

**А.И. Бородулин, А.С. Сафатов, А.А. Ярыгин,
О.Г. Хуторова, Б.Д. Белан, М.В. Панченко**

Периодическая структура полей концентрации биоаэрозолей в тропосфере юга Западной Сибири

*ГНЦ ВБ «Вектор», Кольцово Новосибирской обл.
Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 30.11.2004 г.

Представлены результаты вейвлетного и гармонического анализа массива экспериментальных данных о концентрации аэрозолей суммарного белка и жизнеспособных микроорганизмов в тропосфере юга Западной Сибири, полученных за 1999–2003 гг. Вейвлет-анализ данных показал, что вариации концентрации биоаэрозолей в тропосфере в основном определяются характерными сезонными процессами с периодами: 12; 6; 4 и 8–9 мес. Сезонные вариации определяют около 80% общей дисперсии вариаций концентрации суммарного белка, а амплитуды вариаций концентрации жизнеспособных микроорганизмов малы по сравнению с постоянной составляющей для любой высоты наблюдений.

ГНЦ ВБ «Вектор» в кооперации с рядом институтов СО РАН проводят систематическое изучение биогенной компоненты атмосферного аэрозоля юга Западной Сибири [1–5]. Под термином «биогенная компонента» авторы подразумевают следующие составляющие атмосферного аэрозоля: суммарный белок и жизнеспособные микроорганизмы. Обобщение и анализ полученных данных показали, что концентрация биогенной компоненты атмосферного аэрозоля на юге Западной Сибири наряду с сезонным изменением имеет значительные вариации, а поля концентрации в основном определяются наличием удаленных источников атмосферных примесей [4]. Таким образом, на свойства полей концентрации биоаэрозолей могут также влиять колебательные процессы, происходящие в атмосфере. Представленный в [5] вейвлет-анализ данных о приземной концентрации аэрозолей, полученных в окрестностях г. Новосибирска, позволил установить связь вариаций массовой концентрации аэрозолей и концентрации суммарного белка в приземном слое атмосферы с ее характерными периодическими синоптическими процессами.

В настоящей статье приведены результаты вейвлетного и гармонического анализа массива экспериментальных данных о концентрации аэрозолей суммарного белка и жизнеспособных микроорганизмов в тропосфере юга Западной Сибири, полученных за 5-летний период наблюдений с 1999 по 2003 г.

Отбор проб производился в последней декаде каждого месяца с помощью самолета-лаборатории на восьми высотах: 0,5; 1; 1,5; 2; 3; 4; 5,5 и 7 км. Полеты проводились над Караканским бором, расположенным на правом берегу р. Обь: 54°30' в.д.; 82°20' с.ш. Методики отбора и анализа проб описаны в [4]. Рассматривались 2×8 временных рядов концентрации, представленных 60 отсчетами.

На основании вышесказанного было сделано предположение, что вариации в рядах концентрации тропосферных биоаэрозолей также 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 [6]. 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 [7], 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;
- наличие комплексной составляющей позволяет нам анализировать не только амплитуды, но и фазы выделяемых гармоник;
- и наконец, он уже был нами успешно использован для анализа приземных полей концентрации атмосферных аэрозолей [5].

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. При такой интерпретации возможно рассмотрение математических моделей физических процессов различного масштаба, оказывающих влияние на атмосферные параметры [8].

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. Обычно при таком анализе 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, 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.

На рис. 1 приведен пример полученных вейвлет-спектров концентрации суммарного белка и жизнеспособных микроорганизмов для 1999–2003 гг. на высоте 7 км.

