

Методика исследования влияния планетарных волн на вариации аэрозольной оптической толщи

О.Г. Хуторова*

Казанский государственный университет
420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18

Поступила в редакцию 15.05.2008 г.

Разработана методика исследования планетарных волн по наблюдениям аэрозольной оптической толщи (АОТ) в пространственно разнесенных пунктах. Методика учитывает неравномерность данных, дает возможность исследования пространственно-временной структуры вариаций АОТ и параметра Ангстрема, которая зависит от волновых атмосферных процессов внутрисезонного масштаба. По данной методике можно выделять периодические вариации синоптического масштаба, исследовать их фазовые фронты, периоды вариаций и их волновые числа.

Ключевые слова: планетарные волны, аэрозольная оптическая толщина.

Введение

На фоне сезонных изменений атмосферных параметров, в том числе массовой концентрации аэрозоля, наблюдаются изменения с временными масштабами от нескольких суток до нескольких недель (синоптические временные масштабы), которые характерны для всех слоев атмосферы и связаны с активными синоптическими процессами [1, 2]. Считается, что такие колебания вызваны волнами, пространственные размеры которых сравнимы с радиусом Земли. В литературе широко используется термин «планетарные волны» [3, 4].

В работах [5, 6] на базе данных синхронных наблюдений сети станций атмосферного мониторинга в Республике Татарстан с помощью методики, основанной на использовании вейвлет-анализа и кросс-вейвлет-анализа, сделаны оценки зональных фазовых скоростей планетарных волн и их пространственных размеров в той же проекции. Кроме того, выявлено, что атмосферные процессы синоптического масштаба вносят вклад в пространственную когерентность полей атмосферных параметров, в том числе концентрации малых газовых примесей и аэрозоля в приземном слое.

Вариации аэрозольной оптической толщи (АОТ) также показывают ее сильную зависимость от динамики атмосферы, причем наибольшая изменчивость наблюдается именно на синоптических временных масштабах [7]. Исследования изменчивости АОТ очень важны, так как она является одним из основных аэрозольных параметров, определяющих климатический эффект аэрозолей [8].

В настоящее время бурно развивается сеть AERONET [9], предназначенная для определения

характеристик аэрозоля по спектральным измерениям прямого и рассеянного солнечного излучения. Эта сеть включает в себя большое количество автоматических многоканальных фотометров «Cimel», установленных в различных пунктах земного шара. Информация подвергается специальному унифицированному алгоритму обработки [10] для исключения облачности и контроля качества измерений. Учитывая глобальную структуру сети AERONET, высокую автоматизацию и регулярность проведения измерений, целесообразно провести эмпирические исследования пространственно-временной изменчивости АОТ, зависящей от планетарной синоптической динамики.

Фотометр «Cimel» имеет несколько приемных каналов, предназначенных для определения спектральных оптических толщ аэрозоля в различных диапазонах длин волн. По данным оптической толщи восстанавливаются интегральное влагосодержание, параметр Ангстрема и параметр мутности, которые используются в дальнейшем для получения характеристик атмосферного аэрозоля [11, 12].

Для того чтобы исследовать синоптические вариации оптических свойств атмосферного аэрозоля, решено было использовать данные второго уровня, прошедшие процедуры исключения облачности и корректировки по двум калибровкам [10]. Среднесуточные данные обеспечивают временную равномерность ряда АОТ и исключение внутрисуточных вариаций, которые в данном случае являются высокочастотным шумом.

Исследование изменчивости АОТ требует цифровой фильтрации результатов экспериментальных измерений с целью выделения процессов требуемых синоптических масштабов.

При анализе изменчивости нестационарных сигналов, в данной задаче — рядов АОТ, требуется выявить частотное содержание сигнала, локальное

* Ольга Германовна Хуторова (olga.khutorova@ksu.ru).

во времени, т.е. узнать, какие периодичности значимы в данный момент времени. Вейвлет-преобразование обеспечивает возможность анализировать свойства сигнала одновременно во временном и частотном пространствах [13]. Вейвлет-преобразование как основа методики исследования атмосферных волновых процессов использовалось в работах [5, 6, 15].

