

О.Г. Хуторова

Взаимосвязь вариаций приземной концентрации атмосферных примесей в двух промышленных регионах Татарстана

Казанский государственный университет

Поступила в редакцию 27.01.2004 г.

Исследуются связи изменчивости концентрации приземных примесей в воздушном бассейне двух промышленных регионов Татарстана на основе экспериментальных наблюдений, полученных сетью станций атмосферного мониторинга. Проведен взаимный вейвлет-анализ рядов массовой концентрации аэрозоля, малых газовых примесей и метеопараметров. Показано, что атмосферные процессы синоптического масштаба модулируют пространственную связь полей атмосферных примесей и метеопараметров в приземном слое. Сделаны оценки пространственных масштабов синоптических вариаций концентрации примесей.

Давно известно, что атмосферные волны синоптического масштаба оказывают значительное влияние на динамику и энергетику всех слоев атмосферы. Теория этих процессов развита в [1, 2]. В [3] показана роль крупномасштабных процессов в переносе и глобальном распределении атмосферных примесей. Исследования планетарных волн по длинным рядам температуры, давления и их связь с процессами в океане подробно описаны в [4]. В [5, 6] показано, что синоптические волновые процессы модулируют мезомасштабные вариации как метеопараметров, так и атмосферных примесей.

Данная статья посвящена исследованию влияния волновых процессов синоптического масштаба на пространственную связь изменчивости массовой концентрации аэрозоля, малых газовых составляющих и других атмосферных параметров в приземном слое.

Для этой цели были использованы длинные временные ряды различных метеопараметров и примесей, полученные с помощью автоматизированных станций атмосферного мониторинга в двух промышленных регионах Татарстана. Пункты наблюдения находятся в г. Зеленодольск (54° с.ш., 49° в.д.) и Альметьевск (53° с.ш., 51° в.д.) и разнесены на расстояние 260 км. Обе станции одновременно измеряют приземные концентрации аэрозоля, окиси углерода, двуокиси азота, других газообразных атмосферных примесей и метеопараметры (температуру, скорость и направление ветра, относительную влажность) [7]. Параметры приборов представлены в таблице.

Задача исследования взаимосвязи вариаций в рядах загрязняющих примесей разного рода и метеопараметров в пространственно разнесенных пунктах решалась на основе взаимно корреляционного и взаимного вейвлет-анализа временных рядов атмосферных параметров, полученных в каждом пункте.

Характеристики приборов, измеряющих атмосферные примеси

| Параметр | Метод измерения | Разрешающая способность |
|---------------------|--------------------------------|-------------------------|
| CO | абсорбция ИК-излучения | 1 ppm |
| NO, NO ₂ | хемолуминисценция | 1 ppb/0,5 ppb |
| H ₂ S | УФ-флуоресценция | 1 ppb |
| SO ₂ | УФ-флуоресценция | 1 ppb |
| Аэрозоль | абсорбция β-излучения (фильтр) | 1 мкг/м ³ |

Метод взаимно корреляционного анализа заключается в определении коэффициента корреляции между двумя временными рядами $x(t)$ и $y(t + L)$ в зависимости от сдвига рядов L друг относительно друга [8]. Так как ряды атмосферных параметров всегда нестационарны, то по 38-месячным рядам среднечасовых значений строились локальные взаимные корреляционные функции, полученные внутри скользящего временного окна, шириной 30 сут. Обнаружено, что корреляционная функция для всех исследуемых величин имеет сильные вариации во времени. Максимумы корреляции достигаются как при отсутствии сдвига рядов друг относительно друга, так и при сдвигах рядов до 20 сут в различные периоды времени.

Мы провели сравнение сечений локальной корреляционной функции и рядов приземного давления, температуры скорости и направления ветра. Оказалось, что пространственная связь концентрации приземного аэрозоля, других примесей и метеопараметров в этих пунктах зависит от метеословий в пунктах измерений. Этот вывод был сделан на основании того, что максимальные значения корреляции для всех величин были отмечены в те периоды времени, когда метеословия в обоих пунктах были стабильны и сходны — поле ветра в пунктах наблюдения имело одно и то же направ-

ление, медленно меняющееся в течение нескольких суток, температура и давление слабо менялись.

