

УДК 551.552+504.054+004.4

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ В АТМОСФЕРЕ И КОМПЬЮТЕРНЫЕ РЕАЛИЗАЦИИ МОДЕЛЕЙ

**М. И. Сарафанов, В. Ю. Третьяков**

*Санкт-Петербургский государственный университет,  
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб. д. 7  
E-mail: [mik\\_sar@mail.ru](mailto:mik_sar@mail.ru), [v\\_yu\\_tretyakov@mail.ru](mailto:v_yu_tretyakov@mail.ru)*

Рассматриваются математические модели распределения примесей в турбулентной атмосфере, их программные реализации, производится сравнение и выбор наиболее эффективной модели для произведения расчётов в г. Сатка Челябинской области.

Ключевые слова: примеси в атмосфере, распределение, турбулентность, пограничный слой, УПРЗА.

### Введение

Проблема загрязнения атмосферы на сегодняшний день очень актуальна. Она имеет глобальный характер. Как пример, существенный перенос промышленных производств в Китай и другие азиатские страны, страны Латинской Америки привел к увеличению объёмов выбросов в атмосферу загрязняющих веществ, так как в этих странах очистка выбросов или отсутствует, или явно недостаточна. Кроме того, проблема загрязнения атмосферы не является решённой и в развитых странах, полностью избежать выбросов во многих технологических процессах невозможно. Сложной задачей является отслеживание перемещения и рассеивания выбросов в атмосфере. В связи с этим требуются методы контроля и прогнозирования антропогенного воздействия на воздушные бассейны городов, регионов и атмосферы в целом. Потому всё более востребованными становятся компьютерные программы, предназначенные для моделирования экологического состояния воздушной среды и динамики в ней загрязняющих веществ в различных агрегатных состояниях: газообразном, капельно-жидком, в виде твёрдых частиц.

Именно контроль над состоянием атмосферного воздуха является крайне важным направлением в современной геоэкологии, так как атмосфера служит средой для переноса всех газообразных и аэрозольных выбросов, приносимых как от автомобильного

транспорта, так и от промышленных предприятий. Поэтому приоритетным является проведение деятельности, направленной на создание так называемых унифицированных программ расчёта загрязнения атмосферы (УПРЗА).

В заключении планируется выбрать наиболее эффективную и удобную математическую модель и её компьютерную реализацию для моделирования загрязнения воздуха в небольшом промышленном городе Сатка Челябинской области на Южном Урале. Существенной особенностью небольших промышленных городов с населением менее 100 тыс. человек является то, что концентрация загрязнений, увеличенная в зонах крупных промышленных предприятий, лишь незначительно повышается в центральных районах. В крупных городах ситуация другая: в центральных районах наблюдается интенсивное движение автотранспорта, температура атмосферного воздуха в них на несколько градусов выше, как больше и загрязнения, чем в периферийных, где наблюдаются невысокие уровни загрязнений.

Большинство промышленных выбросов в городе Сатка связано с производством огнеупоров и добычей магнезита ( $MgCO_3$ ). Можно выделить две зоны - источники выбросов, которые расположены в пригороде: территория старого завода, где расположена котельная и на данный момент отсутствуют другие источники и новый завод, где располагаются современные производственные комплексы. Выбросы преимущественно имеют следующий состав:  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ , оксид магния, неорганическая пыль и взвешенные частицы. Жилая застройка города в основном малоэтажная.

Цель представленной работы заключается в выполнении обзора особенностей структуры и функционирования компьютерных систем, предназначенных для моделирования загрязнения атмосферы, выборе наиболее эффективной модели для расчёта загрязнения воздушного бассейна г. Сатка Челябинской области атмосферными выбросами завода огнеупоров.

## **1. Теоретические основы физики атмосферы**

Атмосфера – это газовая оболочка Земли с содержащимися в ней аэрозольными частицами. И как видно из определения, в воздух, помимо атмосферных газов входят жидкие и твёрдые взвешенные частички. Такие частицы различного состава и происхождения называются аэрозолями.

Аэрозоли можно разделить по происхождению на естественные (вулканическая пыль и пепел, частицы дыма после лесных пожаров и т.д.) и антропогенные. В данной работе мы рассмотрим распределение именно антропогенных аэрозолей.

Распространяются аэрозоли в атмосфере под влиянием:

- 1) переноса их воздушными течениями;
- 2) захвата примесей каплями облаков и туманов и последующего вымывания осадками;
- 3) турбулентного обмена [1].

Подавляющая часть атмосферных движений носит турбулентный характер. Исключением являются движения в очень тонком (толщиной от нескольких миллиметров до 1—2 см) слое воздуха, прилегающем к земной поверхности, так называемом вязком подслое. В целом, для определения концентраций после антропогенных выбросов наиболее приоритетным является направление изучения движения субстанций в так называемом планетарном пограничном слое (слое трения). Это нижний слой атмосферы, свойства и динамика которого в значительной степени определяется свойствами подстилающей поверхности. Мощность слоя непостоянна и колеблется от 300–400 м до 1–2 км (в среднем около 1000 м) [2]. Для этого слоя в целом характерна повышенная концентрация аэрозолей. Внутри пограничного слоя выделяется так же приземный (приводный) слой атмосферы с верхней границей от 30–50 м до 150–250 м, в пределах которого особенно велики (по абсолютной величине) и испытывают особенно большие колебания во времени и пространстве вертикальные градиенты метеовеличин: температуры, влажности, скорости ветра и концентрации примесей.

