

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ В ЗАДАЧАХ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ПРОМЫШЛЕННОГО ГОРОДА

В.И. Киселёв, О.Ю. Наговицына, Н.В. Котова

Рассматриваются функции системы экологического мониторинга атмосферного воздуха большого промышленного города, сформулированы математические задачи, решение которых обеспечивает выполнение этих функций. Дан обзор методов решения некоторых из этих задач, намечены методические подходы к решению других.

Ключевые слова: система экологического мониторинга, контроль источников загрязнения, поле концентрации примеси.

Система экологического мониторинга предназначена в конечном итоге для регулирования качества атмосферного воздуха и в системе управления этим качеством служит как измерительным звеном, так и анализирующим, призванным вырабатывать информацию и проекты управленческих решений для лиц, принимающих решения.

Как измерительное звено СЭМ должна решать следующие задачи: представлять информацию об уровне загрязнения атмосферного воздуха в городе; представлять информацию о тенденциях развития уровня загрязнения в краткосрочном, среднесрочном и долгосрочном плане.

Как анализирующее звено СЭМ должна решать следующие задачи: выявлять источники (причины) повышенного загрязнения воздуха как природного, так и антропогенного характера; вырабатывать проекты управляющих решений (воздействий).

Таким образом, СЭМ, как и обычная информационно-аналитическая система, включает: измерительный блок, включающий средства измерения концентрации ВВ в атмосферном воздухе (стационарные датчики АПК, посты гидромета (ручной отбор проб и лабораторный анализ), мобильные (передвижные) датчики) и средства измерения соответствующих метеопараметров, в том числе и параметров верхней атмосферы; информационный блок, включающий базы данных измерений, источников загрязнения и населения с системой географической привязки данных к электронной карте города; блок анализа и математического моделирования, включающий блок построения и анализа полей загрязнения, блок алгоритмов определения виновника (причин) повышенного загрязнения, блок алгоритмов прогноза развития ситуации, блок планирования мероприятий при ЧС и блок

формирования проектов управленческих решений; блок принятия решений, включающий мобильные средства контроля ОС, мобильные средства контроля источников загрязнения и правовую базу знаний.

Все названные блоки тесно связаны между собой единством решаемой задачи, и при проектировании математического обеспечения каждого из блоков необходимо учитывать интересы (требования) остальных блоков. Рассмотрим лишь некоторые математические задачи, возникающие при проектировании СЭМ, и методы их решения. Начнём с измерительного блока. Кроме вопроса соответствующего метрологического обеспечения системы, который будем считать решённым, важнейшим является вопрос её рациональной пространственной конфигурации. Это связано с ограниченностью количества АПК из-за относительной дороговизны аппаратуры и большой контролируемой площади. **Итак, первая математическая задача, которая встаёт при создании СЭМ, – формирование рациональной (оптимальной) пространственной конфигурации системы как измерительного звена.**

При создании системы первым встаёт вопрос – где, в каких точках проводить измерения, чтобы получить достоверную картину загрязнения? Существует ряд принципов (способов) формирования пространственной конфигурации сети (ПКС). Среди них – зональный, который предполагает измерение поля (установку АПК) в характерных зонах города – жилой, зелёной, промышленной и т.д. По этому принципу построены, например, СЭМ г. Москвы, ряда городов США [1]. По принципу один пост контроля на 100000 населения рекомендует формировать СЭМ руководящий документ РД-92 [2]. Известна методика [3], рекомендующая расставлять посты таким образом, чтобы дисперсия ошибки восстановленного поля концентрации была минимальна. И, наконец, известна методика построения системы, ориентированной на контроль источников загрязнения (труб) [4]. Последняя методика требует слишком большого количества постов контроля. Все названные методики ориентированы на решение одной из задач, стоящих перед СЭМ, – восстановление поля концентрации или контроль источников загрязнения. В [5] предложена методика, основанная на формировании системы по принципу, когда пост устанавливается в месте достижения совокупности максимумов обобщённых функционалов вида:

$$F = C_{\max} * P,$$

где C_{\max} – расчётное значение максимальной разовой концентрации, P – плотность населения в точке. Методика предполагает использование методов НЛП и использование для расчёта концентрации математической модели распространения примеси в атмосфере воздуха при различных условиях. При таком подходе исключается установка постов в зонах высокой концентрации примеси, но с малой плотностью населения, а также в зонах с высокой плотностью населения, но с малым уровнем концентрации при-

