при выборе параметров для атомных электростанций // Серия изданий по безопасности. № 50-SG-S3. Вена: МАГАТЭ, 1982. 184 с.
108. Фролов А.В., Резник Л.А., Бондаренко С.М., Бузало Н.С. Научные подходы к созданию информационно-аналитической системы мониторинга и управления качеством воздушной среды региона // Изв.вузов Сев.-Кавк. регион. техн. науки. 2001. № 2. С.102-104.
109. Хинце И.О. Турбулентность, ее механизм и теория. М.: Гос. Изд. физ.-мат лит., 1963. 451 с.
110. Шаталов А.А., Лисанов М.В., Печеркин А.С., Пчельников А.В., Сумской С.И. Методика расчета рассеяния аварийных выбросов, основанная на модели «тяжелого газа» // Безопасность труда в промышленности. 2004. № 9. С. 46-52.
111. Шварц К.Г., Шкляев В.А. Моделирование процессов переноса примеси в свободной атмосфере с помощью квазитрехмерной модели // Метеорология и гидрология. 2000. № 8. С.44-54.
112. Швыряев А.А., Меньшиков В.В. Оценка риска от систематического загрязнения атмосферы в исследуемом регионе: Методические указания к задаче практикума. М: Изд-во Химический факультет Московского Университета, 2002. 41 с.
113. Штриплинг Л.О. Баженов В.В., Калинин Ю.В., Нижневясов О.В. Геоинформационная система мониторинга состояния атмосферного воздуха и контроля за выбросами загрязняющих веществ предприятиями // Омский научный вестник. 2010. № 1(94). С. 203-208.
114. Щербаков А.Ю. Модель нижнего слоя атмосферы и переноса примесей в воздушном бассейне города. // Изменение природных комплексов Нечерноземной зоны под воздействием хозяйственной деятельности человека. 1982. С. 134-154.
115. Экологический программный комплекс для персональной ЭВМ / под ред. А.С. Гаврилова. СПб.: «Гидрометеоздат», 1992. 83 с.
116. Экологический программный комплекс для управления качеством атмосферы городов и промышленных зон «Zone». URL: <http://lenecosoft2002.narod.ru/prod01.htm> (дата обращения 31.07.2023).
117. Юдин М.С. Распространение атмосферного фронта и примеси над изолированной орографией. Институт Вычислительной Математики и Математической Геофизики СО РАН, 2007. 68 с.
118. Ackerman T.P. A Model of the Effects of Aerosols on Urban Climates with Particular Applicatios to the Los Angeles Basin. J. Atm.Sci. 1977. Vol 34. № 3. С. 531-547.
119. ADMS5 – Industrial Air Pollution Modelling Software. URL: <https://www.environmental-expert.com/software/adms-5-industrial-air-pollution-modelling-software-18344> (дата обращения 29.08.2023).
120. Advanced software for modelling dense gas dispersion. URL: <https://www.cerc.co.uk/environmental-software/GASTAR-model.html> (дата обращения 31.07.2023).
121. Air Pollution Modelling and its Application XIII // S.-E. Gryning, E. Batcharova (ed.), Kluwer Academic / Plenum Publishers, New York-Boston-dodrecht-London-Moscow, 2000. 530 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4153-0>
122. Albergel A., Martin D, Strauss B., Gross J.M. The Chernobyl accident: modeling of dispersion over Europe of the radioactive plume and comparison with air activity measurements // Atmospheric Environment. 1988. Vol. 22. pp.839-857.
123. Armistead G. Russell Mathematical modeling of the effect of emission sources on atmospheric pollutant concentrations // Camagie mellon university. 1988. 692 p.
124. Atmospheric Dispersion Modelling. URL: <https://en.ilmatieteenlaitos.fi/atmospheric-dispersion-modelling-group> (дата обращения 31.07.2023).
125. Austin J. Toward the four-dimensional assimilation of stratospheric chemical constituents // J. Geophysics. Res. 1992. Vol. 97. P. 62-75.
126. Bornstein R.D. Observations of Urban Heat Island Effects in New York City // J.App.Met. 1968. Vol.7. № 4. P. 575-582.
127. Brandt J, Chritensen J., Zlatev Z. Real time predictions of transport, dispersion and deposition from nuclear accidents // Environmental Manadgmetn and Helth. 1999. Vol. 10/4. P. 216-223.
128. CALPUFF URL: <https://www.enviro-ware.com/calpuff/> (дата обращения 29.08.2023).
129. Carlslaw D.C. Development of an urban inventory for road transport emission of NO2 and comparison with estimates derived from ambient measurements // Bevers Atmospheric Environment. 2005. Vol. 39. P. 2049-2059.
130. Chang J.S., Brost R.A., Isaksen I.S.A., Madronich S., Middleton P., Stockwell W.R., Walcek C.J. A three-dimensional Eulerian acid deposition model: physical concept and formulation // J. Geophys. Res. 1987. Vol. 92. P. 18691-18699.

