

ГЕОФИЗИКА

УДК 551.510.5

**ОСОБЕННОСТИ СЕЗОННЫХ ВАРИАЦИЙ И ТРЕНДОВ
КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИЗЕМНОГО ОЗОНА НА КИСЛОВОДСКОЙ
ВЫСОКОГОРНОЙ НАУЧНОЙ СТАНЦИИ****О. А. Тарасова, Г. И. Кузнецов, Н. Ф. Еланский, И. А. Сеник, И. А. Сметник***(кафедра физики атмосферы)*

E-mail: atm554@nabla.phys.msu.su

На основании измерений концентрации приземного озона и метеорологических параметров на Кисловодской высокогорной научной станции было проведено исследование влияния относительной влажности, уровня персентайлей и величины накопления NO_x вдоль обратных траекторий движения воздушных масс на особенности сезонных вариаций и трендов озона. Полученные формы сезонного хода и значения трендов по отдельным выборкам позволили качественно описать вклад различных процессов в вариации приземного озона. Анализ результатов показал, что вклад фотохимических процессов в режим приземного озона на станции невелик. Построенная эмпирическая модель приземной концентрации озона по метеорологическим параметрам с учетом сезонного хода позволяет объяснить до 65% вариаций концентрации озона.

Введение

Хотя только 10% атмосферного озона находится в тропосфере и его концентрация здесь не превышает 100 ppb (частиц на миллиард частиц воздуха [1]), он является основным участником фотохимических процессов, определяя баланс большинства атмосферных газов, содержащихся в атмосфере в качестве естественных или антропогенных составляющих. Его источниками в приземном слое является генерация из веществ-предшественников или перенос, как горизонтальный, так и вертикальный [2]. Неравномерность распределения источников загрязняющих веществ, являющихся предшественниками озона, и разнообразие динамических процессов в атмосфере приводят к существенной неоднородности полей концентрации приземного озона [3]. При этом неоднородность характерна не только для распределения самих концентраций, но и для долговременных тенденций их изменения — трендов [4].

Особое место при изучении вариаций концентрации приземного озона уделяется станциям, удаленным от крупных источников загрязнения. К ним относятся высокогорные станции. Их положение позволяет анализировать такие процессы, как вертикальный обмен озоном между приземным слоем и свободной тропосферой и между тропосферой и стратосферой, адвективный перенос озона из различных регионов, а также локальные процессы образования и разрушения озона в приходящих воздушных массах.

Уникальное положение в системе мониторинга концентрации приземного озона занимает Кисловодская высокогорная научная станция (КВНС) [5]. Она удалена как от европейских, так и от мест-

ных источников эмиссии предшественников озона. Предварительный анализ показал [5, 6], что режим приземного озона на КВНС во многом отличается от закономерностей, наблюдаемых в изменчивости приземного озона на Альпийских станциях. Более подробный анализ указанных различий позволит определить механизмы их формирования.

Целью настоящей работы является исследование влияния некоторых параметров на сезонные вариации и тренды концентрации приземного озона на КВНС.

1. Наблюдения

Измерения концентрации приземного озона проводятся на КВНС, находящейся на Северном Кавказе (43.7 с.ш., 42.7 в.д., 2070 м над уровнем моря), с марта 1989 г. по настоящее время. Станция расположена в зоне альпийских лугов на плато, входящем в горную систему Скалистого хребта. На расстоянии 18 км на северо-восток находится курортный город Кисловодск. В окрестностях станции отсутствуют мощные источники загрязнения.

Измерения концентрации озона на КВНС проводятся с помощью газоанализатора Dasibi-1008 АН. Инструментальная погрешность измерений составляет 1 ppb. Условия наблюдений и особенности географического положения станции подробно обсуждаются в статье [5]. Для анализа многолетних результатов измерений использовались метеорологические данные и обратные траектории движения воздушных масс.

Двумерные обратные траектории, построенные на предшествующие четверо суток, имеют разрешение 6 часов и закрывают только период 1988–1996 гг.

