

**Б.М. Десятков, А.И. Бородулин, С.Р. Сарманаев, Н.А. Лаптева, В.В. Марченко,
А.А. Ярыгин**

Алгоритм организации оптимальной сети мониторинга атмосферных газовых и аэрозольных примесей антропогенного и природного происхождения

НИИ аэриологии ГНЦ ВБ «Вектор», пос. Кольцово Новосибирской обл.

Поступила в редакцию 25.11.2003 г.

Рассматривается алгоритм поиска оптимальной сети мониторинга атмосферы для определения минимально необходимого количества контрольных точек, обеспечивающих эффективное решение «обратных» задач рассеяния атмосферных примесей. Алгоритм построен на процедуре последовательного решения «прямых» задач от известных источников с селекцией вариантов по определенным критериям отбора. Приводится практический пример применения алгоритма.

Задачи мониторинга атмосферы и моделирования распространения вредных примесей имеют как фундаментальное, так и прикладное значение. Возрастающая антропогенная нагрузка на окружающую среду, техногенные и естественные природные катастрофы, связанные с выбросом в атмосферу вредных веществ, заставляют человечество заниматься расширением природоохранной деятельности. В этом смысле мониторинг атмосферы, связанный с постоянным наблюдением за концентрацией вредных примесей в атмосфере, является неотъемлемой ее частью. С другой стороны, имеющиеся материальные ресурсы далеко не всегда позволяют проведение экстенсивного развития сети пунктов мониторинга атмосферы.

В этой ситуации практически важной становится задача оптимизация сетей мониторинга. Например, одной из частных задач является организация оптимальной сети контрольных точек для поиска промышленного источника, совершившего скрытый выброс в атмосферу вредных веществ. Другой актуальной задачей является организация оптимальной сети контрольных точек для поиска иных скрытых источников, например имеющих природный характер происхождения либо образующихся в результате угрозы применения вредных веществ террористами.

В работе рассматривается алгоритм построения оптимальной сети мониторинга атмосферы для определения минимально необходимого количества контрольных точек, обеспечивающих эффективное решение «обратных» задач рассеяния атмосферных примесей, – поиска промышленного источника, совершившего скрытый выброс в атмосферу вредных веществ.

В [1–4] нами рассматривался эффективный метод решения «обратных» задач, который основан на использовании уравнения, сопряженного с полуэмпирическим уравнением турбулентной диффузии. В частности, было показано, что для его практического применения необходимо, чтобы, по крайней мере, в трех контрольных точках (пунктах измерения) были известны значения концентрации атмосферной примеси. Данное условие является основным, но не единственным требованием к измеренным значениям концентрации. Другие дополнительные условия, необходимые для построения оптимальной сети мониторинга, будут рассмотрены ниже.

Алгоритм решения задачи построен на основе процедуры последовательного решения «прямых» задач определения полей концентрации примеси от известных источников с селекцией вариантов по заданным критериям отбора. Предположим, что известны расположение всех промышленных предприятий и эффективные высоты источников примеси. Пусть N – количество таких источников, M – количество метеорологических ситуаций, разбитых на классы и предназначенных для решения «прямых» задач распространения газовых и аэрозольных примесей в пограничном слое атмосферы. Тогда $K = NM$ – число возможных вариантов, для которых необходимо решать «прямую» задачу. Всю горизонтальную область, в которой предполагается размещение точек отбора проб, покрываем достаточно мелкой сеткой с квадратными ячейками. В каждом узле этой сетки помещаем контрольную точку, в которой находятся приборы (пункты мониторинга), проводящие измерение концентрации примеси.

Опишем основные этапы алгоритма построения искомой оптимальной сети мониторинга атмосферы:

1. На первом этапе решаем «прямую» задачу для первого из K возможных вариантов. Определим область влияния для данного варианта как область, в которой наблюдается концентрация примеси более некоторого заданного значения C_0 . Значения C_0 задаются, с одной стороны, чувствительностью приборов, а с другой стороны, они должны быть существенно больше фонового значения, чтобы однозначно показать, что измеренное вещество появилось в атмосфере в результате выброса его промышленным предприятием. Рассматриваем возможные различные сочетания по три контрольные точки из области влияния данного варианта. Как было сказано выше, любой из трех точек из этой области достаточно, чтобы решить «обратную» задачу и найти источник для данного варианта. Отмечаем и запоминаем эти сочетания троек.

2. На втором этапе решаем «прямую» задачу для второго из K возможных вариантов. Рассматриваем возможные различные сочетания по три контрольные точки из области влияния данного варианта. Отмечаем и запоминаем эти сочетания троек. Поскольку области влияния первого и второго вариантов могут пересекаться, то некоторые тройки точек могут попасть одновременно в область влия-

ния первого и второго вариантов. Такие тройки точек помечаем признаком того, что они участвуют в двух вариантах.

