

УДК 517.947.551.551

Метод построения оптимальной сети станций мониторинга выбросов газов и аэрозолей

Б.М. Десятков, Н.А. Лаптева*

ФБУН ГИЦ ВБ «Вектор» Роспотребнадзора
630559, р.п. Кольцово, Новосибирская обл.

Поступила в редакцию 18.01.2016 г.

Разработан метод организации оптимальной сети станций мониторинга выбросов опасных для здоровья человека газов и аэрозолей известными источниками при техногенных авариях и/или террористических актах. Построенная сеть станций позволяет зафиксировать выбросы в любых реальных метеорологических условиях. Выполнен анализ основных особенностей тестовых вариантов сетей в зависимости от порога чувствительности измерительных приборов и высоты, на которой расположен мгновенный точечный источник.

Ключевые слова: пограничный слой атмосферы, оптимальная сеть станций мониторинга выбросов, источники газов и аэрозолей; boundary layer of the atmosphere, optimal emission monitoring network, sources of gases and aerosols.

Введение

Одна из основных задач существующих сетей станций экологического мониторинга в городах и промышленных центрах — это информационное обеспечение и поддержка процедур принятия решений в области природоохранной деятельности и экологической безопасности. Важная характеристика таких сетей — степень оптимальности расположения постов измерения концентрации загрязняющих примесей, минимальное количество которых предоставляет достаточно полную информацию о состоянии загрязнения атмосферы. Нами обнаружено около 30 отечественных и зарубежных публикаций за последние 25 лет, в которых с этой точки зрения анализируются имеющиеся и предлагаются новые сети станций мониторинга.

Не делая подробный обзор этих работ, отметим лишь отличительные черты таких сетей. Согласно [1] «все известные системы оперативного контроля по принципу (концепции) построения можно разделить на два типа. К первому относятся те из них, которые позволяют (по полученным на сети пунктов данным) воспроизвести поле концентраций примесей, приближенное к реальному. Системы, базирующиеся на таких сетях стационарных пунктов, называются пространственно-репрезентативными. Ко второму типу относятся системы, «ориентированные на источники», т.е. позволяющие оценить вклад отдельных источников в общее поле загрязнения атмосферы». Достаточно полный обзор существующих подходов изложен в [2].

По используемым математическим методам все работы, связанные с построением пространственно-репрезентативных оптимальных сетей станций мониторинга, можно разделить на две группы. В первой математические методы основаны на дисперсионном анализе больших рядов измеренных значений концентрации на каждой действующей станции и обнаружении корреляционных связей между ними [2, 3–9]. Поэтому данные методы позволяют оценить степень оптимальности уже существующей сети станций и, при необходимости, прежде всего по экономическим причинам, удалить некоторые станции без весомой потери информации. В работе [10] обсуждается методика рационализации региональных наблюдательных сетей, которая включает два этапа: выделение информативно-однородных зон и упорядочение информативно-однородных зон.

Во второй группе используются различные методы восстановления пространственного поля концентраций по вычисленным значениям выброшенного вещества в предполагаемых точках нахождения станций. Для этого прибегают к математическим моделям (в основном гауссова типа) распространения примесей в атмосфере и информации об источниках примесей [11–15].

Работ, посвященных анализу и алгоритмам построения сетей станций, «ориентированных на источники», значительно меньше. Так, например, в [2] предлагается размещать станции контроля под факелом промышленного предприятия на разных расстояниях (0,5; 1; ...; 10 км) от него в предполагаемых зонах максимальных концентраций выбросов данного источника. В [16] рассматривается система оперативного контроля загрязнения атмосферы, которая объединяет оба принципа построения подобных

* Борис Михайлович Десятков (dbm@vector.nsc.ru);
Наталья Александровна Лаптева (lapteva@vector.nsc.ru).

систем: пространственно-репрезентативный и «ориентированный на источники». Этот проект основан на широком использовании лазерных локаторов (лидаров).

Очевидно, что предлагаемый в [1] «ориентированный на источники» подфакельный метод размещения станций контроля не всегда и не при всех реальных метеорологических условиях способен зафиксировать выброс вредных веществ на потенциально опасных предприятиях в чрезвычайных ситуациях, связанных с техногенными авариями и/или террористическими актами. То же самое относится и к пространственно-репрезентативным сетям.

