

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 551.510.4, 551.513.22

Динамика крупномасштабной циркуляции атмосферы и долговременные изменения приземной концентрации озона в Арктике

В.И. Демин, М.И. Белоглазов*

Полярный геофизический институт КНЦ РАН
184200, г. Апатиты Мурманской области, ул. Ферсмана, 14, Академгородок

Поступила в редакцию 13.01.2012 г.

Проведен анализ содержания приземной концентрации озона (ПКО) на севере Скандинавского п-ова при различных формах макроциркуляции в атмосфере (по классификации Г.Я. Вангенгейма). Установлено, что вариации ПКО, вызванные сменой формы циркуляции, составляют в среднем от 3 до 13 мкг/м³, или около 10% от его характерных для сезона средних значений в теплое полугодие и до 15–20% в холодное. На основе установленной связи между значениями ПКО и формами циркуляции дана оценка возможных долговременных изменений ПКО в регионе в случае смены циркуляционных эпох.

Ключевые слова: формы циркуляции атмосферы, приземная концентрация озона, Арктика; circulation patterns of atmosphere, concentration of ozone, Arctic.

Введение

Со второй половины XX в. на значительных пространствах Северного полушария наблюдается заметный рост содержания озона в приземном слое. Согласно ряду оценок его содержание в западной Европе за 100 лет увеличилось более чем в 2 раза — с 20–30 до 60 мкг/м³ (см., например, [1]). Наиболее распространенное объяснение этому явлению — интенсификация фотохимических процессов в приземном слое из-за роста загрязнения воздуха. Данный факт нельзя игнорировать, так как озон — не только парниковый газ и один из основных загрязнителей атмосферного воздуха, но и химическое соединение, в значительной степени определяющее окислительный потенциал атмосферы. По этой причине на законодательном уровне различных стран в последние десятилетия принят целый ряд мер по сокращению выбросов в атмосферный воздух предшественников озона (см., например, [2]).

Однако лишь установление статистически достоверного тренда едва ли можно считать достаточным для выявления природы его вариаций. Необходимо из общего тренда выделить составляющую, которая может быть обусловлена, например, долговременными изменениями в атмосферной циркуляции и изменением повторяемости различных воздушных масс (ВМ). На необходимость учета данного процесса указывает, в частности, обнаруженная нами зависимость приземной концентрации озона (ПКО) от типа ВМ. Так, на рис. 1 представлены средние значения ПКО,

полученные по наблюдениям в обсерватории «Ловозеро» (центральная часть Кольского п-ова, Полярный геофизический институт) в различных ВМ, поступающих на полуостров.

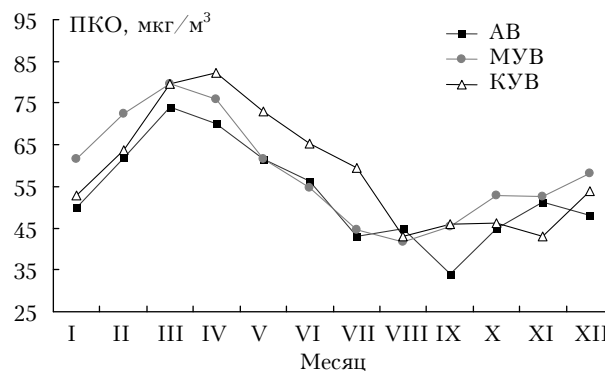


Рис. 1. Средние ПКО в Ловозеро в различных воздушных массах: АВ — арктический воздух; МУВ — морской умеренный воздух; КУВ — континентальный умеренный воздух (адвекция с регионов Центральной и Восточной Европы)

Выделение типа ВМ проведено на основе комплексного анализа траекторий движения воздуха, карт приземного анализа и барической топографии, а также сравнением типичных свойств ВМ [3, 4] и характера погоды на сети метеорологических станций Кольского п-ова в каждый из доступных сроков наблюдений.