Вид вейвлет-спектра сильно зависит от выбранной вейвлет-функции. Для задачи спектрального анализа не требуется применение ортогональных базисов [13], так как в этом случае не ставится задача восстановления сигнала. Поэтому из числа наиболее распространенных и изученных на сегодня вейвлет-функций был выбран вейвлет Морле, исходя из следующих соображений:

– материнская функция представляет собой периодический сигнал, модулированный функцией Гаусса, поэтому мы можем сопоставить вейвлет-спектр АОТ спектру атмосферных волн, являющихся собственными колебаниями атмосферы [5], их принято считать квазипериодическими [3, 4];

– вейвлет Морле имеет хорошую локализацию как в частотном, так и во временном пространстве [13];

– комплексный вейвлет позволяет анализировать не только амплитуду, но и фазу процесса [13–15].

Амплитудный вейвлет-спектр Морле характеризует изменение во времени относительного вклада периодических компонент различного масштаба в исследуемый сигнал, в данной задаче – оптическую толщину, т.е. в каждый момент времени мы можем оценить интенсивность вариаций АОТ всех исследуемых временных масштабов. При такой интерпретации возможно рассмотрение математических моделей физических процессов различного масштаба, оказывающих влияние на вариации АОТ [15]. Фазовый вейвлет-спектр также необходимо учитывать при анализе стабильных колебаний, в этом случае распределение фазового спектра, соответствующего данной периодичности, – узкое, в обратном случае – почти равномерное [15].

Как и любая свертка, вейвлет-преобразование предъявляет требования к исследуемым данным – для адекватного анализа требуются бесконечные непрерывные и равномерные во времени ряды. Однако в рядах значений АОТ имеются пробелы, связанные с исключением облачности, что делает временные ряды неравномерными. Эти пробелы, как и конечность рядов, оказывают воздействие на вейвлет-спектр АОТ в силу так называемого конуса влияния [13]. Поэтому промежутки между наблюдениями были заполнены значениями, полученными путем линейной интерполяции граничных значений АОТ. Уменьшение влияния конечности рядов достигается дополнением на границах средним по рядам значением АОТ.

Проведенное модельное исследование данной методики показало, что пробелы, длина которых значительно меньше исследуемого временного масштаба, не оказывают существенного воздействия на амплитудный вейвлет-спектр. Пробелы, длина которых значительно больше исследуемого временного масштаба, можно не принимать во внимание, так как квазипериодические процессы внутри них не

выделяются. Пробелы, длина которых сравнима с исследуемым временным масштабом, занижают амплитудный спектр сигнала пропорционально длине пробела относительно величины исследуемого периода, как и краевые эффекты больших пробелов. Самое главное, что при использовании интерполяции не появляются ложные пики в амплитудном спектре на границах пробелов, а занижение амплитудного вейвлет-спектра значительно меньше, чем без интерполяции.

Исследование влияния заполнения пробелов на фазовый вейвлет-спектр показало, что это влияние мало, т.е. фазовый вейвлет-спектр практически не искажается. Таким образом, при исследовании синоптических вариаций АОТ основным анализируемым параметром следует считать фазовый вейвлет-спектр.

Методика выделения периодических возмущений по синхронным временным рядам основана на анализе фазовой части вейвлет-представления длинных временных рядов значений АОТ. Методика является развитием идеи работ [5, 6, 15].

Для предварительного отбора периодических вариаций АОТ оценивается уровень значимости амплитудного вейвлет-спектра. Вейвлет-преобразование позволяет нам получить оценки спектра интенсивности вариаций, локализованные во времени с уровнем значимости, почти не зависящим от масштаба волны [14, 15].

Был проведен вейвлет-анализ временных рядов среднесуточных значений оптической толщины, параметра Ангстрема, интегральной ~~водности~~–влажности атмосферы для нескольких пунктов сети AERONET. Спектры всех измеряемых параметров показали присутствие значимых всплесков интенсивности периодических вариаций с временными масштабами от 3 до 50 сут. Причем максимумы в амплитудных вейвлет-спектрах, очевидно, указывали на то, что все выделенные возмущения – квазипериодические, и их интенсивность значима с 80%-й вероятностью в течение нескольких периодов для каждой вариации. Этот результат свидетельствует о том, что проявлением атмосферных процессов синоптических и внутрисезонных масштабов являются смена воздушных масс и, соответственно, изменение характеристик атмосферного аэрозоля в пунктах измерения, что показано, например, в работах [7, 16, 17].

На рис. 1 представлены амплитудные вейвлет-спектры АОТ для оптического излучения с длиной волны 1020 нм в различных пунктах для второго полугодия 2002 г.

