

А.А. Журавлев, Г.М. Тептин, О.Г. Хуторова

Пространственная структура мезомасштабных неоднородностей концентрации примеси в нижней тропосфере

Казанский государственный университет

Поступила в редакцию 7.02.2001 г.

В результате анализа многолетнего цикла ежеминутных измерений концентраций приземного аэрозоля и газовых примесей исследована пространственная структура мезомасштабных неоднородностей концентрации примеси в нижней тропосфере. При анализе продольных корреляционных функций с изменяющимся окном временного сдвига была выявлена периодическая структура корреляционных функций. Исключение суточного хода позволило выделить значимые максимумы корреляционных функций концентраций примесей, которые, вероятнее всего, обусловлены переносом примеси из соседних промышленных центров. Средняя скорость переноса примесей лежит в интервале 1,2–1,4 м/с, что меньше скорости среднего ветра на 15–20%.

Введение

На протяжении последних 6 лет Казанский государственный университет и Минприроды Республики Татарстан ведут непрерывные наблюдения концентрации ряда примесей в приземном слое атмосферы с помощью сети автоматических станций экологического мониторинга. Станции измеряют концентрацию приземного аэрозоля, газовых примесей (CO, NO, NO₂, SO₂, H₂S) и метеорологические параметры (скорость и направление ветра, температуру, относительную влажность). Измерения проводятся на высоте 2,4 м с интервалом 1 мин, которые позже усредняются за получасовой промежуток. Концентрации химических веществ измеряются с точностью $1 \cdot 10^{-9}$ г/м³, а концентрация аэрозоля – фильтровым методом с погрешностью $1 \cdot 10^{-6}$ г/м³ [1, 2].

Уже опубликованы некоторые результаты исследований пространственной структуры турбулентных вариаций концентрации аэрозоля и ряда химических примесей [3, 4]. Данные, полученные на 5 станциях, расположенных в г. Альметьевск, позволили нам исследовать структуру турбулентности в диапазоне масштабов 0,9–6,1 км. Анализ проводился методом построения пространственных корреляционных функций концентрации веществ при поперечном, относительно базовой линии, направлении ветра. Таким образом, исключалось влияние переноса примеси средним ветром.

Результатом анализа стало выявление устойчивого минимума пространственной корреляционной функции в диапазоне масштабов 1,5–3,5 км для NO, NO₂, CO и слабо выраженного минимума для аэрозоля. Также наблюдается минимум пространственной корреляционной функции азимута ветра, принимающей в интервале масштабов неоднородностей 1,5–3,5 км отрицательные значения. В то же время корреляционная функция температуры и относительной влажно-

сти не имеет пространственных вариаций и показывает высокую корреляцию (0,95–0,99) на всем исследуемом диапазоне расстояний. Построение пространственных корреляционных функций для взаимно противоположных направлений ветра относительно базы показало незначительные отклонения от средней корреляционной функции.

Это говорит о существенном влиянии динамических процессов на формирование пространственного распределения аэрозоля и подтверждает идею о том, что флуктуации концентрации примесей в атмосфере обусловлены воздействием турбулентных возмущений. Вихри размерами в несколько километров, как и следовало ожидать, не оказывают значительного влияния на поля температуры и влажности. Можно утверждать, что немалую часть в спектре масштабов неоднородностей занимают вихревые структуры диаметром 1,5–3,5 км, вызванные, возможно, мезомасштабными вихрями. Аналогичные результаты уже были получены другими авторами и опубликованы в периодической печати [5, 6].

Постановка эксперимента

Дальнейшее исследование мезомасштабных неоднородностей состоит в изучении корреляционных функций концентраций примесей по данным станций, расположенных в разных городах Республики Татарстан: в г. Альметьевск [53° с.ш., 51° в.д.] – пункт А и в г. Зеленодольск [54° с.ш., 49° в.д.] – пункт Б. Расстояние между этими городами (база) равно 261 км. На рис. 1 показано взаимное расположение этих городов и еще нескольких близлежащих городов – крупных промышленных центров.