## **2. Уравнения Навье-Стокса. Модели выбросов.**

### **Классификация моделей**

В основе физического моделирования атмосферных процессов лежат уравнение непрерывности и уравнения Навье-Стокса. Будучи дополненной уравнениями переноса тепла и переноса массы, система уравнений Навье-Стокса может описывать конвекцию, термодиффузию в жидкостях. Также вариации уравнения используются в метеорологии для описания движения воздушных масс атмосферы. В настоящее время основное направление численных методов расчета турбулентных течений состоит в решении осредненных уравнений Навье-Стокса, которые называют также уравнениями Рейнольдса. Теперь рассмотрим конкретные модели выбросов:

**1. Модель Гаусса.** Загрязняющий промышленный выброс воздушными потоками выносится из района расположения источника на значительное расстояние. Скорость и дальность переноса зависит от турбулентных течений в атмосфере и существующего во время эмиссии ветрового поля. При реализации модели часто делают некоторые упрощения – концентрации загрязняющих веществ не влияют на разреженный поток, земля принимается относительно плоской, выброс является постоянным и равномерным,

направление ветра и скорость оседания примесей являются постоянными. Гауссовская модель чаще всего используется для моделирования распространения от непрерывных поточных выбросов, начинающихся от уровня земли или надземных источников. [4] Для решения практических задач применяют построение гауссовой модели Пэскуилла – Гиффорда – Бриггса (ПГБ-модели). Данная модель атмосферной диффузии нашла широкое распространение на практике в силу своей простоты и прозрачности получения результатов. В настоящее время реализована в отечественных и зарубежных расчетных кодах «ДОЗА\_М» (НИЦ «Курчатовский институт»), «ВЫБРОС 3.1», «GENII», «РАСЕ», «COSIMA», «AIDA», «BSAVVLversion2.3h» (Fennovoima (Финляндия)) [14].

Любые виды антропогенных примесей в атмосфере (газы, твердые или жидкие частицы - аэрозоли), перемещаются в пространстве преимущественно за счет скорости ветра, задаваемой некоторым вектором. В зависимости от того, привязывается ли этот вектор к частице атмосферы или к фиксированной точке пространства различают, соответственно, так называемую "лагранжеву" скорость и "эйлерову" [14]. На этой разнице и основано главное отличие модели Лагранжа от модели Эйлера.

**2. Модель Эйлера.** Модель Эйлера основана на уравнении сохранения массы для данного загрязнителя. Используется фиксированная решетка (вертикальная и горизонтальная). При реализации моделей решают соответствующие уравнения одновременно во всех ячейках решетки, при этом учитывается обмен загрязняющими веществами между ячейками и химические реакции.

**3. Модель Лагранжа.** Модель Лагранжа предсказывает распространение загрязняющего вещества, учитывая изменение базовой решетки, не привязанной к географическим координатам. Физические уравнения построены так, чтобы моделировать динамику процессов в узлах сетки. Учет химических реакций производится путем добавочного изменения концентраций на каждом шаге расчета. Таким образом, модель Лагранжа позволяет рассматривать реакции в перемещающейся ячейке воздуха. Этим она отличается от модели Эйлера, где неподвижная сетка привязана к реальным геофизическим координатам [4].