При скоростях ветра в разных пунктах различного направления (как правило, это совпадает с изменениями давления и сильными временными и пространственными вариациями вектора скорости ветра) наблюдается слабая пространственная корреляция всех атмосферных параметров, в том числе и концентрации малых газовых составляющих и аэрозоля. Кроме того, локальные корреляционные функции для всех исследуемых величин не стремятся к нулю при увеличении сдвига рядов друг относительно друга. Они то уменьшаются, то снова возрастают при увеличении сдвига на несколько суток. Это свидетельствует о том, что в пространственную связь атмосферных параметров вносят вклад волновые процессы синоптических временных масштабов [8].

Для анализа вариаций нестационарных процессов хорошо подходит аппарат вейвлет-анализа. Вейвлет-преобразование временных рядов, являясь цифровым полосовым фильтром, позволяет исследовать изменения спектра вариаций параметров во времени. Методика исследования рядов геофизических параметров с помощью вейвлет-анализа дана в [9, 10]. В работах [4, 6, 11] с успехом применялся этот метод для оценки вариаций различного масштаба в рядах приземных атмосферных параметров. Взаимный вейвлет-спектр, полученный с помощью материнской функции Морле, показывает относительный уровень связи периодических компонент различных временных масштабов в различные моменты времени. Он строится следующим образом. Сначала проводится вейвлет-преобразование каждого из двух временных рядов $f(t)$ с помощью материнской функции $\psi(x)$:

$$Wf(x, a) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{\psi}\left(\frac{t-x}{a}\right) f(t) dt. \quad (1)$$

Таким образом, получают две матрицы — Wf_A и Wf_Z . Модули вейвлет-спектров характеризуют вклад периодических компонент во временные ряды в каждый момент времени. Затем строят кросс-вейвлет-преобразование:

$$W = Wf_A Wf_Z^*, \quad (2)$$

где «*» означает комплексное сопряжение вейвлет-преобразования. Амплитуда W — взаимный вейвлет-спектр — используется для оценки пространственной связи вариаций во временных рядах атмосферных параметров.

В случае синхронных наблюдений в двух пунктах возможно оценить проекции фазовой скорости на линию, соединяющую эти пункты, и пространственные размеры в той же проекции из выражений:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_x} x, \quad C_x = \frac{\lambda_x}{T}, \quad (3)$$

где φ — значение фазового кросс-вейвлет-спектра для временного масштаба вариации T ; x — расстоя-

ние между двумя пунктами; λ_x — длина волны; C_x — фазовая скорость [11]. Так как вейвлет-преобразование аналогично применению полосового фильтра, то особенности рядов, зависящие от местных условий и вызывающие вариации с локальными масштабами, не оказывают влияния на определение параметров синоптических процессов.

Проведен вейвлет-анализ рядов массовой концентрации аэрозоля, малых газовых примесей и метеопараметров в каждом пункте наблюдения. На рис. 1 представлены примеры сечений модулей вейвлет-преобразования рядов массовой концентрации аэрозоля для двух пунктов для характерного периода 01.04.97–01.09.97.

Сечение характеризует изменение во времени относительного вклада компонент различного синоптического масштаба в исследуемый сигнал, т.е. в каждый момент времени мы можем оценить интенсивность вариаций всех исследуемых временных масштабов. Окрашенные контуры соответствуют превышению 80%-го уровня значимости интенсивностью вейвлет-спектра. Видно, что для периода времени, показанного на рис. 1, преобладающими процессами в вариациях массовой концентрации аэрозоля в обоих пунктах являются гармоники с периодами 5, 11, 30 сут. Те же вариации дают максимумы в вейвлет-представлениях рядов температуры, относительной влажности и скорости ветра. Для примесей интенсивность этих вариаций в Зеленодольске и Альметьевске различна, что объясняется различным средним уровнем загрязненности воздушного бассейна в этих пунктах. Этот результат свидетельствует о том, что уровень примесей определяется локальными источниками в каждом пункте, а синоптические атмосферные процессы вызывают модуляцию поля примесей за счет изменения метеовеличин.

С целью исследования локализации пространственной корреляции временных рядов в частотно-временной области вычислялись кросс-вейвлет-спектры рядов всех исследуемых величин за период 38 мес.