131. *Clarce I.F.* Nocturnal Urban Boundary Layer Over Cincinnati, Ohio // *Mon.Wea.Rev.* 1969. Vol. 97. № 8. P. 582-589.
132. *Eliaassen A.* A review of long-rang transport modeling // *J. Of Applied Meteorology.* 1982. Vol. 19. № 3. P. 92-115.
133. Enhancements to the UK Photochemical Trajectory Model for simulation of secondary inorganic aerosol // *Atmospheric Environment.* 57. P. 278-288.
134. *Henderson-Sellers B.* A simple formula for vertical eddy diffusion coefficients under condition of nonneutral stability // *Journal of Geophysical Research.* Vol. 87, 1982. P. 5860-5864.
135. *Howard L.M.* Note on a paper of John W Miles // *J. Fluid Mech.* 1961. Vol. 10. № 4. P. 509-512.
136. *Koostaja T.V.* Tartu Observatoorium Toraveres. 2014. 214p.
137. *Lamb R.G., Neiburger M.* An interim version of a generalized urban air pollution model // *Atmos. Environ.* 1971. P. 239-264.
138. Large scale computations in air pollution modeling // *Z. Zlatev et al. (ed.), Proceeding of the NATO Advanced research Workshop on Large Scale Computations in air Pollution Modelling, 6-10 July 1998 Sofia, Bulgaria.* Kluwer Academic Publishers, 1999. 392 p.
139. Long-range air pollution: from models to policies // *D. Syrakov, E. Batcharova, B. Wiman (ed.): Proceeding from the Swedish-Bulgarian Workshop, Sozopol, Bulgaria, 1997.* 277 p.
140. *Loon M., Bultjes P.J.H., Segers A.J.* Data assimilation of ozone in the atmospheric transport chemistry model LOTOS // *Environmental Modelling & Software.* 2000. 15. P. 603-609.
141. Mateial of IEAI Meeting, Chapter 3. 1987. 26 p.
142. *Mc Elroy I.L.* Numerical Study of Nocturnal Heat Island Over a Medium Sized Mid-Latitude City (Columbus, Ohio) Bound. – *Layer Met.* 1973. Vol. 3. P. 442-453.
143. *McNider R.T. Moran M.D., Pielke R.A.* Influence of diurnal and inertial boundary layer oscillations on long-rang dispersion // *Atmospheric Environment.* 1988. № 11. P. 2445-2462.
144. *Miloshev N.G.* Air pollution studies at the geophysical institute, Bulgarian academy of sciences // 6th International scientific conference SGEM 2006 Albena. P. 337-348.
145. *Mohammed A., Salim A.A., Hazem T., Zahraa A.H., Fadi A.* PolluMap: A Pollution Mapper for Cities // *Conference materials: Innovations in Information Technology, 2006.* URL: https://www.researchgate.net/publication/224281084_PolluMap_A_Pollution_Mapper_for_Cities (дата обращения 31.07.2023).
146. National Institute of Meteorology and Hydrology, Bulgarian Academy of Sciences, Bulgaria. URL: https://www.bodc.ac.uk/data/bodc_database/ctd/ (дата обращения 31.07.2023).
147. National Technical University of Athens, School of Mechanical Engineering, Fluids Section. Laboratory of Aerodynamics. URL: http://www.aerolab.mech.ntua.gr/environmental_and_industrial_experiments.html (дата обращения 31.07.2023).
148. *Oke T.R.* Review of Urban Climatology 1973-1976. WMO Tech/ Note № 169, 1979. 100 p.
149. *Pasquill F.* Atmospheric diffusion. The dispersion of wind born material from industrial and other sources. N.Y.: Wiley, 1974. 429 p.
150. *Peterson W.B.* User's Guide for HIWAY-2. A Highway Air Pollution Model. Research and Development. USA. 1980. 83 p.
151. *Petrukhin V.A., Vishensky V.A.* Modelling and evolution of Eurasian Tropospheric background pollution based on the data bank of multi-year measurements // *Changing composition of the troposphere. Spatial Environment. Rep. № 17. WMO.* 1989. P. 83-86.
152. *Phisic W.L.* LADM: Lagrangian Atmospheric Dispersion Model. CSIRO. Division of Atmospheric Research. 1994. Technical Paper №. 24. P. 121-145.
153. *Pielke R.A., Uliasz M.* Use of meteorological models as input to regional and mesoscale air quality models. Limitations and strengths. // *Atmospheric Environmental.* 1998. Vol. 32. № 8. P. 1255-1266.
154. *Risutova Z.* Analytical model of air pollution due to motor car traffic // *Contrib.Geophys.Inst.Slov.Acad.Sci.* 1991. № 11. P. 99-107.
155. *Schmidt W.* Der Massenaustausch bei der undgeordneten Stromung in freier Luft und seine Folgen. *Sitzungsber. Akad.Wiss.Wien, Math.-nat.K1 (2a) Bd.126.* 1917. № 6. P. 757-804.
156. *Taylor G.I.* Eddy motion in the atmosphere. *Phil. Trans. Roy. Soc. ser. A.* 1915. Vol. 215. P. 1-26.
157. *Tesler R.* Urban Meteorological Studies in Uppsals. Abs. Uppsala Dossertation Faculti Sci., 1981. 21 p.
158. The DETRACT atmospheric dispersion modeling system. URL: https://atmosphericdispersion.fandom.com/wiki/National_Centre_of_Scientific_Research_%22DEMOKRITOS%22#The_DETRACT_atmospheric_dispersion_modeling_system (дата обращения 31.07.2023).
159. *Uliasz M.* The atmospheric mesoscale dispersion modeling system // *J. of Applied Meteorology.* 1993. Vol. 32. P. 139-149.
160. *Van Jaarsverld J.A., Van Pul W.A.J., De Leeuw F.* Modeling transport and deposition of persistent organic pollution in the European region // *Atmospheric Environmental.* 1997. Vol.32. P. 1011-1024.
161. *Venticatram A.* The Development and Application of a Simplified Ozone Modelling System (SONS) // *Atmospheric Environment.* 1999. Vol. 28. № 22. P. 3365-3678.
162. *Vukovich F.M., King W.I.* A Theoretical Study of the St. Louis Heat Island: Comparisons Between Observed Data and Simulation Result on the Urban Heat Island Circulation // *J.App.Met.* Vol. 19. № 7. 1980. P. 761-778.
163. WindRose PRO Help by Enviroware srl. URL: https://www.enviroware.com/windrose/help/load_isc3st.shtml (дата обращения 31.07.2023).
164. *Yokoyama O, Gamo M., Yamamoto S.* The vertical profiles of the turbulence quantities I the atmospheric boundary layer // *J. Met. Soc. Japan.* 1977. Vol. .55. № 3. P. 264-272.
165. *Yu-Ning H.* On the classical Bradshaw – Richardson number: Its generalized form, properties, and application in turbulence. 2018. Vol.30, Iss. 12.

166. Zhang R., Migxing W., Qingcun Z. Global Two-Dimensional Chemistry Model and Simulation of Atmospheric Chemical Composition // *Advances in Atmospheric Sciences*. 2012. Vol.17(1). P.72-82.

