

А.И. Бородулин<sup>1</sup>, А.С. Сафатов<sup>1</sup>, А.Н. Шабанов<sup>1</sup>, О.Г. Хуторова<sup>2</sup>,  
К.П. Куценогий<sup>3</sup>, В.И. Макаров<sup>3</sup>

## Периодическая структура приземных полей концентрации аэрозолей, содержащих атмосферный белок, в окрестностях г. Новосибирска

<sup>1</sup>ГНЦ вирусологии и биотехнологии «Вектор», Кольцово Новосибирской обл.,

<sup>2</sup>Казанский государственный университет, г. Казань,

<sup>3</sup>Институт химической кинетики и горения СО РАН, г. Новосибирск

Поступила в редакцию 25.11.2003 г.

Предпринята попытка вейвлетного и гармонического анализа массива экспериментальных данных о массовой концентрации атмосферных аэрозолей и концентрации суммарного белка в приземном слое атмосферы, полученного в окрестностях Новосибирска в 2001–2002 гг. Вейвлет-анализ данных показал, что вариации концентрации в приземном слое атмосферы в основном определяются характерными синоптическими процессами с периодами 4, 7, 10 и 15 сут. Данные гармонического анализа показывают, что в среднем синоптические вариации составляют от 40 до 70% общей дисперсии вариаций концентрации, а весной достигают 90%.

### Введение

Проблема распределения концентрации атмосферных примесей регулярно рассматривается и обсуждается в научных публикациях и до сих пор остается актуальной, поскольку имеет большое фундаментальное и прикладное значение. ГНЦ ВБ «Вектор» и ряд институтов СО РАН в рамках интеграционного проекта «Аэрозоли Сибири» в течение нескольких лет проводили систематическое изучение биогенной компоненты атмосферного аэрозоля юга Западной Сибири [1–4]. Суммарный атмосферный белок является наиболее представительной частью атмосферного аэрозоля биогенной природы.

Первые результаты изучения изменчивости белковой компоненты тропосферного аэрозоля над лесными массивами юга Западной Сибири были опубликованы в [1], более детальный анализ проведен в [4]. Параллельно с высотными исследованиями нами также проводились приземные исследования полей концентрации биогенной компоненты атмосферного аэрозоля. В данной статье анализируются экспериментальные данные о массовой концентрации атмосферных аэрозолей и концентрации суммарного белка в приземном слое атмосферы, полученные в окрестностях Новосибирска в 2001–2002 гг.

Отбор приземных проб воздуха осуществлялся в пос. Ключи, расположенном в 12 км от Новосибирского академгородка. Пробы отбирались на аналитические фильтры типа АФА-ХА в течение четырех месячных сессий, приуроченных к весеннему, летнему, осеннему и зимнему сезонам. В каждой месячной, тридцатидневной сессии пробы

отбирались ежедневно. Суточный объем забранного воздуха составлял примерно 300 м<sup>3</sup>.

Содержание суммарного белка в пробах анализировалось в лабораторных условиях по методу Бредфорда, а также флуоресцентным методом [4]. Чувствительность анализов составляла 0,1 мкг/мл смыва пробы с фильтра. Погрешность измерений концентрации не превышала 30%. До и после отбора проб фильтры взвешивались на аналитических весах, что позволяло определять массовую концентрацию атмосферного аэрозоля.

Таким образом, данные о концентрации суммарного атмосферного белка и массовой концентрации за каждый год были представлены двумя массивами из четырех временных рядов, содержащих по тридцать отсчетов в каждом.

### Методики анализа временных рядов

Мы предположили, что вариации в рядах концентрации аэрозоля и биогенной компоненты могут быть вызваны периодическими атмосферными процессами. Выделить периодические компоненты и оценить их временные масштабы позволяет вейвлет-анализ. Вейвлет-преобразование обеспечивает двумерную развертку исследуемого одномерного сигнала, при этом масштаб и координата рассматриваются как независимые переменные. В результате этого появляется возможность анализировать свойства сигнала одновременно во временном и в частотном пространствах [5]. Для анализа вариаций концентрации нами был использован вейвлет Морле.

