

## АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ НАБЛЮДЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК БАЙКАЛЬСКОГО АЭРОЗОЛЯ С ПОМОЩЬЮ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

А.Е. Каплинский, О.Г. Хуторова

*Метод вейвлет-преобразования был применен к задаче анализа временной динамики счетной концентрации частиц фоновых аэрозолей в шести диапазонах их размеров. Исходные временные ряды данных были получены в июле 1991 г. в ходе непрерывного 120-часового эксперимента на побережье озера Байкал с помощью фотоэлектрического счетчика. Первоначальная обработка данных показала наличие волнообразных процессов в динамике счетной концентрации и качественную корреляцию этих процессов в разных диапазонах размеров. Затем исходные временные ряды были подвергнуты вейвлет-преобразованию с базовой функцией Морле. Было показано, что наиболее значимым для всех диапазонов размеров является суточный ход концентрации с временным масштабом в 22–24 часа. Кроме того, выделяются процессы с временными масштабами примерно 4, 6, 12 и 14–16 часов, связанные предположительно с мезомасштабными атмосферными флуктуациями.*

*Ключевые слова:* временная динамика, счетной концентрации частиц, размер частиц, фоновый аэрозоль, эксперимент, вейвлет-преобразование.

Динамические процессы в атмосферном аэрозоле относятся к ряду наиболее трудоемких направлений исследований атмосферы, поскольку этот ее компонент характеризуется наибольшей изменчивостью во времени и в пространстве. Особенно это относится к аэрозолям антропогенного происхождения. Работы в этом направлении опубликованы рядом отечественных и зарубежных авторов [1-5].

К факторам, влияющим на измеряемые параметры аэрозолей, относятся интенсивность солнечной радиации, наличие малых газовых примесей, состояние подстилающей поверхности, влажность воздуха, скорость и направление ветра, другие метеопараметры, а также характеристики источников аэрозольных частиц и ряд других. Совершенно очевидно, что при интерпретации опытных данных учесть такое разнообразие процессов, влияющих на объект исследований, практически невозможно. Вследствие этого приходится ограничиваться несколькими наиболее важными из них, с точки зрения экспериментатора, или строить те или иные гипотезы для объяснения наблюдаемых явлений.

В последние годы появился и существенно развит новый математический метод анализа сложных динамических процессов – вейвлет-преобразование [6-8]. Интегральное вейвлет-преобразование временного ряда  $f(t)$  является функцией двух переменных  $a$  и  $x$ , и определяется в виде

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

где  $Wf(x, a)$  – оператор вейвлет-преобразования,  $a$  – масштаб, не равный нулю,  $x$  – временной сдвиг,  $\Psi$  – вейвлет-функция,  $\gamma$  – нормирующий множитель. Иными словами, вейвлет-преобразование одномерного сигнала заключается в его разложении по базису, сконструированному из некоторой специальной функции (вейвлета)  $\Psi$  посредством масштабных изменений  $a$  и переносов  $x$  [6-8].

При анализе нестационарных сигналов главный интерес представляет частотное содержание сигнала, локальное во времени, то есть вопрос о том, какие временные масштабы вариаций дают основной вклад в сигнал в данный момент времени. При Фурье-анализе в качестве основных базисных функций используются синусы, косинусы и экспоненты с комплексным показателем, простирающиеся вдоль всей вещественной оси. Вейвлеты же строго локализованы, что позволяет анализировать локальные свойства сигнала. Таким образом, в (1) масштаб  $a$  играет роль периода колебаний в спектре Фурье, а сдвиг  $x$  показывает, в каком месте временной оси это колебание проявляется. Это дает возможность оценить изменение модового состава вариаций в исследуемых временных рядах. В отличие от преобразования Фурье, вейвлет-

## АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ НАБЛЮДЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК БАЙКАЛЬСКОГО АЭРОЗОЛЯ С ПОМОЩЬЮ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

анализ обеспечивает двумерную развертку одномерного «сигнала», причем частота и время рассматриваются как независимые переменные. Результаты вейвлет-преобразования дают возможность проанализировать свойства сигнала как во временном, так и в частотном пространствах одновременно, и, таким образом, выделить на разных стадиях исследуемого процесса его составляющие, имеющие различный временной масштаб, которые можно предположительно связать с теми или иными физическими механизмами.