References

- Averin, G. and Pavliy, V., 2007. Algoritmy modelirovaniya poley zagryazneniya atmosfery nad promyshlennym gorodom po eksperimental'nym dannym [Algorithms for modeling atmospheric pollution fields over an industrial city based on experimental data]. *estnik Donetskogo universiteta. Seriya yestestvennyye nauki*. (2), pp.338-346. (in Russian)
- Aloyan, A., 1985. Chislennoye modelirovaniye dal'nego perenosa primesey v atmosfere [Numerical modeling of long-range transport of impurities in the atmosphere]. *Chislennyye metody v zadachakh fiziki atmosfery i okhrany okruzhayushchey sredy*, pp. 59-72. (in Russian)
- Antropov, K., Kazmer, Yu., and Varaksin, N., 2010. Opisaniye prostranstvennogo raspredeleniya za-gryazneniya atmosfernogo vozdukh promyshlennogo tsentra metodom LAND USE REGRESSION (obzor) [Description of the spatial distribution of atmospheric air pollution of an industrial center by the land-use regression method (review)]. *Ekologicheskiye sistemy i pribory*. (1), pp. 28-41. (in Russian)
- Arguchintsev, V., 1994. Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniye aerorozley v pogranchnom sloye atmosfery [Numerical modeling of aerosol propagation in the boundary layer of the atmosphere]. *Optika atmosfery i okeana*, 7(8), pp. 1106-111. (in Russian)
- Ariel, N., Egorov, B. and Murasheva, A., 1987. O kharakteristikakh profilya vetra v nizhnem sloye vozdukh nad okeanom [On the characteristics of the wind profile in the lower layer of air above the ocean]. *Tr. GGO*, (506), pp. 183-191. (in Russian)
- Berlyant M. (ed.), 1982. *Atmosfernaya diffuziya i zagryazneniye vozdukh* [Atmospheric diffusion and air pollution]. Leningrad, Hydrometeoizdat. 129 p. (in Russian)
- Akhmetzhanov, H. and Degtyarev, V., 1979. Ob otsenke faktorov, formiruyushchikh mikroklimat Alma-Aty [On the assessment of factors forming the microclimate of Alma-Ata]. *Meteorologiya i Gidrologiya*. (1), pp. 66-71. (in Russian)
- Akhmetov, M., 1978. Meteorologicheskiye aspekty za-gryazneniya atmosfery v rayonakh razmeshcheniya pred-priyatiy ugol'noy promyshlennosti [Meteorological aspects of atmospheric pollution in areas where coal industry enterprises are located.] *Metody izucheniya, raschetov i prognozov vodnykh i klimati-cheskikh resursov*. Pp. 111-126. (in Russian)
- Bakin, R., Zaryanov, A., Kiselev, A., Krasnoperov, S., Merkushev, P., Pripachkin, D., Shvedov, A. and Shikin, A., 2018. Concept of computational and predictive system reltran as applied to safety analyses in cases of atmospheric releases of radioactive substances. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti*, №3(91), pp. 27-38. (in Russian)
- Balter, B., Balter, D., Egorov, V., Stalnaya, M., Faminskaya, M., 2021. Space observations of surface parameters for aermod modeling of industrial air pollution. part 1. literature review, data, land use classification. *Cosmic Research*, 18(2), pp. 97-111.
- Bart, A., Belikov, D. and Strachenko, A., 2011. Supercomputer-based mathematical model for air quality prediction in the urban area. *Matematika i mekhanika*, 3(15), pp. 15-24. (in Russian)
- Bakhareva, G. and Herbut-Geibovich, A., 1978. Pervyye rezul'taty mezometeorologicheskikh nablyudeniy v Moskve i blizhayshikh prigorodakh [The first results of mesometeorological observations in Moscow and the nearest suburbs]. *Trudy TSVGMO*. 12, pp. 59-67. (in Russian)
- Belov, I., Bespalov, M., Klochkova, L., Kuleshov, A., Suzan, D. and Tishkin, V., 2000. Transportnaya model' rasprostraneniya gazoobraznykh primesey v atmosfere goroda [Transport model of the propagation of gaseous impurities in the city atmosphere]. *Matematicheskoye modelirovaniye*. 12(11), pp. 56-82. (in Russian)
- Belov, P. and Karlova, Z., 1990. Trayektornaya model' perenosa zaryazneniy [Trajectory model of the transfer of contamination]. *Meteorologiya i Gidrologiya*. 12, pp. 67-74. (in Russian)
- Belolipetsky, V. and Shokin, Yu., 1997. *Matematicheskoye modelirovaniye v zadachakh okruzhayushchey sredy* [Mathematical modeling in environmental problems]. Novosibirsk: "INFOLIO-press". 240 p. (in Russian)
- Belyaev, I., and Khrushch, V., 1993. Matematicheskaya mo-del' nestatsionarnogo prostranstvennogo perenosa zagryazneniya v atmosfere [Mathematical model of nonstationary spatial transport of pollution in the atmosphere]. *Izvestiya vuzov. Energy*. 11-12, pp. 134-141. (in Russian)
- Beresnev, S. and Grazin, V., 2007. Vertikal'nyy vetrovoy perenos aerorozley v stra-tosfere [Vertical airflow in the stratosphere]. *Optika atmosfery i okeana*, 20(6), pp. 537-543. (in Russian)
- Berlyand, M., Genrikhovich, E. and Onikul, V., 1990. Modelirovaniye za-gryazneniya atmosfernogo vozdukh iz nizkikh i kho-lodnykh istochnikov [Modeling of atmospheric air pollution from low and cold sources]. *Meteorologiya i gidrologiya*, (5), pp. 5-17. (in Russian)
- Berlyand, M., 1985. *Prognoz i regulirovaniye sostoyaniya atmosfery* [Forecast and regulation of the state of the atmosphere]. Leningrad, Gidrometeoizdat. 272 p.
- Berlyand, M., 1975. *Sovremennyye problemy atmosfernoy diffuzii i zagryazneniya atmosfery* [Modern problems of atmospheric diffusion and atmospheric pollution]. Leningrad, Gidrometeoizdat. 448 p. (in Russian)
- Beschastnov, S., 2003. Vliyaniye sdvigoov vetra na poperechnoye rasseyaniye strui gazoerazol'noy primesi na bol'shikh rassto-yaniyakh ot istochnika [The influence of wind shear on transverse scattering of a jet of aerosol impurity at large distances from the source]. *Meteorologiya i Gidrologiya*. (12), pp. 39-45. (in Russian)
- Borzilov, V., Klepikova, N. et al., 1989. Meteorologicheskiye usloviya dal'nego perenosa radioaktivnykh produktov ava-rii na Chernobyl'skoy atomnoy elektrostantsii [Meteorological conditions of long-range transport of radioactive products of the Chernobyl nuclear power plant accident]. *Meteorologiya i Gidrologiya*. (11), pp. 5-11. (in Russian)