В общем случае выбор анализирующего вейвлета является неоднозначным и зависит от конкретной

задачи. Вейвлет Морле был выбран нами по следующим причинам:

- он хорошо приспособлен для анализа квазипериодических процессов, так как имеет хорошую локализацию в частотном пространстве;

- материнская функция представляет собой периодический сигнал, модулированный гауссовой функцией, поэтому мы можем сопоставить вейвлет-спектр спектру атмосферных волн, являющихся собственными колебаниями атмосферы [6], которые принято считать квазипериодическими;

- при правильном подборе его параметров мы избегаем сложных пересчетов временного масштаба в период процесса, что позволяет нам использовать временной масштаб как заданную величину при проведении гармонического анализа.

Модуль вейвлет-преобразования характеризует изменение во времени относительного вклада компонент различного масштаба в исследуемый сигнал, т.е. в каждый момент времени мы можем оценить интенсивность вариаций всех исследуемых временных масштабов  $a$ . При такой интерпретации возможно рассмотрение математических моделей физических процессов различного масштаба, оказывающих влияние на атмосферные параметры [6].

В [7, 8] вейвлет-анализ длинных рядов измерений аэрозоля и химических примесей по данным станций атмосферного мониторинга показал большие возможности исследования временных вариаций атмосферных примесей. Вейвлет-анализ дает возможность оценить изменение модового состава вариаций в исследуемых временных рядах.

Нами также проводился гармонический анализ временных рядов для оценки амплитуд и фаз их периодических составляющих. В этом случае временной ряд аппроксимировался суммой гармоник с заранее известными периодами  $P_i$

$$S(t) = A_0 + \sum_i A_i \cos[(t - T_i) 2\pi / P_i],$$

где  $A_0$  – постоянная составляющая сигнала;  $A_i$  и  $T_i$  – амплитуды и фазы гармоник, которые находятся методом наименьших квадратов. Обычно периоды задаются из предположений выбранной модели физики атмосферы или находятся другими методами. В общем случае мы можем провести вейвлет-анализ временного ряда, определить этим методом существование стабильных колебаний и их временные масштабы  $P_i$ , а затем найти амплитуды и фазы периодических вариаций с помощью гармонического анализа. Метод гармонического анализа, например, успешно применялся в [9] для нахождения параметров приливных процессов и сезонных вариаций поля скорости ветра в нижней термосфере.

## Результаты и обсуждение

При проведении вейвлет-анализа данные по сезонам года были объединены в один массив длиной 635 сут. Промежутки между сессиями экспериментов были заполнены значениями, полученными пу-

тем линейной интерполяции средних по сессиям величин. Эта процедура необходима для исключения ложных результатов за счет краевых эффектов (конечности рядов). Вследствие этого найденные вейвлет-спектры являются чисто качественными и позволяют провести только оценку присутствия или отсутствия квазипериодических процессов того или иного временного масштаба. На рис. 1 приведены полученные вейвлет-спектры массовой концентрации белка и массовой концентрации аэрозоля.