Подобные спектры характерны и для других рядов. По оси x отложено время в сутках. Ось y представляет собой ось масштабов вейвлет-преобразования, соответствующих периодам вариаций от 1 до 60 сут. Градациями серого цвета представлены модули вейвлет-коэффициентов, максимальные значения которых соответствуют амплитудам мезомасштабных вариаций. Белый цвет соответствует минимальным значениям коэффициентов, черный – максимальным.

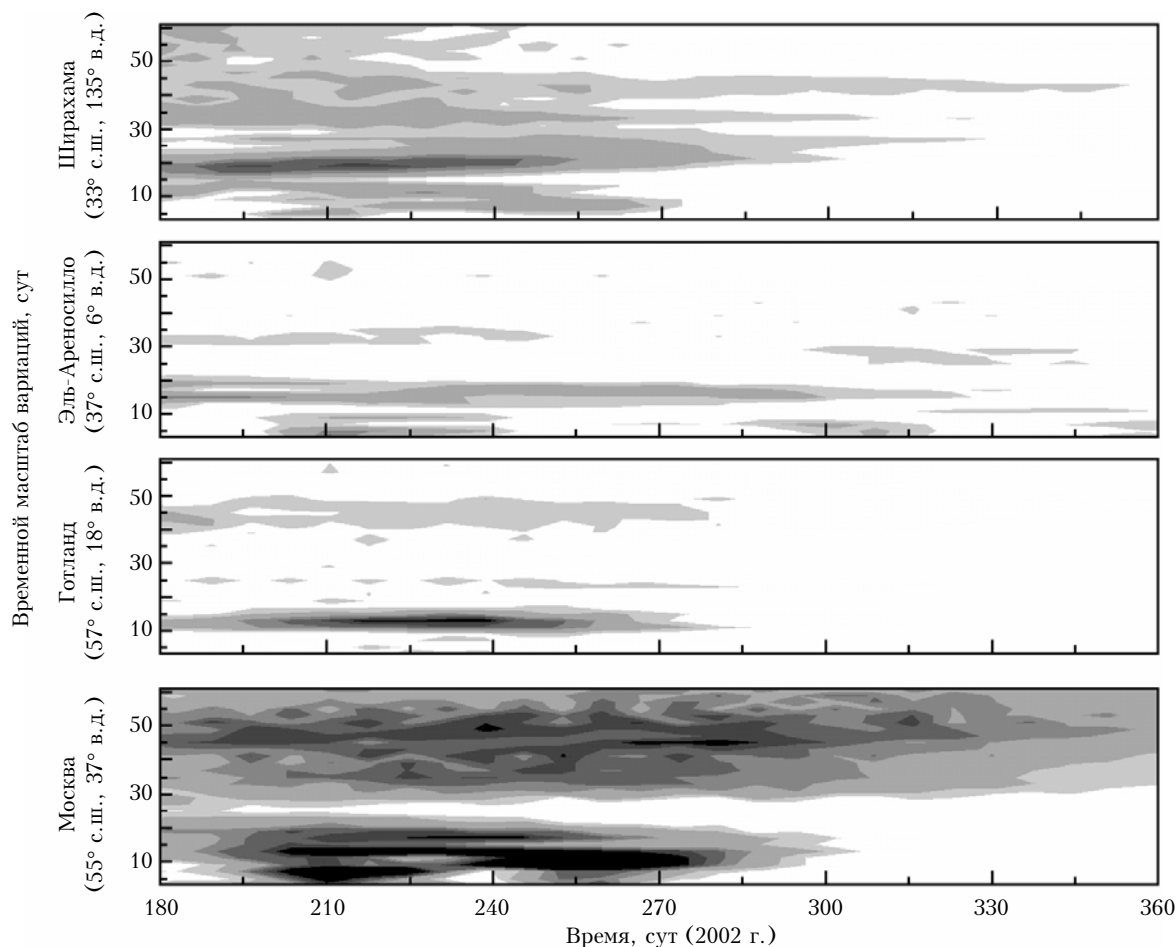


Рис. 1. Амплитудный вейвлет-спектр

Из рис. 1 видно, что с июля по октябрь 2002 г. в этих пунктах наблюдался периодический процесс с временными масштабами около 13 сут, причем наиболее сильные вариации отмечены в Москве, где в это время наблюдалось сильное замутнение атмосферы дымом торфяных пожаров [18], т.е. поля атмосферного аэрозоля, сформированные локальными источниками, процессами переноса и турбулентной диффузии, приобретают дополнительную пространственную и временную неоднородность, вызванную волновыми атмосферными процессами.

