

О.А. Тарасова, Г.И. Кузнецов, И.С. Захаров

Применение спектрального анализа для исследования вариаций приземного озона над Европой

Московский государственный университет

Поступила в редакцию 25.11.2003 г.

Представлены предварительные результаты спектрально-кластерного анализа вариаций концентрации приземного озона над Европой по данным измерений на сети ЕМЕР. Проведен анализ энергетических вкладов различных процессов от локальных до крупномасштабных в четырех выбранных диапазонах периодов от 91 до 1 сут. Показано, что энергетические спектральные вклады крупномасштабной компоненты увеличиваются с севера на юг с уменьшением вклада более короткопериодных процессов. Кластеризация энергетических вкладов выявила существенную пространственную неоднородность процессов, управляющих режимом приземного озона на территории Европы.

Введение

Повышенный интерес к вопросам качества среды обитания неразрывно связан с проблемой изменения газового состава приземного слоя воздуха. Среди наиболее опасных для человека газов нельзя недооценивать роль приземного озона.

В последние десятилетия ученые всего мира уделяют особое внимание изменчивости приземного озона. Это внимание обусловлено следующими основными факторами:

1) озон является токсичным загрязнителем атмосферы, концентрация которого нередко превышает предельно допустимую, вследствие чего Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) включила его в список пяти основных загрязнителей, содержание которых необходимо контролировать при определении качества воздуха;

2) озон играет ключевую роль в химических и фотохимических процессах в тропосфере, активно участвуя во внутриатмосферной трансформации малых газов и обуславливая ее окислительную способность;

3) над обширными континентальными районами Северного полушария до недавнего времени наблюдались положительный тренд концентрации тропосферного и приземного озона, а также увеличение частоты эпизодов образования существенно повышенных его концентраций [1].

Несмотря на изменение ситуации в последнее десятилетие [2, 3], т.е. уменьшение пиковых концентраций, до сих пор не до конца понятно, какие процессы имеют максимальное влияние на изменчивость приземного озона. Среди управляющих процессов можно выделить, прежде всего, горизонтальный и вертикальный перенос и фотохимическую генерацию и разрушение [4]. Определенный вклад вносят сухое осаждение на подстилающую поверхность, вымывание озона осадками и ряд дру-

гих процессов. Если динамические процессы имеют естественную изменчивость, то уровень предшествующих озона в атмосфере напрямую связан с деятельностью человека. Разделение естественной и антропогенной компонент вариаций и трендов концентрации приземного озона в различных точках земного шара трудно реализуемо в связи с ограниченностью экспериментальных данных, а математически (напрямую) не реализуемо в связи с нелинейностью связей изменчивости озона и управляющих процессов.

В данной работе делается попытка подойти к указанной проблеме с позиции временного масштабирования атмосферных процессов, управляющих изменчивостью приземной концентрации озона. Разработанная методика используется для исследования изменчивости приземного озона над Европой на базе данных сети ЕМЕР (международного проекта по трансграничному переносу загрязнений) с использованием спектрально-кластерных методов анализа данных.

1. Выбор управляющих процессов

Масштабы атмосферных процессов, управляющих изменчивостью газового состава, существенно различаются и могут составлять от часов (суток) до нескольких лет и десятков лет [5]. Среди наиболее характерных масштабов внутригодовой изменчивости, связанных с различными процессами, в работе предлагается выделить четыре временных диапазона: 90–31, 30–19, 18–8 и 7–1 сут. Некоторые из этих периодов были обнаружены в изменчивости приземного озона на ряде станций, включенных в проект TOR-2 [6].

Самая длиннопериодная группа (далее называемая крупномасштабом) частично отражает сезонную изменчивость концентрации озона. Основным влияющим фактором в этой группе является

изменение радиационного и термического режима нижнего слоя атмосферы, что отражается в первую очередь на активности фотохимических процессов на данной территории.

Периоды 19–30 сут обычно связываются с глобальными колебаниями атмосферы (например, планетарные волны, длинные и супердлинные волны, волны Россби) [7]. Влияние планетарных волн на изменчивость приземного озона осуществляется за счет вертикальных движений, сопровождаемых транспортом озона из более высоких слоев (например, из верхней тропосферы, где концентрация озона выше). Планетарные волны были обнаружены и в ОСО [8] и была подтверждена их связь с глобальными изменениями климата [9].