Они рассчитаны Норвежским институтом исследований атмосферы (NILU) с использованием программы расчета двумерных траекторий системы ЕМЕР и метеорологических данных, обеспеченных проектами ЕМЕР/МСС-W Норвежского метеорологического института [7].

2. Результаты

Выборка по перцентайлям

Первой задачей при анализе вариаций концентрации приземного озона является выборка репрезентативных значений для каждой станции. В рамках проекта TOR-2 [8] было использовано несколько подходов к получению таких значений, одним из которых является выборка по перцентайлям.

Уровень значимости данных может составлять различное количество перцентайлей, так как эти уровни определяются различными атмосферными процессами. Как показано в техническом отчете по проекту TOR-2 за 1996 г. [9], для станции Rørvik репрезентативные значения концентрации приземного озона соответствуют уровню 51–53 перцентайлей от всего ряда данных для зимних условий и 70–75 перцентайлей для летних. Для других станций этот уровень может быть другим [10]. Особенностью выборок по перцентайлям является их неприменимость для регионов с мощными локальными источниками.

В связи с различием атмосферных процессов, формирующих определенные уровни концентрации, можно оценить их влияние на сезонные вариации и тренды концентрации приземного озона. Анализ различных уровней перцентайлей на КВНС (таблица) показал, что для всех выборок наблюдается значительный отрицательный тренд. Его величина максимальна для низких значений концентрации ($-2.1 \pm 0.3\%/год$) и минимальна для высоких значений ($-1.5 \pm 0.3\%/год$). Следует заметить, что на альпийских высокогорных станциях наблюдается противоположное распределение величин трендов, и с ростом концентрации тренд меняется от слабо-

положительного (для уровней концентрации озона от 1 до 50 перцентайлей) до отрицательного (значения концентрации выше медианных). Для большинства европейских станций происхождение отрицательного тренда максимальных значений концентрации приземного озона связывается с введением ограничений на выбросы предшественников озона и, следовательно, с уменьшением его фотохимической генерации.

На КВНС фотохимический источник озона ослаблен. Высокие значения концентрации озона могут быть связаны либо с его опусканием из свободной тропосферы, где содержание озона выше, чем в тропосфере, и более стабильно, либо с его адвекцией из загрязненных областей (где наблюдается значительный отрицательный тренд). Немаловажное значение могут иметь и другие явления. Поскольку низкие уровни концентрации связаны с переносом озона из низлежащих слоев атмосферы за счет горно-долинной циркуляции, то их значительный отрицательный тренд может быть связан с существенным уменьшением локальных выбросов загрязняющих веществ, или, другими словами, с ослаблением локальных источников загрязнения. Поскольку анализ проводится для периода промышленно-экономического кризиса в России, то значительный отрицательный тренд минимальных значений, по-видимому, следует связывать именно с этим процессом.

Подобное различие в трендах различных уровней перцентайлей позволяет предположить, что долговременные изменения концентрации приземного озона на европейских озонометрических станциях и на КВНС определяются соотношением динамического (определяемого переносом) и фотохимического (определяемого локальными условиями загрязнения) факторов. Исходя из этого предположения, можно заключить, что поскольку и в России, и в Европе уменьшается уровень предшественников озона, то фотохимический тренд будет иметь одинаковый знак (отрицательный) и только условия переноса будут определять существенные различия между средними величинами реально наблюдаемых изменений концентрации приземного озона.