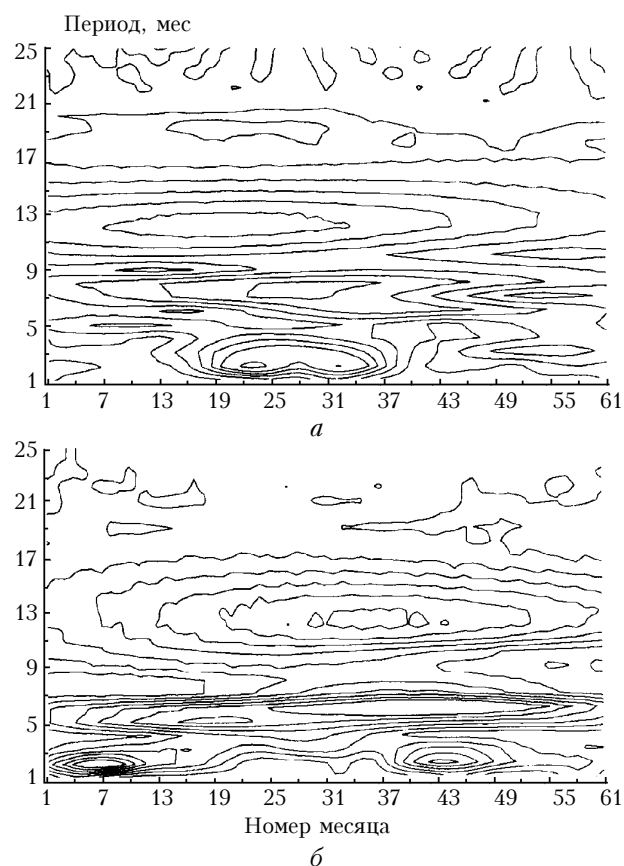


Рис. 1. Вейвлет-преобразование временных рядов концентрации аэрозолей суммарного белка (а) и жизнеспособных микроорганизмов (б)

Вейвлет-спектр для ряда концентрации суммарного белка построен для диапазона его изменения от 0,1–1,1 с шагом 0,15, вейвлет-спектр для ряда концентрации жизнеспособных микроорганизмов — для диапазона 0,05–0,35 с шагом 0,05.

Анализ полученных данных показывает, что с помощью вейвлет-анализа для каждого временного ряда выявляются регулярные периодические сезонные процессы: 12; 8–9; 6 и 4 мес. Амплитуда этих вариаций не постоянна во времени, но всегда значима с вероятностью более чем 80%. Кроме регулярных колебаний иногда выделяются процессы с периодом порядка 24 мес — межгодовые колебания.

Обращает на себя внимание приближенное подобие полученных вейвлет-спектров концентрации суммарного белка и жизнеспособных микроорганизмов. Это позволяет предположить, что вариации массовой концентрации биоаэрозолей во многом определяются динамическими процессами в тропосфере, в частности ее сезонными колебаниями. Вместе с тем неполное подобие вейвлет-спектров, вероятно, указывает на различающуюся природу источников и стоков тропосферных биоаэрозолей.

При проведении гармонического анализа рядов концентрации экспериментальные данные были аппроксимированы суммой сезонных гармоник с периодами: 12; 8–9; 6 и 4 мес, т.е. были взяты только те гармоники, которые значимы в вейвлет-спектрах для всех временных рядов.

На рис. 2 приведен пример аппроксимации временных рядов концентрации суммарного белка и жизнеспособных микроорганизмов суммой гармоник для 2000 г. на высоте 0,5 км. Пропуски на кривых рис. 2 обозначают отсутствие данных.

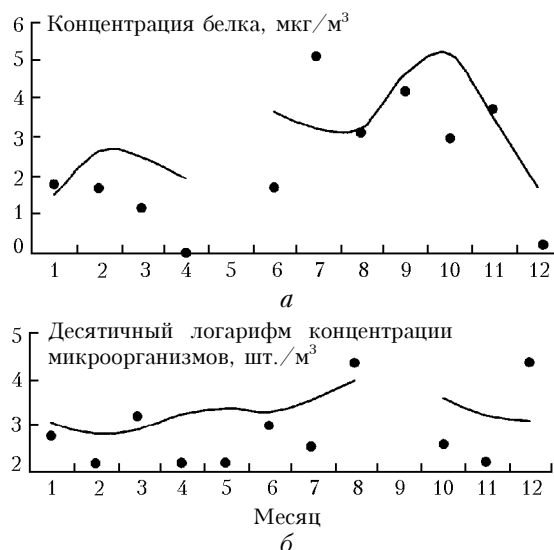


Рис. 2. Аппроксимация экспериментальных рядов концентрации аэрозолей суммарного белка (а) и жизнеспособных микроорганизмов (б) суммой гармоник с выявленными сезонными периодами

В табл. 1 и 2 приведены сводные результаты гармонического анализа. Представлены: A_0 — постоянная составляющая и доверительный интервал; A_i и T_i — амплитуды и времена максимума и доверительные