Далее по рядам данных АОТ, полученных на разных станциях для оптического излучения с длиной волны 1020 нм, проводится вейвлет-анализ с целью выделения квазипериодических вариаций атмосферы для указанного излучения синхронно по нескольким рядам, необходимым для исследования пространственной зависимости фазы выделенных периодичностей.

В полученных вейвлет-спектрах, привязанных к одному периоду времени, выбраны значимые возмущения АОТ, выявленные одновременно на всех станциях. Главный критерий отбора события возможной волновой вариации состоит в том, что распределение фазового вейвлет-спектра имеет узкий максимум в течение времени превышения ампли-

тудным спектром 80%-го уровня значимости. Выделенные события были сгруппированы по временному масштабу и датам этих событий.

Фазовая часть вейвлет-преобразования, соответствующая времени локализации максимальной амплитуды возмущения, на каждой из станций имеет различные значения. Но разность фаз в каждой паре пунктов постоянна, пока волна существует. Постоянство фазовых характеристик свидетельствует о волновых процессах планетарного масштаба, распространяющихся в пространстве, причем вейвлет-преобразование локализует эти процессы во времени. Таким образом устанавливались периоды вариаций, их амплитуды и временная привязка.

Для апробации данной методики был проведен поиск значимых периодических вариаций АОТ для оптического излучения с длиной волны 1020 нм (АОТ 1020) синоптического и внутрисезонного масштабов по данным сети солнечных спектрорадиометров «Симел». Отбирались наиболее устойчивые вариации, существующие в течение нескольких месяцев в каждом из пунктов. По данным 60 пунктов, расположенных на широтах от -33° до 60° , обнаружено несколько сотен событий синоптических вариаций АОТ 1020. Получены гистограммы эмпирических распределений периодов и амплитуд этих вариаций (рис. 2).