# Модели переноса и рассеяния примеси в атмосфере

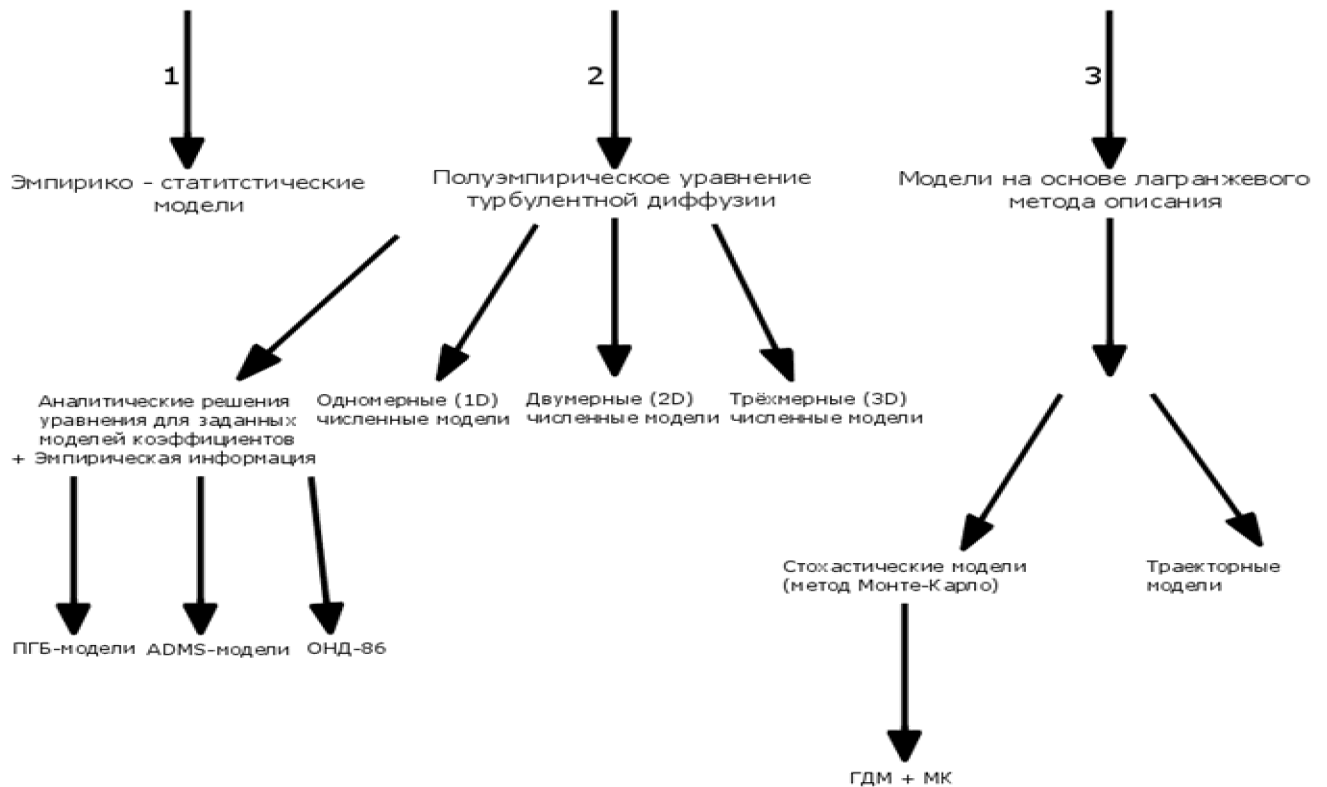


Рисунок 2. Общая схема классификации методов математического моделирования городской атмосферы [13]

### 3. Уравнение переноса примесей в турбулентной атмосфере

Все представления о турбулентном массообмене нашли отражение в уравнении турбулентной диффузии примесей. Именно оно и является основой для большинства моделей распределения. И хотя это уравнение учитывает достаточное количество параметров, решить аналитически его невозможно, решение требует применения численных методов, что усложняет использование.

Давайте рассмотрим составляющие уравнения [3]:

- 1) Адвективный приток примеси
- 2) Конвективный приток примеси
- 3) Приток примеси под влиянием горизонтального турбулентного обмена
- 4) Приток примеси под влиянием вертикального турбулентного обмена

#### 5) Учет захвата и вымывания примеси каплями и кристаллами облаков и осадков

$$\frac{\partial q}{\partial t} = - \underset{1}{(u \frac{\partial q}{\partial x} + v \frac{\partial q}{\partial y})} - \underset{2}{w \frac{\partial q}{\partial z}} + \underset{3}{k_s (\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2})} + \underset{4}{\frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial q}{\partial z}} - \underset{5}{\frac{q}{\tau}} \quad (1)$$

Уравнение справедливо как при расчётах перемещения аэрозолей, составленных лёгкими частицами <1 мкм (такие частицы совершают хаотичные передвижения наподобие броуновского движения молекул, но с меньшей интенсивностью), так и тяжелыми >1 мкм. В целом, данное уравнение достаточно понятно разбирается во многих научных трудах, что делает его основой практически всех последующих моделей по расчёту распределения примесей.

При разборе уравнения так же необходимо вспомнить про ещё один важный момент - коэффициент турбулентного обмена – это показатель интенсивности турбулентного перемешивания в движущейся среде - воздухе, воде и т. д. Этот коэффициент характеризует общее количество вещества, переносимого в результате вихревых движений через единицу площади неподвижной поверхности внутри данной турбулентной среды в обоих направлениях. В атмосфере коэффициент вертикально возрастает от очень малых величин у самой поверхности земли до 50 - 100 г/см \* сек на высоте 30 - 40 м, а выше в среднем медленно убывает с высотой. Иногда в слоях с особенно сильной турбулентностью может достигать 200 - 300 г/см \* сек [5].

### **4. ОНД-86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе**

Методика была разработана геофизической обсерваторией им. А. И. Воейкова Госкомгидромета (научный руководитель на тот момент доктор физико-математических наук, профессор М. Е. Берлянд) и введена в применение 1 января 1987 года. Используется по сегодняшний день. Любые издаваемые отдельно приложения, рекомендательные и справочные материалы к настоящему ОНД должны согласовываться с Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды России.

Изначально, ОНД-86 разрабатывалась для расчётов рассеивания загрязняющих веществ от стационарных точечных источников. Однако последующие разработки в методике позволяют производить расчёт выбросов площадных и линейных источников. Например, автомагистраль можно представить в виде линейного источника выбросов в атмосферу.