Таблица 1

Сводные результаты гармонического анализа рядов концентрации суммарного белка

Параметр	Высота, км							
	0,5	1	1,5	2	3	4	5,5	7
A_0	2,83 $6,97 \cdot 10^{-10}$	2,5 $1,43 \cdot 10^{-10}$	2,13 $3,90 \cdot 10^{-10}$	2,09 $6,47 \cdot 10^{-10}$	1,92 $5,55 \cdot 10^{-10}$	1,79 $5,39 \cdot 10^{-10}$	2,07 $4,55 \cdot 10^{-10}$	1,85 $4,93 \cdot 10^{-10}$
A_1	1,43 $1,58 \cdot 10^{-9}$	1,47 $1,20 \cdot 10^{-9}$	1,14 $8,52 \cdot 10^{-10}$	1,27 $5,63 \cdot 10^{-10}$	1,53 $7,60 \cdot 10^{-10}$	1,3 $1,24 \cdot 10^{-10}$	1,28 $6,30 \cdot 10^{-10}$	0,93 $3,18 \cdot 10^{-10}$
T_1	240,79 $6,57 \cdot 10^{-8}$	228,01 $4,33 \cdot 10^{-8}$	244,21 $3,77 \cdot 10^{-8}$	266,37 $3,41 \cdot 10^{-8}$	265,03 $5,41 \cdot 10^{-8}$	264,8 $8,57 \cdot 10^{-9}$	241,43 $2,80 \cdot 10^{-8}$	261,56 $1,98 \cdot 10^{-8}$
A_2	0,57 $8,46 \cdot 10^{-10}$	0,57 $4,06 \cdot 10^{-10}$	0,36 $1,22 \cdot 10^{-10}$	0,73 $7,36 \cdot 10^{-10}$	0,79 $8,73 \cdot 10^{-10}$	0,67 $6,30 \cdot 10^{-10}$	0,9 $7,59 \cdot 10^{-10}$	0,52 $3,96 \cdot 10^{-10}$
T_2	176,31 $3,23 \cdot 10^{-8}$	161,28 $1,04 \cdot 10^{-8}$	194,42 $1,84 \cdot 10^{-8}$	175,61 $2,29 \cdot 10^{-8}$	195,95 $9,48 \cdot 10^{-8}$	201,8 $7,88 \cdot 10^{-8}$	170,74 $1,65 \cdot 10^{-8}$	171,42 $1,30 \cdot 10^{-8}$
A_3	0,39 $9,26 \cdot 10^{-10}$	0,26 $9,63 \cdot 10^{-10}$	0,37 $8,16 \cdot 10^{-10}$	0,43 $7,83 \cdot 10^{-10}$	0,42 $6,77 \cdot 10^{-10}$	0,42 $6,18 \cdot 10^{-10}$	0,47 $8,07 \cdot 10^{-10}$	0,31 $5,49 \cdot 10^{-10}$
T_3	118,58 $1,93 \cdot 10^{-8}$	160,31 $2,43 \cdot 10^{-8}$	110,4 $1,36 \cdot 10^{-8}$	87,72 $5,65 \cdot 10^{-9}$	102,32 $1,26 \cdot 10^{-8}$	117,82 $1,12 \cdot 10^{-8}$	28,61 $3,60 \cdot 10^{-9}$	36,58 $3,71 \cdot 10^{-9}$
A_4	0,81 $3,84 \cdot 10^{-10}$	0,72 $9,45 \cdot 10^{-10}$	0,61 $3,23 \cdot 10^{-10}$	0,62 $7,54 \cdot 10^{-10}$	0,46 $5,36 \cdot 10^{-10}$	0,36 $2,47 \cdot 10^{-10}$	0,16 $4,16 \cdot 10^{-10}$	0,3 $5,58 \cdot 10^{-10}$
T_4	64,34 $7,00 \cdot 10^{-9}$	74,03 $1,07 \cdot 10^{-9}$	57,26 $6,00 \cdot 10^{-9}$	68,88 $7,08 \cdot 10^{-9}$	68,27 $6,69 \cdot 10^{-9}$	55,12 $5,07 \cdot 10^{-9}$	116,23 $4,34 \cdot 10^{-9}$	84,23 $9,21 \cdot 10^{-9}$
Остаточная дисперсия, %	15,86	21,81	17,6	23,35	34,64	28,16	15,56	18,48

Таблица 2

Сводные результаты гармонического анализа рядов концентрации жизнеспособных микроорганизмов