В связи с этим актуальной становится задача разработки метода построения оптимальной сети станций мониторинга выбросов газов и аэрозолей при техногенных авариях и/или террористических актах. Под оптимальностью в данном случае понимается минимальное количество станций, которые позволят контролировать выбросы в любой момент и в любых реальных метеорологических условиях. Станции могут быть стационарными и мобильными и частично пересекаться с уже существующими.

Такая сеть должна выполнять две основные функции: фиксировать выброс вещества и определять его в случае, если координаты источника известны; определять местоположение, тип источника и массу выброшенного вещества, если выброс является скрытым, а источник неизвестен. Полученная информация позволит смоделировать дальнейшее распространение примесей в атмосфере и оценить степень и возможные зоны поражения.

Цель данной работы — разработка метода построения оптимальной сети станций мониторинга выбросов опасных для здоровья человека веществ известными источниками, которая позволит зафиксировать выброс в любой момент времени и в любых реальных метеорологических условиях.

Описание метода

Предполагаем, что нам известно местоположение особо опасного предприятия, на котором может произойти выброс в атмосферу вредных для здоровья человека газов или аэрозолей.

Метод создания оптимальной сети станций мониторинга основан на последовательном решении «прямых» задач рассеяния атмосферных примесей (когда по информации об источнике моделируется распространение примесей во всех реальных метеорологических ситуациях). Строится предварительная сеть станций мониторинга, которая будет в состоянии зафиксировать выброс для этих условий. Далее определяется вес каждой станции мониторинга (количество метеорологических ситуаций, в которых фиксируется выброс), проводится ранжирование их по весу. В качестве решения предлагается два–три варианта сети, различающиеся количеством станций. Для моделирования диффузии примесей в пограничном слое атмосферы используется разработанная в ГНЦ ВБ «Вектор» численно-аналитическая модель переноса аэрозолей в термически стратифицирован-

ном пограничном слое атмосферы [17]. Исходная система дифференциальных уравнений решается конечно-разностным методом, в котором трехмерная область распространения примесей в атмосфере покрывается разностной сеткой с пространственными шагами Δx , Δy , Δz . Значения всех функций и параметров уравнений записываются в узлах данной сетки, именно с этими значениями выполняются все математические операции. Для них строится система алгебраических уравнений, которая далее решается.

Опишем основные этапы алгоритма построения искомой оптимальной сети станций мониторинга выбросов.

Пусть N — общее количество вариантов (число различных метеорологических условий), которые необходимо учитывать. В общем случае необходимо рассмотреть возможные направления ветра (16 румбов); скорости ветра 2, 5, 8, 11, 15 м/с; утренние, дневные, вечерние и ночные условия (различная термическая стратификация приземного слоя); все сезоны года и все месяцы. В этом случае максимальное число вариантов $N = 3840$.

Задаем предельное значение интегральной по времени концентрации дозы C_0 такое, что, если в какой-либо области вычисленное значение C меньше C_0 , то считаем, что в этой области доза равна 0. Значения C_0 определяются, с одной стороны, чувствительностью измерительных приборов, а с другой — они должны быть существенно больше фонового значения, чтобы однозначно показать, что измеренное вещество появилось в атмосфере вследствие выброса его промышленным предприятием.

Заметим, что, если местоположение источника известно, то в силу линейной зависимости концентрации от мощности источника достаточно одного измеренного значения дозы в одной точке для определения массы выброшенного вещества.

Задачу распространения примесей решаем для каждого из N возможных вариантов. Определим область влияния для варианта как область, где $C > C_0$. Во все узлы разностной сетки в области влияния помещаем контрольные точки. В каждой контрольной точке суммируем число таких вариантов. Это число назовем весом контрольной точки. Определяем точку (или точки) с максимальным весом, запоминаем их. Они являются частью будущей оптимальной сети станций мониторинга. Варианты, в которых присутствуют эти точки, удаляем из первоначально рассматриваемого множества N вариантов.

Для оставшихся вариантов снова находим контрольные точки с максимальным весом, запоминаем их, удаляем варианты, в которых присутствуют эти точки, повторяем эти действия до тех пор, пока не будут обработаны все варианты.