Так, например, поступающий на Кольский п-ов из Атлантики морской умеренный воздух благодаря интенсивному перемешиванию над замерзающей акваторией отличается более высоким содержанием ПКО в осенне-зимний период, в то время как конти-

* Валерий Иванович Демин (demin@pgia.ru); Михаил Иванович Белоглазов (blgz@pgia.ru).

нентальный умеренный воздух и арктический воздух при этом устойчиво стратифицированы. По этой причине вторжения данных масс за холодными фронтами приводят к возрастанию ПКО по сравнению с другими типами ВМ. В летний период ВМ с акватории Баренцева моря, напротив, как правило, устойчивы и содержание озона в приземном слое снижается по сравнению, например, с неустойчивым КУВ. Кроме того, при выходе на Кольский п-ов КУВ в регион поступает ВМ с европейской территории России (ЕТР) и Восточной Европы с более высоким содержанием озона, в том числе и вследствие активных фотохимических процессов в загрязненном воздухе в очагах формирования данных ВМ.

Характерные вариации ПКО при прохождении атмосферных фронтов и сменах ВМ обнаруживаются и в других регионах (см., например, [5–8]).

Известно, что перестройка крупномасштабной циркуляции атмосферы, отражающаяся в изменении положения длинных волн в тропосфере, приводит к изменению характера адвекции в конкретном регионе. Однако оперировать числом выходов тех или иных ВМ не очень удобно, тем более что имеет место их постепенная трансформация. По этой причине для определения границ естественной изменчивости содержания озона в приземном слое, возникающей за счет крупномасштабной перестройки тропосферной циркуляции, более важно сопоставить значения ПКО с типичными формами тропосферной макроциркуляции.

Типизация макроциркуляционных процессов проведена нами в соответствии с классификацией Вангенгейма–Гирса по информации, открыто предоставляемой метеорологической службой Германии (Deutscher Wetterdienst), с сайтов [www2.wetter3.de], Wetterzentrale Karlsruhe [www.wzkarten3.de] и NOAA [www.esrl.noaa.gov/psd/data]. Данная схема предусматривает выделение в Атлантико-Европейском секторе в зависимости от характера термобарических волн в тропосфере (через траекторию барических образований и направление барических и термических градиентов) трех форм циркуляции: западной W, восточной E, меридиональной C [9]. При про-

цессах формы W в тропосфере наблюдаются волны малой амплитуды, быстро смещающиеся с запада на восток. Процессам E и C соответствуют волны большой амплитуды, но различной географической локализации гребней и ложбин. При форме циркуляции E над Атлантикой и Западной Европой наблюдается хорошо развитая ложбина, а над Восточной Европой – мощный гребень. При форме циркуляции C локализация ложбин и гребней обратная.

Одно из преимуществ выбранной схемы классификации макропроцессов по сравнению с другими (например, схемы А.Л. Каца [10], Б.Л. Дзержевского [11]) – наличие хорошо выраженных циркуляционных эпох, о которых говорилось выше, и это позволяет перейти к прогнозу возможных изменений ПКО (чего нельзя сделать на основе только средних значений ПКО в разных ВМ).

В качестве исходных данных воспользуемся результатами мониторинга ПКО за 1990–2009 гг. на ст. Оуланка (Финляндия, базы данных ЕМЕР; <http://www.emer.int/>), расположенной на севере Финляндии и имеющей много больший ряд измерений по сравнению с obs. «Ловозеро» (с 1999 г.), что значительно повышает надежность оценок.

Результаты проведенного анализа по среднему содержанию ПКО в приземном слое в разные сезоны при различных формах циркуляции (E, W, C) представлены на рис. 2 и в таблице.

