

Б.М. Десятков, С.Р. Сарманаев, А.И. Бородулин, С.С. Котлярова

Изучение возможностей метода определения характеристик точечного мгновенного источника атмосферных загрязнений по измеренным значениям концентрации примеси

НИИ аэриобиологии ГНЦ ВБ «Вектор», пос. Кольцово, Новосибирская обл.

Поступила в редакцию 2.02.2001 г.

Рассматривается метод определения координат и мощности точечного источника примеси по измеренным в нескольких точках значениям концентрации. Метод основан на применении уравнения, сопряженного с полуэмпирическим уравнением турбулентной диффузии. Изучаются возможности метода для случая, когда используемые значения концентрации содержат как ошибки измерений, так и статистический разброс, обусловленный турбулентностью атмосферы. Проведено две серии расчетов. В первой серии использовались значения концентрации, полученные моделированием распространения аэрозольных частиц над г. Новосибирском. Во второй серии расчетов использовались экспериментальные данные. Полученные результаты восстановления координат и мощности источника можно оценить как удовлетворительные.

В [1] нами был рассмотрен метод определения координат и мощности точечного источника атмосферной примеси по значениям концентрации, измеренным в нескольких контрольных точках. Данный метод основан на решении уравнения, сопряженного с полуэмпирическим уравнением турбулентной диффузии. Идея использования таких уравнений в задачах, связанных с охраной окружающей среды, была впервые сформулирована Г.И. Марчуком в начале 70-х гг. Дальнейшее развитие она получила в ряде исследований, например [2-5]. При соответствующей математической постановке прямой и сопряженной задач можно получить функционал, который связывает искомые характеристики с измеренными значениями концентрации и функцией Грина, которая является решением сопряженной задачи. Применительно к нашей проблеме этот функционал выглядит следующим образом:

$$\int_{\Omega} R_* D d\Omega = \int_{\Omega} R D_* d\Omega; \quad (1)$$

$$D = \int_0^{\infty} C dt, \quad D_* = \int_{-\infty}^0 C_* dt,$$

где C – концентрация примеси, выброшенная мгновенным точечным источником, описываемым функцией R ; D – интегральная концентрация примеси, доза; C_* – функция Грина; R_* – функция, которая определяет координаты контрольных точек, где измеряется концентрация примеси; Ω – трехмерная область, в которой моделируется распространение примеси.

Пусть

$$R = R_0 \delta(x - x_0, y - y_0, z - z_0, t); \quad (2)$$

$$R_* = \begin{cases} \delta(x - \xi, y - \eta, z - h); & \xi, \eta \in S \\ 0; & \xi, \eta \notin S. \end{cases}$$

Тогда из (1) и (2) можно получить следующее выражение:

$$J = \int_S \left| R_0 - \frac{D(\xi, \eta, h)}{D_*(x_0, y_0, z_0; \xi, \eta, h)} \right| dS. \quad (3)$$

Соотношение (3) связывает характеристики мгновенного точечного источника, расположенного в пока не известной точке с координатами x_0, y_0, z_0 и в момент времени $t = 0$ выбросившего в атмосферу некоторое количество вещества R_0 , с измеренными на плоскости S в точках с координатами ξ, η, h значениями интегральной концентрации. Очевидно, что минимум этого функционала определяет искомые характеристики.

Были изучены возможности этого метода для случая, когда используемые значения интегральной концентрации содержали как ошибки измерений, так и статистический разброс, обусловленный турбулентным процессом распространения примесей в атмосфере.

Всего было проведено две серии расчетов. В первой серии моделировалось распространение аэрозольных частиц диаметром 10 мкм над г. Новосибирском. В расчетах учитывались реальный рельеф местности и тип поверхности (городская застройка различной этажности, степь, лес, водоемы и др.). Для получения значений интегральной концентрации в контрольных точках решению обратной задачи предшествовало решение прямой задачи распространения с источником, имевшим координаты $x_0 = 12$ км, $y_0 = 12,5$ км, $z_0 = 50$ м, z_0 – вертикальная координата (рис. 1,а). Источник срабатывал в 15 ч местного времени и выбрасывал в атмосферу примесь массой R_0 .