Данная методика, основанная на решении уравнения турбулентной диффузии,

позволяющая производить расчёты концентраций в каких-либо точках пространства. Она довольно эффективна и используется в современных компьютерных системах, например, в УПРЗА «Эколог», УПРЗА «ЭкоЦентр» и «ЭРА-Воздух».

Нормы не распространяются на расчет концентраций на дальних (более 100 км) расстояниях от источников выброса (здесь следует переходить к более сложным моделям, которые хорошо описаны, например, в монографиях А. Е. Алояна).

Основная формула, используемая при расчётах имеет вид [6]

$$c_m = \frac{AMFm\eta}{H^2 \sqrt[3]{V_1 \Delta T}}, \quad (2)$$

A - коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы;  
M (г/с) - масса вредного вещества, выбрасываемого в атмосферу в единицу времени;  
F - безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания вредных веществ в атмосферном воздухе;

m и n - коэффициенты, учитывающие условия выхода газовой смеси из устья источника выброса;

H (м) - высота источника выброса над уровнем земли (для наземных источников при расчетах принимается H=2м);

$\eta$  - безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности

$\Delta T$ (°C) - разность между температурой выбрасываемой газовой смеси и температурой окружающего атмосферного воздуха;

$V_1$  (м<sup>3</sup>/с) – расход газовой смеси

При расчётах учитывается высота источника выброса, диаметр трубы, скорость ветра, его направленность, средняя скорость выхода газовой смеси из устья источника, температура воздуха как атмосферы, так и газовой смеси. В методике учитываются скорость оседания веществ, температурная стратификация атмосферы, условия выхода газовой смеси из устья источника выброса, производится учёт влияния рельефа местности (устанавливается на основе анализа картографического материала, освещающего рельеф).

Существует также методика расчета осредненных за длительный период концентраций выбрасываемых в атмосферу вредных веществ как дополнение к ОНД-86. Она включает расчет загрязнения атмосферного воздуха выбросами группы точечных, линейных и площадных источников, а так же учёт застройки [7].

В целом, это достаточно эффективная методика позволяет моделировать различные

сценарии распределения выбросов. Однако, она имеет существенный недостаток: отсутствует учёт захвата и вымывания примеси облаками и осадками (это возможно исправить включением в модель ряда полуэмпирических соотношений – функции распределения частиц примеси, а также капель облаков и осадков по размерам), а ведь метеорологические условия оказывают существенное (нередко определяющее) влияние на уровни загрязнения атмосферы вблизи земной поверхности, на распределение концентрации примесей в пространстве и изменение во времени.

И хотя специалисты в данной области выделяют ещё несколько недостатков в использовании методики в современных программах, таких как сложность расчетных схем, вызванная базированием методики на процессах атмосферной диффузии, и отсутствие алгоритмизации процесса расчета (так отдельные разделы методики связаны с использованием методов приближенного вычисления, что создает принципиальную возможность для существования параллельно разных программных продуктов с разной степенью достоверности), работа УПРЗА согласно ОНД-86 позволяет эффективно и точно рассчитывать воздействия выбросов и распространение газопылевого облака. Встроенные средства создания и редактирования топоосновы в географической системе координат позволяют без труда привязать растры не только непосредственно с отсканированных схем и карт, но и через программы типа Google Earth. Что опять же делает подобные программы в связке с методикой простыми в использовании. Все УПРЗА являясь приложением ОНД-86, являют собой возможность даже для неспециалистов в области атмосферной диффузии производить необходимые расчеты величин приземных концентраций [8].

## **5. Унифицированная программа расчёта загрязнения атмосферы «Эколог».**

### **Принципы работы. УПРЗА «Эко Центр».**

Разработка любого проекта расчёта предельно допустимых выбросов осуществляется для того, чтобы получить разрешение на выброс загрязняющих веществ в атмосферу. Также любому предприятию необходимо вести экологическую проектную документацию. Для этого экологи предприятий используют УПРЗА.

Программы «Эколог» и «Эко Центр» реализуют методику ОНД-86. В программу «Эколог» включено дополнение к методике ОНД-86, учитывающее застройку, что является большим преимуществом перед другими УПРЗА. Программа «Эколог» была разработана и выпущена в 2003 году фирмой «Интеграл» - одним из российских лидеров в области разработки программных средств в области охраны окружающей среды.



Существует несколько модулей программы [17]:

**Базовый модуль** - позволяет рассчитать приземные концентрации загрязняющих веществ.

**ГИС-Стандарт** – осуществляет работу с графическим материалом с различными форматами ГИС.

**Застройка и высота** – модуль производит учет влияния застройки, а также расчет концентраций на произвольной высоте над уровнем земли.

**Расчетный блок НОРМА 4.0** - подбирает оптимальные предложения по снижению выбросов источников с целью снижения концентраций до желаемого уровня.

**Расчетный блок ГАЗ** - производит расчет концентраций от труб компрессорных станций газопроводов.

**Расчетный блок СРЕДНИЕ 4.0** – модуль осуществляет расчет осредненных концентраций загрязняющих веществ в атмосфере по дополнению к ОНД-86 (методика расчета осредненных за длительный период концентраций выбрасываемых в атмосферу вредных веществ).