Одним из принципиальных отличий вейвлет-преобразования от Фурье-анализа является огромное множество функций, которые можно использовать в качестве базисных вейвлетов. Выбор конкретной функции зависит от того, что конкретно исследователь хочет выделить в анализируемых данных, и от специфики самих данных. Следовательно, очень важно подобрать оптимальную вейвлет-функцию для данного сигнала или ряда, хотя, конечно, эта задача имеет множество решений, и пока не существует универсального критерия оптимальности выбора [7]. Для задачи спектрального анализа произвол в выборе вейвлетов увеличивается, поскольку здесь не требуется применение ортогональных базисов и не ставится задача обратного преобразования, т.е. восстановления сигнала [6]. В нашем анализе мы использовали вейвлет-функции МНАТ (вторая производная функции Гаусса) и функцию Морле. МНАТ-вейвлет имеет узкий энергетический спектр и приспособлен для анализа сложных сигналов из-за хорошей временной локализации. Функция Морле имеет хорошую локализацию в частотном пространстве и поэтому приспособлена для анализа квазипериодических процессов [6].

При интерпретации полученного вейвлет-спектра учитываются математические модели физических процессов различного масштаба, оказывающих влияние на атмосферные параметры [9, 10]. В работе [12] вейвлет-анализ длинных рядов измерений аэрозоля и газовых примесей по данным станций атмосферного мониторинга показал большие возможности в исследовании временных вариаций атмосферных примесей.

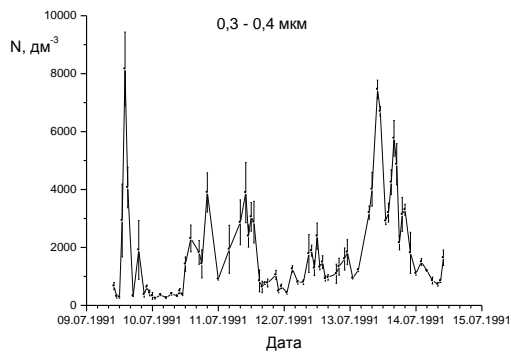
Непрерывный 120-часовой аэрозольный эксперимент, проведенный с 9 по 14 июля 1991 г. в рамках проекта «Аэрозоли Сибири» на побережье озера Байкал [13], также дал хороший материал для применения вейвлет-преобразования. В ходе эксперимента фото-

электрическим счетчиком ПКЗВ-906 периодически измерялась счетная концентрация аэрозольных частиц в нескольких диапазонах их размеров. Точка измерений находилась у поселка Листвянка, на площадке солнечного радиотелескопа Института солнечно-земной физики СО РАН на высоте 230 м над поверхностью озера. Период измерений характеризовался преимущественно малооблачной погодой без осадков с дневными температурами 20-25 °С.

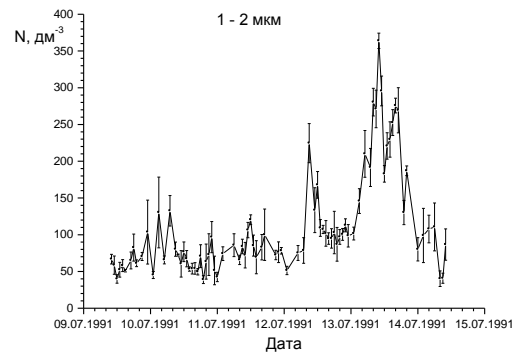
Измерения проводились в дневное время ежедневно, а в ночное – с 2-часовыми интервалами. Их результаты представляли собой наборы отдельных серий измерений, относящихся к шести соответствующим интервалам оптических размеров частиц: 0,3-0,4; 0,4-0,5; 0,5-1,0; 1,0-2,0; 2,0-5,0 и 5,0-10,0 мкм. Каждая серия измерялась в течение одной минуты при скорости прокачки 1 л/мин, и после записи показаний прибора измерения повторялись несколько раз. Таким образом, за 10 минут набиралось в среднем 5 серий измерений. По техническим причинам количество серий в ряде случаев было или больше, или меньше среднего, а несколько полученных наборов были исключены из дальнейшего рассмотрения по причине сомнений в их достоверности.

В качестве первого шага для анализа экспериментальных данных были выполнены статистическая обработка полученных шести временных рядов наблюдений и построение графиков. Погрешности измерений вычислялись при заданной доверительной вероятности 0,95. При этом исключались из дальнейшего рассмотрения еще и данные, полученные с наибольшей погрешностью. Примеры результатов первоначальной обработки временных рядов приведены на рис.1 а) – е) для всех шести интервалов размеров частиц.