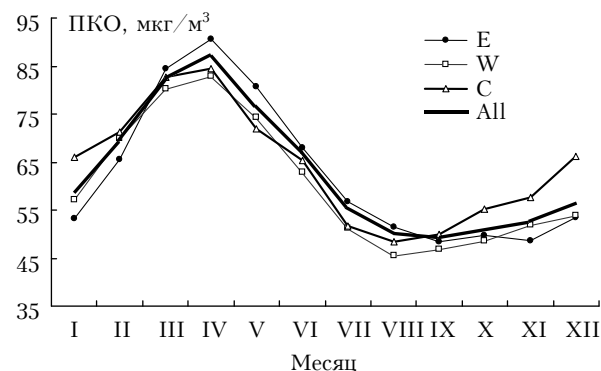


Рис. 2. Среднемесячные ПКО в Оуланке при разных формах циркуляции (E, W, C) и общее для всех типов (all)

Среднемесячные ПКО, мкг/м³, в Оуланке при различных формах циркуляции (в скобках указаны среднеквадратичные отклонения); отмечены группы, с которыми имеется статистически значимое различие средних при их парном сравнении

Месяц	Форма циркуляции		
	E	W	C
Январь	53,1 (13,5) w, c	57,3 (16,4) e, c	66,1 (11,4) e, w
Февраль	65,6 (10,2) w, c	70,0 (9,8) e	71,2 (8,1) e
Март	84,3 (12,2) w	80,3 (8,5) e, c	82,6 (8,8) w
Апрель	90,5 (16,2) w, c	83,0 (10,9) e	84,5 (10,9) e
Май	80,7 (18,3) w, c	74,4 (12,9) e, c	71,9 (11,6) e, w
Июнь	68,0 (14,7) w, c	62,8 (13,2) e	65,3 (13,3) e
Июль	56,9 (14,6) w, c	51,3 (12,4) e	51,7 (10,9) e
Август	51,4 (14,3) w, c	45,5 (9,9) e, c	48,5 (9,1) e, w
Сентябрь	48,5 (10,5) c	46,9 (10,0) c	49,9 (9,0) e, w
Октябрь	49,7 (11,1) c	48,7 (12,5) c	55,3 (9,6) e, w
Ноябрь	48,7 (13,3) w, c	52,0 (13,9) e, c	57,7 (10,3) e, w
Декабрь	53,5 (13,0) c	53,9 (13,4) c	66,2 (13,2) e, w

Гипотеза о равенстве средних в трех группах была проверена и отвергнута для всех месяцев. Проверка выполнялась с помощью непараметрического критерия Крускала–Уоллиса, предназначенного для оценки различий одновременно между несколькими выборками [12]. В таблице кроме среднемесячных значений ПКО приведены также среднеквадратические отклонения для каждой формы циркуляции, а символами *e*, *w*, *c* отмечены группы, с которыми имеется статистически значимая разница при их парном тестировании U-критерием Манна–Уитни (как и в случае теста Крускала–Уоллиса $p < 0,05$).

Проведенный статистический анализ подтверждает наличие связи между изменениями ПКО и крупномасштабными формами атмосферной циркуляции.

В теплое полугодие наиболее высокие ПКО в регионе наблюдаются при процессах формы *E*, для которой наиболее характерен вынос в регион воздушных масс с ЕТР, Восточной и Центральной Европы – регионов с повышенными содержаниями озона в приземном слое. В зимнее время повышенным содержанием отличаются процессы формы *C* – при данной форме циркуляции хорошо перемешанные неустойчивые воздушные массы «ныряют» с акватории Баренцева моря на территорию Кольского п-ова и ЕТР в соответствии с направлением ведущего потока. Аналогичные закономерности были отмечены выше и для обл. «Ловозеро».

Как видно из рис. 2, крупномасштабная перестройка атмосферной циркуляции (смена формы циркуляции) сопровождается изменением ПКО в среднем около $7,5 \text{ мкг/м}^3$ (от 3 до 13 мкг/м^3). Для сравнения: суточные вариации ПКО вследствие изменения режима турбулентного обмена могут достигать $30\text{--}40 \text{ мкг/м}^3$.