В результате выполнения такого алгоритма будет получена оптимальная сеть станций мониторинга, которую можно разбить на несколько версий (вариантов), например, три: максимальную, когда контролируются все метеорологические условия; минимальную, когда не учитываются маловероятные метеорологические условия, и промежуточную. Выбор варианта сети определяется общим количеством

в ней станций мониторинга, экономическими соображениями и другими факторами.

Результаты расчетов и их обсуждение

Моделировалось распространение газов при мгновенном выбросе их из точечного источника, расположенного на высоте H в центре области распространения, горизонтальный размер которой был равен 8×8 , 16×16 и 32×32 км. Рассматривались следующие варианты метеорологических условий: скорость ветра на высоте 5 м (высота флюгера) равна 2, 5, 8, 11 и 15 м/с, 16 направлений ветра с шагом $22,5^\circ$, устойчивая и неустойчивая температурная стратификация приземного слоя атмосферы, 4 сезона года, время суток, когда произошел выброс вещества равно 1 и 13 ч. Всего было рассмотрено 640 вариантов метеорологических условий. Высота, на которой находился точечный источник, задавалась равной 30, 60, 90, 120, 150 и 180 м, предельное значение $C_0 = 0,01; 0,1; 0,5; 1; 5; 10; 20; 40; 60; 80; 100$ мг·с/м³, количество выброшенного вещества $Q_0 = 10^4$ г.

Оптимальная сеть станций мониторинга для заданных метеорологических условий зависит от высоты, на которой расположен источник, чувствительности приборов, измеряющих концентрацию примесей, и от массы выброшенного вещества. Выбранные значения параметра C_0 и Q_0 не охватывают все возможные сочетания этих величин, однако линейная зависимость концентрации примесей от массы выброшенного вещества позволяет провести расчет всех сочетаний величин C_0 и Q_0 при указанных выше значениях. Например, значениям $C_0 = 0,1$ мг·с/м³ и $Q_0 = 10^4$ г соответствуют следующие сочетания C_0 и Q_0 : 1 и 10^5 ; 0,1 и 10^4 ; 0,01 и 10^3 ; 0,001 и 10^2 ; 0,0001 и 10^1 и т.д.

Чтобы исключить влияние термических, орographicеских и иных неоднородностей подстилающей поверхности на построенные сети, моделирование распространения примесей проводилось над ровной, однородной поверхностью.

Далее для краткости местоположения станций контроля загрязнения воздуха будем называть контрольными точками; высоту, на которой расположен точечный мгновенный источник, — высотой источника; варианты метеорологических ситуаций, в которых значения концентрации регистрируются в контрольных точках, — пойманными вариантами.

В таблице показано, что при изменении C_0 от малых (высокая точность измерительных приборов) до больших значений (низкая точность измерительных приборов) количество пойманных вариантов метеоусловий уменьшается от 100% до 0. Число необходимых контрольных точек также сильно зависит от этого параметра. Так, для $C_0 = 1$ требуются всего четыре контрольные точки, которые ловят все 100% вариантов рассмотренных метеоусловий. Для $C_0 = 100$ четыре контрольные точки ловят всего 2% вариантов метеоусловий. Максимальное же число контрольных точек требуется для промежуточных значений C_0 .

Число контрольных точек (n) и число пойманных вариантов (P , %) для высоты источника $H = 30$ м в области 8×8 км для различных сезонов года и предельных значений C_0

| C_0 | Лето | | Зима | | Весна | | Осень | | Год | |
|-------|------|-----|------|-----|-------|-----|-------|-----|-----|-----|
| | n | P | n | P | n | P | n | P | n | P |
| 1 | 4 | 100 | 4 | 100 | 4 | 100 | 4 | 100 | 4 | 100 |
| 5 | 8 | 100 | 8 | 100 | 8 | 100 | 8 | 100 | 8 | 100 |
| 10 | 16 | 95 | 20 | 95 | 16 | 95 | 20 | 95 | 28 | 95 |
| 20 | 8 | 52 | 8 | 52 | 8 | 52 | 8 | 52 | 8 | 53 |
| 40 | 12 | 27 | 12 | 27 | 16 | 27 | 12 | 27 | 20 | 28 |
| 60 | 8 | 15 | 8 | 15 | 8 | 15 | 8 | 15 | 8 | 15 |
| 80 | 12 | 7 | 8 | 7 | 12 | 7 | 8 | 7 | 16 | 8 |
| 100 | 4 | 2 | 4 | 2 | 4 | 2 | 4 | 2 | 4 | 3 |

Построенные оптимальные схемы контрольных точек очень сильно различаются по конфигурации и количеству точек в зависимости от высоты источника и значения C_0 (чувствительность измерительных приборов). Поэтому далее представим и обсудим только основные закономерности.