Амплитуда взаимного вейвлет-спектра с базовой функцией Морле характеризует уровень связи рядов этих величин в двумерном частотно-временном пространстве. Фазовая часть в случае вейвлета Морле содержит информацию о сдвиге времени максимума квазипериодической вариации соответствующего временного масштаба одного временного ряда относительно другого.

На рис. 2 представлены амплитуды кросс-вейвлет-спектров для метеопараметров и примесей для периода с 01.04.97 по 01.09.97. Значения кросс-вейвлет-спектра представлены в безразмерном виде. Шкала показывает лишь относительный уровень связи рядов. Окрашенные контуры соответствуют превышению спектром 80%-го уровня значимости. Видно, что связь рядов всех исследуемых величин определяется гармониками с временным масштабом 5, 11 и 30 сут, т.е. теми же процессами, что выявляются в спектрах каждой величины. Но максимумы кросс-спектров наблюдаются в разное время для каждого из параметров.

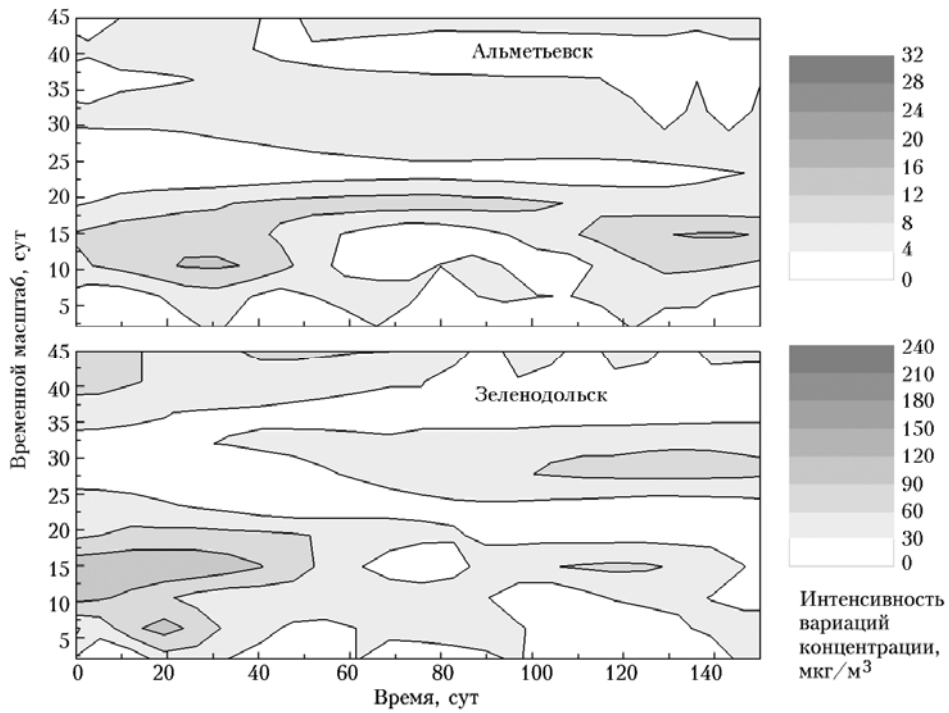


Рис. 1