Примененный нами подход позволяет также дать прогноз возможных долговременных тенденций ПКО в регионе. Известно, что в динамике атмосферы существуют длительные (многолетние) периоды с аномальным (по сравнению с климатической нормой) развитием той или иной формы циркуляции, получившие названия циркуляционных эпох [9]. Их су-

ществование наглядно демонстрирует рис. 3, где представлены отклонения суммарного (за год) числа дней с той или иной формой циркуляции от средних многолетних (1900–2010 гг.) значений.

Например, период с 1972 по 1995 г. является эпохой *E*-циркуляции, а последующие годы могут быть отнесены к эпохе формы *W*.

Как следует из рис. 2, если в предстоящие годы произойдет увеличение повторяемости процессов формы *E*, можно получить небольшое (не более $3\text{--}5 \text{ мкг/м}^3$ относительно его средних значений, определенных за период 1990–2009 гг.) возрастание ПКО в весенне-летний период и примерно такое же его некоторое снижение в зимние месяцы. Если же увеличится повторяемость процессов формы *C*, следует ожидать снижения ПКО весной и летом (не более $1\text{--}4 \text{ мкг/м}^3$) и заметного увеличения (до $5\text{--}9 \text{ мкг/м}^3$) в зимние месяцы. Появление трендов соответствующих знаков и в пределах, указанных выше, можно считать естественными долговременными вариациями ПКО. Напротив, несовпадение знаков или выход за указанные количественные пределы следует рассматривать как появление иных механизмов вариаций ПКО (изменение интенсивности фотохимических процессов, в том числе в регионах формирования воздушных масс).

Если каждой *i*-форме циркуляции поставить в соответствие некоторое среднее значение ПКО, равное $[O_3]_i$, то все вариации, удовлетворяющие выражению

$$\Delta[O_3] \leq \sum_{i=1} \Delta n_i [O_3]_i,$$

где Δn_i – изменение числа процессов *i*-й формы, можно считать естественными (происходящими из-за долговременных изменений макроциркуляционного режима). Предложенное соотношение необходимо непременно учитывать, если анализ трендов проводится на коротких временных рядах.

Исходя из приведенных оценок, можно утверждать, что долговременные вариации ПКО в Арктике, вызванные изменениями в крупномасштабной

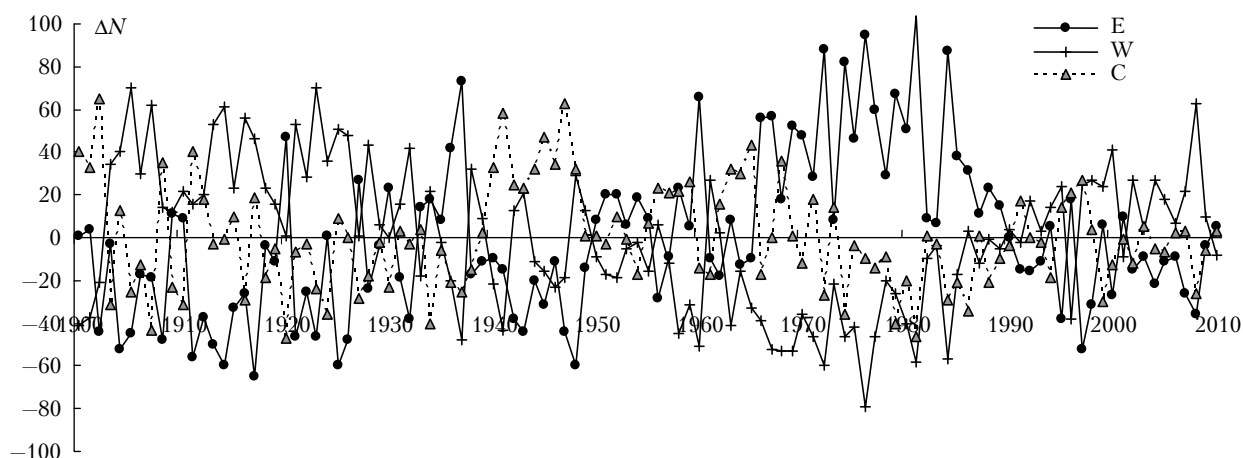


Рис. 3. Аномалии количества дней в году с формами циркуляции *E*, *W*, *C* (ΔN) от средних многолетних (1900–2010 гг.) значений