23. Borzilov, V., Veltischeva, N., Klepikova, N., Novitsky, M., Burkov, A. and Metelkina, L., 1988. Regional'naya model' perenosa po-lidispersnoy primesi v atmosfere [Regional model of polydisperse impurity transfer in the atmosphere]. *Meteorologiya i Gidrologiya*. (4), pp. 57-65. (in Russian)
24. Borodulin, A., Maistrenko, G. and Chaldin, B., *Statisticheskoye opisaniye rasprostraneniya aerorozoley v atmosfere* [Statistical description of aerosol propagation in the atmosphere]. Novosibirsk, NSU. 124 p. (in Russian)
25. Bril, A., Drugachenok, M., Kabashnikov, V. et al., 1988. Issledovaniya rasseivaniya solyanoy pyli v Soligorskom promyshlennom rayone [Studies of salt dust dispersion in the Soligorsk industrial district]. *Meteorologiya i Gidrologiya*. (12), pp. 64-71. (in Russian)
26. Buzalo, N., 2003. *Matematicheskoye modelirovaniye perenosa primesi v mezometeorologicheskoy pogranichnom sloye atmosfery* [Mathematical modeling of impurity transfer in the mesometeorological boundary layer of the atmosphere]. Candidate's Dissertation of Technical Sciences. Novocheerkassk, 174 p.
27. Buzalo, N., 1999. *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryaz-nyayushchey primesi v atmosfere* [Numerical modeling of the spread of a contaminant in the atmosphere]. In: *Scientific and Technical Creativity of the Young - to the Revival of the University: Proceedings of Scientific-Technical. Conf. Students and Postgraduates of South-Russian State Technical University. Novocheerkassk, South-Russian State Technical University*, pp. 30-31. (in Russian)
28. Buzalo, N. and Nikiforov, A., 1999. *Rezultaty chislennogo issledovaniya zagryazneniya g. Novocheerkasskka dioksidom azota i ben(a)pirenom* [Results of a numerical study of pollution of Novocheerkassk with nitrogen dioxide and ben(a)pyrene]. In: *The Intellectual reserve of the University – Solving the Problems of the North Caucasus region: Proceedings of the 48th Session of the Scientific and Technical Conf. Student. and Asp. of the South Russian State Technical University (NPI). Novocheerkassk, South Russian State Technical University*, pp. 29-30. (in Russian)
29. Byzova, N., Ivanov, V. and Garger, E., 1989. *Turbulentnost' v pogranichnom sloye atmosfery* [Turbulence in the boundary layer of the atmosphere]. Leningrad, Gidrometeoizdat. 262 p. (in Russian)
30. Businger, J., Tennekes, H., Wingaard, J., 1985. *Atmospheric turbulence and air pollution modelling (Dordrecht etc.)* Leningrad, Hydrometeoizdat. 351 p. (in Russian)
31. Veltischeva, N., 1980. Modelirovaniye transgranichnogo perenosa dnuvki-si sery s uchetom vertikal'nykh dvizheniy [Modeling of transboundary transport of sulfur dioxide taking into account vertical movements]. *Meteorologiya i Gidrologiya*. (7), pp. 12-19. (in Russian)
32. Vladimirov, S., 1999. Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya pas-sivnoy primesi v atmosfere [Numerical modeling of the propagation of passive impurities in the atmosphere]. *Meteorologiya i Gidrologiya*. (7), pp. 22-35. (in Russian)
33. Voronina, P., Klimova, E., Kulikov, A., Medvedev, S., Ivin G. and Fomin, V., 1994. Regional'naya skhema matematicheskogo modelirovaniya protsessov v atmosfere dlya prove-deniya ekologicheskikh ekspertiz [Regional scheme of mathematical modeling of processes in the atmosphere for environmental expertise]. *Vychislitel'nyye tekhnologii*. 3(8), pp. 27-44. (in Russian)
34. Gabdullin, V., Semakina, A. and Shklyayev, M., 2009. Modelirovaniye raspredeleniya primesey v atmosfere (na primere Udmurtskoy Respubliki) [Modeling of the distribution of impurities in the atmosphere (on the example of the Udmurt Republic)]. *Bulletin of the Udmurt University. Biology. Earth Sciences*. (1), pp. 117-126. (in Russian)
35. Gevlich, I., 2001. Chislennoye modelirovaniye perenosa gazoobraznykh chistykh sredstv na osnove metodologii iskusstvennogo intellekta [Numerical modeling of the transfer of gaseous emissions based on the methodology of artificial intelligence]. *Shtuchnyy intellekt*. 4, pp. 13-17. (in Russian)
36. Integral Group of Companies. Available from: <https://integral.ru> [Accessed 31th July 2023].
37. Grigoriev, Yu. and Shokin, Yu., 1993. Statisticheskiye modeli i metody v zadachakh migra-tsii aerorozoley [Statistical models and methods in aerosol migration problems]. *Vychislitel'nyye tekhnologii*, 2(4), pp. 117-140. (in Russian)
38. Gromov, V. and Gormatyuk, Y., 1989. Rasseyaniye primesi ot statsionar-nykh istochnikov v prizemnom sloye atmosfery [Scattering of impurities from stationary sources in the surface layer of the atmosphere]. *Meteorologiya i Gidrologiya*. (2), pp. 37-47. (in Russian)
39. Gusev, N., 1986. *Radioaktivnyye vybrosy v biosfere* [Radioactive emissions in the biosphere]. Moscow, Energoatomizdat, pp. 64-66. (in Russian)
40. Demidov, G. and Marchuk, G., 1966. Teorema sushchestvovaniya resheniya zadachi kratko-srochnogo prognoza pogody [The theorem of the existence of a solution to the problem of short-term weather forecast]. *DAN OF THE USSR*. 170(5), pp. 1006-1008. (in Russian)
41. Dovgalyuk, Yu. and Ivlev, L., 1988. *Fizika vodnykh i drugikh atmosferynykh aerorozoley* [Physics of water and other atmospheric aerosols]. St. Petersburg, Publishing House of St. Petersburg State University. 320 p. (in Russian)
42. Edigarov, A. and Suleymanov, V., 1995. Matematicheskoye modelirovaniye avariynogo istecheniya i rasseivaniya prirodnoy gaza pri vzryve gazoprovoda [Mathematical modeling of emergency outflow and dispersion of natural gas during a gas pipeline explosion]. *Matematicheskoye modelirovaniye*. (4), pp. 23-45. (in Russian)
43. Elokhin, A., Talerko, N., Buikov, M. et al., 1996. Sravneniye eksperimental'nykh i raschetnykh dannykh prizemnoy kontsentratsii primesi v atmosfere [Comparison of experimental and calculated data on the surface concentration of impurities in the atmosphere]. *Meteorologiya i Gidrologiya*. (2), pp. 41-47. (in Russian)
44. Atkins, P., Bek, L., Blekvud, T., Boun, N., Bubenik, D., Vestberg, K., Gerstl, R., Grinfeld, S., Krokker, B., Leonardos, G., Lloyd, A., Nepp, K., Paylet, M., Roberts, D., Sparks, A., Toro, R., Khenz, D., Short, L., Eddinger, D., 1988. *Zashchita atmosfery ot promyshlennogo zagryazneniya* [Protection of the atmosphere from industrial pollution]. Moscow, Metallurgiya. 711 p. (in Russian)
45. Zilitinkevich, S., 1970. *Dinamika pogranichnogo sloya atmosfery* [Dynamics of the boundary layer of the

atmosphere]. Leningrad, Gidrometeoizdat. 290 p. (in Russian)

46. Ivanitskiy, M., 2018. Statistical modeling of distribution of concentration of solid particles in the atmosphere district location boiler, combusting non-project fuel. *Proceedings of the higher educational institutions. Energy Sector Problems*, 20(3-4), pp.129-135. (in Russian)

47. Ivanov, A., Bril, A., Drugachenoe, M. et al., 2000. *Matematicheskoye modelirovaniye rassyaniya primesi v vozdukhnom bassejne promyshlennogo regiona. Sopostavleniye raschetnykh i eksperimental'nykh dannykh [Mathematical modeling of impurity scattering in the air basin of an industrial region. Comparison of calculated and experimental data]. In: Measurement, Modeling and Information Systems as Means of Environmental Rehabilitation at the Urban and Regional Levels: Proceedings of the International Conference "ENVIROMIS 2000". Publishing House of the Central Research Institute, pp. 156-162. (in Russian)*

48. Israel, Yu., Petrov, V., Severov, D. et al., 1987. Modelirovaniye vypadeniya radioaktivnykh osadkov v okrestnosti Chernobyl'skoy AES [Simulation of radioactive fallout in the vicinity of the Chernobyl nuclear power plant]. *Meteorologiya i Gidrologiya*. (2), pp. 5-10. (in Russian)

49. Katkov, V., 1998. *Regional'naya model' perenosa zagryazneniy [Regional model of pollution transfer]. In: Digital Information Processing and Management in an Emergency Situation: Reports of the First International Conference, Minsk. 2, pp.140-147. (in Russian)*

50. Kachurin, L., 1990. *Fizicheskiye osnovy vozdeystviya na atmosfernyye protsessy [Physical bases of influence on atmospheric processes]. Leningrad, Gidrometeoizdat, pp. 463. (in Russian)*