На рис. 1, а изображена оптимальная сеть контрольных точек, построенная для точечного источника, который расположен на высоте 30 м для $C_0 = 1$. Схема спроектирована для области 8×8 км и состоит из четырех точек, которые ловят выбросы вещества при всех 100% вариантов метеорологических условий. На рис. 1—3 местоположение источника указано черным крестиком.

На рис. 1, б показана оптимальная сеть контрольных точек для тех же условий, но с $C_0 = 10$. Схема состоит из 28 точек, которые ловят 95% вариантов: 4 точки (ромбы) — 76%, 12 точек (треугольники) — 15%, 12 точек (квадраты) — 4%. Изменение значения C_0 от 1,0 до 10 привело к резкому увеличению количества контрольных точек и одновременно к уменьшению числа пойманных вариантов. В каждом из лучей, состоящем из квадратов, можно оставить одну любую контрольную точку в удобном месте. На рис. 1, б приведен пример расположения таких точек, которые выделены большими квадратами. Это справедливо и для рис. 2, 3. Если оставить только 4 точки (ромбы), которые ловят 76% вариантов, то оптимальная сеть будет состоять только из них. Необходимо подчеркнуть, что данные точки не ловят метеорологические ситуации для ночных условий и скорости ветра на высоте флюгера 15 м/с. Подобные варианты ловятся контрольными точками, расположенными на большом удалении от источника, которые показаны на рис. 2 квадратами. Но вероятность таких метеорологических условий очень мала. Так, например, для Новосибирска [18] она не превышает 0,2%. Очевидно, такими вариантами можно пренебречь и ограничиться контрольными точками, расположенными на небольшом удалении от источника.

Таким образом, если не учитывать маловероятные метеорологические ситуации, то для высоты источника 30 м оптимальная сеть станций контроля для всех рассмотренных значений C_0 выглядит так, как представлена на рис. 1, б.