Анализ имеющихся в нашем распоряжении данных заключался в построении продольных взаимно корреляционных временных функций с расширяющимся окном временного сдвига. Вначале производим

временной сдвиг ряда данных на Δt , затем из измерений в пункте А выбираем те значения концентраций, когда в момент времени t_0 ветер имел направление, совпадающее с направлением базы и не выходящее за пределы допустимого интервала (см. рис. 1):

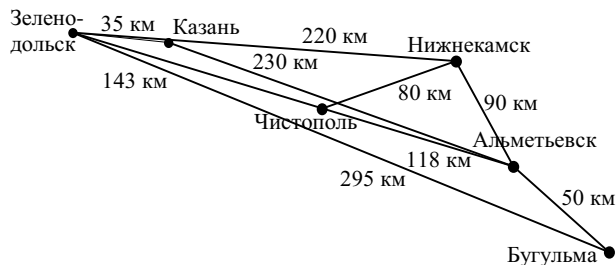


Рис. 1. Взаимное расположение городов с измерительными станциями и ближайших крупных промышленных центров

$(112 \pm 15)^\circ$ (направление ветра из Зеленодольска в Альметьевск) и $(292 \pm 15)^\circ$ (направление ветра из Альметьевска в Зеленодольск). Дополнительное условие состоит в том, чтобы в пункте Б, в момент времени $t_0 + \Delta t$, ветер также имел направление, совпадающее с направлением базы и не выходящее за пределы допустимого интервала (для случая направления переноса из Зеленодольска в Альметьевск), где Δt – величина временного сдвига. По отобранным данным определялся корреляционный коэффициент с помощью хорошо известного выражения

$$K[N_{1i}(t_0), N_{2i}(t_0 + \Delta t)] = \frac{1}{n} \frac{\sum (N_{1i} - \bar{N}_1)(N_{2i} - \bar{N}_2)}{\sigma_{N_1} \sigma_{N_2}}, \quad (1)$$

где n – количество измерений для данного корреляционного коэффициента.

Таким методом можно обнаружить процессы переноса примеси в тропосфере средним ветром и при известной его скорости определить расстояние до источника загрязнения. Для оценки достоверности построенных функций нанесены интервалы достоверности, определяемые выражением [8]:

$$\delta_K = \sigma / \sqrt{n - 1}. \quad (2)$$

Предположительно перенос примеси в пределах базового расстояния может быть обусловлен синоптическими процессами в атмосфере. Их средние масштабы – несколько тысяч километров. Поэтому хотя ветер внутри циклонов и антициклонов имеет вихревую структуру, на расстояниях в несколько сотен километров его можно считать сонаправленным [7].

Поскольку одновременно со станцией в г. Зеленодольск работало три станции в г. Альметьевск, то для исключения локальных флуктуаций скорости и направления ветра было применено усреднение по показаниям этих станций. Так же помимо концентраций каждой станции для расчетов брались и средние значения концентрации по измерениям трех станций г. Альметьевск.

Результаты измерений и расчетов

Все полученные корреляционные функции имеют преимущественно положительные значения и вид, близкий к периодическому (рис. 2), что, видимо, обусловлено различными волновыми процессами в атмосфере. В среднем точки корреляционных коэффициентов лежат в диапазоне значений от 0,4 до 0,8, а величина доверительного интервала – в интервале $0,05 \pm 0,2$. Примеры пространственных корреляционных функций для нескольких примесей представлены на рис. 2.