51. Israel Yu. (ed.), 1987. *Kislotnyye dozhd [Acid rain]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 276 p. (in Russian)*

52. Kitaygorodsky, S., 1970. *Fizika vzaimodeystviya atmosfery i okeana [Physics of interaction between the atmosphere and the ocean]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 284 p. (in Russian)*

53. Kochergin, V., Sukhorukov, V. and Tsvetova, E., 1974. Modelirovaniye protsessov vertikal'noy turbulentnoy diffuzii v okeane [Modeling of vertical turbulent diffusion processes in the ocean]. *Chislennyye metody rascheta okeanicheskikh techeniy*. Novosibirsk, Central Research Center of the Siberian Branch. USSR Academy of Sciences, pp. 129-153. (in Russian)

54. Kratzer, P., 1958. *Klimat goroda [The climate of the city]. Moscow, Inostrannaya literatura, 236 p. (in Russian)*

55. Laichtman, D., 1970. *Fizika pogranichnogo sloya atmosfery [Physics of the boundary layer of the atmosphere]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 290 p. (in Russian)*

56. Levin, A., 1971. K voprosu ob uravneniyakh, opisyyayushchikh turbulentnyuyu diffuziyu v atmosfere [On the question of equations describing turbulent diffusion in the atmosphere]. *Tr. Ukr.NIGMI*, (103), pp. 102-107. (in Russian)

57. Lozhkin, V., 2017. New approach for predicting of air pollution near highway caused by burning peat bog. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 26(6), pp. 60-69. <https://doi.org/10.18322/PVB.2017.26.06.60-69> (in Russian)

58. Markvad, V. and Ile, P., 1988. Zavisimost' vypadnykh dioksida sery i sul'fatov na podstilayushchuyu poverkhnost' ot meteorologicheskikh usloviy, parametrov vybrosov i rasstoyaniya do istochnika vybrosov [Dependence of sulfur dioxide and sulfate precipitation on the underlying surface on meteorological conditions, emission parameters and distance to the source of emission]. *Meteorologicheskkiye aspekty zagryazneniya atmosfery: itogi sotrudnichestva sotsialisticheskikh stran*. Leningrad, Gidrometeoizdat, 239 p. (in Russian)

59. Marchuk, G., 1982. *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy [Mathematical modeling in the problem of the environment]. Moscow, Nauka, 319 p. (in Russian)*

60. Marchuk, G. and Aloyan, A., 1995. Global'nyy perenos primechi v atmosfere [Global transfer of matter in the atmosphere]. *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana*. 31(5), pp. 597-606. (in Russian)

61. Marchuk, G., Kuzin, V. and Skiba, Yu., 1983. Proyektionno-raznostnyy metod rascheta sopryazhennykh funktsiy dlya modeli perenosa tepla v sisteme atmosfera-ocean-pochva [Projection-difference method for calculating conjugate functions for a model of heat transfer in the atmosphere-ocean-soil system]. *Aktual'nyye problemy vychislitel'noy i prikladnoy matematiki*. Novosibirsk, Nauka, pp. 149-154. (in Russian)

62. Marchuk, G., Penenko, V., Aloyan, A. and Lazriev, G., 1979. Chislennoye modelirovaniye mikroklimata goroda [Numerical modeling of the microclimate of the city]. *Meteorologiya i Gidrologiya*. (8), pp. 5-15. (in Russian)

63. Marchuk, G., Rivin, G. and Yudin, M., 1973. Chislennyye eksperimenty s balansovymi skhemami [Numerical experiments with balance schemes]. *Izv. AN SSR. Physics of the Atmosphere and Ocean*. 9(11), pp.1186-1190. (in Russian)

64. Byzova N. and Makhonko, K. (ed.), 1971. *Meteorologiya i atomnaya energiya [Meteorology and atomic energy]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 648 p. (in Russian)*

65. Vorobyov V. and Snytko V. (ed.), 2002. *Metodologiya sistemnogo ekologicheskogo kartografirovaniya [Methodology of systematic ecological mapping]. Irkutsk, Publishing House of the Institute of Geography SB RAS, 194 p. (in Russian)*

66. Metody raschetov rassevaniya vybrosov vrednykh (zagryaznyayushchikh) veshchestv v atmosfernom vozdukh [Methods of calculating the dispersion of emissions of harmful (polluting) substances in atmospheric air]. Decree of Ministry of Natural Resources of Russia № 273 from 06.06.2017. (in Russian)

67. Monin, A., 1965. O strukture pogranichnogo sloya atmosfery [On the structure of the boundary layer of the atmosphere]. *Izvestiya AN SSSR, FAO*. 2(3), pp.252-265. (in Russian)

68. Monin, A. and Obukhov, A., 1954. Osnovnyye zakonomernosti turbulentnogo peremeshivaniya v prizemnom sloye atmosfery [The main patterns of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere]. *Tr. Geofiz. Int-ta AN SSSR*. 24(151). (in Russian)

69. Monin, A., 1956. Poluempiricheskaya teoriya turbulentnoy diffuzii [Semiempirical theory of turbulent diffusion]. *Tr. Geofiz. in-ta AN SSSR*. 33(160). (in Russian)