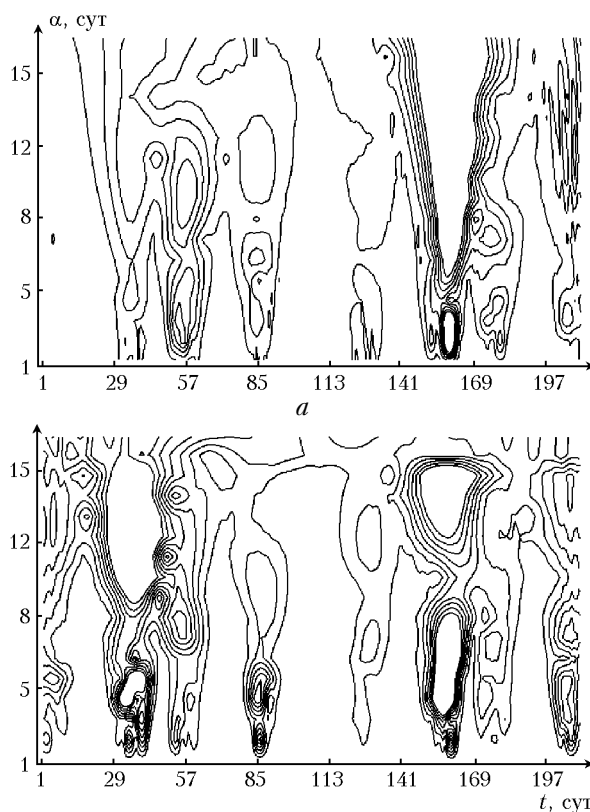


Рис. 1. Изолинии вейвлет-спектров рядов концентрации атмосферного белка (с шагом 0,01) (а) и массовой концентрации (с шагом 1,0) (б)

Из рис. 1 видно, что помимо сезонных вариаций концентрации проявляются вариации характерных синоптических масштабов: 4, 7, 10, 15 сут. Обращает на себя внимание приближенное подобие полученных вейвлет-спектров массовой концентрации белка и массовой концентрации аэрозоля. Это позволяет предположить, что вариации массовой концентрации аэрозоля и концентрации белка во многом определяются динамическими процессами в атмосфере – адвективным переносом и турбулентной диффузией. Вместе с тем неполное подобие вейвлет-спектров, вероятно, указывает на различную природу источников и стоков атмосферного аэрозоля в целом и его белковой составляющей.

Для оценки вклада амплитуд вариаций концентрации был проведен гармонический анализ временных рядов. Каждый ряд аппроксимировался суммой гармоник с синоптическими периодами 30, 15, 10, 7, 4 сут. Период 30 сут необходимо учитывать как основной период ряда, совпадающий с его

протяженностью. Кроме того, этот период близок к значению, которое соответствует хорошо известному циклу солнечной активности 27 сут. На рис. 2 представлен пример аппроксимации экспериментальных временных рядов для сессии лета 2001 г. Точками показаны исходные данные, а линиями – результаты подбора суммой гармоник.

В таблице представлены амплитуды  $A_i$  (мкг/м<sup>3</sup>), времена максимума  $T_i$  (сут), полученные для сессий 2001 и 2002 гг. Столбцы, соответствующие массовой концентрации атмосферного аэрозоля и концентрации атмосферного белка, отмечены символами  $C_m$  и  $C_p$ . Значения концентрации даны в мкг/м<sup>3</sup>. В верхней части строки  $A_0$  приведена постоянная составляющая. Строки, помеченные  $A_i$  ( $i = \overline{1, 5}$ ), соответствуют амплитудам гармоник с периодами: 30; 15; 10; 7 и 4 сут. Строки, помеченные  $T_i$ , – временам максимумов гармоник с теми же периодами. Под каждым числом в клетках таблицы приведены 90%-е доверительные интервалы. Так, например, если для массовой концентрации белка зимой 2001 г. время максимума  $T_4$  составляет 3,1 сут, то эта величина значима, так как ее 90% доверительный интервал составляет  $5 \cdot 10^{-5}$ . Данные показывают, что гармоника с периодом 7 сут достигает максимума через 3,1 сут относительно начала временного ряда. В дальнейшем этот максимум повторяется через каждые 7 сут, а именно через 10,1; 17,1 и 24,1 сут относительно начала временного ряда. Последняя строка представляет собой долю синоптических вариаций  $\gamma$  в общей дисперсии процесса. Полученные результаты подтверждают то, что в среднем синоптические вариации составляют от 40 до 70% общей дисперсии вариаций концентрации, а весной достигают 90%. Наблюдающееся подобие кривых аппроксимации временных рядов для массовой концентрации аэрозоля и концентрации белка усиливает сделанное выше предположение о том, что вариации концентрации в основном определяются динамическими процессами в атмосфере.