Периоды 18–8 сут представляют колебания концентрации, вызываемые крупномасштабными синоптическими процессами (крупномасштабные барические системы, смена воздушных масс и др.) [7]. Многочисленные исследования были проведены по оценке влияния различных барических систем на изменчивость озона и показано, что наблюдаемые прохождения фронтальных зон, циклонов и антициклонов сопряжены с характерными изменениями концентрации озона [10].

Периоды 1–7 сут характеризуют короткопериодные, локальные процессы (включая локальные синоптические процессы), которые обуславливаются как локальными характеристиками местности, например, распределением источников, наличием локальных циркуляций, так и влиянием внутренних гравитационных волн и т.д. Указанный диапазон не включает суточной изменчивости концентрации приземного озона.

Приведенное выше масштабирование периодичностей уже использовалось ранее для анализа временной изменчивости общего содержания озона [8].

2. Используемые данные

В работе были использованы данные измерений концентрации приземного озона, полученные на Европейской сети станций проекта ЕМЕР. Данные измерений приземного озона свободно доступны в Интернет (<http://www.nilu.no/projects/csc/>).

Сеть станций ЕМЕР образована в 1979 г., ее деятельность направлена на исследование изменчивости газового и аэрозольного состава атмосферы над Европой и оценке трансграничного транспорта загрязнений. На сети станций проводятся измерения концентрации озона и ряда предшественников. Сеть станций достаточно плотно расположена на территории Центральной и Северной Европы, три станции работают на территории России (см. на рис. 3 сеть станций, представленных частично).

Для анализа использовались ряды измерений концентрации приземного озона с временным разрешением 1 ч. Данные имеют высокое качество. Процент заполнения рядов составляет от 79 до 99%. Стандартным прибором для измерения концентрации озона на сети является DASIBI, точность измерений которого составляет 1 ppbv.

Для исследования особенностей распределения приземного озона были выбраны 90 станций с максимальной продолжительностью измерений 10 лет и более.

3. Методы анализа

Обработка данных проводилась в несколько этапов. На выбранных станциях производилась предварительная фильтрация данных с целью выделения спектрального диапазона, содержащего выделенные диапазоны изменчивости (выделение изменчивости от 3 мес до 1 сут). Предварительная фильтрация необходима для того, чтобы освободить ряд от годового и суточного периодов, на которые приходится более 50% изменчивости приземного озона. Фильтрация осуществлялась методом скользящего среднего с вычитанием. Данная процедура позволяет очистить ряд как от вариаций длиннее 3 мес, так и от короткопериодных (суточных и короче) вариаций. Отфильтрованные ряды затем использовались для оценки спектра изменчивости приземного озона на рассматриваемой сети станций.

Спектральный анализ проводился с использованием коррелограммного метода [11]. Преобразование Фурье реализовывалось в пакете Matematica 3.0. Далее оценивался процентный вклад исследуемых процессов в энергетический спектр.

Для анализа использовались уже обозначенные выше диапазоны периодов: 91–31, 30–19, 18–8 и 1–7 сут. Энергетический процентный вклад каждого из диапазонов в общий спектр рассчитывался по следующей формуле:

$$S = \frac{\sum_{i=n_{start}}^{n_{end}} (\text{Re}(b_i)^2 + \text{Im}(b_i)^2)}{\sum_{i=0}^N (\text{Re}(b_i)^2 + \text{Im}(b_i)^2)} 100\%,$$

где b_i – Фурье-коэффициенты; N – общее количество гармоник в анализируемом спектре; n_{start} и n_{end} – начальный и конечный номера гармоник анализируемых периодов.

Указанная обработка данных измерений проводилась для каждой станции и затем систематизировалась.

Было рассмотрено широтное распределение полученных оценок, и проведен их кластерный анализ как по вектору энергетических вкладов, так и с дополнительным учетом широты и долготы станций. Как было обнаружено в процессе анализа, второй из подходов является математически не совсем корректным, поскольку он естественным образом производит группировку по максимально влияющему параметру, т.е. группирует станции по широте и долготе.

Для классификации векторов энергетических вкладов применяется метод k -средних. Основы метода достаточно подробно представлены в литературе, например [12]. Кластерный анализ осуществляется в пакете статистических программ SPSS 8.0.