**Расчетный блок РИСКИ 4.0.** – производит расчет рисков для здоровья человека.

«ГИС Эколог» реализует три основных формы представления данных: картографическую (на экранной карте), иерархическую (в дереве слоёв) и табличную (в атрибутивной таблице). Все виды представления данных присутствуют в интерфейсе одновременно и синхронизированы между собой.

Большим плюсом программы является широкая дифференциация с точки зрения выборов источников, предполагающая выбор одного из 8 типов источников загрязнения. В расчетах могут быть учтены нагретые и холодные выбросы точечных, линейных и площадных источников [9].

Каждый источник выбросов может иметь несколько вариантов исходных параметров. Учитывается влияние рельефа на рассеивание веществ (с помощью введения поправок на рельеф для источников в соответствии с ОНД-86).

Учитывается фоновая концентрация веществ, дифференцированная по скоростям и направлениям ветра и по расположению постов наблюдений за фоном. При этом программа позволяет оценить фоновое загрязнение воздуха без учета вклада отдельных источников, что упрощает расчет загрязнения воздуха для реконструируемых предприятий.

Имеется возможность построения нормативных санитарно-защитных зон (СЗЗ)

предприятия, а также задания охранных и производственных зон. Расчет по предприятию может иметь несколько вариантов, существует возможность проведения расчета с минимальным заданием исходных данных. Выдаются значения приземных концентраций в расчетных точках в мг/м<sup>3</sup> или в долях ПДК. Эти значения сведены в специальные таблицы [10].

Существует так же аналог программы – «ГИС ЭкоЦентр» с открытым программным кодом. Программа находится в свободном доступе, так же возможно использование «ЭКО центр» Профессионал (не распространяется бесплатно), где возможности УПРЗА расширены и производится расчёт с учётом застройки. Программа позволяет рассчитать концентрации загрязняющих веществ в атмосфере на разной высоте.

В целом, функциональные возможности программ «ЭкоЦентр» и «Эколог» схожи.

## **6. Характеристики финской модели SILAM. Принципы работы.**

Система SILAM, разработанная под руководством Ari Karppinen'a в Финском метеорологическом институте, является одной из самых эффективных моделей из европейских аналогов. Финский метеорологический институт - это исследовательское агентство, входящее в состав Министерства транспорта и коммуникаций, является ведущим экспертом в области метеорологии в морских и арктических областях исследований [16].

System for Integrated modelLling of Atmospheric coMposition – система интегрального моделирования атмосферных композиций, включает в себя, кроме рассмотренных выше, учет распространения радионуклидов, аэрозолей различного размера (размер частиц варьируется в широких пределах) и природных аллергенов. Может использоваться для прогноза последствий чрезвычайных ситуаций.

SILAM содержит обширную базу данных: 496 нуклидов и параметров их распадов, 80 механизмов радиоактивных загрязнений с учетом влияния на органы-мишени человеческого организма (23 органа).

Для численного моделирования в SILAM используются метеорологические базы данных, находящиеся в хранилищах Европейского центра ETEX, либо численные модели прогноза погоды в различных форматах.

Динамика расчета SILAM основывается на более точной (но и более ресурсоемкой в плане компьютерных вычислений) интегральной схеме, что увеличивает

продолжительность вычислений (если в моделируемой системе происходят химические реакции или радиоактивный распад изотопов) и требует применения высокопроизводительной вычислительной техники. Последние версии SILAM позволяют ее использовать на многопроцессорных кластерных системах в режиме параллельных вычислений. Модель SILAM является свободно-распространяемой и мультиплатформенной (под ОС Linux и Windows). Так же SILAM открыта для доработок и исследований, имеет открытый программный код [15].

Программа способна:

- 1) моделировать последствия лесных и торфяных пожаров;
- 2) уточнять очаги лесных и торфяных пожаров;
- 3) распространение пылицы растений и природных аллергенов;
- 4) производить оценку влияния на регион промышленных предприятий

Система SILAM позволяет моделировать распространение значительного количества химических веществ и их смесей с различными типами взаимодействий между ними [11].

В зависимости от химических и физических превращений, которые могут происходить со смесью, выделяют модули:

**Passive** – пассивный, рассматриваются перенос и осаждение веществ без рассмотрения химических реакций;

**PM\_General** – общий для взвешенных частиц, аналогичен пассивному, но применяется для решения обратных задач;

**Dmat\_Sulphur** – учитывается перенос и осаждение оксидов серы  $SO_2$ ,  $SO_4$ ,  $SO_x$ ;

**Asid\_Basic** – учитывается перенос и осаждение неорганических химических соединений, выбросов  $CO$ ,  $NO_x$ ,  $SO_x$ ,  $NH_3$ ;

**CB4** – учитывается перенос и осаждение органических и неорганических соединений, выбросов угарного газа, летучих органических веществ, оксидов азота;

**Radioactive** – перенос и осаждение радиоактивных веществ;

SILAM способна решать прямые и сопряженные (часто называемые обратными) задачи рассеяния. Испытания модели с 2007 г. по настоящее время показали удовлетворительную корреляцию с данными непосредственных наблюдений на метеостанциях. Сравнение расчетных моделей распространения атмосферных выбросов с результатами наблюдений по 150 метеорологическим станциям показало, что коэффициент корреляции везде превышает 60%, при среднем его значении более 70%. Но так как большинству европейских архивов по источникам атмосферных загрязнений характерно отсутствие данных по территориям, расположенным восточнее 45° в.д.,

использование системы затруднено для некоторых внутренних регионов России (Урала, Сибири и т.д.) [11].