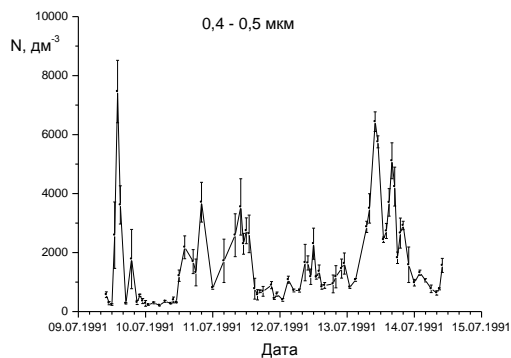
Из приведенных графиков следует, что в течение 5 полных суток периоды относительно небольшой концентрации частиц сменялись интенсивными всплесками, которые во всех интервалах размеров были явно скоррелированы между собой. На графиках просматриваются несколько волн концентрации частиц с периодами, оцениваемыми в десятки часов, происхождение которых можно предположительно связать с динамикой атмосферы. Вместе с тем из графиков видно, что перепады концентрации в каждом из этих интервалов имеют явную тенденцию к снижению с ростом размеров частиц.



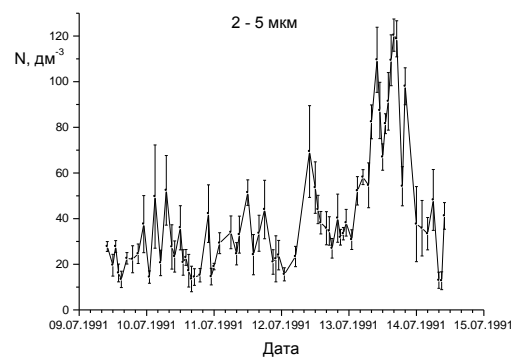
а)



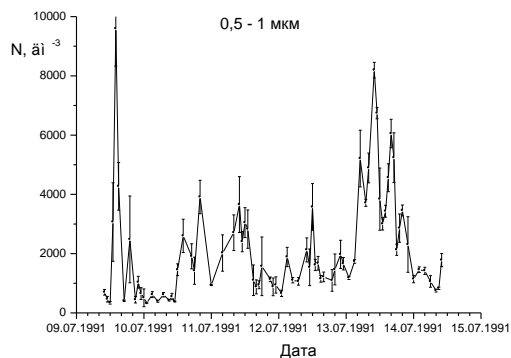
г)



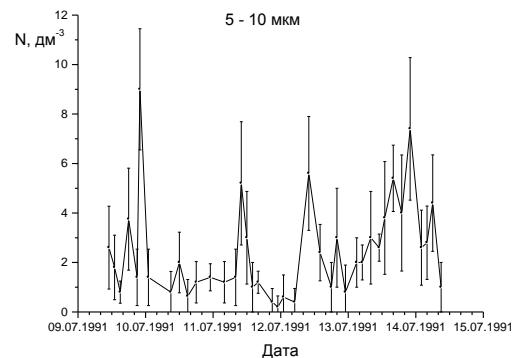
б)



д)



в)



е)

Рисунок 1 - Экспериментальные зависимости счетной концентрации аэрозольных частиц от времени для диапазонов размеров частиц: а) 0,3–0,4 мкм; б) 0,4–0,5 мкм; в) 0,5–1 мкм; г) 1–2 мкм; д) 2–5 мкм; е) 5–10 мкм.

Это свидетельствует о фракционной неоднородности, поскольку мелкодисперсные фракции частиц характеризуются большей изменчивостью во времени по сравнению с крупными частицами.

Более детальные и интересные результаты получаются, если к полученным временным рядам применить вейвлет-

преобразование. Длина рядов и их временное разрешение позволяет оценить присутствие в них динамических процессов с временными масштабами от 2 до 24 часов. Верхний предел исследуемых масштабов выбран из соображений возможности достоверной оценки интенсивности вариаций вне конуса ошибок на границах временного ряда. Пер-

## АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ НАБЛЮДЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК БАЙКАЛЬСКОГО АЭРОЗОЛЯ С ПОМОЩЬЮ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

вый этап анализа – применение ко всем рядам вейвлет-преобразования с функцией МНАТ. Все спектры показали присутствие значимых всплесков интенсивности счетной концентрации частиц с временными масштабами примерно 4, 6, 12, 14-16 и 22-24 часа. Чередование минимумов и максимумов в

вейвлет-спектрах очевидно указывало на то, что все выделенные возмущения – квазипериодические, и их интенсивность значима с 70 % вероятностью в течение нескольких периодов. С целью более точной частотной локализации ко всем рядам применено вейвлет-преобразование с функцией Морле.