70. Monin, A. and Yaglom, A., 1965. *Sticheskaya gidromekhanika* [Static hydromechanics]. Moscow, Nauka, 639 p. (in Russian)
71. Monin, A. and Ozmidov, R., 1981. *Okeanskaya turbulentnost'* [Oceanic turbulence]. Leningrad, Gidrometeoizdat. 320 p. (in Russian)
72. Monin, A. and Obukhov, A., 1954. Osnovnyye zakonomernosti turbulentnogo peremeshivaniya v prizemnom sloye atmosfery [The main patterns of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere]. *Tr.Geofiz. Inta AN SSSR*. 24(151). (in Russian)
73. 2001. *Monitoring ambient air quality for health impact assessment*. WHO Regional Office for Europe, (85), 316 p. (in Russian)
74. Muratova, G., Krukier, L., Datsyuk, V., Datsyuk, O., Chikin, A. and Zubov, V., 2008. *Modelirovaniye protsessov rasprostraneniya primesey vozduшной srede v rayone ob'yektov energetiki* [Modeling of the processes of propagation of impurities in the air environment in the area of energy facilities]. In: *Telematics-2008: Proceedings of the 15th Scientific and Practical Conference, 2008, St. Petersburg. 1*, 536 p. (in Russian)
75. Scientific and practical portal "Ecology of production" (01.01.2007). Available from: <https://www.ecoindustry.ru/magazine/archive/viewdoc/2007/1/872.html> [Accessed 6th February 2023].
76. Nikiforov, A. and Buzalo, N., 2000. *Prognozirovaniye zagryazneniya vozduшной srede promyshlennogo tsentra na osnove uravneniya turbulentnogo perenosa* [Forecasting of air pollution of an industrial center on the basis of the equation of turbulent transport]. In: *Mathematical Modeling and Computer Technologies: Proceedings of 4th All-Russian Symposium, Kislovodsk, pp. 5-7*. (in Russian)
77. Obukhov, A., 1946. Turbulentnost' v neodnorodnoy po temperature atmosphere [Turbulence in a temperature-inhomogeneous atmosphere]. *Trudy In-ta ikh. geofiziki AN SSSR*. 1, pp.95-115. (in Russian)
78. Ozmidov, R., 1986. *Diffuziya primesey v okeane* [Diffusion of impurities in the ocean]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 279 p. (in Russian)
79. Online map "Breezometer" Available from: <https://www.breezometer.com/air-quality-map/ru/air-quality/united-states/new-york> [Accessed 6th June 2023].
80. Pekunov, V. and Yasinsky, F., 2003. *Parallelnoye resheniye zadachi vkluchayet issledovaniye rasprostraneniya zagryazneniy v vozdušnykh basseynakh bol'shogo goroda na territorii predpriyatiya* [Parallel solution of the problem of numerical modeling of pollution propagation in the air basin of a large city in the vicinity of an enterprise]. Moscow, 78p. (in Russian)
81. Peneko, V. and Aloyan, A., 1985. *Modeli i metody dlya resheniya zadach okruzhayushchey srede* [Models and methods for environmental issues]. Novosibirsk, Nauka, 256 p. (in Russian)
82. Penenko, V., 1981. *Metody chislennogo modelirovaniya atmosferykh protsessov* [Methods of numerical modeling of atmospheric processes]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 350 p. (in Russian)
83. Penenko, V. and Raput V., 1974. O yedinstvennosti resheniya zadachi prognoza pogody v sfere [On the uniqueness of solving the problem of weather forecasting in the sphere]. *Izv. AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*. 10(8), pp. 891-894. (in Russian)
84. Penenko, V. and Korotkov, M., 1994. *Matematicheskoye modelirovaniye gidrodinamiki i zagryazneniya atmosfery gorodov i promyshlennykh regionov* [Mathematical modeling of hydrodynamics and atmospheric pollution of cities and industrial regions]. *Matematicheskiye problemy ekologii*. Novosibirsk, IM SO RAN, pp. 81-96. (in Russian)
85. Perevedentsev, Yu. and Salakhova, R., 2007. *Vvedeniye v geoekologiyu atmosfery: uchebnoye posobiye* [Introduction to the geoecology of the atmosphere]. Kazan, Kazan University Publishing House. 112 p. (in Russian)
86. Pikus, I. and Butusov, O., 2008. *Modeling forest pollution in the area of highways* [Modeling of forest pollution in the area of highways]. In: *Ways to Improve the Quality of Education in Universities and the Competitiveness of Young Professionals in the Labor Market: Proceedings of Science Practical Conference, 24 June 2008, Tver, 114p*. (in Russian)
87. Plugotarenko, N. and Varnavskiy, A., 2012. Application of neural networks to build prediction model of urban air pollution. *Engineering Journal of Don*, (4) (part 2).
88. Rastorgueva, G., 1974. Nekotoryye rezultaty eksperimental'nykh issledovaniy termicheskogo rezhima Zaporozh'ya [Some results of experimental studies of the thermal regime of Zaporozhye]. *Trudy GGO*. (332), pp. 24-29. (in Russian)
89. Rivin, G. and Voronina, P., 1998. Perenos aerolya v atmosfere: imi-tatsionnyye eksperimenty [Aerosol transport in the atmosphere: simulation experiments]. *Optika atmosfery i okeana*. 11(7), pp. 744-747. (in Russian)
90. Website of NPP "Logus". Available from: <http://www.logus.ru/catalog/info45.htm> [Accessed 6th February 2023].
91. Samarskaya, E., Suzan, D. and Tishkin, V., 1997. *Postroyeniye matematicheskoy modeli rasprostraneniya zagryazneniy v atmosfere* [Construction of a mathematical model of pollution propagation in the atmosphere]. *Matematicheskoye modelirovaniye*. 9(11), pp. 59-71. (in Russian)
92. Sedunov, Yu., Borzilov, V., Klepikova, N. et. al., 1989. Fiziko-matematicheskoye modelirovaniye perenosa v atmosfere radioaktivnykh veshchestv v rezultate avarii na Chernobyl'skoy AES [Physical and mathematical modeling of atmospheric transport of radioactive substances as a result of the Chernobyl accident]. *Meteorologiya i Gidrologiya*. (9), pp.6-13. (in Russian)
93. Semakina, A., Voronov, I., Renkez, G., Korobeynikova, A. Danilov, P. and Zuev, A., 2022. *Razrabotka intellektual'nogo geoservisa dlya monitoringa ekologicheskoy obstanovki* [Development of an intelligent geoservice for monitoring the environmental situation]. In: *Formation of Scientific and Human Development Potential of the Udmurt Republic: Proceedings of Conf. 8-10 November 2022, Izhevsk, Udmurt University, 645p*. (in Russian)
94. Semenchin, E., Kuzyakina, M., 2012. *Stokhasticheskiye metody resheniya obratnykh zadach v matematicheskoy modeli diffuzii* [Stochastic methods for solving inverse problems in a mathematical model of diffusion]. Moscow, OOO Izdatel'skaya firma «Fiziko-matematicheskaya literatura». 173p. (in Russian)