### 7. Экологический программный комплекс «ЗОНА»

Экологический программный комплекс «ЗОНА» создан под руководством проф. А.С. Гаврилова (1998 г.) в Российском государственном гидрометеорологическом университете [12]. Является реализацией стохастической модели гидродинамического моделирования и «метода Монте-Карло» (ГДМ + МК).

Назначение программы - обеспечение полной информационной поддержки принятия решений в области управления качеством атмосферы городов и промышленных зон.

Принцип работы программы имеет следующую структуру: три основных модуля - **Z/DATA**, **Z/CALC**, **Z/ANALITIC**. Каждый модуль выполняет определённые функции.

**Z/DATA** – модуль, предназначенный для экспорта, импорта и обработки пространственной графической информации. Источники выбросов могут быть представлены как точечные, линейные, площадные объекты или объёмными, холодными или перегретыми, химическими или радиоактивными, иметь разнообразную временную динамику выбросов. Модуль совместим с другими информационными системами путем использования различных форматов.

**Z/CALC** – модуль, производящий формирование цифровых моделей рельефа ландшафта и городской застройки с помощью **Z/DATA**. Способен производить автоматический выбор области расчёта на основе конфигурации источников выбросов.

С применением метода Монте-Карло рассчитывается перенос и рассеивание примеси в атмосфере от всех типов источников, с учетом, при необходимости, первоначального перегрева, эффектов вымывания примеси осадками, гравитационного осаждения аэрозольных частиц, а также изменения в процессе переноса изотопного состава примеси за счет радиоактивного распада. Такой расчет дает возможность не только оценить средние и максимальные значения концентрации, токсические или радиоактивные дозы при аварийных выбросах, но также определить для каждой точки пространства и основные параметры неблагоприятных метеоусловий, при которых их следует ожидать. Очень полезным для последующего анализа оказывается и получаемая в итоге функция распределения.

**Z/ANALITIC** - многофункциональное программное средство для создания проблемно-ориентированных электронных карт. Включает в себя ГИС, программные модули для работы с электронными таблицами и обработки данных наблюдений.

**Z/Ecomed** – модуль, включающий в себя все возможности предыдущего, а также

способный реализовывать методику расчета риска здоровью населения за счет факторов окружающей среды (загрязнение атмосферы, питьевой воды и т.д.).

**Z/RADIOLOG** – модуль, реализующий алгоритм расчета изменения во времени изотопной структуры выброса (в частности и той его части, которая выпала на поверхность в результате сухого или влажного осаждения), производит расчет биологических доз.

Результаты представлены в виде форматов Microsoft Office Word и Excel, а также форматов BMP, DXF, MIF/MID для последующего включения в другие документы. Так же «Зона» совместима с другими ГИС и программными средствами Microsoft Office [12].

«Зона» способна использовать числовые модели для расчетов поля ветра и загрязнения атмосферы над конкретными элементами ландшафта и в конкретные моменты времени.

К плюсам данного программного комплекса так же можно отнести его способность

- 1) воспринимать и обрабатывать метеорологическую информацию и измеренные значения концентрации примесей в атмосфере;
- 2) оценивать вклад каждого источника загрязнения в величину концентрации примесей в заданной точке пространства;
- 3) оценивать последствия загрязнения атмосферы для здоровья населения выбросами токсических или радиоактивных веществ;
- 4) оценивать интенсивность осаждения примесей на подстилающую поверхность;
- 5) рассчитывать поля среднегодовых концентраций;
- 6) рассчитывать зону поражения от аварийных выбросов (включая радиоактивные);
- 7) способность производить расчет трехмерной структуры ветрового потока с учетом зданий и сооружений, трехмерных полей загрязнения атмосферы
- 8) решать обратные задачи по определению параметров выбросов и их источников по результатам наблюдений [12]

Таким образом, несмотря на недостатки самого «метода Монте-Карло», данный комплекс является эффективным отечественным продуктом в области охраны и контроля состояния атмосферного воздуха.

## Заключение

В большинстве случаев компьютерные программы для моделирования распределения примесей в атмосфере имеют схожие преимущества и недостатки. Во многом определяющими для выбора той или иной модели являются учёт в них застройки и учёт захвата и вымывания примесей осадками, а также возможность применения модели в условиях ограниченности метеорологической информации, поскольку по методологии моделирования программы зачастую схожи. Российские программы основаны на решении полуэмпирического уравнения атмосферной диффузии примесей и гидродинамических уравнений с применением «метода Монте-Карло», европейские аналоги опираются на численное моделирование используя метеорологические базы данных.