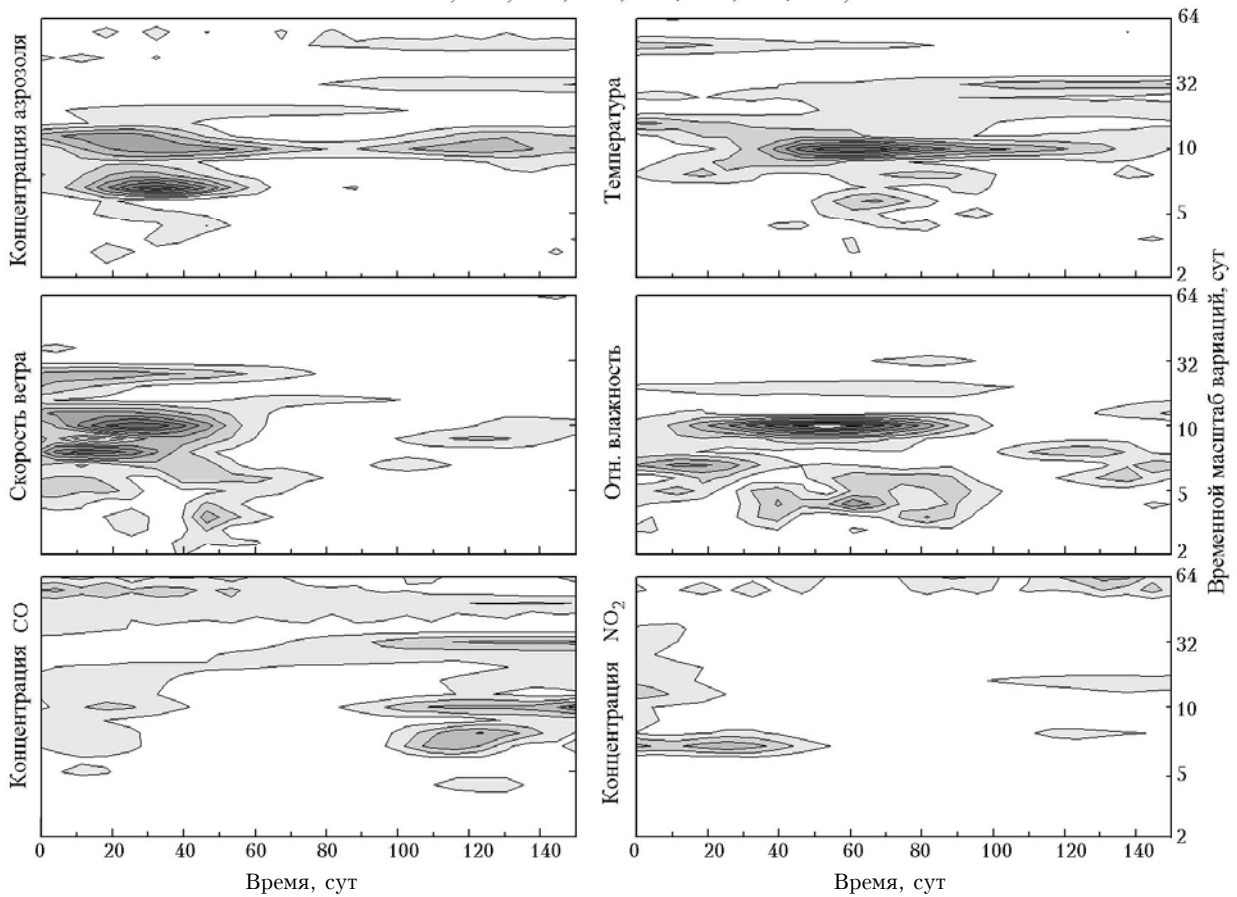
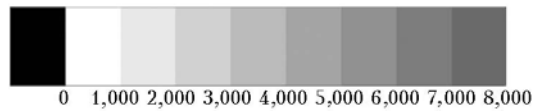


Рис. 2

Исследование взаимных вейвлет-спектров за период 38 мес показало, что взаимный вейвлет-спектр превышает 80%-й уровень значимости для характерных синоптических периодов от 3 до 20 сут для всех примесей и метеопараметров. Временные масштабы 30–50 сут значимы во взаимном спектре концентрации аэрозоля, двуокиси азота, двуокиси серы, температуры и скорости ветра.

Анализ фазовых кросс-спектров позволяет оценить фазовые скорости перемещения волновых возмущений C_x , их пространственные размеры λ_x в проекции на линию, соединяющую два пункта наблюдения согласно выражениям (3). Для оценки были отобраны события превышения кросс-спектром 80%-го доверительного уровня и для этих событий сделаны оценки C_x и λ_x . Гистограммы горизонтальных фазовых скоростей C_x и гистограммы пространственных масштабов λ_x волновых процессов, полученных из анализа рядов массовой концентрации аэрозоля, приведены на рис. 3.