95. Semchenko, B. and Belov, P., 1984. *Meteorological aspects of environmental protection* [Meteorological aspects of environmental protection]. Moscow, Publishing House of Moscow State University. 96p. (in Russian)
96. Sutton, O., 1958. *Micrometeorology*. Leningrad, Gidrometeoizdat. 352 p. (in Russian)
97. Smith, K., 1978. *Principles of applied climatology*. Leningrad, Gidrometeoizdat. 424 p. (in Russian)
98. Sonkin, L., 1974. Voprosy prognozirovaniya fo-novogo zagryazneniya atmosfery v gorodakh [Issues of forecasting background atmospheric pollution in cities]. *Trudy GGO*. (314), pp. 40-45. (in Russian)
99. Sonkin, L., 1991. *Sinoptiko-statisticheskii analiz i kratkosrochnyy prognoz zagryazneniya atmosfery* [Synoptic and statistical analysis and short-term forecast of atmospheric pollution]. Leningrad, Gidrometeoizdat. 224 p. (in Russian)
100. Stepanenko, S., Voloshin, V. and Tipzov, S., 2009. New formula of estimation of level of the ground concentrations of pollutions from industrial sources. *Ukrains'kiy gidrometeorologichniy zhurnal*. (4), pp. 227-237. (in Russian)
101. Sukhonosov, V., 1980. O differentsial'nykh svoystvakh obobshchennogo resheniya statsionarnoy zadachi dinamiki atmosfery [On the differential properties of the generalized solution of the stationary problem of atmospheric dynamics]. *Dinamika neodnorodnoy zhidkosti*. Novosibirsk, (44), pp. 106-120. (in Russian)
102. Talerko, N., Garager, E., Kuzmenko, G., 2010. Programmnyy kompleks dlya otsenki i prognozirovaniya radiatsionnoy situatsii v Chernobyl'skoy zone otchuzhdeniya [A software package for assessing and predicting radiation radiation in the Chernobyl exclusion zone]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost'*. (3), pp. 45-49. (in Russian)
103. Temam, R., 1981. *Navier-Stokes equations*. Moscow, Mir. 408 p. (in Russian)
104. Byzova, N., 1982. *Tipovyye kharakteristiki nizhnego 300-metrovogo sloya atmosfery po izmereniyam na vy-sotnoy maste* [Typical characteristics of the lower 300-meter layer of the atmosphere according to measurements on a high-altitude mast]. Leningrad, Gidrometeoizdat. 69 p. (in Russian)
105. Frost W. and Moulden T. (ed.), 1980. *Handbook of Turbulence. Fundamentals and Applications*. Moscow, Mir. 535 p. (in Russian)
106. Turgumbaeva, R., 2001. *Otsenka i prognozirovaniye zagryazneniya prizemnogo sloya atmosfery vybrosami khimicheskogo predpriyatiya* [Assessment and forecasting of pollution of the surface layer of the atmosphere by emissions from a chemical enterprise]. Kazakhskiy natsional'nyy pedagogicheskii universitet im. Abaya. 65 p. (in Russian)
107. 1982. *Uchet dispersionnykh parametrov atmosfery pri vybore parametrov dlya atomnykh elektrostantsiy* [Consideration of atmospheric dispersion parameters when choosing parameters for nuclear power plants]. Seriya izdaniy po bezopasnosti № 50-SG-S3. Vienna: IAEA. 184 p. (in Russian)
108. Frolov, A., Reznik, L., Bondarenko, S. and Buzalo, N., 2001. Nauchnyye podkhody k sozdaniyu informatsionno-analiticheskoy sistemy monitoringa i upravleniya kachestvom vozduшной sredy regiona [Scientific approaches to the creation of an information and analytical system for monitoring and managing the quality of the air environment in the region]. *Izv.vuzov Sev.-Kavk. region. Tekhn. nauki*. (2), pp.102-104. (in Russian)
109. Hinze, J., 1963. *Turbulence. An introduction to its mechanism and theory*. Moscow, Fizmatgiz. 451 p. (in Russian)
110. Shatalov, A., Lisanov, M., Pecherkin, A., Pchelnikov, A. and Sumskey, S., 2004. Metodika rascheta rasseyaniya aviarynykh bol'nykh, osnovannaya na modeli «tyazhelogo gaza» [Method of calculating the dispersion of emergency emissions based on the "heavy gas" model]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. (9), pp. 46-52. (in Russian)
111. Shvarts K. and Shklyayev, V., 2000. Simulation of the processes of admixture propagation in the lower atmosphere, related to powerful ejections at abnormal heating. *Meteorologiya i Gidrologiya*, 8, pp. 44-54. (in Russian)
112. Shvyryayev, A. and Menshikov, V., 2002. *Otsenka riska ot sistematicheskogo zagryazneniya atmosfery v predelakh ogranicheniy: Metodicheskiye ukazaniya po resheniyu prakticheskikh zadach* [Risk assessment from systematic atmospheric pollution in the studied region: Methodological guidelines for the task of the workshop]. Moscow, Izd-vo Fakul'tet Khimicheskogo Moskovskogo Universiteta. 41 p. (in Russian)
113. Shtripling, L., Bazhenov, V., Kalinin, Yu., Nizhevyasov, O., 2010. Geoinformation system for monitoring of condition of atmospheric air and control over emissions of polluting substances by enterprises. *Omsk Scientific Bulletin*, 1(94), pp. 203-208. (in Russian)
114. Shcherbakov, A., 1982. Model' nizhnego sloya atmosfery i perenos primesey v vozdušnyy basseyn goroda [Model of the lower layer of the atmosphere and the transport of impurities in the air basin of the city]. *Izmeneniye vykhoda kom-pleksov Nechernozemnoy zony pod vliyaniye khozyaystvennoy deyatel'nosti cheloveka*, pp. 134-154. (in Russian)
115. Gavrilov, A., Voronov, G. and Shcherbo, A., 1992. *Ecological software package for personal computer. theoretical basis and user manual of ecological package "zone"*. St. Petersburg, Gidrometeoizdat. 83 p. (in Russian)
116. Ecological software package for managing the quality of the atmosphere of cities and industrial zones "Zone". Available from: <http://lenecosoft2002.narod.ru/prod01.htm> [Accessed 31th July 2023].
117. Yudin, M., 2007. *Rasprostraneniye atmosferного fronta i primesi nad izolirovannoy orografiyey* [Propagation of the atmospheric front and impurities over isolated orography]. Institut vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy geofiziki SO RAN. 68p. (in Russian)
118. Ackerman, T., 1977. A Model of the Effects of Aerosols on Urban Climates with Particular Applications to the Los Angeles Basin. *J. Atm.Sci.*, 34(3), pp. 531-547.
119. ADMS5 – Industrial Air Pollution Modelling Software. Available from: <https://www.environmental-expert.com/software/adms-5-industrial-air-pollution-modelling-software-18344> [Accessed 29th August 2023].
120. Advanced software for modelling dense gas dispersion. Available from: <https://www.cerc.co.uk/environmental-software/GASTAR-model.html> (дата обращения 31.07.2023) [Accessed 31th July 2023].