4. Результаты

Прежде всего, в работе исследовался вклад различных механизмов в изменчивость приземного озона в зависимости от широты станции наблюдения. Широтное распределение энергетических вкладов различных процессов приведено на рис. 1.

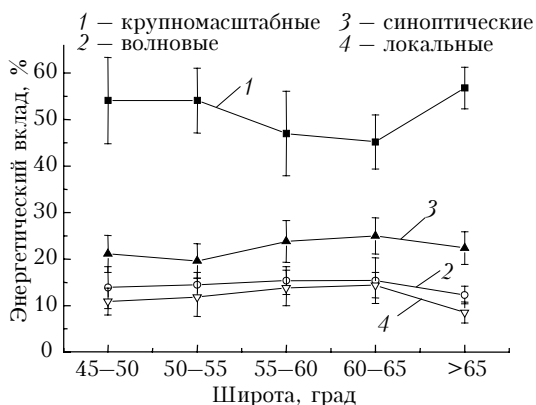


Рис. 1. Широтное распределение энергетического вклада различных компонент по данным спектрального анализа данных измерения приземного озона на сети станций ЕМЕР

Как видно из рис. 1, на долю наиболее низкочастотных крупномасштабных процессов приходится максимум энергии в спектре. Он имеет существенный широтный градиент с севера на юг, плавно уменьшаясь от 54% в диапазоне 45–50° до 44% – 60–65° с.ш. Поскольку крупномасштабные процессы являются частичным отражением сезонного хода, подобный широтный градиент демонстрирует естественную изменчивость освещенности и, следовательно, активность фотохимических процессов генерации озона из предшественников. Небольшой рост в последней широтной группе связан, вероятно, со случайным выбросом из-за малой статистики в высокой широтной группе (всего четыре станции).

Компонента планетарных волновых процессов имеет небольшой энергетический спектральный максимум в диапазоне 60–65° с.ш., что может быть обусловлено прохождением планетарной фронтальной зоны в этом регионе с возможным усилением стратосферно-тропосферного обмена, в частности посредством распространяющихся планетарных волн. Однако данный максимум является слабо выраженным. В среднем вклад компоненты планетарных волн в энергетический спектр вариаций составляет около 15%.

Энергетический вклад синоптической компоненты имеет небольшой широтный градиент со слабо выраженным максимумом в средних широтах. В среднем энергетический вклад синоптической компоненты не превышает 20%.

Энергетический вклад короткопериодной компоненты также имеет слабый широтный градиент, обратный градиенту крупномасштабных процессов. При переходе к более высоким широтам энергетический вклад короткопериодной компоненты растет. Энергетический вклад локальных процессов

является минимальным среди рассмотренных групп (около 10%).

Полученные пространственные градиенты показывают, что при переходе от низких к высоким широтам все меньшее количество энергии переносится долгопериодными вариациями, что связано с изменением условий освещенности и, следовательно, активностью фотохимических процессов генерации озона.

Чтобы оценить возможную пространственную изменчивость энергетических вкладов различных процессов в спектр вариаций приземного озона, проведен кластерный анализ векторов энергетических вкладов.

Кластеризация энергетических вкладов приведена на рис. 2. Географическое распределение кластеров приведено на рис. 3. Кластеры упорядочены в соответствии с ростом широты центров кластеров. В 1-й кластер (самый южный) попали три станции, одна из которых расположена в Португалии, а две другие – в Австрии и Словакии. Особенности данного кластера являются максимальный вклад крупномасштабной компоненты в наблюдаемые спектры вариаций и, следовательно, существенное влияние сезонного хода в наблюдаемую изменчивость.

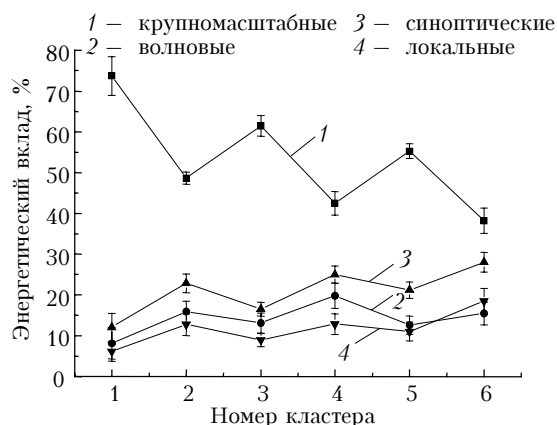


Рис. 2. Распределение по кластерам энергетического вклада различных компонент по данным спектрального анализа данных измерения приземного озона на сети станций ЕМЕР. Центры кластеров: 1 – (45,06° с.ш.; 10,05° в.д.); 2 – (50,58; 5,49); 3 – (51,9; 10,89); 4 – (52,45; 14,54); 5 – (54,24; 10,76); 6 – (54,35; 7,65)