3. Далее аналогично перебираем все оставшиеся варианты и для каждой вновь рассматриваемой тройки контрольных точек проверяем, в скольких вариантах участвует эта тройка, запоминаем это количество вариантов. Дополнительно запоминаем, в каких именно вариантах присутствует данная тройка контрольных точек.

4. После перебора всех K вариантов будем иметь все сочетания по три контрольные точки, присутствующие в рассматриваемых вариантах. Таким образом, для каждой тройки точек будем знать, в каком количестве вариантов присутствует эта тройка (назовем это эффективностью использования этой тройки контрольных точек) и в каких именно вариантах.

5. Определяем тройку с максимальной эффективностью. При выполнении этого пункта возможно не единственное решение, т.е. могут появиться тройки с одинаковой максимальной эффективностью. Если варианты, в которых присутствуют такие тройки, не пересекаются, то эти тройки запоминаем и далее переходим к следующему п. 6. Если в этих тройках присутствуют пересекающиеся варианты, т.е. хотя бы в одном варианте присутствуют две различные тройки, то оставляем ту тройку, в которой составляющие ее точки встречаются в максимальном количестве вариантов.

Выбранные таким образом тройки запоминаем. Отмечаем все варианты, в которых присутствуют эти тройки, удаляем эти варианты из первоначально рассматриваемых K вариантов. Данные тройки будут частью искомой сети контрольных точек.

6. Для оставшихся вариантов и оставшихся троек повторяем п. 5 до тех пор, пока не останется ни одной тройки с эффективностью больше единицы. Для троек с эффективностью, равной единице, т.е. разные тройки присутствуют только в одном варианте, оставляем ту из них, в которой контрольные точки присутствуют в максимальном количестве вариантов.

В результате выполнения такого алгоритма будет получена оптимальная сеть станций мониторинга – минимальное количество точек отбора проб концентрации, которые обеспечивают решение «обратных» задач для любого из K заданных вариантов.

Теоретический анализ и тестовые расчеты показали, что решение поставленной задачи, а именно оптимальная сеть пунктов мониторинга, не является единственным. Поэтому на этапе отбора троек необходимо привлекать следующие дополнительные условия:

Расстояние между точками в оставляемой тройке не должно быть меньше некоторого значения R_{\min} . В противном случае такие точки воспринимаются предложенной математической моделью как одна точка.

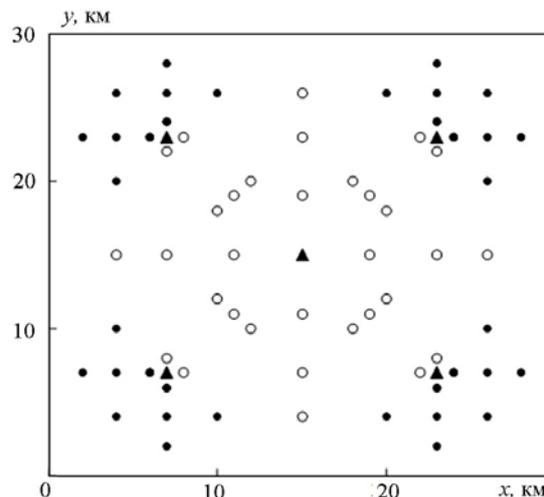
Чтобы избежать влияния границ рассматриваемой области, точки не должны приближаться к границам ближе чем на три шага сетки.

Необходимо также учитывать, что в некоторых районах города по причинам, не связанным с моделью или алгоритмом, невозможно размещение пунктов мониторинга.

Оценки показывают, что число возможных сочетаний по три точки будет не слишком большим и современный мощный персональный компьютер обеспечит перебор всех вариантов и всех контрольных точек за разумное время.

Для проверки описанного алгоритма нами были построены примеры оптимальных сетей для различных метеорологических условий и различных предельных значений

концентрации. На рисунке представлен пример результатов одного из таких расчетов. Построение сети проводилось для горизонтально однородной площадки размером 30×30 км с пятью точечными стационарными источниками, расположенными симметрично на площадке на высоте 50 м и имеющими одинаковую мощность, равную 10^6 г.



Пример построенной сети станций мониторинга атмосферы. Треугольники – точечные источники; кружочки – контрольные точки

Рассматривались два значения скорости ветра: 3 и 5 м/с на высоте флюгера, и восемь направлений ветра. Метеорологические условия были заданы типичными для Западно-Сибирского региона для июня на 15 ч местного времени. Таким образом, общее количество рассматриваемых вариантов составило $K = 5 \cdot 16 = 80$. Предельное значение концентрации было задано равным $C_0 = 0,025$ г/см³. «Прямая» задача распространения примеси решалась методами, описанными в [5]. Общее количество троек, попавших в область влияния этих вариантов, составило 116 728.

