

О.А. Тарасова

Методы оценки трендов концентрации приземного озона на Кисловодской высокогорной научной станции

Московский государственный университет

Поступила в редакцию 28.11.2002 г.

Анализируются методы оценок трендов концентрации приземного озона на основе измерений, ведущихся на Кисловодской высокогорной научной станции за период с 1989 г. по настоящее время. Рассмотрены статистические методы, фильтрация по различным параметрам и моделирование метеорологически скорректированного тренда. Показано, что первая группа методов подтверждает наличие статистически значимых отрицательных трендов приземного озона, методы фильтрации позволяют выделить механизмы этих изменений. Интегрированный вклад метеорологических факторов в изменчивость концентрации приземного озона составляет около 30%.

Введение

Исследования долговременной изменчивости приземного озона имеют особое значение. Стимулом этих исследований послужили впервые зафиксированные случаи существенных повреждений растений при смоговых ситуациях в Лос-Анджелесе. Недавние московские пожары 2002 г., приведшие к появлению смога, привлекли внимание широкого круга специалистов в нашей стране к проблемам приземного озона.

Чтобы исследовать факторы, определяющие изменчивость приземного озона в Европе, с конца 80-х гг. начала действовать программа EUROTRAC по изучению изменчивости химического состава атмосферы. В Москве на физическом факультете МГУ 8–12 сентября 2002 г. проходило Рабочее совещание по исследованиям тропосферного озона в рамках подпрограммы TOR-2 (Tropospheric Ozone Research – исследования тропосферного озона), входящей в состав программы EUROTRAC-2. На нем отмечалось, что наряду с существенным продвижением в понимании озонной климатологии так и остался недостаточно понятным вклад различных процессов в формирование трендов приземного озона. Кроме того, особенностью работ по анализу трендов в Европе является различие методик их оценки, что зачастую затрудняет не только сравнение станций между собой, но и внутреннюю интерпретацию механизмов изменчивости.

Основная цель данной работы заключается в гармонизации методов и подходов к исследованиям трендов концентрации приземного озона на примере Кисловодской высокогорной научной станции и оценке их внутренней согласованности и возможности использования для разделения вкладов различных механизмов в формирование тренда.

Измерения

Кисловодская высокогорная научная станция (КВНС), находящаяся на Северном Кавказе (43,7° с.ш., 42,7° в.д., 2070 м над уровнем моря), занимает уникальное положение в системе мониторинга концентрации приземного озона [10]. Она удалена как от европейских, так и от местных источников эмиссии предшественников озона и может быть рассмотрена как фоновая станция.

Измерения концентрации приземного озона проводятся на КВНС с марта 1989 г. по настоящее время (рис. 1). Измерения метеорологических параметров были начаты в 1991 г.

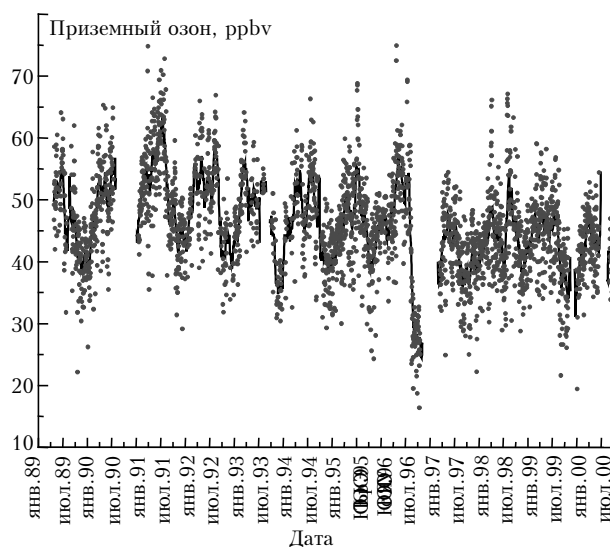


Рис. 1. Среднесуточные значения (точки) концентрации приземного озона на Кисловодской высокогорной научной станции и 30-дневное скользящее среднее (сплошная линия) за доступный период 1989–2000 гг.