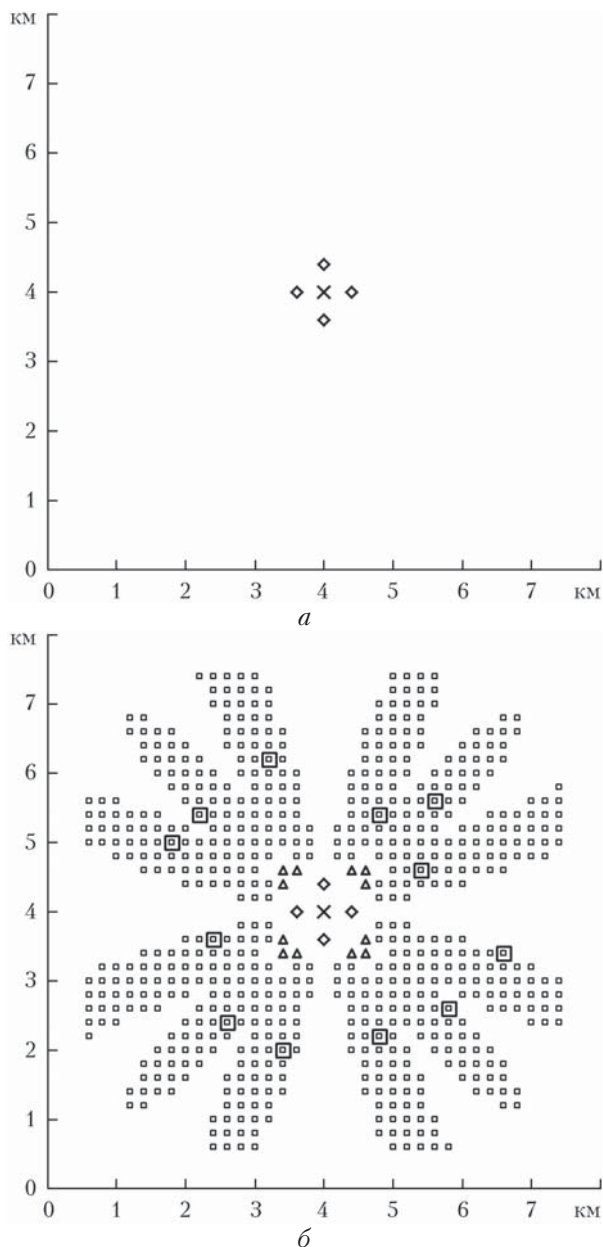


Рис. 1. Оптимальная сеть для высоты источника 30 м: $C_0 = 1$, число контрольных точек 4, поймано 100% вариантов (а); $C_0 = 10$, число контрольных точек 28, поймано 95% вариантов: 4 точки (ромбы) ловят 76%, 12 точек (треугольники) – 15%, 12 точек (квадраты) – 4% (б)

При увеличении высоты источника уменьшается эффективность (доля пойманных вариантов в общем числе пойманных вариантов) контрольных точек, расположенных вблизи источника и увеличивается эффективность точек, находящихся на периферии области. Наряду с этим точки не могут ловить варианты, при которых наблюдается распространение примесей на большее расстояние. По этой причине были проведены расчеты для области 16×16 и 32×32 км.

На рис. 2 и 3 изображены схемы для высоты источника 120 м и $C_0 = 1$ и 10 для области 32×32 км.

Из сравнения рис. 1 с рис. 2 и 3 следует, что при увеличении высоты источника с 30 до 120 м

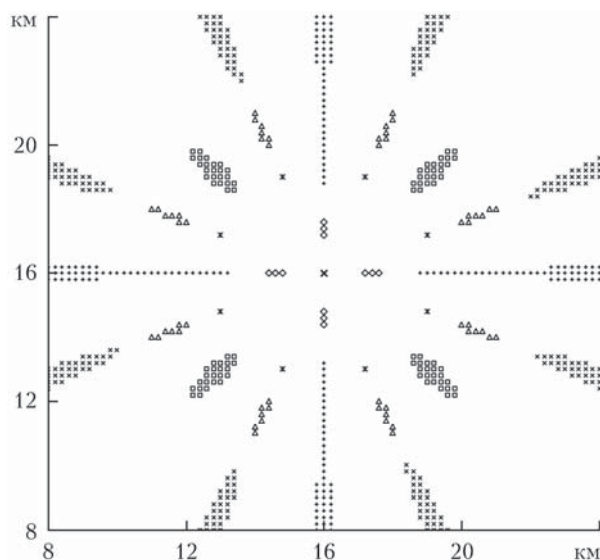


Рис. 2. Оптимальная сеть для высоты источника 120 м: $C_0 = 1$, число контрольных точек 36, поймано 68% вариантов: 4 точки (ромбы) ловят 30%, 8 точек (треугольники) – 23%, 4 точки (квадраты) – 10%, 4 точки (плюсы) – 2%, 8 точек (звездочки) – 3%, 8 точек (крестики) – 1%

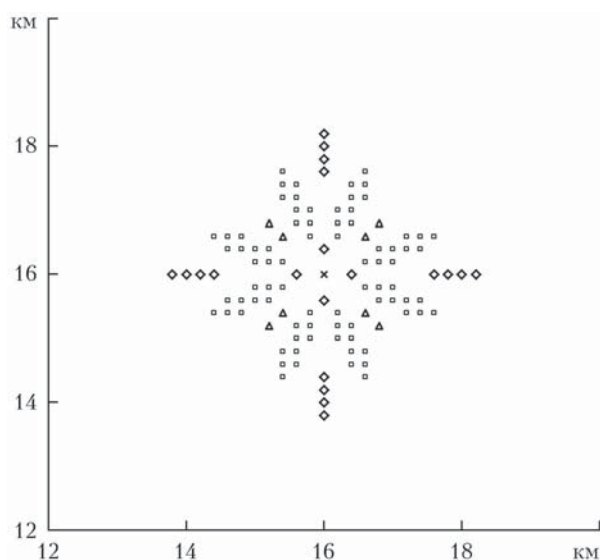


Рис. 3. Оптимальная сеть для высоты источника 120 м: $C_0 = 10$, число контрольных точек 20, поймано 10% вариантов: 4 точки (ромбы вблизи источника) ловят 3%, 4 точки (ромбы вдали от источника) – 4%, 4 точки (треугольники) – 2%, 8 точек (квадраты) – 1%

число контрольных точек увеличивается с 4 до 36, а число пойманных вариантов уменьшается со 100 до 68% для $C_0 = 1$, число контрольных точек уменьшается с 28 до 20, а число пойманных вариантов с 95 до 10% для $C_0 = 10$. Эффективность точек, расположенных вблизи источника, уменьшается от 1,0 до 0,44 для $C_0 = 1$ и от 0,8 до 0,3 для $C_0 = 10$. Соответственно увеличивается эффективность точек, расположенных вдали от источника.