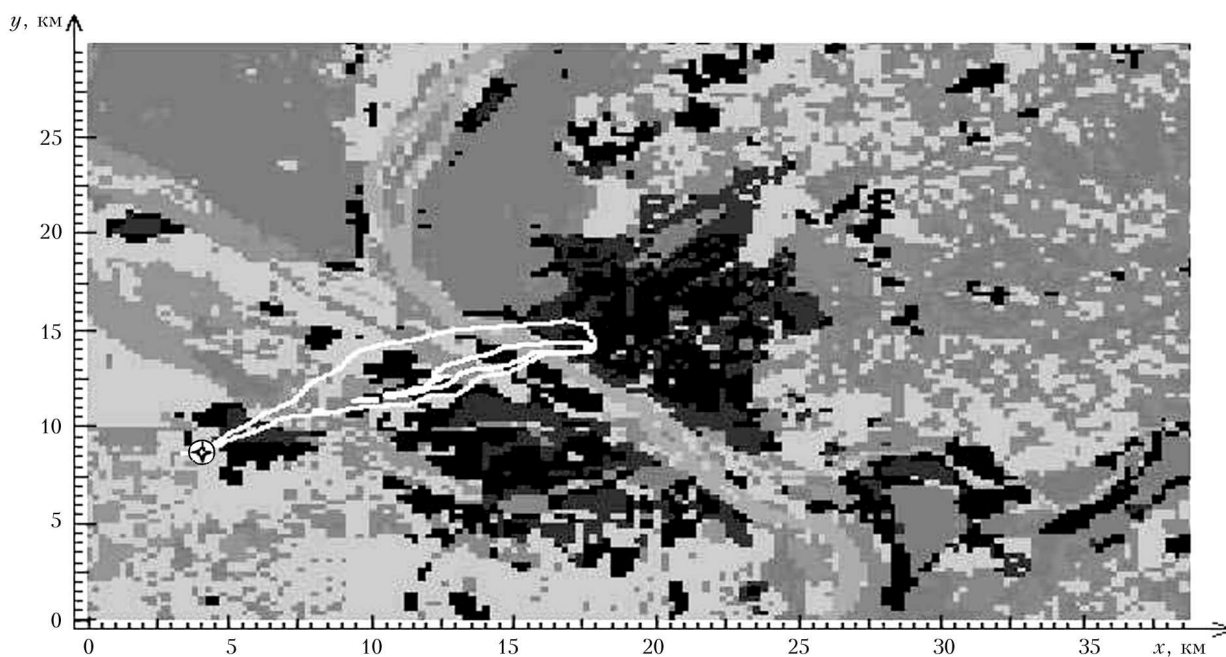
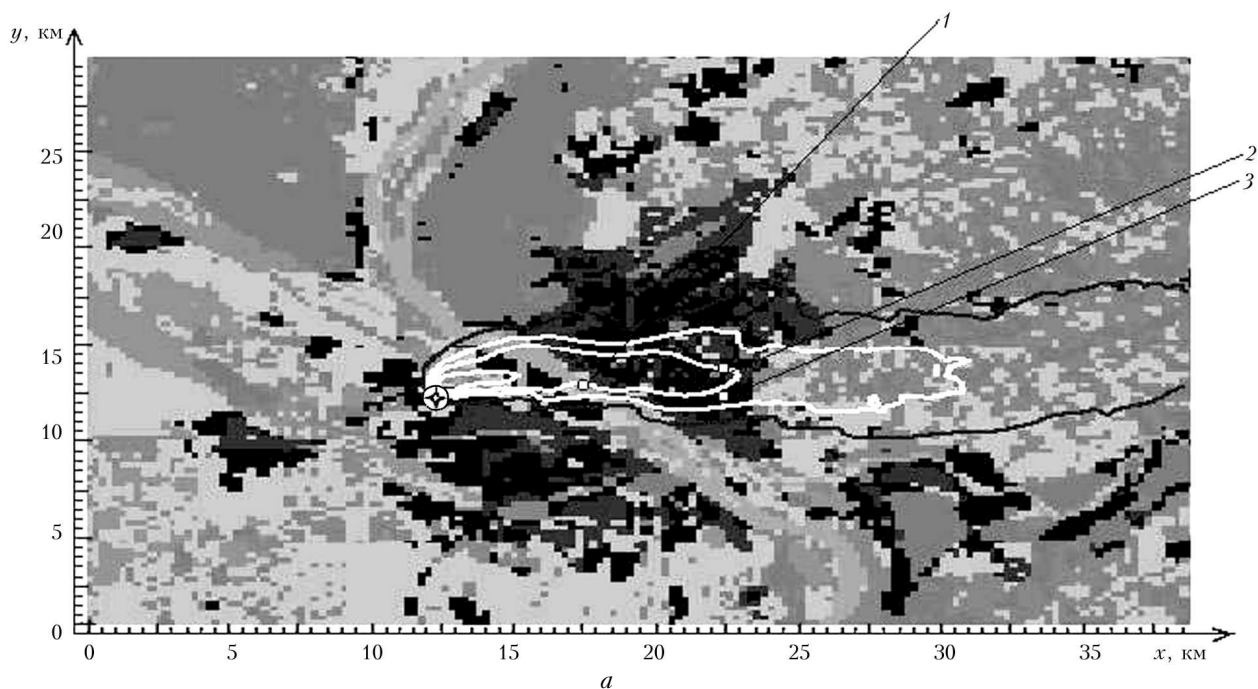