Предварительный анализ показал [2], что режим приземного озона на КВНС во многом отличается от закономерностей, наблюдаемых в изменчивости приземного озона на альпийских станциях. Основной особенностью изменчивости приземного озона является наличие отрицательного тренда в ряду наблюдений. Тринадцатилетний ряд наблюдений позволяет применять различные методы оценки трендов концентрации приземного озона.

2. Статистические методы

В группу статистических методов оценки трендов могут быть отнесены методы, основывающиеся на преобразованиях исходного ряда наблюдений. Подробное описание часто используемых статистических методов можно найти в [4]. Среди них можно выделить графический метод, линейные регрессионные модели, модель авторегрессионного процесса и ряд статистических тестов. Некоторые из этих методов были использованы для оценок трендов концентрации приземного озона на КВНС.

2.1. Линейная регрессия по времени

Построение временного графика концентрации и оценка угла наклона прямой линейной регрессионной модели дают оценку линейного тренда в ряду измерений. Для проверки достоверности оценки линейного тренда может быть использован t -тест. Применение этого метода выявляет существенный отрицательный тренд концентрации приземного озона на КВНС [$-1,75 \pm 0,4$]% в год за период 1989–2000 г.]. Аналогичные оценки получены для отдельных выборок, определяемых условиями наблюдений. Например, значения трендов получены для различных месяцев (табл. 1), для различных уровней концентраций (персентайлей) и для ночных условий [$-1,4 \pm 0,35$]% в год], соответствующих времени формирования на КВНС суточного максимума.

Таблица 1
Оценки трендов концентрации приземного озона на КВНС за период 1989–2000 г. с использованием линейной регрессии по времени для различных месяцев

Месяц	Величина тренда, % в год
Январь	$0,06 \pm 0,96$
Февраль	$-1,21 \pm 0,53$
Март	$-1,71 \pm 0,65$
Апрель	$-1,27 \pm 0,43$
Май	$-1,63 \pm 0,53$
Июнь	$-2,2 \pm 0,67$
Июль	$-1,86 \pm 1,1$
Август	$-2,45 \pm 1,4$
Сентябрь	$-2,1 \pm 1,3$
Октябрь	$-2,01 \pm 1,1$
Ноябрь	$-0,5 \pm 0,62$
Декабрь	$-1,12 \pm 0,81$

Как видно из табл. 1, для большинства месяцев наблюдается значительный отрицательный тренд. Слабоотрицательный и даже положительный

тренд, не являющийся статистически значимым, наблюдается только в ноябре – январе.

Применение метода линейной регрессии для оценки величин трендов для выборок различных уровней концентрации – персентайлей – может быть эффективным способом выявления тех или иных механизмов его формирования. Анализ различных уровней персентайлей на КВНС 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]. Примечательно, что на альпийских высокогорных станциях Европы наблюдается противоположное распределение величин трендов, а именно: с ростом концентрации тренд меняется от слаболожительного (для уровней концентрации озона от 1 до 50 персентайлей) до отрицательного (значений концентрации выше медианных) [5]. Для большинства европейских станций происхождение отрицательного тренда максимальных значений концентрации приземного озона связывается с введением ограничений на выбросы предшественников озона, иначе говоря, с ослаблением фотохимического механизма его генерации.

Такие различия являются косвенным указателем на различие механизмов формирования трендов на горных станциях Европы и КВНС. Если исходить из того, что долговременные изменения концентрации приземного озона на высокогорных европейских озонметрических станциях и на КВНС определяются, в основном, соотношением динамического (определяемого переносом) и фотохимического (определяемого локальными условиями загрязнения) факторов, то 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 трендов концентрации приземного озона [11].