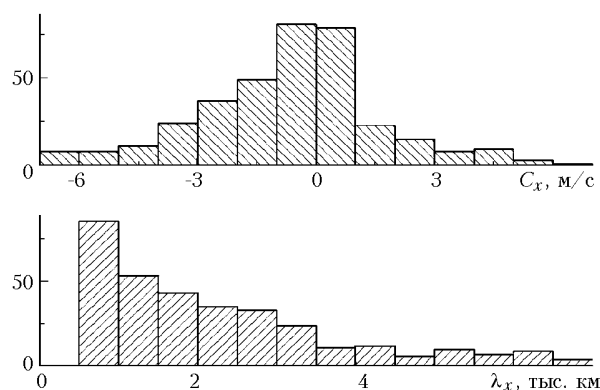


Рис. 3

Сравнение аналогичных распределений, полученных по рядам температуры, скорости ветра, концентрации двуокиси азота, относительной влажности по критерию Пирсона, показало, что эти распределения с 95%-й вероятностью принадлежат к одной генеральной совокупности, т.е. вариации всех исследуемых величин определяются одними и теми же синоптическими атмосферными процессами.

Сделаны оценки пространственных масштабов и фазовых скоростей синоптических вариаций концентрации примесей. Наиболее вероятные пространственные масштабы планетарных волн меняются в пределах от 1 до 3 тыс. км. Ошибки оценок λ_x тем выше, чем больше длина волны. Надежно определяются пространственные размеры до 6000 км. В интервале от 6000 км и далее оценка показывает

лишь то, что пространственные масштабы волнового процесса много больше, чем расстояние между станциями. Распределения фазовых скоростей говорят о том, что наиболее вероятные фазовые скорости планетарных процессов меньше 5 м/с. Волны с отрицательными скоростями распространяются с запада на восток и связаны с волнами Россби, возмущения с положительными скоростями распространяются с востока на запад и могут быть вызваны проявлениями волн Кельвина в средних широтах [2].

Полученные результаты показывают, что атмосферные процессы синоптического масштаба модулируют пространственные характеристики связи полей атмосферных параметров, в том числе концентрации малых газовых примесей и аэрозоля в приземном слое.

Работа выполнена при частичной поддержке фондов РФФИ (грант № 03-05-96211, 04-05-64194) и НИОКР РТ (№ 09-9.5-165).

1. Дикий Л.А. Теория колебаний земной атмосферы Л.: Гидрометеониздат, 1969. 195 с.
2. Госсард Э., Хук У. Волны в атмосфере. М: Мир, 1985. 582 с.
3. Walton, John J., Maccracken, Michael C., Ghan, Steven J. A global-scale Lagrangian trace species model of transport, transformation, and removal processes // J. Geophys. Res. D. 1988. V. 93. № 6. P. 8339–8354.
4. Иванов В.В. Планетарные колебания атмосферы и океана // Успехи физ. наук. 2002. Т. 172. № 7. С. 777–783.
5. Хуторова О.Г., Тептин Г.М. Временные вариации аэрозоля и малых газовых примесей в приземном городском воздухе // Изв РАН. Физ. атмосф. и океана. 2003. Т. 39. № 6. С. 782–790.
6. Хуторова О.Г., Тептин Г.М. Сезонная изменчивость спектра вариаций атмосферных параметров приземного слоя // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16. № 7. С. 645–647.
7. MeduiUm – SENSOR g6mbH. Экологический измерительный комплекс: Учебный материал для технического и гарантийного обслуживания. Ч. 1, 2. Берлин, 1994. 500 с.
8. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. Т. 1. М.: Мир, 1971. 312 с.
9. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физ. наук. 1996. Т. 166. № 11. С. 1145–1170.
10. Torrence G., Compo G.P. A Practical Guide to Wavelet Analysis // Bul. the Amer. Meteorol. Soc. 1998. V. 79. № 1. P. 61–78.
11. Хуторова О.Г., Тептин Г.М. Метод выделения перемещающихся возмущений по синхронным временным рядам // Прием и обработка сигналов в сложных информационных системах. Вып. 21. 2003. С. 133–139.

O.G. Khoutorova. Relation between variations of the surface concentration of air pollutants in two industrial regions of Tatarstan.

This paper studies the relation of variability of the concentration of surface air pollutants for two industrial regions of Tatarstan. It is based on the experimental measurements by a network of atmospheric stations. Cross wavelet analysis is carried out for the series of the aerosol mass concentration, minor gases, and meteoroparameters. It is shown that atmospheric processes of synoptic scale modulate the spatial relation of the fields of atmospheric pollutants and meteoroparameters in the surface layer. The spatial scales of synoptic variations of the pollutant concentration are estimated.