В результате работы программы была получена сеть из 68 контрольных точек, показанных на рисунке черными и белыми кружочками. Это минимальный набор точек, который позволяет решить «обратную» задачу и определить неизвестный источник при любых заданных метеорологических условиях и заданных источниках примеси. Очевидно, что в силу осевой симметрии рассматриваемого примера полученная сеть пунктов мониторинга должна быть симметричной. Это является одним из критериев правильности работы алгоритма для рассматриваемого примера. Удаление любой из контрольных точек сети приведет к тому, что, по крайней мере, в одном из K вариантов нельзя будет решить «обратную» задачу.

Полученное в этом примере количество контрольных точек 68 является не малым даже для крупного промышленного города. Число контрольных точек может быть гораздо меньше, если исключить варианты, в которых источник находится на окраине города и ветер дует со стороны города. В этом случае область влияния источника находится за пределами города и соответствующие варианты можно не рассматривать, а соответствующие контрольные точки (показанные на рисунке черными кружочками) можно отбросить.

Из представленного рисунка видно, что если такие варианты не учитывать и убрать 36 точек, расположенных между источником и ближайшей границей рассматриваемой

мой области, то их количество уменьшится до 32. Очевидно, если уменьшить предельное значение концентрации, то количество контрольных точек тоже уменьшится. В этом случае области влияния и пересечения для каждого варианта будут существенно больше и, следовательно, тройки, находящиеся в пересекающихся областях, будут обслуживать гораздо больше вариантов.

Тестовые расчеты показали, что при построении оптимальной сети станций мониторинга для конкретных городов и реальных метеорологических условий и для значительно большего количества источников общее количество станций будет примерно таким же, хотя общее количество вариантов K будет во много раз больше. Это объясняется тем, что области влияния большей части вариантов пересекаются и эффективность троек увеличивается, т.е. одни и те же тройки будут использованы в гораздо большем количестве вариантов.

В заключение можно отметить, что изложенная идея в несколько измененном виде может быть использована и для поиска источников, расположение которых неизвестно.

1. *Desyatkov B.M., Sarmanaev S.R., Borodulin A.I., Kotlyarova S.S., Selegei V.V.* Determination of Some Characteristics of an Aerosol Pollution Source by Solving the Inverse Problem of Pollutant Spread in the Atmosphere // *Atmos. and Ocean. Opt.* 1999. V. 12. N 2. P. 130–133.
2. *Sarmanaev S.R., Desyatkov B.M., Borodulin A.I., Kotlyarova S.S.* Definition of Parameters of a Multipoint Source of Aerosol Pollutants by Solution of the Inverse Problem of Their Dispersion in Atmosphere // *Atmos. and Ocean. Opt.* 2000. V. 13. N 9. P. 875–878.
3. *Desyatkov B.M., Sarmanaev S.R., Borodulin A.I., Kotlyarova S.S.* Study of the Method for Determining Characteristics of an Instantaneous Point Source from the Measured Pollutant Concentration // *Atmos. and Ocean. Opt.* 2001. V. 14. N 6–7. P. 557–560.
4. *Borodulin A.I., Desyatkov B.M., Sarmanaev S.R., Lapteva N.A., Yarygin A.A.* Errors in the Emission Rate Estimated from Solution of the Inverse Problem on the Diffusion of an Atmospheric Pollutant // *Atmos. and Ocean. Opt.* 2002. V. 15. N 5–6. P. 453–457.
5. *Desyatkov B.M., Sarmanaev S.R., Borodulin A.I.* Numerical-Analytical Model of the Aerosol Transport in a Thermally Stratified Boundary Layer of the Atmosphere // *Atmos. and Ocean. Opt.* 1996. V. 9. N 6. P. 517–520.

B.M. Desyatkov, A.I. Borodulin, S.R. Sarmanaev, N.A. Lapteva, V.V. Marchenko, A.A. Yarygin. **Algorithm of organization of the optimal network for monitoring of gas and aerosol admixtures of anthropogenic and natural origin.**

The algorithm of search for the optimal atmospheric pollution monitoring network is considered. The algorithm is required for the determination of minimum essential number of reference points, which provide for the effective solution of atmospheric admixture dispersion inverse problems. The algorithm is based on the procedure of the successive solution of direct problems from known sources with the variant selection using some selection criteria. The example of the determination of the optimal atmospheric pollution network is given.