Рис. 1. Изолинии вычисленных значений доз (а) и функционала J (б); \oplus – мгновенный точечный источник. 1, 2 и 3 – контрольные точки, в которых задавалась доза примеси

Расчеты проводились для метеоусловий, типичных для г. Новосибирска на 25 июня. На город дул юго-западный ветер, скорость которого на высоте флюгера, расположенного на загородной метеостанции, была равна 3 м/с. С использованием метода [6] рассчитывались поля скорости ветра над площадкой, а затем интегральная концентрация примеси.

На рис. 1,а приведены изолинии интегральной концентрации, полученные для этого случая. Внутренняя изолиния проведена для интегральной кон-

центрации, равной $1 \cdot 10^5$ усл. ед., остальные для $6 \cdot 10^3$, $5 \cdot 10^2$ и $1 \cdot 10^1$ усл. ед. соответственно. Интегральная концентрация в контрольных точках 1, 2 и 3 равна $9,2 \cdot 10^3$, $6,7 \cdot 10^3$ и $8,8 \cdot 10^2$ усл. ед. соответственно. После этого проводилось решение обратной задачи: значения интегральной концентрации в трех контрольных точках (см. рис. 1) интерпретировались как измеренные; для каждой контрольной точки решалось сопряженное уравнение турбулентной диффузии и вычислялись поля функции Грина; минимизировался

функционал (3) и определялись координаты источника и масса выброшенного вещества.

При использовании трех контрольных точек найденные координаты совпали с исходно заданными координатами источника. Восстановленное значение массы отличалось от исходного значения менее чем на 3%. Дополнительные расчеты показали, что увеличение количества контрольных точек, а также изменение их взаимного расположения практически не влияют на точность определения характеристик источника. Изолинии значений функционала J , представленные на рис. 1,б для этого случая, хорошо локализируют источник примеси. Минимальное значение функционала J , показанное на рис. 1,б точкой белого цвета, находится в той же точке, где находится источник при решении прямой задачи.

Во второй серии расчетов использовались данные, полученные в ГНЦ ВБ «Вектор» в экспериментах по разработке аэрозольной технологии защиты сельскохозяйственных растений от вредных насекомых.