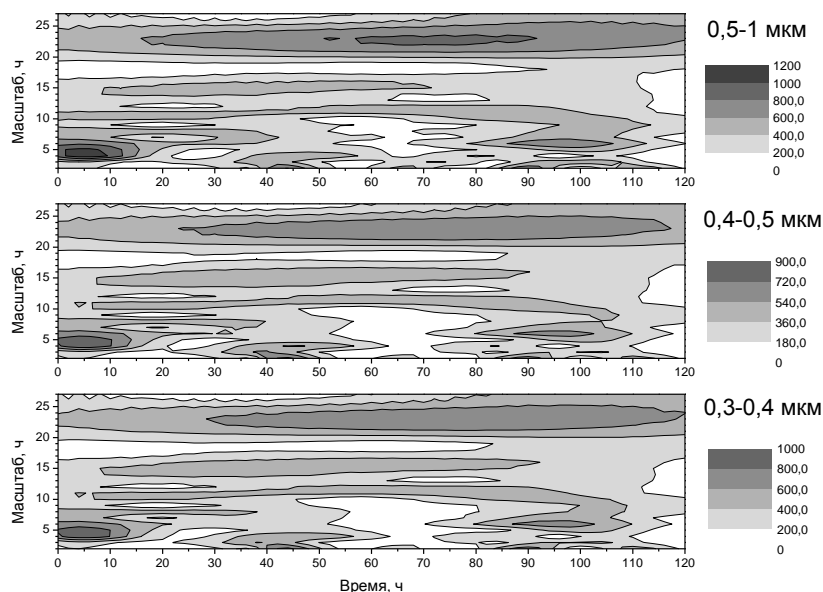


Рисунок 2 - Рассчитанные зависимости амплитуды вейвлет-спектров от времени для диапазонов размеров частиц 0,3–0,4 мкм; 0,4–0,5 мкм; 0,5–1,0 мкм

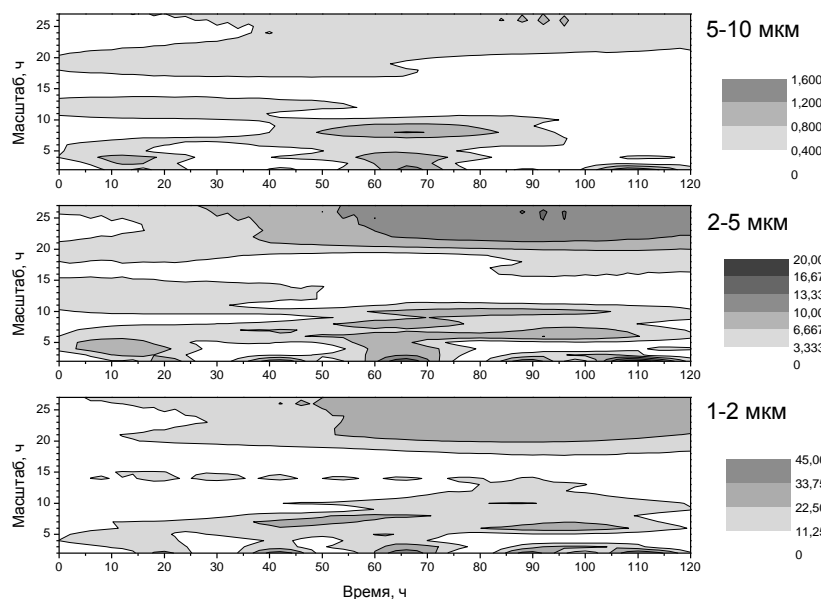


Рисунок 3 - Рассчитанные зависимости амплитуды вейвлет-спектров от времени для диапазонов размеров частиц 1–2 мкм; 2–5 мкм; 5–10 мкм

На рисунках 2 и 3 представлены полученные амплитуды вейвлет-спектров с материнской функцией Морле для шести исходных рядов концентрации частиц. По оси абсцисс отложены значения времени с начала эксперимента в часах, по оси ординат – временные масштабы вариаций концентрации во временных рядах. Справа от рисунков приведены шкалы интенсивности. Увеличение интенсивности вейвлет-спектра, соответствующее какому-либо моменту и временному масштабу, означает, что в данный момент времени в динамике концентрации аэрозоля выделяется процесс соответствующего масштаба. Чем выше по шкале интенсивности, тем более значимыми являются вариации концентрации, изображаемые на вейвлет-спектрах соответствующей плотностью заливки.