На рис. 4 представлена зависимость количества пойманных вариантов от высоты источника и значения C_0 . Видно, что количество пойманных вариантов уменьшается с увеличением обоих параметров.

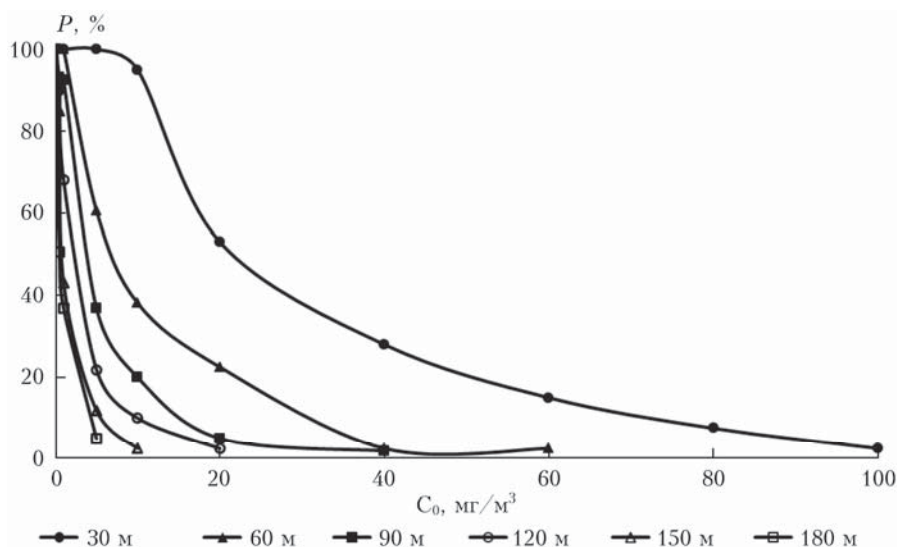


Рис. 4. Количество пойманных вариантов P в зависимости от значения C_0 для высоты источника 30, 60, 90, 120, 150, 180 м

Это объясняется тем, что уменьшается общее количество вариантов, в которых значение дозы больше заданного значения C_0 . Чтобы поймать 100% вариантов для высоты источника $H = 30, 60, 90, 120$ м, необходимо выполнение условия $C_0 \leq 5, 0; 1, 0; 0, 1; 0, 01$ соответственно для каждой высоты источника.

Заключение

Разработан метод построения оптимальной сети станций мониторинга выбросов газов и аэрозолей известными источниками. Проведены исследования особенностей данных сетей. Обнаружены следующие закономерности.

1. Для всех сезонов года построенные сети контрольных точек для высоты источника 30 м совпадают для малых значений $C_0 \leq 5, 0$ и для больших значений $C_0 \geq 60$. Для промежуточных же $40 > C_0 \geq 10$ имеется небольшое отличие в схемах. Однако оно наблюдается в основном в контрольных точках, расположенных на периферии области, которые ловят относительно малое число вариантов.

2. Чем больше высота источника, тем меньше количество пойманных вариантов при неизменном значении C_0 и тем выше эффективность контрольных точек, удаленных от источника.

3. При недостаточной чувствительности измерительных приборов число контрольных точек, необходимых для регистрации всех возможных вариантов выброса вещества, должно быть нереально большим (10–20). Для существенного уменьшения необходимого числа точек можно пренебречь маловероятными метеорологическими ситуациями (сочетание устойчивой стратификации с большой скоростью ветра) и увеличить чувствительность измерительных приборов.

4. Чтобы поймать 100% вариантов для высоты источника $H = 30, 60, 90, 120$ м, следует выполнить условия $C_0 \leq 5, 0; 1, 0; 0, 1; 0, 01$ соответственно для каждой высоты источника, а область распростране-

ния примесей должна быть равной 32×32 км. Количество контрольных точек при этом минимально и равно 4.