Как видно из рис. 2, результаты кластерного анализа согласуются с результатами широтного анализа энергетических вкладов. Минимальный вклад (38%) крупномасштабных процессов отмечается в 6-м, самом северном, кластере. Максимальный вклад волновой компоненты (около 20%) наблюдается в 4-м кластере. Особенностью 4-го кластера является то, что в него входят как четыре станции вдоль 48° с.ш., расположенные в Альпах, так и ряд станций, находящихся на Балтийском побережье. В этом же кластере наблюдается относительно высокий вклад синоптических процессов (около 25%). Существенный вклад синоптической компоненты в этом кластере по сравнению с остальными кла-

стерами связан, вероятно, с тем, что в него попал ряд приморских станций. Сравнительно высокий энергетический вклад долгопериодной компоненты в 3-м кластере соответствует в основном континентальным районам средней полосы, хотя трудно назвать расположение станций кластера значительно локализованным. Максимальный вклад локальной и синоптической компонент в энергетический спектр среди выделенных кластеров наблюдается в самой северной группе. Интересным фактом является то,

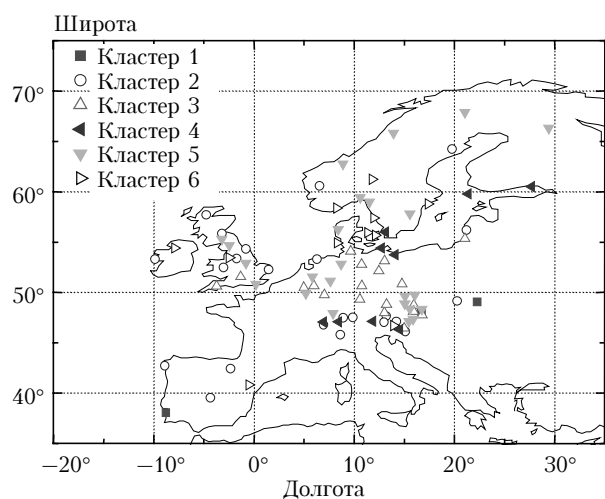


Рис. 3. Географическое распределение кластеров по энергетическим вкладам различных компонент

что в этом кластере почти все станции приморские. Исключение составляет высокогорная станция АТ38 (1900 м над ур. м.), где крупномасштабные синоптические процессы обуславливают 30% энергетического вклада в выбранном диапазоне периодов.

Отмеченные пространственные неоднородности в расположении кластеров демонстрируют сложную картину распределения влияющих процессов над Европой и сложность однозначного описания их пространственного распределения. Детальная интерпретация полученных результатов возможна с привлечением описания условий наблюдения на каждой из станций конкретного кластера.

Заключение

Для анализа предварительных результатов спектрально-кластерного анализа вариаций концентрации приземного озона над Европой использовались данные наблюдений приземного озона на Европейской озонметрической сети ЕМЕР. Построенные оценки энергетических вкладов различных процессов — от локальных до крупномасштабных — позволили выявить ряд интересных особенностей пространственной изменчивости приземного озона.

В статье показано, что энергетические спектральные вклады крупномасштабной компоненты имеют широтный градиент с севера на юг. Это обусловлено тем, что данный масштаб максимально отражает активность фотохимических процессов, связанных с широтным градиентом освещенности,

среди рассматриваемых периодов. В остальных рассмотренных компонентах это влияние существенно слабее. Энергетический подход позволяет выделить диапазон 55–60° с.ш. как зону наиболее активного влияния волновых процессов.