2.2. Тест Менн–Кендалла

Непараметрический тест Менн–Кендалла был использован для оценки трендов концентрации приземного озона на КВНС. Применение этого теста удобно, поскольку процедура не чувствительна к присутствию в рядах пропущенных значений, кроме того, данные могут иметь любое распределение. В анализе могут учитываться данные, которые лежат ниже пределов чувствительности прибора, путем приписывания им значения, которое ниже, чем минимальное измеренное. Такое допущение оправдано тем, что в тесте используются не сами измерения, а их относительные величины: 1 – если $x_i < x_{i+1}$, 0 – если $x_i = x_{i+1}$, -1 – если $x_i > x_{i+1}$. Идея теста состоит в проверке нуль-гипотезы об отсутствии тренда путем расчета нормированных статистических сумм и их последующего сравнения с таблицами нормального распределения. Компью-

терная реализация сезонного кендалловского теста выполнена в виде макроса «MULTIMK» Андресом Гримвалем (Линкепинский университет сельского хозяйства, Англия) [12]. Результаты расчетов для КВНС приведены в табл. 2, из которой видно, что практически для всех сезонов с высокой степенью вероятности существует отрицательный тренд в массиве данных.

кой влажностью, тренд концентрации озона в среднем несколько меньше, чем для группы с высокой влажностью.

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

Таблица 2
Результаты сезонного кендалловского теста за период 1989–1999 гг. на КВНС

Месяц	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III
Нормальная статистика	-1,88	-2,41	-2,72	-1,70	-1,67	-2,50	-2,06	-0,99	-0,49	-0,83	-1,73	-2,77
Вероятность отвергнуть нуль-гипотезу	D**	D***	D***	D**	D**	D***	D**	D	—	D	D**	D***

Исключение составляют зимние месяцы (соответствующие значения доверительной вероятности: D^{***} – более 0,99, D^{**} – более 0,95, D – более 0,75). Указанные вероятности находятся в хорошем качественном согласии с оценками метода линейной временной регрессии.

3. Методы фильтрации

Для качественной оценки влияния определенных механизмов, влияющих на долговременные изменения концентрации приземного озона, анализ трендов проводится в выборках, выполненных по определенному параметру. В качестве параметров фильтрации могут выступать как метеорологические условия (например, уровень относительной влажности, скорость ветра, направление переноса, сектор прихода обратной траектории), так и концентрации отдельных газовых компонентов – предшественников озона. Выбор в качестве физического фильтра уровня концентрации СО или окислов азота позволяет анализировать тренды в более или менее загрязненных воздушных массах.

В качестве метеорологического параметра фильтрации был выбран уровень относительной влажности 60%, аналогичный выбираемому при фильтрации данных на европейских высокогорных станциях. При этом предполагается, что выборкам с уровнями влажности ниже 60% соответствуют в среднем преобладающие нисходящие движения в месте наблюдения более сухих воздушных масс и наоборот. Поэтому динамика трендов в выборках по влажности отражает влияние процессов вертикального обмена на изменчивость приземного озона. Регрессионный 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 с низ-

влияние фотохимического фактора на 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 трасс обратных траекторий соответственно. Тренд концентрации приземного озона заметно отличался для разных выборок по загрязнению. Для высоких значений концентрации окислов азота величина тренда составляла $(-1,82 \pm 0,16)\%$ в год, в то время как для низкого содержания окислов азота эта величина составляет $(-1,66 \pm 0,12)\%$ в год. Такие величины еще раз подтверждают, что мощность локального фотохимического источника приземного озона убывает за счет уменьшения привносимых предшественников.

Влияние дальнего переноса на тренды концентрации приземного озона на КВНС подробно обсуждалось нами ранее в статье [9]. Важно отметить, что распределение секторов переноса меняется год от года. Было выделено среднее влияние каждого сектора, и показано, что повторяемость переноса из секторов с повышенным содержанием озона уменьшается за период наблюдений. Этот факт позволяет сделать предположение о частично динамической природе отрицательного тренда концентрации приземного озона на КВНС.