Различие в механизмах формирования различных уровней перцентайлей проявляется не только в трендах, но и в форме среднего сезонного хода (рис. 1). Для высоких уровней концентрации наблюдается выраженный двойной сезонный максимум, причем летние значения превышают весенние на величину, большую уровня инструментальной ошибки. Весенний максимум концентрации приземного озона обычно связывают с увеличением притока озона из верхних слоев атмосферы, где весной наблюдается сезонный максимум, а летний — с активной фотохимической генерацией озона из предшественников. Принимая во внимания эти особенности, можно заключить, что формирование летнего максимума высоких значений определяется фотохимическим

Т а б л и ц а

Тренды концентрации приземного озона на КВНС для различных выборок по параметрам

Выборки	Тренд	Период
10 перцентайлей	$-2.1 \pm 0.3\%$ в год	1989–2000
25 перцентайлей	$-1.9 \pm 0.3\%$ в год	1989–2000
50 перцентайлей	$-1.7 \pm 0.3\%$ в год	1989–2000
75 перцентайлей	$-1.6 \pm 0.3\%$ в год	1989–2000
95 перцентайлей	$-1.5 \pm 0.3\%$ в год	1989–2000
относительная влажность > 60%	$-2.0 \pm 0.6\%$ в год	1991–2000
относительная влажность < 60%	$-2.2 \pm 0.6\%$ в год	1991–2000
$NO_x < 0.9\langle NO_x \rangle$	$-1.66 \pm 0.12\%$ в год	1989–1996
$NO_x > 1.1\langle NO_x \rangle$	$-1.82 \pm 0.16\%$ в год	1989–1996

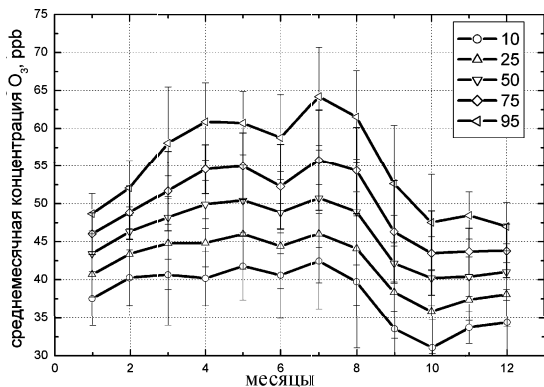


Рис. 1. Средний многолетний сезонный ход концентрации приземного озона для различного уровня перцентайлей на КВНС за период 1989–2000 гг.

механизмом (либо за счет генерации озона из принесенных в пункт наблюдения предшественников, либо за счет непосредственной адвекции озона из районов его генерации). Для низких уровней концентрации различие между величинами весеннего и летнего максимумов лежит в пределах инструментальной погрешности прибора.

Выборка по влажности

Особое значение имеет анализ сезонных вариаций и трендов концентрации приземного озона для выборок по уровню относительной влажности. Для сравнения режима озона на КВНС с другими высокогорными станциями была выбрана величина 60%.

Формальный анализ трендов внутри выборок по влажности показал, что для группы с высокой относительной влажностью, превосходящей 60%, его величина составляет $-2.2 \pm 0.6\%$ в год, а для группы с низкой влажностью величина тренда приземного озона составляет $-2.0 \pm 0.6\%$ в год. Хотя различие в величинах лежит в пределах стандартного отклонения, можно заключить, что для воздуха свободной тропосферы, который попадает в группу низкой влажности, тренд концентрации озона в среднем несколько меньше, чем для группы с высокой влажностью. Аналогичные особенности трендов для различного уровня влажности регистрируются на станции Цугшпитце в Альпах, но с противоположным знаком [10].

Происхождение воздуха из свободной тропосферы для группы с низкой влажностью подтверждается также особенностями сезонных вариаций: наличие двойного сезонного максимума для выборки с низкой влажностью и единственного сезонного максимума для выборки с высокой влажностью (рис. 2). Величина весеннего максимума превышает величину летнего для выборки с низкой влажностью. Формирование сезонных вариаций в группе с низкой влажностью можно объяснить активностью стратосферно-тропосферного обмена в весенние (апрель–май) и летние (июль–август) месяцы в зоне сближения тропической тропопаузы и тропопаузы средних широт (в высотной планетарной фронтальной зоне).