а

б

Рис. 2. Результаты гармонического анализа данных летней сессии 2001 г.

Сводные результаты гармонического анализа временных рядов

Параметр	2001 г.								2002 г.							
	Зима		Весна		Лето		Осень		Зима		Весна		Лето		Осень	
	$C_m$	$C_p$	$C_m$	$C_p$	$C_m$	$C_p$	$C_m$	$C_p$	$C_m$	$C_p$	$C_m$	$C_p$	$C_m$	$C_p$	$C_m$	$C_p$
$A_0$	26,97 0,28	$7 \cdot 10^{-3}$ $10^{-4}$	61,91 1,34	0,10 $10^{-3}$	33,63 0,35	0,24 $4 \cdot 10^{-3}$	31,00 0,31	0,09 $2 \cdot 10^{-3}$	21,79 0,23	0,08 $9 \cdot 10^{-4}$	52,10 0,89	0,55 $5 \cdot 10^{-3}$	26,05 0,49	0,31 $3 \cdot 10^{-3}$	37,37 0,67	0,28 $4 \cdot 10^{-3}$
$A_1$	2,59 0,55	$3 \cdot 10^{-3}$ $10^{-4}$	33,25 1,22	0,09 $10^{-3}$	6,37 0,50	0,03 $2 \cdot 10^{-3}$	16,25 0,26	0,08 $9 \cdot 10^{-4}$	0,57 0,88	0,02 $10^{-3}$	35,36 1,06	0,63 $4 \cdot 10^{-3}$	4,28 0,38	0,02 $10^{-3}$	9,90 0,72	0,15 $2 \cdot 10^{-3}$
$T_1$	14,29 0,39	26,98 $6 \cdot 10^{-4}$	18,19 4,02	15,60 $4 \cdot 10^{-3}$	10,59 0,83	1,34 $4 \cdot 10^{-4}$	9,15 0,66	6,39 $2 \cdot 10^{-3}$	11,93 0,75	3,49 $6 \cdot 10^{-4}$	19,60 3,80	21,24 0,03	2,42 0,14	3,94 $2 \cdot 10^{-3}$	8,81 1,46	6,02 $6 \cdot 10^{-3}$
$A_2$	9,03 0,15	$10^{-3}$ $3 \cdot 10^{-4}$	23,22 2,31	0,07 $2 \cdot 10^{-3}$	4,71 0,35	0,05 $3 \cdot 10^{-3}$	3,35 0,58	0,05 $10^{-3}$	3,06 0,18	0,03 $10^{-3}$	17,75 0,49	0,39 $8 \cdot 10^{-3}$	5,85 0,93	0,05 $5 \cdot 10^{-3}$	13,57 0,81	0,08 $3 \cdot 10^{-3}$
$T_2$	3,64 0,23	5,07 $10^{-4}$	14,74 4,87	1,25 $4 \cdot 10^{-4}$	1,55 0,10	3,49 $3 \cdot 10^{-3}$	6,95 0,31	3,99 $2 \cdot 10^{-3}$	12,91 0,57	8,95 $2 \cdot 10^{-3}$	3,49 0,73	6,47 $5 \cdot 10^{-3}$	4,99 0,76	7,67 $2 \cdot 10^{-3}$	1,00 0,10	3,79 $4 \cdot 10^{-3}$