На рис. 2 представлена типичная схема таких экспериментов, где источник примеси обозначен звездочкой, кружочками – контрольные точки, в которых проводилось измерение концентрации. Значения концентрации в точках с пронумерованными кружочками использовались для решения обратной задачи.

Всего было рассмотрено 7 экспериментов. Все эксперименты были проведены при нейтральной или слабоустойчивой стратификации приземного слоя атмосферы. Количество контрольных точек, используемых в расчетах, изменялось от 3 до 17. В качестве

примера в табл. 1 представлены измеренные значения дозы (в усл. ед.) в контрольных точках в эксперименте № 5. Необходимо обратить внимание на большой разброс измеренных значений доз.

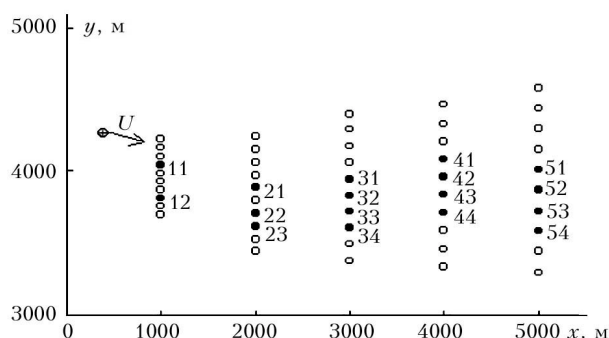


Рис. 2. Схема проведения экспериментов. * – точечный источник, о – контрольные точки, в которых проводилось измерение концентрации аэрозолей

В табл. 2 и на рис. 3 представлены экспериментальные и рассчитанные значения координат точечного источника и массы выброшенного вещества в усл. ед. Видно, что координаты точечного источника определяются достаточно хорошо. Средняя ошибка в определении координат равна 83 м, а стандартное отклонение равно 70 м. Масса выброшенного вещества определяется с меньшей точностью, чем координаты источника. Средняя относительная ошибка этой величины и ее стандартное отклонение равны соответственно 89 и 96%.

Таблица 1

Экспериментальные значения дозы в контрольных точках для эксперимента № 5, усл. ед.

Номер точки	11	12	21	22	23	31	32	33	34
Доза, усл. ед.	0,37	0,15	0,10	0,25	0,56	0,56	1,30	1,50	0,70
Номер точки	41	42	43	44	51	52	53	54	–
Доза, усл. ед.	0,60	0,55	0,47	0,18	0,02	0,24	0,37	0,30	–

Таблица 2

Экспериментальные и вычисленные значения параметров источника

№ эксперимента	Количество использованных точек	ϵ , м	$R_{0э}$, усл. ед.	$R_{0г}$, усл. ед.	δ , %
1	2	3	4	5	6
1	3	17	0,88	0,96	9,2
1	4	14	0,88	0,89	0,6
1	7	10	0,88	0,88	0,9
1	15	28	0,88	0,75	15,6
2	3 (а)	34	0,13	0,70	425,0
2	3 (б)	25	0,13	0,53	294,0
2	3 (в)	94	0,13	0,25	88,8
2	4 (а)	19	0,13	0,42	213,0
2	4 (б)	108	0,13	0,27	100,0
2	4 (в)	244	0,13	0,03	78,1
2	5 (а)	91	0,13	0,25	85,8
2	5 (б)	282	0,13	0,10	28,0
2	6 (а)	40	0,13	0,38	184,0
2	6 (б)	40	0,13	0,36	172,0
2	6 (в)	55	0,13	0,32	138,0

1	2	3	4	5	6
3	3	82	0,88	0,80	9,1
3	5	63	0,88	0,80	9,7
3	6	83	0,88	0,88	0,2
4	3	92	0,89	1,17	30,9
4	4	96	0,89	1,92	115,0
4	6	96	0,89	1,88	110,0
5	3	153	0,52	0,40	22,5
5	5	68	0,52	0,07	86,8
5	10	155	0,52	0,15	71,5
5	13	191	0,52	0,29	43,3
5	17	166	0,52	0,16	68,5
6	3	15	0,25	0,45	80,0
6	5	5	0,25	0,19	23,6
7	3	30	0,59	1,04	76,0
Среднее значение		83			89
Стандартное отклонение		70			96

Примечание. ϵ – отклонение вычисленных значений координат источника от истинных; $R_{0э}$ и $R_{0т}$ – экспериментальные и вычисленные значения выброшенной массы вещества; δ – относительная ошибка определения количества выброшенного вещества.