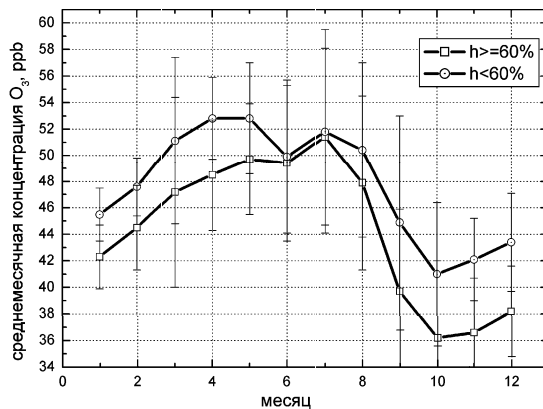


Рис. 2. Средний многолетний сезонный ход концентрации приземного озона для различного уровня относительной влажности на КВНС за период 1991–2000 гг.

Выборку с высокой влажностью отличает наличие единственного сезонного максимума летом. Происхождение этого максимума определяется, скорее всего, фотохимическим механизмом.

Выборка по уровню накопления NO_x вдоль обратных траекторий

В отличие от выборок по влажности, которые характеризуют влияние динамических процессов на режим концентрации приземного озона, анализ уровней предшественников вдоль обратных траекторий движения воздушных масс позволяет оценить влияние фотохимического фактора на сезонные вариации и тренды концентрации приземного озона.

Для выделения чистой и умеренно загрязненной воздушных масс были сделаны выборки с уровнями накопления NO_x 0.9 и 1.1 от среднего уровня вдоль обратных траекторий соответственно.

Тренд концентрации приземного озона заметно отличается для разных выборок по загрязнению. Для высоких значений концентрации окислов азота величина тренда составляет $-1.82 \pm 0.16\%$ в год, в то время как для низкого содержания окислов азота эта величина составляет $-1.66 \pm 0.12\%$ в год. Особенностью сезонных вариаций (рис. 3) при таком

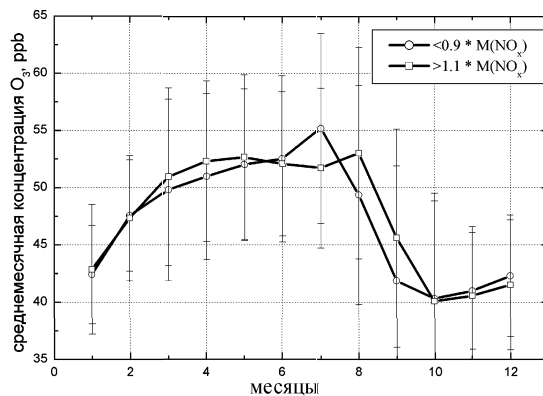


Рис. 3. Средний многолетний сезонный ход концентрации приземного озона на КВНС для различного уровня накопления NO_x вдоль обратных 4-суточных траекторий движения воздушных масс за период 1989–1996 гг.

методе разбиения на выборки является наличие двойного максимума концентрации приземного озона (май и август) для группы с высокими значениями накопления NO_x вдоль траектории и единственный сезонный максимум в июле для группы с низкими значениями NO_x . Различие в сезонных вариациях по этим двум выборкам мало и не позволяет сделать строгих выводов о различии в механизмах их формирования.

3. Регрессионная модель оценки влияния метеорологических параметров

Одним из возможных методов анализа влияния исследуемых факторов на режим приземного озона является построение приближенных эмпирических моделей, например на основе метеорологических параметров.

Для построения эмпирической модели приземной концентрации озона C были рассмотрены ее связи со следующими параметрами: 1) атмосферным давлением p , мбар; 2) приземной температурой T , °C; 3) относительной влажностью h , %; 4) разностью давлений между соседними сутками dp .