В целом, практически все современные программы для контроля состояния атмосферы выполняют функции, связанные с подготовкой промышленной документации (способны поддерживать оформление документов для быстрой печати, производить автоматическое формирование нормативной санитарно-защитной зоны в соответствии с СанПиН и т.д.).

Модель SILAM не обеспечена данными для работы с внутренними регионами России, так же эта система ресурсоемка в плане компьютерных вычислений.

Из всех УПРЗА прежде всего стоит выделить две программы: «ЭкоЦентр» и «Эколог». Различие между ними заключается не столько существенных преимуществах в характеристиках, а скорее в самом подходе разработчиков: «ЭкоЦентр» - УПРЗА с открытым исходным кодом и свободная в распространении, «Эколог» - платная программа; обе эти УПРЗА имеют дополнительные модули и различные расширения, позволяющие выполнять расчёты с учётом застройки.

Программный комплекс «Зона» использует комбинацию ГДМ+МК, которая оказывается наиболее эффективной для решения задач расчета загрязнения атмосферы в условиях ограниченной метеорологической информации и над поверхностью сложной структуры. Это весомый плюс, так как найти метеоданные для г. Сатка – сложная задача, поскольку действующие метеостанции в непосредственной близости от города отсутствуют.

Таким образом, для расчётов переноса и рассеивания атмосферных выбросов от промышленных предприятий г. Сатка наиболее эффективной компьютерной моделью является программный комплекс «Зона». Для выполнения расчётов и представления их результатов эта компьютерная модель наиболее эффективна и удобна.

## Литература

1. С. П. Хромов, М. А. Петросянц «Метеорология и климатология», из-во «КолосС», 2004г.
2. Лайхтман Д. Л., «Физика пограничного слоя атмосферы», 2 изд., Л., 1970
3. Рабочая программа по дисциплине «Анализ и прогноз уровня загрязнения атмосферы, океана и вод суши» Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева, Специальность 020804 геоэкология 2007 г.  
(1) Уравнение турбулентной диффузии примесей
4. Бызова Н. Л., Гарнер Е.К., Иванов В.Н. «Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчет распространения примеси», Глава Современные компьютерные модели распространения загрязняющих веществ в атмосфере
5. Краткая географическая энциклопедия. Том 2/Гл.ред. Григорьев А.А. М: Советская энциклопедия – 1961 г.
6. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий, Общесоюзный нормативный документ  
(2) Формула одиночного стационарного источника выброса, используемая в ОНД-86
7. Методика расчёта осреднённых за длительный период концентраций выбрасываемых в атмосферу вредных веществ  
URL: [www.geol.vsu.ru/ecology/ForStudents/Documentarium/OND-86%20\(dopolnenie\)](http://www.geol.vsu.ru/ecology/ForStudents/Documentarium/OND-86%20(dopolnenie)) дата обращения 12.12.2016
8. «Принципы Программной Реализации ОНД-86» Голубничий А. А., Замулина М. В. Современные научные исследования и инновации. 2015. № 1 [Электронный ресурс]. URL: [web.snauka.ru/issues/2015/01/46263](http://web.snauka.ru/issues/2015/01/46263) дата обращения 19.11.2016
9. Голубничий А.А., Замулина М.В. Источники загрязнения в ОНД-86 (параметризация расчетов в УПРЗА) // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 2
10. Унифицированная программа расчета загрязнения атмосферы «Эколог» Версия 3.0 Руководство пользователя, Глава Основные функциональные возможности
11. Белихов А. Б., Леготин Д. Л., Сухов А. К. Моделирование распространения атмосферных загрязнений с помощью системы SILAM, 2014
12. Информационное обеспечение экологической безопасности в управлении качеством городской среды  
Гаврилов А.С. ЭПК «ЗОНА»//Информационный бюллетень ГИС ассоциации N1(13) 1998.
13. Экология и гидрометеорология больших городов и промышленных зон. (Россия - Мексика). Монография. Т. 1. Анализ окружающей среды. – СПб: РГГМУ, 2009, - 180 с.  
В. А. Шелутко, В. В. Дмитриев, Лесама де ла Торе Х. Л., А. С. Гаврилов, М. Е. Баранова,

Ернандес Серда М. Е.

14. Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук «Использование математических моделей переноса и рассеяния радионуклидов в атмосфере для управления рисками на стадии проектирования атомных электростанций» Харченко Е. В., РГГМУ, 2015.

### Ресурсы Интернета

15. Официальный сайт разработчика SILA. URL: [silam.fmi.fi](http://silam.fmi.fi)

16. Сайт Финского метеорологического института. URL: [ilmatieteenlaitos.fi](http://ilmatieteenlaitos.fi)

17. Официальный сайт фирмы «Интеграл» URL: [www.integral.ru/shop/cargo/284.html](http://www.integral.ru/shop/cargo/284.html)

### References

1. S. P. Hromov, M. A. Petrosianc «Meteorology and Climatology», Publishing house «KolosS», 2004

2. D. L. Laihtman, «Physics of boundary layer of the atmosphere», 2<sup>nd</sup> edition, 1970

3. Rabochaya programma po distsipline «Analiz i prognozirovaniye urovnya zagryazneniya atmosfery, okeana i vody» Mordovskogo gosudarstvennogo universiteta im. N. P. Ogareva, Spetsial'nost' 020804 geoekologiya 2007 g.