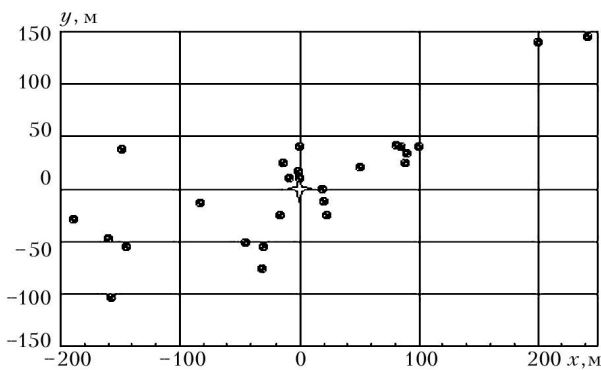


Рис. 3. Вычисленные координаты точечного источника.

★ – истинное положение источника

Были проведены расчеты с различным количеством используемых контрольных точек (см. эксперименты № 1 и 5), а также расчеты с различным расположением контрольных точек на экспериментальной площадке (см. эксперимент № 2). В этом случае буквой «а» в таблице отмечены расположенные близко от источника точки, буквой «б» – расположенные далеко от источника, а «в» – распределенные равномерно по площадке. Расчеты не выявили устойчивой зависимости точности теоретических результатов от расположения контрольных точек. Этот факт, по-видимому, можно объяснить недостаточной точностью измерений скорости ветра, температуры и дозы и стати-

стическим характером процесса распространения примеси. С учетом этих замечаний полученные результаты восстановления характеристик источника примеси можно оценить как вполне удовлетворительные.

Работа выполнена по контракту с International Science and Technology Center № 1217p и финансируется Defense Advanced Research Project Agency, USA.

1. Десятков Б.М., Сарманаев С.Р., Бородулин А.И., Котлярова С.С., Селегей В.В. Определение некоторых характеристик источника аэрозольных примесей путем решения обратной задачи их распространения в атмосфере // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12. № 2. С. 136–139.
2. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука, 1982. 320 с.
3. Марчук Г.И. Окружающая среда и некоторые проблемы оптимизации размещения предприятий // Докл. АН СССР. 1976. Т. 227. № 5. С. 1056–1059.
4. Marchuk G.I., Penenko V.V. Application of Optimization Methods to the Problem of Mathematical Simulation of Atmospheric Processes and Environment // Proc. of the IFIP. В. 1979. P. 240–252.
5. Пененко В.В., Ранута В.Ф. Некоторые модели оптимизации режима работы источников загрязнения атмосферы // Метеорол. и гидрол. 1983. № 2. С. 59–68.
6. Десятков Б.М., Сарманаев С.Р., Бородулин А.И. Численно-аналитическая модель переноса аэрозолей в термически стратифицированном пограничном слое атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 1996. Т. 9. № 6. С. 815–820.

B.M. Desyatkov, S.R. Sarmanayev, A.I. Borodulin, S.S. Kotlyarova. Study of capabilities of the method of finding the characteristics of an instant point source of atmospheric pollution from impurity concentration measurements.

The method of finding the coordinates and power of a point source of pollution from the concentration measurements obtained in several points is considered in the paper. The capabilities of the method are studied for the case of presence in the used data both of measurement errors and statistical scatter due to the atmospheric turbulence. Two calculation series have been performed. In the first series, the concentrations were used obtained by simulating the aerosol particles distribution above Novosibirsk. Experimental data were used in the second series. The obtained results of reconstruction of the coordinates and source power can be estimated as satisfactory.