Модель строилась следующим образом. На первой стадии исходный ряд приземной концентрации озона и каждого из независимых параметров $F_s(d)$ (на место индекса s может быть подставлен любой из параметров: C , p , T , h , dp) представляли в виде суммы нормального годового хода $F_{sy}(d)$ и остатка $R_s(d)$:

$$F_s(d) = F_{sy}(d) + R_s(d).$$

Нормальный годовой ход $F_{sy}(d)$ представляли в виде суммы постоянной $F_{s0}(d)$, линейной и гармонических составляющих с периодом $T = 365$ дней:

$$F_{sy}(d) = F_{s0}(d) + N_s d + A_s \cos(2\pi d/T) + B_s \sin(2\pi d/T).$$

Модельное значение приземной концентрации озона M_c выглядит следующим образом:

$$M(d) = F_{sy}(d) + \sum K_s R_s(d),$$

где K_s — коэффициент регрессии для метеопараметра s .

Модель построена только для тех участков ряда, где имеются все входные параметры (озон и метеопараметры). Количество таких участков ограничено. Результаты моделирования приведены на рис. 4. Как видно из графика, модель достаточно хорошо описывает вариации приземного озона.

Модель объясняет до 65% вариаций концентрации приземного озона при учете только метеорологических параметров и параметризации сезонного хода. В дальнейшем модель будет усовершенствована для лучшего объяснения изменчивости озона.

Заключение

В работе был проведен анализ влияния различных факторов на тренды и сезонные вариации концентрации приземного озона на Кисловодской высокогорной научной станции. Для анализа использовались выборки по уровню персентайлей, относительной

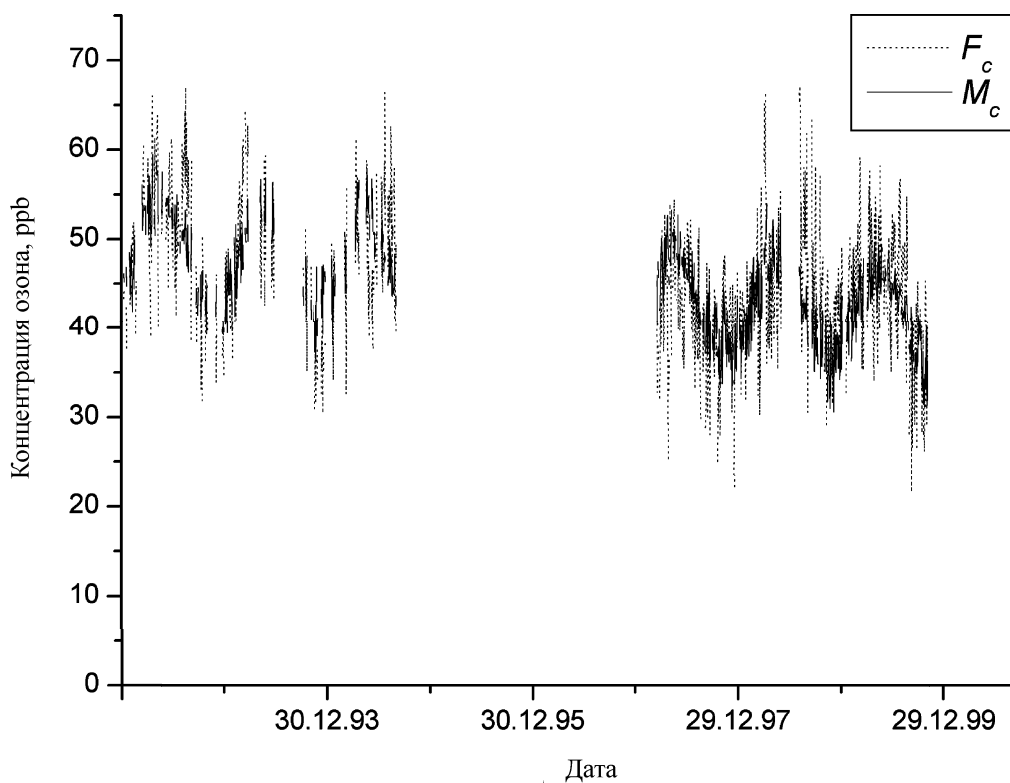


Рис. 4. Сравнение среднесуточных концентраций озона на КВНС (F_c) и результатов регрессионной модели (M_c)

влажности и уровню окислов азота вдоль обратных траекторий движения воздушных масс.