Параметр	Высота, км							
	0,5	1	1,5	2	3	4	5,5	7
A_0	3,3 $4,79 \cdot 10^{-10}$	3,36 $4,36 \cdot 10^{-10}$	3,19 $4,31 \cdot 10^{-10}$	3,18 $4,91 \cdot 10^{-10}$	3,17 $4,70 \cdot 10^{-10}$	3,21 $4,65 \cdot 10^{-10}$	3,36 $4,39 \cdot 10^{-10}$	3,21 $4,35 \cdot 10^{-10}$
A_1	0,4 $3,88 \cdot 10^{-10}$	0,4 $3,60 \cdot 10^{-10}$	0,32 $3,76 \cdot 10^{-10}$	0,48 $4,11 \cdot 10^{-10}$	0,28 $1,4 \cdot 10^{-10}$	0,11 $3,28 \cdot 10^{-10}$	0,52 $4,06 \cdot 10^{-10}$	0,45 $2,89 \cdot 10^{-10}$
T_1	234,7 $1,53 \cdot 10^{-8}$	218,82 $1,06 \cdot 10^{-8}$	197,37 $7,46 \cdot 10^{-8}$	231,73 $1,61 \cdot 10^{-8}$	267,28 $1,55 \cdot 10^{-8}$	358,05 $1,30 \cdot 10^{-8}$	227,36 $1,45 \cdot 10^{-8}$	233,02 $1,18 \cdot 10^{-8}$
A_2	0,18 $3,60 \cdot 10^{-10}$	0,15 $5,45 \cdot 10^{-10}$	0,24 $3,70 \cdot 10^{-10}$	9,69 $3,90 \cdot 10^{-10}$	0,2 $4,57 \cdot 10^{-10}$	0,18 $4,61 \cdot 10^{-10}$	0,14 $3,67 \cdot 10^{-10}$	0,23 $2,57 \cdot 10^{-10}$
T_2	126,1 $3,78 \cdot 10^{-9}$	32,5 $2,82 \cdot 10^{-9}$	131,23 $6,97 \cdot 10^{-9}$	142,28 $8,94 \cdot 10^{-9}$	167,41 $1,22 \cdot 10^{-8}$	113,67 $7,80 \cdot 10^{-9}$	225,88 $1,32 \cdot 10^{-8}$	136,35 $4,98 \cdot 10^{-9}$
A_3	0,12 $3,00 \cdot 10^{-10}$	0,16 $2,76 \cdot 10^{-10}$	0,08 $1,14 \cdot 10^{-10}$	0,17 $2,35 \cdot 10^{-10}$	0,16 $2,95 \cdot 10^{-10}$	0,11 $1,17 \cdot 10^{-10}$	0,05 $2,53 \cdot 10^{-10}$	0,5 $3,79 \cdot 10^{-10}$
T_3	123,03 $7,43 \cdot 10^{-9}$	121,23 $6,31 \cdot 10^{-9}$	175,1 $5,63 \cdot 10^{-9}$	9,23 $3,97 \cdot 10^{-9}$	121,39 $5,71 \cdot 10^{-9}$	121,42 $3,20 \cdot 10^{-9}$	156,82 $6,35 \cdot 10^{-9}$	86,6 $4,41 \cdot 10^{-9}$
A_4	0,17 $4,43 \cdot 10^{-10}$	0,11 $2,49 \cdot 10^{-10}$	0,04 $3,34 \cdot 10^{-10}$	0,08 $2,45 \cdot 10^{-10}$	0,16 $1,47 \cdot 10^{-10}$	0,03 $3,01 \cdot 10^{-10}$	0,25 $2,62 \cdot 10^{-10}$	0,15 $3,22 \cdot 10^{-10}$
T_4	16,8 $1,19 \cdot 10^{-9}$	89,52 $2,31 \cdot 10^{-9}$	41,74 $2,47 \cdot 10^{-9}$	117,9 $2,00 \cdot 10^{-9}$	34,67 $1,27 \cdot 10^{-9}$	115,07 $6,16 \cdot 10^{-9}$	108,94 $4,17 \cdot 10^{-9}$	112,56 $6,32 \cdot 10^{-9}$
Остаточная дисперсия, %	17,19	9,05	12,59	14,76	11,43	4,08	17,7	29,12

интервалы для периодов 12; 8,5; 6 и 4 мес соответственно (см. верхнюю и нижнюю строки табл. 1, 2); остаточная доля общей дисперсии, %, приведена без учета сезонных вариаций и постоянной составляющей. Анализ данных показал, что сезонные вариации определяют около 80% общей дисперсии вариаций концентраций белка. Амплитуды вариаций концентраций микроорганизмов малы по сравнению с постоянной составляющей для всех высот.