(1) Uravneniye turbulentnoy diffuzii primesey

4. Byzova N. L., Garner Ye.K., Ivanov V.N. «Eksperimentalnyye issledovaniya atmosfernoй diffuzii i raschet rasprostraneniya primesi», Glava Sovremennyye komp'yuternyye modeli rasprostraneniya zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosphere

5. Kratkaya geograficheskaya entsiklopediya. Tom 2 / Gl.red. Grigor'yev A.A. M: Sovetskaya entsiklopediya - 1961 g.

6. Metodika rascheta kontsentratsiy v atmosfernom vozdukhе vrednykh veshchestv, sodержashchikhsya v vybrosakh predpriyatiy, Obshchesoyuznyy normativnyy dokument

(2) Formula odinochnogo statsionarnogo istochnika vybrosa, ispol'zuyemaya v OND-86

7. Metodika raschota vremeni za prodolzhitel'nyy period kontsentratsii vybrasyvayemykh v atmosferu vrednykh veshchestv

URL: [www.geol.vsu.ru/ecology/ForStudents/Documentarium/OND-86%20\(dopolnenie\) data obrashcheniya 12.12.2016](http://www.geol.vsu.ru/ecology/ForStudents/Documentarium/OND-86%20(dopolnenie) data obrashcheniya 12.12.2016)

8. «Printsipy Programmnoy Realizatsii OND-86» Golubnichiy A. A., Zamulina M. V.

Sovremennyye nauchnyye issledovaniya i innovatsii. № 1 [Elektronnyy resurs]. URL:

[web.snauka.ru/issues/2015/01/46263](http://web.snauka.ru/issues/2015/01/46263) data obrashcheniya 19.11.2016



9. Golubnichiy A.A., Zamulina M.V. Istochniki zagryazneniya v OND-86 (parametrizatsiya raschetov v UPRZA) // *Sovremennyye nauchnyye issledovaniya i innovatsii*. №2.
10. Unifitsirovannaya programma rascheta vybrosov uglekislogo gaza «Ekolog» Versiya 3.0 Rukovodstvo pol'zovatelya, Glava Osnovnyye funktsional'nyye vozmozhnosti
11. Belikhov A. B., Legotin D. L., Sukhov A. K. Modelirovaniye rasprostraneniya atmosferynykh zagryazneniy s pomoshch'yu sistemy SILAM, 2014
12. Informatsionnoye obespecheniye ekologicheskoy bezopasnosti Gavrilov A.S. EPK «ZONA» // *Informatsionnyy byulleten' GIS assotsiatsii N1* (13) 1998.
13. Ekologiya i gidrometeorologiya bol'shikh gorodov i promyshlennykh zon. (Rossiya - Meksika). Monografiya. T. 1. Analiz okruzhayushchey sredy. - SPb: RGGMU, 2009, - 180 s. V. A. Shelutko, V. V. Dmitriyev, Lesama de la Tore KH. L., A. S. Gavrilov, M. Ye. Baranova, Yernandes Serda M. Ye.
14. Dissertatsiya na soiskaniye uchonoy stepeni kandidata fiziko-matematicheskikh nauk «Ispol'zovaniye modeley dlya peredachi i rasseyaniya radionuklidov v atmosfere dlya upravleniya riskami na etape proyektirovaniya atomnykh elektrostantsiy» Kharchenko Ye. V., RGGMU, 2015.

#### **Internet recourses**

15. Ofitsialnyy sayt razrabotchika SILAM. URL: [silam.fmi.fi](http://silam.fmi.fi)
16. Sayt Finskogo meteorologicheskogo instituta URL: [ilmatieteenlaitos.fi](http://ilmatieteenlaitos.fi)
17. Ofitsialnyy sayt firmy «Integral» URL: [www.integral.ru/shop/cargo/284.html](http://www.integral.ru/shop/cargo/284.html)

## MATHEMATICAL MODELING OF DISTRIBUTION OF IMPURITIES IN THE ATMOSPHERE AND COMPUTER IMPLEMENTS OF MODELS

**M. I. Sarafanov, V. U. Tretyakov**

*St. Petersburg State University,  
199034, St. Petersburg, Universitetskaya nab. 7  
E-mail: [mik\\_sar@mail.ru](mailto:mik_sar@mail.ru), [v\\_yu\\_tretyakov@mail.ru](mailto:v_yu_tretyakov@mail.ru)*

This article is about mathematical models of the distribution of impurities in the turbulent atmosphere, their software implementation, a comparison and selection of the most effective model for calculating in Satka, Chelyabinskaya oblast.

Keywords: Impurities in the atmosphere, distribution, turbulence, boundary layer, program for calculating atmospheric pollution.