$A_3$	6,45 0,47	$9 \cdot 10^{-4}$ $8 \cdot 10^{-5}$	21,91 1,22	0,07 $2 \cdot 10^{-3}$	9,42 0,60	0,09 $6 \cdot 10^{-3}$	4,49 0,54	0,02 $10^{-3}$	2,36 0,49	0,02 $2 \cdot 10^{-3}$	6,26 1,40	0,19 $4 \cdot 10^{-3}$	4,34 0,63	0,01 $9 \cdot 10^{-3}$	6,37 1,39	$7 \cdot 10^{-3}$ 0,01
$T_3$	6,05 0,38	0,06 $6 \cdot 10^{-7}$	6,05 1,17	5,97 $2 \cdot 10^{-3}$	5,22 0,26	6,61 $7 \cdot 10^{-3}$	6,04 0,43	7,73 $3 \cdot 10^{-3}$	4,91 0,20	5,84 $10^{-3}$	7,18 1,74	2,20 $3 \cdot 10^{-3}$	2,53 0,32	5,43 $4 \cdot 10^{-3}$	3,62 0,73	8,76 $9 \cdot 10^{-3}$
$A_4$	0,79 0,75	$10^{-3}$ $9 \cdot 10^{-5}$	10,71 0,70	0,04 $10^{-3}$	10,07 0,51	0,08 $5 \cdot 10^{-3}$	3,12 0,35	0,03 $3 \cdot 10^{-3}$	3,14 0,32	$9 \cdot 10^{-3}$ $10^{-3}$	13,28 0,97	0,15 $8 \cdot 10^{-3}$	5,41 0,86	0,07 $4 \cdot 10^{-3}$	8,32 1,07	0,02 $7 \cdot 10^{-3}$
$T_4$	5,15 0,61	3,10 $5 \cdot 10^{-5}$	2,61 0,29	1,73 $4 \cdot 10^{-4}$	0,39 0,03	2,35 $2 \cdot 10^{-3}$	2,98 0,17	4,16 $2 \cdot 10^{-3}$	4,97 0,25	3,45 $5 \cdot 10^{-4}$	2,10 0,32	1,24 $2 \cdot 10^{-3}$	0,56 0,05	5,39 $4 \cdot 10^{-3}$	0,81 0,14	1,10 $10^{-3}$
$A_5$	1,87 0,65	$2 \cdot 10^{-3}$ $2 \cdot 10^{-4}$	7,94 1,12	0,02 $10^{-3}$	1,30 0,58	0,06 $8 \cdot 10^{-3}$	5,07 0,55	0,02 $3 \cdot 10^{-3}$	0,71 0,75	$9 \cdot 10^{-3}$ $2 \cdot 10^{-3}$	15,06 1,21	0,02 $4 \cdot 10^{-3}$	3,50 0,69	0,03 $4 \cdot 10^{-3}$	4,14 0,48	0,02 0,01
$T_5$	3,78 0,23	1,62 $5 \cdot 10^{-5}$	3,50 0,94	3,62 $7 \cdot 10^{-4}$	1,42 0,16	3,52 $4 \cdot 10^{-3}$	3,98 0,17	0,83 $4 \cdot 10^{-4}$	1,00 0,12	3,65 $8 \cdot 10^{-4}$	1,68 0,30	1,56 $2 \cdot 10^{-3}$	1,53 0,18	1,07 $10^{-3}$	1,69 0,19	0,77 $10^{-3}$
$\gamma$	58,85	36,29	68,44	92,40	66,00	47,00	62,91	69,14	41,79	55,94	64,90	86,70	49,21	52,80	43,15	65,50