меси. Таким образом, СЭМ в этом случае ориентирована на контроль загрязнения воздуха в селитебной зоне. Кроме этого, достижение максимума обобщённого функционала в какой-то точке означает, что достаточно плотно заселённая жилая зона находится под достаточно мощным воздействием источников загрязнения атмосферы. Это создаёт предпосылки для успешного выявления источников, формирующих загрязнение (поле концентрации) в этой зоне. Таким образом, предлагаемый подход позволяет создать систему, ориентированную как на контроль загрязнения атмосферного воздуха в селитебной зоне, так и на контроль источников загрязнения. Кроме этого, такое построение системы создаёт *хорошие* предпосылки для решения задачи восстановления фактического поля концентрации. **Итак, вторая математическая задача, возникающая при разработке СЭМ как аналитического звена, – задача восстановления (построения) фактического поля концентрации.**

Содержательно задача восстановления поля концентрации ставится следующим образом: требуется по данным измерений значений концентраций в ограниченном количестве точек построить (восстановить) поле загрязнения воздушного бассейна города, в том или ином смысле близкое к фактическому его состоянию. Трудность решения задачи обуславливается следующими обстоятельствами: площадь города, для которого решается задача восстановления поля концентрации, чрезвычайно велика и составляет, например, для г. Челябинска, $20 \times 40 \text{ км}^2$; количество точек, в которых проводятся регулярные измерения концентрации вредных веществ в атмосферном воздухе города, составляет 12–20 единиц (часть из этих постов контроля оснащены автоматическими газоанализаторами, что означает круглосуточное автоматическое измерение концентрации примеси в воздухе с интервалом в 20 минут, на других постах 4 раза в сутки производится отбор проб с последующим лабораторным анализом содержания примеси); распределение источников загрязнения атмосферы по территории города можно считать случайным (нерегулярным, либо распределённым по равномерному закону (двумерная случайная величина), либо с неизвестным законом распределения). С другой стороны, расположение (координаты) основных источников загрязнения и их мощности, разумеется, известны; источники, формирующие загрязнение, разнородны и представляют собой либо точечный источник (заводские и фабричные трубы различных высот (от 10 до 150 м)), либо линейный источник (автомагистрали с различной интенсивностью движения автотранспорта), либо площадной источник (свалки, хранилища различного рода веществ, выделяющих вредные примеси в атмосферу города, разливы веществ по поверхности земли, например при авариях или в случае техногенных или природных катастроф); распространение вредных примесей в атмосфере описывается для различных источников выбросов и условий распространения различными математическими моделями, точность которых, как правило, весьма приближительна.

Перечисленные факторы затрудняют решение задачи построения поля концентрации.

С другой стороны, существует ряд положительных факторов, использование которых возможно при разработке алгоритмов построения поля концентрации. Среди таковых следующие: из физической сущности поля концентрации можно предположить, что концентрация примеси как математическая функция является как угодно гладкой функцией; также из физических соображений практически всегда можно указать границы области построения поля концентрации (границы города), где концентрация равна нулю; из имеющихся данных, а также по мере накопления данных в ходе эксплуатации системы, можно выявить т.н. «зелёные» зоны, в которых концентрация вредных примесей близка к нулю; при наличии в черте города предприятий – загрязнителей атмосферного воздуха города в качестве внутренних границ можно использовать границы их санитарно-защитных зон, на которых, как известно, расчётная концентрация равна 1 ПДК; из физических соображений, это известно также и из экспериментальных данных, следует, что атмосферный воздух, содержащий вредные примеси, как более тяжёлый имеет свойство прижиматься к земле; вследствие этого более «грязный» воздух как более тяжёлый имеет свойство стекаться в пониженные места рельефа города; из предыдущего пункта следует необходимость (и возможность) учёта рельефа местности при построении поля концентрации; при построении поля концентрации возможно применение различных математических моделей распространения примесей в атмосфере города с условием её непротиворечивости экспериментальным данным.

При этих условиях задача восстановления поля концентрации примеси в атмосферном воздухе города по данным его измерений в ограниченном количестве точек ставится следующим образом.