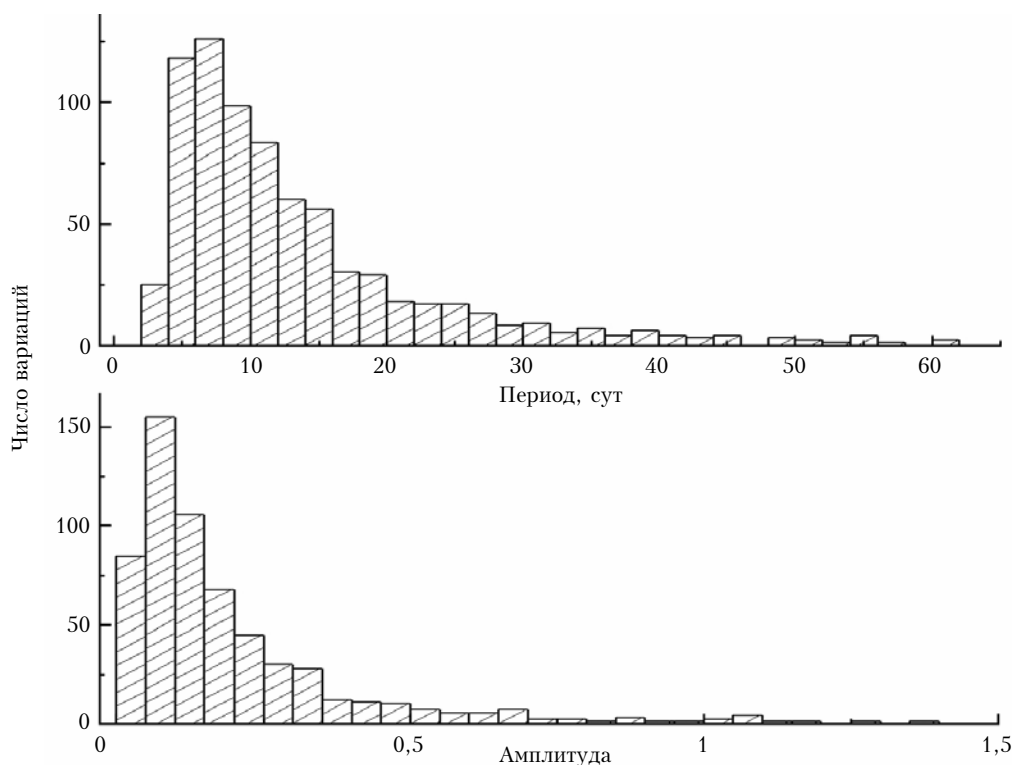


Рис. 2. Гистограммы периодов и амплитуд вариаций АОТ

Из выделенных событий максимальное число синоптических вариаций имеет периоды от 5 до 11 сут, что соответствует периодам волн Россби [4]. Амплитуды вариаций АОТ свидетельствуют о вкладе каждой внутрисезонной гармоники в суммарную дисперсию, характерную для каждого пункта. Для исследованных событий амплитуды, т.е. глубина модуляции уровня АОТ 1020, в основном не превышают 0,25.

Следующий шаг — отбор одновременно существующих вариаций с одним периодом в разных пунктах. Амплитуда вариаций определялась характерным для каждого региона уровнем атмосферных примесей. Пространственная зависимость фазы выделенных периодичностей оказалась не случайной. Построены фазовые фронты распространяющихся волн. На рис. 3 представлен пример фазового фронта планетарной волны с временным масштабом 5 сут, который был получен путем вычисления значений фазы на нескольких станциях с помощью вейвлет-анализа и последующей интерполяции полученных результатов.

Изолинии построены так, что направление распространения волны соответствует направлению от более светлых областей к более темным перпендикулярно линиям равной фазы.

Одновременные фазовые спектры, полученные в пространственно разнесенных пунктах, позволяют оценить волновые числа синоптических процессов, определяющих пространственно-временные вариации АОТ с помощью решения уравнения линейной регрессии

$$\varphi_k = k_x x + k_y y + \varphi_0,$$

где φ_k — фазовый вейвлет-спектр данной вариации; k_x, k_y — волновые числа в зональном и меридиональном направлениях; x — долгота; y — широта.

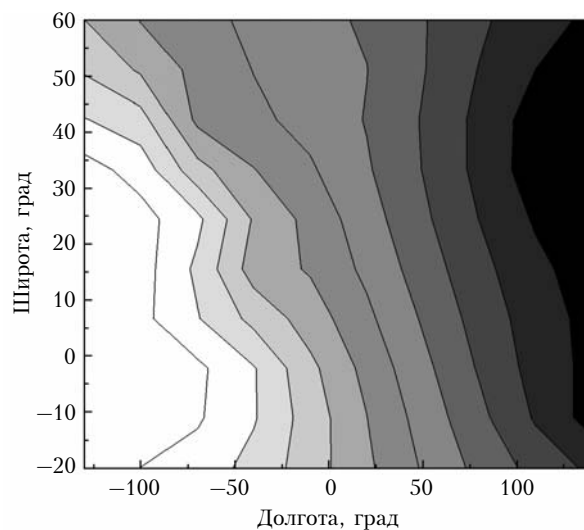


Рис. 3. Фазовый фронт волны с периодом $T = 5$ сут (2002 г.)

Построена гистограмма распределения зонального волнового числа для волновых вариаций АОТ для оптического излучения с длиной волны 1020 нм (рис. 4).

Для исследованной совокупности событий (23 случая) можно заключить, что большая часть волновых процессов, формирующих периодические вариации АОТ, распространяется с востока на запад

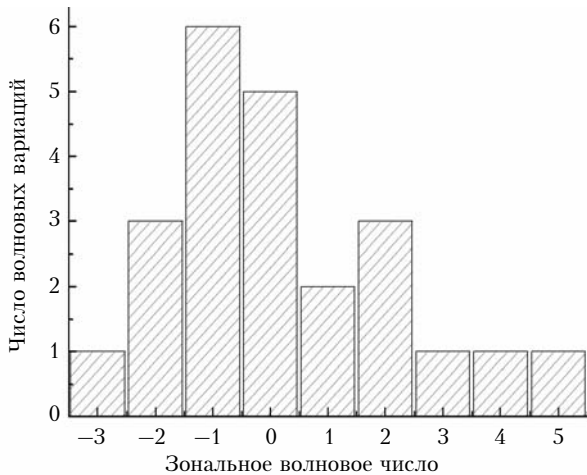


Рис. 4. Распределение зональных волновых чисел

($k_x < 0$) и имеет волновое число, близкое к единице, т.е. на поверхности земного шара укладывается одна длина волны. Как фазовые фронты, так и эмпирическое распределение показывают, что планетарные волны испытывают явление дисперсии, вследствие чего фронт не идеально плоский, а волновые числа не всегда точно целые. Надо сказать, что это предварительные результаты, так как исследуемая выборка не охватывает весь временной, пространственный и спектральный диапазоны измерений сети солнечных спектро радиометров «Cimel».