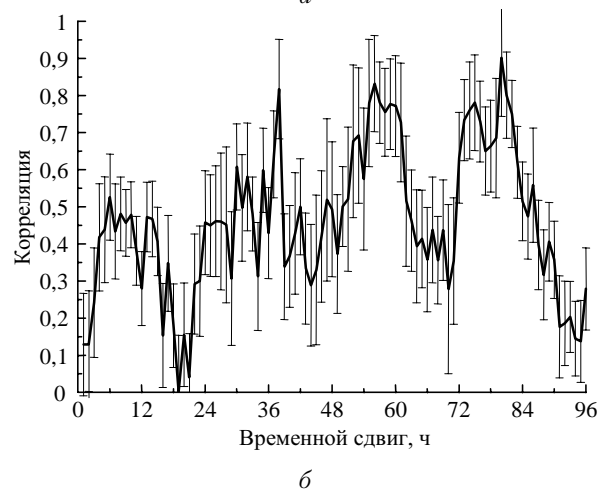
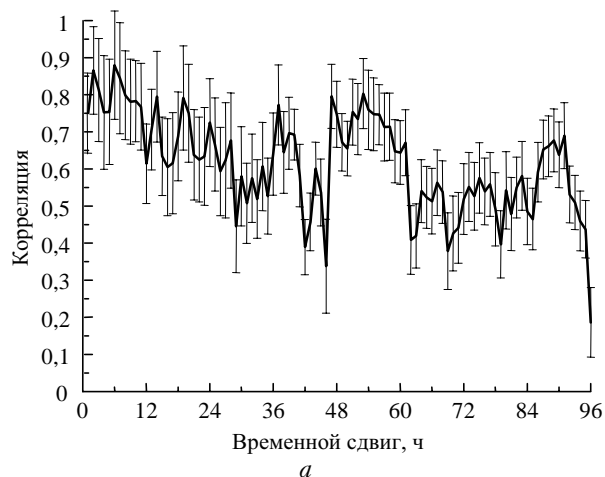


Рис. 2. Продольные корреляционные функции аэрозоля (а) и NO (б) в зависимости от величины временного сдвига; направление ветра: из Зеленодольска в Альметьевск

Анализ графиков производился следующим образом: а) выделялись явные, достоверные, максимумы корреляционных функций, б) для временного сдвига, соответствующего этим высоким значениям корреляции, выявлялась средняя скорость ветра, в) исходя из предположения существования переноса примеси, вычислялось вероятное расстояние до источника загрязнения.

В табл. 1 приводится анализ полученных корреляционных функций для некоторых измеряемых примесей воздуха. Первая строка – временной сдвиг,

Анализ пространственных корреляционных функций

Примесь	Характеристика	Максимумы корреляционных функций							
		5–6	12–13	26–27	38–39	52–53	55–58	74–75	
NO	Время, ч	5–6	12–13	26–27	38–39	52–53	55–58	74–75	
	Расстояние, км	29±2	70±4	170±5	240±8	325±9	350±14	465±18	
NO ₂	Время, ч	6–8	16–19	28	37–39	46–47	58–60	65–67	
	Расстояние, км	45±3	100±5	175±9	230±11	300±12	380±17	395±18	
Аэрозоль	Время, ч	6–7	17–18	28	37	47–48	52–56	60–61	
	Расстояние, км	33±2	100±3	175±6	235±8	310±11	360±13	385±17	

при котором наблюдается максимум корреляционной функции, вторая – расчетное расстояние, которое могла покрыть примесь под действием среднего ветра.

Поскольку концентрации примесей испытывают значительные вариации в течение суток, то, по-видимому, часть пиков корреляционных функций обусловлена суточным и сезонным ходами. Следующим шагом исследования стало исключение этих вариаций.

Как показало исследование, в разное время года наблюдаются значительные отличия как по форме, так и по амплитуде кривой суточного хода. Так, в летнее время наивысшие концентрации наблюдаются с 7 до 10 ч утра и меньший максимум в 21–22 ч, а с 23 вечера до 5 ч утра и с 12 до 18 ч концентрации всех примесей падают ниже среднесуточного значения. Зимой также присутствуют оба максимума, хотя они немного смещены: утренний с 8 до 11 и вечерний с 16 до 19 ч, а дневной минимум выражен слабо и находится выше среднесуточного значения. Кроме того, суточный ход и средняя концентрация сильно зависят от дня недели. Эта зависимость также была учтена при исключении суточного хода.