Вейвлет-анализ показывает, что не все амплитуды сезонных колебаний постоянны в течение периода наблюдений. Это значит, что результаты гармонического анализа дают усредненные по времени значения амплитуд. Оценки фаз вариаций показали,

что все гармоники, кроме четырехмесячных, — поверхностные, т.е. на указанных высотах наблюдений колебания находятся в фазе. Было установлено, что четырехмесячная периодичность — внутренняя и вызвана волной, распространяющейся сверху вниз с вертикальной скоростью порядка 4 км/мес.

Таким образом, вейвлетный и гармонический анализ пятилетних временных рядов концентраций тропосферных биоаэрозолей, как и в [5], показал, что вариации концентраций суммарного белка и жизнеспособных микроорганизмов на юге Западной Сибири в основном определяются выявленными периодическими процессами, связанными с сезонными вариациями атмосферы.

1. Андреева И.С., Белан Б.Д., Бородулин А.И., Буряк Г.А., Марченко Ю.В., Олькин С.Е., Панченко М.В., Петрищенко В.А., Пьянков О.В., Резникова И.К., Сафатов А.С., Сергеев А.Н., Степанова Е.В. Изучение изменчивости биогенной компоненты атмосферного аэрозоля над лесными массивами Западной Сибири // *Оптика атмосф. и океана*. 2000. Т. 13. № 6–7. С. 639–644.
2. Анкилов А.Н., Бакланов А.М., Белан Б.Д., Бородулин А.И., Буряк Г.А., Власенко А.Л., Марченко Ю.В., Олькин С.Е., Панченко М.В., Пененко В.В., Пьянков О.В., Резникова И.К., Сафатов А.С., Сергеев А.Н., Цветова Е.А. Годовое изменение концентрации белка в биогенной компоненте атмосферного аэрозоля на юге Западной Сибири // *Оптика атмосф. и океана*. 2001. Т. 14. № 6–7. С. 520–525.
3. Андреева И.С., Бородулин А.И., Буряк Г.А., Олькин С.Е., Петрищенко В.А., Рапута В.Ф., Резникова И.К., Сафатов А.С. Изучение биогенной компоненты атмосферного аэрозоля, аккумулярованного в снежном покрове вблизи некоторых источников аэрозолей // *Оптика атмосф. и океана*. 2002. Т. 15. № 5–6. С. 471–474.
4. Андреева И.С., Бородулин А.И., Буряк Г.А., Жуков В.А., Зыков С.В., Марченко Ю.В., Олькин С.Е., Петрищенко В.А., Пьянков О.В., Резникова И.К., Ретин 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. Бородулин А.И., Сафатов А.С., Хуторова О.Г., Куценогий К.П., Макаров В.И. О периодической структуре приземных полей концентрации аэрозолей суммарного атмосферного белка в окрестностях г. Новосибирска // *Докл. РАН*. 2003. Т. 392. № 2. С. 280–282.
6. Torrence G., Compo G.P. A Practical Guide to Wavelet Analysis // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 1998. V. 79. N 1. P. 61–78.
7. Монин А.С. Прогноз погоды как задача физики. М.: Наука, 1969. 184 с.
8. Хуторова О.Г., Тептин Г.М. Исследование мезомасштабных вариаций в тропосфере по наблюдениям концентрации примесей // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана*. 2001. Т. 37. № 6. С. 853–856.
9. Хуторова О.Г., Корчагин Г.Е. Исследование пространственной структуры мезомасштабных вариаций тропосферного аэрозоля различными методами // *Оптика атмосф. и океана*. 2001. Т. 14. № 6–7. С. 650–654.

A.I. Borodulin, A.S. Safatov, A.A. Jarygin, O.G. Khutorova, B.D. Belan, M.V. Panchenko. **Periodic structure of bioaerosol concentration fields in troposphere of the South of Western Siberia.**

The work presents the results of wavelet and harmonic analyses of an array of experimental data on the concentrations of total protein and live microorganism aerosols in troposphere of the South of Western Siberia obtained in 1999–2003. Wavelet analysis has shown that typical seasonal processes with the periods of 12; 6; 4 and 8–9 months mainly determine variations in bioaerosol concentration in troposphere. Seasonal variations determine about 80% of the total dispersion of variations in total protein concentration, and the amplitudes of variations in live microorganism concentration are too small as compared with the constant component for any altitude of observations.