Математическая постановка задачи восстановления поля концентрации вредной примеси в атмосферном воздухе промышленного города

Пусть на плоскости переменных (x,y) задана замкнутая ограниченная область G . На области G задана неизвестная функция концентрации примеси $f(x,y)$, обладающая следующими свойствами: $f(x,y)$ – непрерывная вместе со своими производными необходимого порядка функция по обоим переменным во всей области G ; $f(x,y) \geq 0$ для любой точки (x,y) , принадлежащей области G ; $f(x,y) = 0$ для любой точки (x,y) , принадлежащей внешней границе области G ; внутри области G заданы области G_{\min} , такие, что $f(x,y) = 0$ внутри и на границе этих областей; внутри области G заданы области G_{\max} , такие, что $f(x,y) = 1$ ПДК на границе этих областей, а внутри этих областей значения $f(x,y) \geq 1$ ПДК; на области G задана своими линиями уровня известная функция $R(x,y)$ (в нашем случае это функция рельефа

местности), значения которой коррелируют со значениями функции $f(x,y)$; известны значения функции в ограниченном количестве точек, координаты которых заданы.

Требуется по известным в заданных областях и точках значениям функции и её свойствам, перечисленным выше, восстановить (построить) функцию (концентрации) на заданной области в виде линий уровня с регулярным по значению шагом, обладающую заданными свойствами.

Понятно, что при такой постановке задачи её решение скорее всего не единственно и поэтому любой алгоритм решения должен содержать оценку точности восстановления функции путём, например, математического моделирования.

При численном решении задачи (которое в данном случае представляется разумным из-за её сложности) решение естественно разбить на две задачи: задачу восстановления значений функции в узлах регулярной, или нерегулярной, сетки приемлемого шага; задачу построения линий уровня функции с заданным шагом по её значениям в узлах регулярной сетки.

Другой ключевой задачей СЭМ как аналитического звена является **задача определения источника (виновника) повышенного загрязнения по данным ограниченного числа измерений**. Возможные методы решения этой задачи рассмотрены в работах [6, 7].

Библиографический список

1. Проблемы экологии Москвы: Сеть назем. измерений / П. Бакка, И.П. Беляев, Б.А. Болодурин и др.; под ред. Е.И. Пупырева; Совмест. предприятие в обл. охраны окружающей среды «Прима», Моск. центр по гидрометеорологии и наблюдению природ. среды. – М.: Гидрометеоиздат: Моск. отделение, 1992. – 197 с.
2. Руководство по контролю загрязнения атмосферы: Руководящий документ. РД 52.04.186-89: [дата введения 01.07.1991] / Гос. ком. СССР по гидрометеорологии, М-во здравоохранения СССР. – М.: Госкомгидромет СССР, 1991. – 693 с.
3. Артемов, В.М. Анализ состояния загрязнения снегового покрова для проектирования сети станций АНКОС-А. В кн.: Методические и системотехнические вопросы контроля загрязнения окружающей среды / В.М. Артемов, Д.П. Парцеф, Ю.Е. Саэт и др. // Труды ИМПГ. – 1982. – Вып. 48. – С. 144–149.
4. Оптимизация пространственной структуры сети наблюдений при контроле загрязнения атмосферы города / А.Н. Ясенский и др. // Труды Главной Геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. – Л.: Гидрометеоиздат, 1987.
5. Способ формирования сети наблюдений для контроля загрязнения атмосферы города: патент 2102782 Российская Федерация: МПК 6G 01W 1/00 A / В.С. Земсков, В.И. Киселев, В.П. Колодий, С.М. Эфендиев; заявитель и патентообладатель Государственный ракетный центр им. акад. В.П. Макеева. – № 94004144/28; опубл. 20.01.1998.
6. Способ контроля за выбросами загрязняющих веществ источниками загрязнения атмосферы: патент 2161321 Российская Федерация: МПК: 7G 01W

1/00 А / В.И. Киселев, В.П. Колодий; заявитель и патентообладатель Государственный ракетный центр «КБ им. акад. В.П. Макеева». – № 98114132/28; заявл. 14.07.1988; опубл. 27.12.2000.

7. Способ контроля за режимом работы источников загрязнения воздуха в период неблагоприятных метеорологических условий: патент 2244327: МПК: 7G 01W 1/00 А / В.И. Киселев, В.П. Колодий; заявитель и патентообладатель Государственный ракетный центр «КБ им. акад. В.П. Макеева». – № 2001126583/28; заявл. 1.10.2001; опубл. 10.01.2005.

[К содержанию](#)