Для каждого сезона и дня недели строились функции суточного изменения концентрации примеси и после вычитались из измеренных значений. Это позволило более точно исключить влияние суточного хода. На рис. 3 в качестве иллюстрации представлены графики тех же, что и на рис. 2, корреляционных функций концентрации аэрозоля и NO, но уже с вычтенным суточным ходом.

Средний уровень корреляционной функции при этом несколько снизился, но высота ряда пиков даже несколько возросла. Был применен критерий значимости корреляционной функции с уровнем достоверности 95% [8].

На представленных выше корреляционных функциях можно отметить по несколько ярких статистически значимых максимумов, которые превышают пороговый уровень, определенный вероятностью 0,95. Аналогичный анализ графиков и расчетов по другим примесям для статистически достоверных максимумов приведен в табл. 2.

Количество значимых пиков для каждой корреляционной функции, после исключения суточных вариаций, несколько уменьшилось. Большая часть пиков хорошо объясняется переносом примеси из близ-

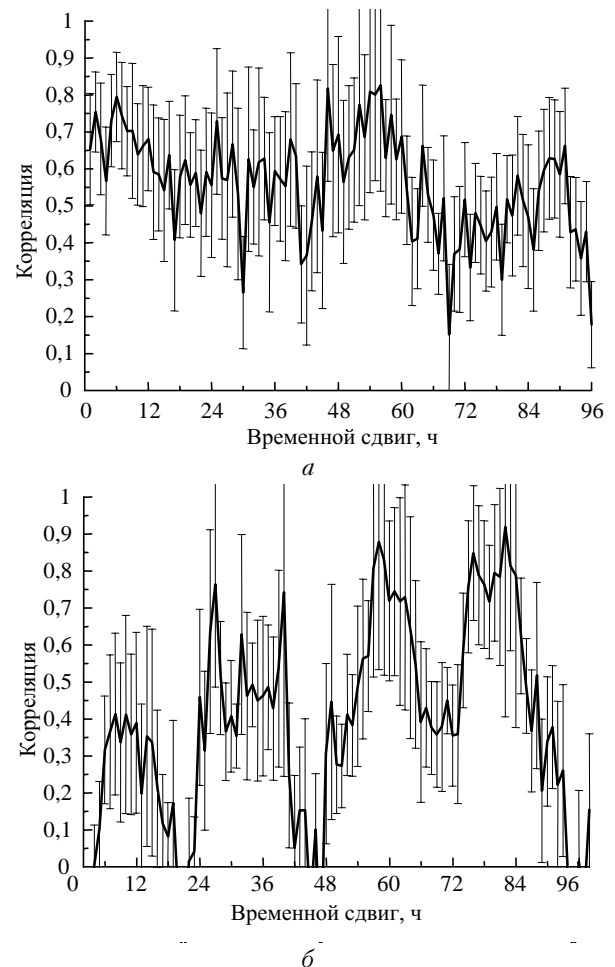


Рис. 3. Корреляционные функции аэрозоля (а) и NO (б) с исключенным суточным ходом; направление ветра: Зеленодольск – Альметьевск

лежащих промышленных центров. Несколько завышенное, относительно фактического, расчетное расстояние объясняется хорошо известным фактом: скорость переноса примеси меньше скорости среднего ветра. Это обусловлено завихрениями и турбулентными неоднородностями атмосферы, замедляющими перенос примеси. В среднем, по нашим расчетам, скорость переноса ниже скорости ветра на 15±20%. Так, средняя скорость ветра составляет 1,6±1,9 м/с, а расчетная скорость переноса примеси в среднем составила 1,2±1,4 м/с.

Таблица 2

Анализ пиков корреляционных функций

Примесь	Максимумы корреляции				
	Время, ч	6–8	15	38–40	47–48
NO ₂	Время, ч	6–8	15	38–40	47–48
	Расстояние, км	40±3	90±4	245±9	285±12
	Город	Приг.	?	Каз.	Зел.
NO	Время, ч	6	25	38	55–57
	Расстояние, км	35±2	145±4	220±11	310±14
	Город	Приг.	Чис.	?	Зел.
Аэрозоль	Время, ч	5–6	25	46	54–56
	Расстояние, км	35±5	150±7	280±12	320±15
	Город	Приг.	Чис.	Каз.	Зел.