4. Моделирование метеорологически скорректированного тренда

Первые попытки разделения временных масштабов вариаций приземного озона были сделаны в работе [3]. В ней описана регрессионная модель выделенной сезонной компоненты на основе температуры и точки росы.

Для того чтобы учесть влияние долговременных изменений локальных метеорологических условий на тренды концентрации приземного озона, на КВНС была разработана многопараметрическая регрессионная модель, включающая в себя температуру, относительную влажность, давление и скорость ветра. Метеорологические переменные были

выбраны как стандартно использующиеся в моделях учета влияния метеорологических условий на приземный озон [1, 8]. Построение модели проводилось в три этапа.

На первом этапе разделяются временные вариации различных масштабов – сезонные вариации с периодами более 3 мес и ряд остатков. Первый из них содержит как сезонные вариации, так и трендовую компоненту. Для разделения временных вариаций использовалась фильтрация Колмогорова–Зубенко (KZ-фильтры). Аппаратная функция фильтра может быть найдена в работе [7]. Сущность KZ-фильтрации состоит в применении скользящего среднего к ряду несколько раз. За счет этого достигаются существенное подавление шума и хорошее выделение сигнала с заданными периодами.

Еще одним достоинством данного метода является его нечувствительность к присутствию в ряде пропущенных (отсутствующих) значений [6].

Таким образом, исходный ряд концентрации приземного озона может быть записан в виде

$$O_3 = KZ_{29,3}(O_3) + RE,$$

где $KZ_{29,3}(O_3)$ – 29-дневный фильтр, применяемый к ряду измерений; RE – ряд остатков после вычитания фильтрованного ряда из исходного. Результаты разделения представлены на рис. 2 и 3. Аналогичным образом проводится выделение долгопериодных компонент в локальных метеорологических параметрах.

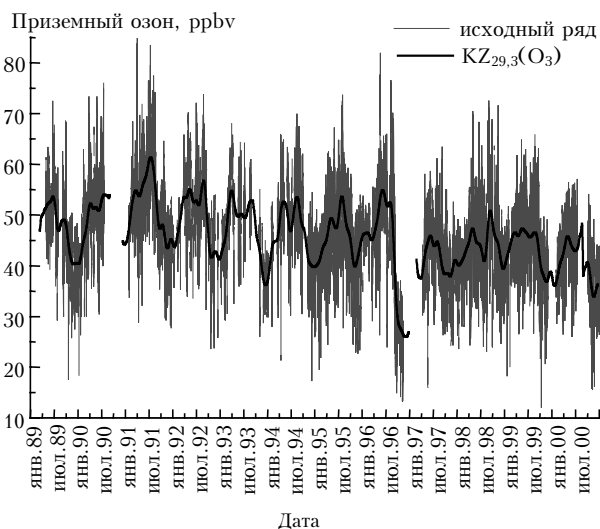


Рис. 2. Трехчасовые значения концентрации приземного озона на КВНС и выделенная долгопериодная компонента ($KZ_{29,3}(O_3)$)

На втором шаге строится многопараметрическая регрессионная модель долгопериодной компоненты вариаций концентрации приземного озона по метеорологическим параметрам. Таким образом, модельный ряд концентрации может быть представлен в виде

$$MO = aKZ_{29,3}(T) + bKZ_{29,3}(h) + cKZ_{29,3}(w_s) + dKZ_{29,3}(p),$$

где MO – модельные значения концентрации приземного озона; T – локальная температура; h – относительная влажность; w_s – скорость ветра; p – атмосферное давление; a, b, c, d – коэффициенты регрессии.