Главное отличие данного метода построения оптимальной сети станций мониторинга выбросов от подфакельного расположения станций контроля [2] состоит в том, что он указывает объективно оптимальное расположение станций. В этом случае при техногенной аварии и/или террористическом акте эти станции зафиксируют выброс в любых возможных метеорологических условиях, при заданных характеристиках измерительных приборов и для конкретных примесей.

1. Ясенский А.Н., Боброва В.К., Зив А.Д., Красов В.И. Оптимизация пространственной сети наблюдений при контроле загрязнения атмосферы города // Труды ГГО. 1987. Вып. 492. С. 13–23.
2. Безуглая Э.Ю. Мониторинг состояния загрязнения атмосферы в городах. Л.: Гидрометеониздат, 1986. 203 с.
3. Silva C., Quiroz A. Optimization of the atmospheric pollution monitoring network at Santiago de Chile // Atmos. Environ. 2003. V. 37. P. 2337–2345.
4. Ni-Bin Chang, Tseng C.C. Optimal design of a multi-pollutant air quality monitoring network in a metropolitan region using Kaohsiung, Taiwan as an example // Environ. Monitor. Asses. 1999. V. 57. P. 121–148.
5. Handscombe C.M., Elson D.M. Rationalization of the national survey of air pollution monitoring network of the United Kingdom using spatial correlation analysis: A case study of the Greater London area // Atmos. Environ. 1982. V. 16, N 5. P. 1061–1070.
6. Liu M.K., Avrin J. Methodology for designing an optimum air quality monitoring network. EPA-600/4-81-002, PB81-17M91. 1981.
7. Modak P.M., Lohani B.N. Optimization of ambient air quality monitoring networks (part I) // Environ. Monitor. Asses. 1985. N 5. P. 1–19.
8. Modak P.M., Lohani B.N. Optimization of ambient air quality monitoring networks (part II) // Environ. Monitor. Asses. 1985. N 5. P. 20–38.
9. Katoh H., Nagasawa S., Ootaki A., Shiozawa K. Study on representative ness of air monitoring station by sta-

- tistical model (in Japanese) // J. Jpn. Soc. Air Pollut. 1985. N 20. P. 384–393.
10. *Покровский О.М.* О рационализации региональных наблюдательных сетей // Метеорол. и гидрол. 2000. № 8. С. 5–21.
 11. *Corti A., Senatore A.* Project of an air quality monitoring network for industrial site in Italy // Environ. Monitor. Asses. 2000. V. 65. P. 109–117.
 12. *Van Egmond N.D., Onderdelinden D.* Objective analysis of air pollution monitoring network data; spatial interpolation and network density // Atmos. Environ. 1981. V. 15. P. 1035–1046.
 13. *Houglan E.S., Stephens N.T.* Air pollutant monitoring by analytical techniques // J. Air Pollut. Control. V. 26, N 11976. P. 51–53.
 14. *Noll K.E., Miller T.L., Norco J.E., Rauffer R.K.* An objective air monitoring site selection methodology for large point sources // Atmos. Environ. 1986. V. 11. P. 1051–1059.
 15. *Buell C.E.* Objective procedures for optimum location of air pollution observation stations. EPA-650/4-75-005, PB-252622. 1975.
 16. *Балин Ю.С., Белан Б.Д., Надеев А.И., Панченко М.В.* Система оперативного контроля загрязнения воздушного бассейна промышленных центров «Город» // Оптика атмосф. и океана. 1994. Т. 7, № 2. С. 163–176.
 17. *Бородулин А.И., Десятков Б.М.* Моделирование распространения примесей в пограничном слое атмосферы. Новосибирск: НГУ, 2007. 376 с.
 18. *Климат Новосибирска* / Под ред. С.Д. Кошинского. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 223 с.

В.М. Desyatkov, N.A. Lapteva. Method for constructing optimal network monitoring stations of gases and aerosols emissions.

A method is developed for organization of optimal network of monitoring stations of hazardous emissions of gases and aerosols from known sources during technogenic accidents and terrorist acts. A network built allows one to fix emissions in any real meteorological conditions. The basic features of test networks are analyzed depending on the instrumentation sensitivity threshold and source altitude.