В случае отсутствия подобия в анализ данных следовало бы включить влияние возможных источников и стоков аэрозоля. К сожалению, имеющихся данных пока не достаточно для анализа этих механизмов.

### Выводы

Вейвлетный и гармонический анализ временных рядов массовой концентрации атмосферных аэрозолей и их белковой компоненты на качественном уровне показал, что вариации массовой концентрации в приземном слое атмосферы в основном определяются характерными синоптическими процессами. Этот результат соответствует высказанному нами ранее предположению о том, что биогенная компонента атмосферного аэрозоля на юге Западной Сибири в основном формируется за счет наличия ряда независимых друг от друга и сильно удаленных от места наблюдения источников [1, 4]. Вместе с тем вклад от локальных источников, вероятно, наиболее значим в весенний период, соответствующий пробуждению растительного сообщества в данном регионе. В дальнейшем целесообразно продолжить исследования в данном направлении с целью получения достоверных количественных характеристик и уточнения вклада в вариации концентрации локальных и удаленных источников аэрозолей и их стоков.

1. Белан Б.Д., Бородулин А.И., Марченко Ю.В., Олькин С.Е., Панченко М.В., Пьянков О.В., Сафатов А.С., Буряк Г.А. Изучение изменчивости белковой компоненты атмосферного аэрозоля над лесными массивами юга Западной Сибири // Докл. РАН. 2000. Т. 374. № 6. С. 827–829.

*A.I. Borodulin, A.S. Safatov, A.N. Shabanov, O.G. Khutorova, K.P. Koutzenogii, V.I. Makarov.*  
**Periodic structure of surface concentration fields of aerosol containing atmospheric protein in the vicinity of Novosibirsk.**

An attempt of wavelet and harmonic analysis of the array of experimental data on atmospheric aerosol mass concentration and total protein concentration in surface air in the vicinity of Novosibirsk in 2001–2002 is undertaken. The wavelet analysis of the data has shown that surface air concentration variations are mainly determined by characteristic synoptic processes with the periods of 4, 7, 10 and 15 days. The results of harmonic analysis have shown that synoptic variations average from 40 to 70% of concentration variations and reach 90% in spring.

2. Андреева И.С., Белан Б.Д., Бородулин А.И., Буряк Г.А., Жуков В.А., Панченко М.В., Пененко В.В., Петрищенко В.А., Сафатов А.С. Изучение изменчивости содержания живых микроорганизмов в атмосферном аэрозоле на юге Западной Сибири // Докл. РАН. 2001. Т. 381. № 2. С. 278–282.
3. Бородулин А.И., Сафатов А.С., Белан Б.Д., Панченко М.В. О статистике концентрации тропосферного биоаэрозоля // Докл. РАН. 2002. Т. 385. № 1. С. 113–115.
4. Андреева И.С., Бородулин А.И., Буряк Г.А., Жуков В.А., Зыков С.В., Марченко В.В., Марченко Ю.В., Олькин С.Е., Петрищенко В.А., Пьянков О.В., Резникова И.К., Репин В.Е., Сафатов А.С., Сергеев А.Н., Рапута В.Ф., Пененко В.В., Цветова Е.А., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Панченко М.В., Анкилов А.Н., Бакланов А.М., Власенко А.Л., Куценогий К.П., Макаров В.И., Чуркина Т.В. Биогенная компонента атмосферного аэрозоля на юге Западной Сибири // Химия в интересах устойчивого развития. 2002. Т. 10. № 5. С. 547–561.
5. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физ. наук. 1996. Т. 166. № 11. С. 1145–1170.
6. Монин А.С. Прогноз погоды как задача физики. М.: Наука. 1969. 184 с.
7. Хуторова О.Г., Тептин Г.М. Временные вариации аэрозоля и малых газовых примесей в приземном городском воздухе // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2003. Т. 39. № 6. С. 782–790.
8. Хуторова О.Г., Корчагин Г.Е. Исследование пространственной структуры мезомасштабных вариаций тропосферного аэрозоля различными методами // Оптика атмосфер. и океана. 2001. Т. 14. № 6–7. С. 650–654.
9. Fahrutdinova A.N., Khutorova O.G., Berdunov N.V., Ganin V.A., Ishmuratov R.A. Long-term Variations of Circulation in Mid-latitude Upper Mesosphere-lower Thermosphere // Adv. Space Res. 1997. V. 20. N 6. P. 1161–1164.