атмосферной циркуляции, не превышают нескольких мкг/м³, а значит, нельзя игнорировать появление даже малых тенденций. В иных географических регионах величина естественных вариаций ПКО может оказаться существенно больше.

Итак, на основе полученных связей между ПКО и формами циркуляции W, E, C представлены варианты возможных сезонных изменений ПКО при различных сценариях смены существующей циркуляционной эпохи.

Для выделения естественных вариаций ПКО, обусловленных долговременными изменениями циркуляции атмосферы, предложено рассматривать изменения ПКО отдельно внутри различных групп атмосферных процессов, выделенных по той или иной классификации, с непременным учетом изменения повторяемостей последних.

1. *Garthwaite R. et al.* Ground level ozone in the 21st century: trends, interactions with climate and environmental impacts. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 6 (2009). 282002. doi: 10.1088/1755-1307/6/8/282002.
2. *Transboundary Air Pollution: acidification, eutrophication and ground-level ozone in the UK.* Report of the NEGTAР, 2001. 314 p.
3. *Дюбюк А.Ф.* Справочник по местным признакам погоды. М.; Свердловск: Гидрометиздат, 1943. 84 с.

4. *Хромов С.П.* Основы синоптической метеорологии. Л.: Гидрометеониздат, 1948. 696 с.
5. *Аришинова В.Г., Белан Б.Д., Рассказчикова Т.М., Рожов А.Н., Толмачев Г.Н.* Изменения концентрации озона в приземном слое при прохождении атмосферных фронтов // Оптика атмосф. и океана. 1995. Т. 8, № 4. С. 625–631.
6. *Демин В.И., Белоглазов М.И., Еланский Н.Ф.* О связи приземной концентрации озона и высоты слоя перемешивания // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17, № 8. С. 662–665.
7. *Селегей Т.С., Филоненко Н.Н., Ленковская Т.Н.* Зависимость концентраций приземного озона от адвективных факторов // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 12. С. 1080–1086.
8. *Bethan S., Vaughan G., Gerbig C., Volz-Thomas A., Richer H., Tiddeman D.A.* Chemical air mass differences near fronts // J. Geophys. Res. D. 1998. V. 103, N 11. P. 13413–13434.
9. *Гурс А.А.* Макроциркуляционный метод долгосрочных метеорологических прогнозов. Л.: Гидрометеониздат, 1974. 488 с.
10. *Кац А.Л.* Сезонные изменения общей циркуляции атмосферы и долгосрочные прогнозы. Л.: Гидрометеониздат, 1960. 270 с.
11. *Кононова Н.К.* Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б.Л. Дзердзеевскому. М.: Воентехиниздат, 2009. 372 с.
12. *Халафян А.А.* Statistica 6. Статистический анализ данных. М.: Бином-Пресс, 2007. 512 с.

V.I. Demin, M.I. Beloglazov. **Dynamics of atmospheric circulation and long-term ground-level ozone variations in the Arctic.**

Content of ground-level ozone over the North Scandinavia related to main atmospheric circulation patterns are studied. It is shown that ozone variations in the surface layer, which is caused by the circulation changes are 3–13 kg or about 10% and 15–20% of typical seasonal values in summer and in cold half-years, respectively. Descriptive techniques may be extended to forecast future values of ozone concentrations in different stages of the circulation epoch.