Применение кластеризации к анализу пространственных неоднородностей вариаций приземного озона позволило выделить ряд характерных кластеров на территории Европы. В частности, как и при широтном усреднении, в отдельный кластер попал ряд станций, расположенных в самом южном и в самом континентальном районах Европы, имеющих максимальный вклад крупномасштабной компоненты. Локализовалось в отдельный кластер и большое число континентальных станций, где также существен вклад крупномасштабной компоненты. Вклады компонент для разных кластеров могут различаться почти в два раза, что особенно ярко выражается в изменчивости вклада крупномасштабных синоптических процессов. Однако, как показывает анализ, выделенные кластеры в значительной степени определяются условиями наблюдений, поэтому для дальнейшей интерпретации полученного пространственного распределения энергетических вкладов необходимо получить информацию об условиях наблюдений.

Проведенный анализ еще раз выявил чрезвычайно сложные механизмы формирования режима приземной концентрации озона в неоднородных физико-географических условиях и условиях загрязнения Европы.

Выявленные закономерности укладываются в общие представления о распределении механизмов, управляющих режимом приземного озона. В частности, характерный рост эффективного вклада волнового и более короткопериодных диапазонов при переходе от 45 до 65° с.ш. хорошо укладывается в модель трехячейковой структуры поля скорости ветра зональной климатической модели, развитой в [13]. Эта модель также демонстрирует оцененный в работе отрицательный градиент энергетического вклада волнового и более короткопериодных диапазонов изменчивости.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 03-05-64712 и INTAS 01-0016.

1. Еланский Н.Ф., Звягинцев А.М., Тарасова О.А. Исследования тропосферного озона в Европе и России // Метеорол. и гидрол. 2003. № 1. С. 125–128.
2. Roemer M. Trends of ozone and related precursors in Europe. Status report. TOR-2. Task group 1. Apeldoorn: TNO-report № R-2001/244, 2001. 60 p.
3. TOR-2 (Tropospheric Ozone Research), Final Report. International Scientific Secretariat (ISS), GSF, Munich, Germany, 2003. 168 p.
4. Tarasova O.A. and Karpetchko A.Yu. Accounting for local meteorological effects in the ozone time-series of Lovozero (Kola Peninsula) // Atmos. Chem. Phys. 2003. V. 3. P. 941–949.
5. Бьзова Н.Л., Иванов В.Н., Грагер Е.К. Турбулентность в пограничном слое атмосферы. Л.: Гидрометиздат, 1989. 263 с.
6. Cvitas T. et al. Spectral analysis of boundary layer ozone data from the EUROTRAC TOR network //

- J. Geophys. Res. 2004. V. 109. D02302. 2004. doi:10.1029/2003JD003727.
7. *Шакина Н.П.* Гидродинамическая неустойчивость в атмосфере. Л.: Гидрометиздат, 1990. 308 с.
 8. *Хргуан А.Х., Кузнецов Г.И.* Проблемы наблюдений и исследования атмосферного озона. М.: Изд-во МГУ, 1981. 216 с.
 9. *Jadin E.A.* Arctic and Antarctic Oscillations, Ozone Changes and SST anomalies// Abst. Int. Symp. on Stratospheric Variations and Climate. Kyushu University, Fukuoka, Japan. 2002. P. 16–19.
 10. *Kuznetsova I.N., Elansky N.F., Senik I.A.* Measurements of the tropospheric ozone concentration over the Kislovodsk High Altitude Station: Synoptic scale meteorological processes as a cause of ozone variations // *Izvestiya RAS, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2001. V. 37. Suppl. 1. P. 120–130.
 11. *Марпл-мл. С.Л.* Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 584 р.
 12. *Айвазян С.А., Бежаева З.И., Староверов О.В.* Классификация многомерных наблюдений. М.: Статистика, 1974. 240 с.
 13. *Петухов В.К.* Зональная климатическая модель тепло- и влагообмена в атмосфере над океаном // *Физика атмосферы и проблема климата*. М.: Наука, 1980. С. 8–41.

O.A. Tarasova, G.I. Kuznetsov, I.S. Zakharov. **Spectral analysis application to the investigation of the surface ozone variations over Europe.**

The paper presents the preliminary results of spectral-cluster analysis of variations of the surface ozone concentration measured at the European ozone network of the EMEP project. The analysis of the energetic contributions of different processes ranging from local to largescale in four selected period groups from 91 to 1 day was carried out. It was shown that the energetic spectral contributions of the largescale processes are growing from the North to the South with the decrease of contribution of more short-term processes. Clustering of the energetic contributions reveals the substantial spatial non-uniformity of the processes governing surface ozone regime over Europe.