Примечания: Первая строка – временной сдвиг, при котором наблюдается значимый максимум корреляционной функции, вторая – расчетное расстояние (км), которое могла покрыть примесь под действием среднего ветра, третья – город, возможный источник загрязнения; приг. – пригород Альметьевска, Зел. – Зеленодольск (261 км), Чис. – Чистополь (114 км), Каз. – Казань (230 км), ? – труднообъяснимые максимумы (в скобках указано фактическое расстояние до города, определенное по карте).

Заключение

Исследование продольных корреляционных функций с изменяющимся окном временного сдвига показало, что имеются явные значимые пики корреляционной функции, которые частично обусловлены суточной и сезонной вариациями концентрации примеси. В то же время анализ показывает, что часть пиков корреляционной функции обусловлена переносом примесей из соседних промышленных центров. Различие скоростей ветра и переноса примеси объясняется теорией турбулентного переноса и подтверждает наше предположение о существовании значимого пе-

реноса загрязнений воздуха на расстояния до 300 км. Пока остаются неисследованными периодические вариации корреляционных функций, которые, по видимому, можно объяснить различными периодическими атмосферными процессами. Для их объяснения, вероятно, должны быть применены другие методы анализа, что планируется сделать в будущем.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 01-0564390, а также при поддержке фонда НИОКР РТ, грант № 09-9.4-52/2001 ф.

1. *Schepovskikh A.I., Safin R.N., Khutorova O.G.* Seasonal variation of impurities in the troposphere from the measurements by automatic station Zelenodolsk // *Environ. Radioecol. Appl. Ecol.* 1997. V. 3. N 3. P. 19–28.
2. *Khutorova O.G.* Spectra of tropospheric aerosol's and polluting impurities variations // *J. of Aerosol Science.* 1999. V. 30. P. 335–336.
3. *Фахрутдинова А.Н., Хуторова О.Г.* Влияние внутренних гравитационных волн на динамический режим нижней термосферы // *Изв. РАН Физ. атмосф. и океана.* 1998. Т. 34. № 1. С. 19–24.
4. *Jouravlev A.A., Khutorova O.G., Teptin G.M.* Experimental investigation of mesoscale inhomogeneities of atmospheric aerosols and impurities // *Environ. Radioecol. Appl. Ecol.* 2000. V. 6. N 3. P. 15–19.
5. *Горчаков Г.И., Шишков П.О., Копейкин В.М., Емиленко А.С., Исаков А.А., Захарова П.В., Сидоров В.Н., Шукуров К.А.* Лидарно-нефелометрическое зондирование аридного аэрозоля // *Оптика атмосф. и океана.* 1998. Т. 11. № 10. С. 1118–1123.
6. *Горчаков Г.И., Копров Б.М., Шукуров К.А.* Исследование выноса субмикронного аэрозоля с подстилающей поверхности // *Оптика атмосф. и океана.* 2000. Т. 13. № 2. С. 166–170.
7. *Монин А.С.* Прогноз погоды как задача физики. М.: Наука, 1969. 184 с.
8. *Дженкинс Г., Ваттс Д.* Спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1971. 316 с.

A.A. Zhuravlev, G.M. Teptin, O.G. Khutorova. **Spatial structure of mesoscale inhomogeneities in pollutant concentration within the lower troposphere.**

Many-year minutely measurements of the concentration of the surface aerosol and gaseous pollutants have been analyzed to study the spatial structure of mesoscale inhomogeneities in the pollutant concentration within the lower troposphere. The periodic structure has been revealed when analyzing longitudinal correlation functions with a varying time shift. Exclusion of the diurnal behavior has allowed us to separate significant peaks of correlation functions of the pollutant concentrations that are caused, most likely, by pollutant transport from neighboring industrial centers. The mean speed of pollutant transport ranges from 1.2 to 1.4 m/s, and the mean wind speed exceeds it roughly by 15–20%.