Проведенные исследования показали, что планетарные волновые процессы вносят существенный вклад в пространственно-временные вариации АОТ.

Автор благодарна всем организаторам и исследователям сети AERONET, а также Бренту Холбену за данные исследований, использованные в работе.

1. Хуторова О.Г., Теттин 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.
2. Khoutorova O.G. Planetary waves effects in the bottom impurities // Environ. Radioecol. and Appl. Ecol. 2002. V. 8. N 4. P. 21–26.
3. Монин А.С. Прогноз погоды как задача физики. М.: Наука, 1969. 184 с.
4. Гилл А. Динамика атмосферы и океана. М.: Мир, 1986. Т. 1. 397 с.; Т. 2. 415 с.
5. Хуторова О.Г., Теттин Г.М. Волновые возмущения локальных и синоптических масштабов по синхронным

- измерениям атмосферных примесей // Докл. РАН. 2005. Т. 400. № 1. С. 110–112.
6. Хуторова О.Г. Взаимосвязь вариаций приземной концентрации атмосферных примесей в двух промышленных регионах Татарстана // Оптика атмосфер. и океана. 2004. Т. 17. № 5–6. С. 526–529.
7. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Еремина Т.А., Рассазчикова Т.М., Турчинович С.А. О маломасштабной пространственно-временной изменчивости прозрачности атмосферы и солнечной радиации // Оптика атмосфер. и океана. 1998. Т. 11. № 10. С. 1049–1054.
8. Горбаренко Е.В. Пространственно-временная изменчивость аэрозольной составляющей оптической толщи атмосферы на территории СССР // Метеорол. и гидрол. 1997. № 5. С. 36–44.
9. Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanré D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakajima T., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A. AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization // Remote Sens. Environ. 1998. V. 66. N 1. P. 1–16.
10. Smirnov A., Holben B.N., Eck T.F., Dubovik O., Slutsker I. Cloud-screening and quality control algorithms for the AERONET database // Remote Sens. Environ. 2000. V. 73. N 3. P. 337–349.
11. Dubovik O., Smirnov A., Holben B.N., King M., Kaufman Y., Eck T., Slutsker I. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET). Sun and sky radiance measurements // J. Geophys. Res. D. 2000. V. 105. N 8. P. 9791–9806.
12. Cachorro V.E., Gonsales M.J., de Frutos A.M. et al. Fitting the Angstrom formula to spectrally resolved aerosol optical thickness // Atmos. Environ. 1989. V. 23. N 2. P. 265–270.
13. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физ. наук. 1996. Т. 166. № 11. С. 1145–1170.
14. Torrence G., Compo G.P. A Practical Guide to Wavelet Analysis // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1998. V. 79. N 1. P. 61–78.
15. Хуторова О.Г., Теттин Г.М. Метод выделения перемежающихся возмущений по синхронным временным рядам // Прием и обработка сигналов в сложных информационных системах. 2003. Вып. 21. С. 133–139.
16. Панченко М.В., Терпугова С.А. Внутрисезонные факторы изменчивости характеристик субмикронного аэрозоля. 1. Воздушные массы // Оптика атмосфер. и океана. 1995. Т. 8. № 12. С. 1761–1772.
17. Jacobson M.Z. Atmospheric pollution: history, science and regulation. Cambridge University Press, 2002. 399 p.
18. Чубарова Н.Е. Влияние аэрозоля и атмосферных газов на ультрафиолетовую радиацию в различных оптических условиях, включая условия дымной мглы 2002 г. // Докл. РАН. 2004. Т. 394. № 1. С. 105–111.

O.G. Khutorova. Method of investigation of the planetary wave influence on the aerosol optical thickness variations.

In this work the method of planetary waves research from measurements of the aerosol optical thickness in spatially distanced sites is developed. This method takes into account time non-uniformity of the data, enables researching the space structure of AOT and Angstrom parameter variations, which depend on atmospheric wave intraseasonal processes. By the given technique it is possible to estimate periodic variations of synoptic scale, to investigate their phase fronts, the periods of variations, and their wave numbers.