121. Gryning S.-E. and Batcharova E. (ed.), 2000. *Air Pollution Modelling and its Application XIII*. New York, Springer New York. 530p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4153-0>
122. Albergel, A., Martin, D, Strauss, B. and Gross, J., 1988. The Chernobyl accident: modeling of dispersion over Europe of the radioactive plume and comparison with air activity measurements. *Atmospheric Environment*, 22, pp. 839-857.
123. Armistead, G., 1988. *Russell Mathematical modeling of the effect of emission sources on atmospheric pollutant concentrations*. Camagie mellon university. 692 p.
124. Atmospheric Dispersion Modelling. Available from: <https://en.ilmati.tieteentaitos.fi/atmospheric-dispersion-modelling-group> [Accessed 31th July 2023].
125. Austin, J., 1922. Toward the four-dimensional assimilation of stratospheric chemical constituents. *J. Geophysics. Res.*, 97, pp. 62-75.
126. Bornstein, R., 1968. Observations of Urban Heat Island Effects in New York City. *J. App. Met.*, 7(4). pp. 575-582.
127. Brandt, J., Christensen, J. and Zlatev, Z., 1999. Real time predictions of transport, dispersion and deposition from nuclear accidents. *Environmetal Manadgmetn and Helth*, 10(4), pp. 216-223.
128. CALPUFF. Available from: <https://www.enviro-ware.com/calpuff/> [Accessed 29th August 2023].
129. Carlslaw, D., 2005. Development of an urban inventory for road transport emission of NO2 and comparison with estimates derived from ambient measurements. *Bevvers Atmospheric Environment*, 39, p. 2049-2059.
130. Chang, J., Brost, R., Isaksen, I., Madronich, S., Middleton, P., Stockwell, W. and Walcek, C., 1987. A three-dimensional Eulerian acid deposition model: physical concept and formulation. *J. Geophys. Res.*, 92, pp. 18691-18699.
131. Clarke, I., 1969. Nocturnal Urban Boundary Layer Over Cincinnati, Ohio. *Mon. Wea. Rev.*, 97(8), pp. 582-589.
132. Eliaassen, A., 1982. Review of long-rang transport modeling. *J. Of Applied Meteorology*, 19(3), pp. 92-115.
133. Enhancements to the UK Photochemical Trajectory Model for simulation of secondary inorganic aerosol. *Atmospheric Environment*, 57, pp. 278-288.
134. Henderson-Sellers, B., 1982. A simple formula for vertical eddy diffusion coefficients under condition of nonneutral stability. *Journal of Geophysical Research*, (87), pp. 5860-5864.
135. Howard, L., Note on a paper of John W Miles. *J. Fluid Mech*, 10(4), p. 509-512.
136. Koostaja, T., 2014. *Tartu Observatoorium To-raveres*. 214p.
137. Lamb, R., and Neiburger, M., 1971. An interim version of a generalized urban air pollution model. *Atmos. Environ*, pp. 239-264
138. Zlatev Z. et al. (ed.), 1999. *Large scale computations in air pollution modelling*. Large Scale Computations in air Pollution Modelling: Proceeding of the NATO Advanced research Workshop, 6-10 July 1998, Sofia, Bulgaria. Kluwer Academic Publishers, p. 392
139. Syrakov, D., Batcharova, E. and Wiman, B., 1997. *Long-range air pollution: from models to policies*. Proceeding from the Swedish-Bulgarian Workshop, Sozopol, Bulgaria, 277 p.
140. Loon, M., Builtjes, P. and Segers, A., 2000. Data assimilation of ozone in the atmospheric transport chemistry model LOTOS. *Environmental Modelling & Software*, 15, pp. 603-609.
141. Mateial of IEAI Meeting, 1987, chapter 3, pp. 26.
142. Mc Elroy, I., 1973. Numerical Study of Nocturnal Heat Island Over a Medium Sized Mid-Latitude City (Columbus, Ohio) Bound. *Layer Met*, 3, pp. 442-453.
143. McNider, R., Moran, M., Pielke, R., 1988. Influence of diunal and inertial boundary layer oscillations on long-rabg dispersion. *Atmospheric Environment*, (11), pp. 2445-2462.
144. Miloshev, N., 2006. *Air pollution studies at the geophysical institute, Bulgarian academy of sciences*. In: *6th International Scientific Conference Sgem, 2006, Albena*, pp. 337-348.
145. Mohammed, A., Salim, A., Hazem, T., Zahraa, A., Fadi, A., 2006. PolluMap: A Pollution Mapper for Cities. In: *Innovations in Information Technology: Proceedings of Conference*. Available from: https://www.researchgate.net/publication/224281084_PolluMap_A_Pollution_Mapper_for_Cities [Accessed 31th July 2023].
146. National Institute of Meteorology and Hydrology, Bulgarian Academy of Sciences, Bulgaria. URL: https://www.bodc.ac.uk/data/bodc_database/ctd/ [Accessed 31th July 2023].
147. National Technical University of Athens, School of Mechanical Engineering, Fluids Section. Laboratory of Aerodynamics. Available from: http://www.aerolab.mech.ntua.gr/environmental_and_industrial_experiments.html [Accessed 31th July 2023].
148. Oke, T., 1979. Review of Urban Climatology 1973-1976. *WMO Tech.*, (169), 100 p.
149. Pasquill, F., 1974. *Atmosheric diffusion. The dispersion of wind born material from industrial and other sources*. N.Y., Wiley. 429 p.
150. Peterson, W., 1980. *User's Guide for HIWAY-2. A Highway Air Pollution Model*. USA, Research abd Development. 83 p.
151. Petrukhin, V. and Vishensky, V., 1989. Modelling and evolution of Eurasian Tropospheric background pollution based on the data bank of multi-year measurements. *Changing composition of the troposphere. Spatial Environment*, (17), pp. 83-86.
152. Phisic, W., 1994. LADM: Lagrangian Atmospheric Dispersion Model. CSIRO. Division of Atmspheric Research. *Technical Paper*, (24), pp. 121-145
153. Pielke, R. and Uliasz, M., 1998. Use of meteorological models as input to regional and mesoscale air quality models. Limitations and strengths. *Atmosheric Environmental*, 32(8), pp. 1255-1266.
154. Risutova, Z., 1991. Analytical model of air pollution due to motor car traffic. *Contrib. Geophys. Inst. Slov. Acad. Sci.*, (11), pp. 99-107.
155. Schmidt, W., 1917. Der Massenaustausch bei der undgeordneten Stromung in freier Luft und seine Folgen. *Sitzungsber. Akad. Wiss. Math.-nat*, K1(2a), 126(6), pp. 757-804.

156. Taylor, G., 1915. Eddy motion in the atmosphere. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, ser. A, 215, pp. 1-26.
157. Tesler, R., 1981. Urban Meteorological Studies in Uppsals. *Abs. Uppsala Dossertation Faculti Sci.*, 21 p.
158. The DETRACT atmospheric dispersion modeling system. Available from: https://atmosphericdispersion.fandom.com/wiki/National_Centre_of_Scientific_Research_%22DEMOKRITOS%22#The_DETRACT_atmospheric_dispersion_modeling_system [Accessed 31th July 2023].
159. Uliasz, M., 1993. The atmospheric mesoscale dispersion modeling system. *J. of Applied Meteorology*, 32, pp. 139-149.
160. Van Jaarsverld, J., Van Pul, W., 1997. De Leeuw F.A.A.M. Modeling transport and deposition of persistent organic pollution in the European region. *Atmospheric Environmental*, 32, pp. 1011-1024.
161. Ventcatram, A., 1999. The Development and Application of a Simplified Ozone Modelling System (SONS). *Atmospheric Environment*, 28(22), pp. 3365-3678.
162. Vukovich, F. and King, W., 1980. A Theoretical Study of the St. Louis Heat Island: Comparisons Between Observed Data and Simulation Result on the Urban Heat Island Circulation. *J. App. Met.*, 19(7), pp. 761-778.
163. WindRose PRO Help by Enviroware srl. Available from: https://www.enviroware.com/windrose/help/load_isc3st.shtml [Accessed 31th July 2023].
164. Yokoyama, O, Gamo, M. and Yamamoto, S., 1977. The vertical profiles of the turbulence quantities I the atmospheric boundary layer. *J. Met. Soc.*, 55(3), pp. 264-272.
165. Yu-Ning, H., 2018. On the classical Bradshaw – Richardson number, Its generalized form, properties, and application in turbulence. *Physics of Fluids*, 30(12), 125110.
166. Zhang, R., Migxing, W. and Qingcun, Z., 2012. Global Two-Dimensional Chemistry Model and Simulation of Atmospheric Chemical Composition. *Advances in Atmospheric Sciences*, 17(1), pp. 72-82.

Статья поступила в редакцию 10.10.2024; одобрена после рецензирования 11.10.2024; принята к публикации 06.11.2024.

The article was submitted 10.10.2024; approved after reviewing 11.10.2024; accepted for publication 06.11.2024.