Из результатов вейвлет-преобразования следует, что для всего периода эксперимента и всех размеров частиц наиболее значимым является суточный ход их концентрации. Таким образом, можно утверждать, что интенсивность солнечной радиации непосредственно влияет на концентрацию аэрозольных частиц. Кроме того, выделяются вариации характерных мезомасштабов примерно в 4, 6, 12 и 15 часов. Первая из них соответствует первым календарным суткам наблюдений (с 0-го по 14-й час эксперимента, что соответствует периоду с 10.00 до 24.00 9 июля), вторая – полным пятым суткам (с 86-го по 110-й час, или с 0.00 до 24.00 13 июля), третья – с 14-го по 110-й час, или с 0.00 часов вторых суток (10 июля) до 24.00 пятых суток (13 июля), и четвертая – с 14-го по 90-й час, или с 0.00 вторых суток (10 июля) до 6.00 пятых суток (13 июля). Отметим, что амплитуды вариаций в 12 и 15 часов для диапазонов 1–2 и 2–5 мкм не всегда значимы, что может быть связано с погрешностями измерений концентрации частиц в этих диапазонах.

Вариации массовой концентрации аэрозоля с аналогичными периодами от нескольких часов до суток были исследованы в работах [11, 12]. Причиной мезомасштабных флуктуаций, на наш взгляд, может быть сложная динамика атмосферы, связанная с конвекцией, орографией, суточным ходом влажности и скорости ветра [9, 10]. В то же время, интенсивность вариаций концентрации может зависеть от среднего уровня концентрации и модулироваться мезомасштабными атмосферными процессами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горчаков Г.И., Шукуров К.А. Флуктуации концентрации субмикронного аэрозоля в конвективных условиях // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39. № 1. С. 85-97.
2. Горчаков Г.И., Копров Б.М., Шукуров К.А. Влияние ветра на вынос аэрозоля с подстилающей поверхности // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40. № 6. С. 759-775.
3. Дойч Ф., Странгер М., Каплинский А.Е., Самек Л., Йос П., Ван Грикен Р. О влиянии количества осадков на концентрацию элементов и ионов в частицах городского аэрозоля // Оптика атмосферы и океана. 2003. Т. 16. № 10. С. 927-932.
4. Harrison R.M., Shi J.P., Jones M.R. Continuous measurements of aerosol physical properties in the urban atmosphere // Atmospheric Environment. 1999. V. 33. P. 1037-1047.
5. Woo K.S., Chen D.R., Pui D.Y.H., McMurry P.H. Measurement of Atlanta aerosol size distributions: observations of ultrafine particle events // Aerosol Science and Technology. 2001. V. 34. P. 75-87.
6. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. 1996. т. 166. № 11. С. 1145-1170.
7. Новиков Л.В. Основы вейвлет-анализа сигналов. Учебное пособие. СПб.: Изд-во ООО «Модус+», 1999. 152 с.
8. Torrence G., Compo G. P. A Practical Guide to Wavelet Analysis // Bulletin of the American Meteorological Society. 1998. V.79. № 1. P. 61-78.
9. Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 280 с.
10. Монин А.С. Прогноз погоды как задача физики. М: Наука, 1969. 184 с.
11. Khoutorova O.G., Douryagin D.N., Vasilyev A.A., Korchagin G.E. Waves in air impurities and their influence on atmospheric optical properties // Atmospheric Environment. 2001. V. 35. № 30. P.5131-5134.
12. Хуторова О.Г., Тептин Г.М. Временные вариации аэрозоля и малых газовых примесей в приземном городском воздухе // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39. № 6. С. 782-790.
13. Каплинский А.Е., Суторихин И.А. Исследование многосуточной динамики концентрации частиц байкальского аэрозоля // Международная конференция «Экология Сибири, Дальнего Востока и Арктики». Тезисы докладов. Томск, 2001. С.62.

**Каплинский А.Е.**, к.ф.-м.н., доц.,  
АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Барнаул,  
тел. 8-903-995-5070;  
**Хуторова О.Г.**,  
Казанский государственный университет,  
Казань.