При увеличении уровня персентайлей (от 10 до 90%) в соответствующих выборках наблюдается последовательное уменьшение отрицательного тренда от -2.1 до -1.5% в год. Существенное отличие величин трендов на КВНС от наблюдаемых в Европе связано, видимо, с отсутствием заметных фотохимических источников озона в районе станции и с особенностями динамических процессов, формирующих режим приземного озона.

Выборки по уровню относительной влажности показывают слабое отличие в величинах трендов, однако форма сезонных вариаций концентрации приземного озона различна. Если в выборке с высокой влажностью наблюдается единственный сезонный максимум летом, имеющий фотохимическое происхождение, то для выборки с низкой влажностью сезонный максимум является двойным. Весенние концентрации приземного озона в условиях низкой влажности превышают летние, что подтверждает идею об активности вертикального обмена в этой группе.

Анализ вариаций концентрации приземного озона в выборках по уровню накопления окислов азота вдоль обратных траекторий не выявил существенных различий в форме сезонного хода между группами. Для выборок с уровнем NO_x более 1.1 и менее 0.9 от средней величины оцененные тренды различны. Большой отрицательный тренд наблюдается для высокого уровня NO_x и меньший — для малых значений, что согласуется с идеей о частично фотохимическом происхождении тренда концентраций приземного озона.

На основе измеренных метеопараметров построена регрессионная модель приземной концентрации озона на КВНС. Модель объясняет до 65% вариаций концентрации приземного озона за счет изменения метеорологических параметров с учетом параметризации сезонного хода.

Полученные в настоящей работе оценки влияния различных факторов на тренды и сезонные вариации

приземного озона на высокогорной станции являются новыми. Важно, что полученные результаты существенно отличаются от результатов аналогичных исследований на высокогорных станциях Центральной Европы, географическое положение которых и окружающий фон источников предшественников озона существенно сложнее, чем для КВНС. Это открывает возможности для дальнейшего сравнительного исследования соотношения динамических и фотохимических факторов формирования тренда приземного озона в различных регионах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 00-05-64742, 03-05-64712 и 01-05-64402, и INTAS, грант 01-0016.

Литература

1. *Crutzen P.J.* // Tropospheric Ozone. 1998. **227**. P. 3.
2. *Memmesheimer M., Bock H., Ebel A.* et al. // Tropospheric ozone research: tropospheric ozone in the regional and sub-regional context. Berlin, 1997. P. 153.
3. *Scheel H., Ancellet G., Areskoug H.*, et al. // Tropospheric ozone research: tropospheric ozone in the regional and sub-regional context. Berlin, 1997. P. 35.
4. *Roemer M.* // Trends of ozone and related precursors in Europe. Status report. TOR-2. Task group 1. TNO-report No. R-2001/244. 2001. Apeldoorn.
5. *Сеник И.А., Еланский Н.Ф.* // Изв. АН, ФАО. 2001 (в печ.).
6. *Elansky N.F., Markova T.A., Senik I.A.* et al. // TOR-2 (Tropospheric Ozone research) Annual Report—1999. 2001. P. 65.
7. *Solberg S., Stordal F., Hov O.* // J. Atmos. Chem. 1997. **28**, No. 1–3. P. 111.
8. TOR-2 (Tropospheric Ozone Research), Annual Report 2000. ISS. Munich, Germany, 2001.
9. TOR-2 (Tropospheric Ozone Research), Annual Report 1996. ISS. Munich, Germany, 1997.
10. *Gomisek B., Ciglar R., Scheel H.E., Veber M.* // Proc. of EUROTRAC Symposium / Eds. P.M. Borrell and P. Borrell. Southampton, 1999. P. 292.

Поступила в редакцию
03.06.02