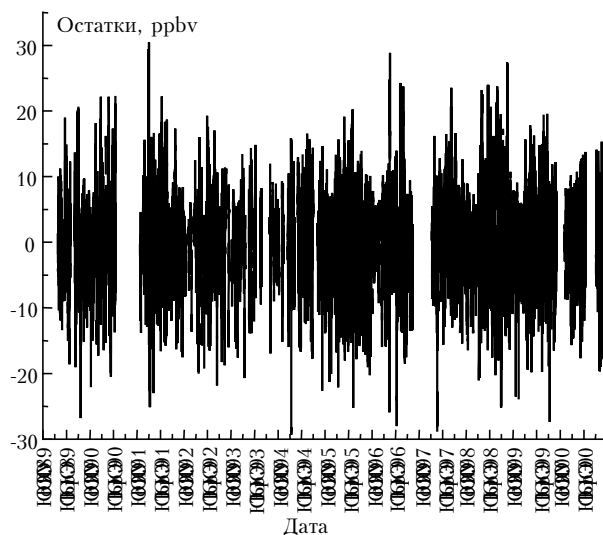


Рис. 3. Ряд остатков концентрации приземного озона после вычитания долгопериодной компоненты из исходного ряда измерений на КВНС

На третьем шаге модельное значение концентрации приземного озона вычитается из исходного ряда измерений, и затем методом линейной регрессии по времени оценивается изменение наклона регрессионной прямой. Сравнение полученных регрессионных кривых (рис. 4) показало, что вычитание модельного ряда приводит к уменьшению отрицательного тренда. Если в исходном ряду измерений его величина за период с ноября 1991 по июнь 1999 г. составляла $-0,85$ ppbv/год, то после учета долговременных изменений локальных метеорологических параметров $-0,62$ ppbv/год.

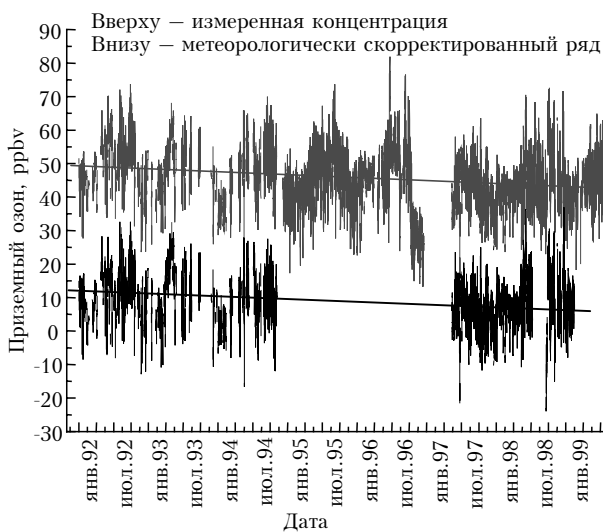


Рис. 4. Сравнение линейных регрессий для исходного ряда измерений концентрации приземного озона на КВНС за период с ноября 1991 по июнь 1999 г. с линейной регрессией метеорологически скорректированного ряда

Таким образом, долговременные изменения таких метеорологических параметров, как температура, относительная влажность, скорость ветра и атмосферное давление, являются ответственными за 27% величины отрицательного тренда концентрации приземного озона на КВНС. Оценивая эту величину, следует иметь в виду ее параметрическую значимость. Дальнейшее развитие разработанной модели, включение в нее физико-химических механизмов, учет их прямых и обратных связей с метеопараметрами позволят провести качественную и количественную оценку вклада различных механизмов, определяющих тренды приземного озона, и ответить на вопрос о роли антропогенного фактора в их формировании.

Заключение

В работе проведен анализ методов оценок трендов концентрации приземного озона на основе измерений, ведущихся на Кисловодской высокогорной научной станции с 1989 г. по настоящее время. Применение различных статистических методов и подходов дает согласованные результаты. Показано, что статистические тесты и оценки методами линейной регрессии указывают на существенный отрицательный тренд для всех месяцев за исключением периода с ноября по январь. Показано, что фильтрация по физическим параметрам может быть использована как эффективный метод оценки вклада различных механизмов в формирование трендов приземного озона. Анализ результатов дает возможность сделать вывод о значительном влиянии динамических процессов на формирование трендов. Моделирование метеорологически скорректированного тренда позволяет заключить, что интегрированный вклад метеорологических факторов в изменчивость концентрации приземного озона составляет 27%.

Автор выражает благодарность сотрудникам Кисловодской высокогорной научной станции за предоставленные данные и доценту кафедры физики атмосферы физического факультета МГУ Г.И. Кузнецову за ценные замечания в процессе написания статьи.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 00-05-64742, 03-05-64712 и INTAS 01-0016.

O.A. Tarasova. Methods for estimation of trends in the surface ozone concentration at Kislovodsk High Mountain Station.

The methods for estimation of trends in the surface ozone concentration are analyzed using the measurements of the surface ozone concentration carried out at Kislovodsk High Mountain station since 1989 till now. Statistical methods, filtering on the basis of different parameters and modeling of the meteorologically adjusted trend are considered. It is shown, that the first mentioned group of methods confirms the presence of statistically significant negative trends in the surface ozone concentration at the site. Methods of filtering gave possibility to study the mechanisms of the long-term changes. Integrated contribution of meteorological factors to the long-term changes of the surface ozone concentration is about 30%.

1. *Bloomenfield P., Royle J. A., Stainberg L.J. and Qing Yang.* Accounting for meteorological effects in measuring urban ozone levels and trends // *Atmos. Environ.* 1996. V. 30. N 17. P. 3067–3077.
2. *Elansky N.F., Markova T.A., Senik I.A., Kuznetsov G.I., Tarasova O.A., Beloglasov M.I., Karpechko A.Yu., Kortumova L.V., Olshansky D.I.* Surface ozone in remote, rural and urban regions of Russia // *TOR-2 (Tropospheric Ozone Research) Annual Report 1999.* Munich: ISS, 2001. P. 65–72.
3. *Flaum J.B., Rao S. T., and Zubenko I. G.* Moderating the influence of Meteorological Conditions on Ambient Ozone Concentrations // *J. Air&Wast Manage. Assoc.* 1996. V. 46. P. 35–46.
4. *Gilbert R.O.* Statistical methods for environmental pollution monitoring. New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1987. 280 p.
5. *Gomisek B., Ciglar R., Scheel H.E. and Veber M.* Analysis of the Ozone spring Maximum at the Krvavec Elevated TOR Site // *Proc. of EUROTRAC Symposium / Ed. P.M. Borrell and P. Borrell.* Southampton, 1999. P. 292–297.
6. *Randel W.J.* Filtering and data processing for time series analysis // *Methods of experimental physics.* 1994. V. 28. P. 283–311.
7. *Rao S., Zubenko I., Neagu R., Porter S., Ku J. and Henry R.* Space and Time Scales in Ambient Ozone Data // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 1997. V. 78. N 10. P. 2153–2166.
8. *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.
9. *Tarasova O.A., Elansky N.F., Kuznetsov G.I., Kuznetsova I.N., Senik I.A.* Impact of Air Transport on Seasonal Variations and Trends of Surface Ozone at Kislovodsk High Mountain Station // *J. Atmos. Chem.* 2003 (в печати)
10. *Senik I.A. and Elansky N.F.* Surface Ozone Concentration Measurements at the Kislovodsk High-Altitude Scientific Station: Temporal Variations and Trends // *Izvestiya RAS, Atmospheric and Oceanic Physics.* 2001. V. 37. Suppl. 1. P. S110–S119.
11. *Tarasova O.A., Кузнецов Г.И., Еланский Н.Ф., Сеник И.А., Сметник И.А.* Особенности сезонных вариаций и трендов концентрации приземного озона на Кисловодской высокогорной научной станции // *Вест. МГУ. Сер. 3. Физ. и астрон.* 2003. (В печати).
12. *TOR-2 (Исследования тропосферного озона):* Рабочее совещание. Москва, 8–12 сентября 2002 г.: Сб. тезисов докл. / Под ред. О.А. Тарасовой. М.: МАКС Пресс, 2002. 48 с. (на англ. яз.).