

В.И. Демин, М.И. Белоглазов, Н.Ф. Еланский

О связи приземной концентрации озона и высоты слоя перемешивания

*Полярный геофизический институт Кольского научного центра РАН,
г. Апатиты Мурманской обл.*

Поступила в редакцию 26.04.2004 г.

Проведен анализ изменчивости приземной концентрации озона (ПКО) в зависимости от некоторых динамических процессов в арктической атмосфере. Используются результаты измерений ПКО и аэрологического зондирования на Кольском полуострове, а также метеорологические ИНТЕРНЕТ-данные. Найдена регрессионная зависимость максимальной среднечасовой величины ПКО от максимальной высоты слоя перемешивания, при этом коэффициент корреляции равен 0,7. На основе того, что величина высоты слоя перемешивания различна в разных воздушных массах, объяснены особенности динамики приземного озона из-за смены синоптических процессов.

Согласно общепринятым представлениям основными источниками озона в приземном слое являются его перенос из более насыщенных им стратосферы и верхних слоев тропосферы, а также его фотохимическая генерация в приземном слое. Однако особенности механизма такого переноса изучены крайне недостаточно, особенно в области высоких широт. Целью данной работы является анализ изменчивости приземной концентрации озона (ПКО) в зависимости от некоторых динамических процессов в арктической атмосфере. Для анализа использованы результаты измерений ПКО в обсерватории «Ловозеро» и на атмосферном Апатитском полигоне Полярного геофизического института, находящихся в центральной части Кольского полуострова. Измерения проводятся с помощью УФ-озонметров «DASIBI» 1008АН (производства США) и «Monitor Labs» ML9810В (Великобритания). Для анализа синоптических ситуаций использованы данные Метеорологического института в Берлине и Немецкой метеорологической службы, доступные в сети Интернет, а также результаты аэрологического зондирования в г. Кандалакша, находящемся примерно в 60 км к юго-западу от Апатит.

Из данных вертикального зондирования (см., например, [1, 2] или http://www.fmi.fi/research_atmosphere/atmosphere_4.html) хорошо известно, что отношение смеси озона всегда возрастает (часто в несколько раз) от уровня земли к верхней границе пограничного слоя (1...2 км) до значений 40–45 ppb (в летний период). Отсюда следует, что наличие механизма, обеспечивающего вертикальный воздухообмен между приземным слоем и свободной тропосферой, должно сопровождаться повышением приземной концентрации озона до уровней, характерных для верхней границы пограничного слоя атмосферы (ПСА). Так как между высотой слоя перемешивания $H_{c.п}$ и высотой пограничного слоя суще-

ствует тесная связь (коэффициент корреляции около 0,95), то, используя соотношение [3]:

$$H_{c.п} = 0,74k_1/f$$

(здесь k_1 – коэффициент турбулентности на высоте 1 м; f – параметр Кориолиса), на основании климатических данных о значениях коэффициента турбулентного обмена [3], можно оценить величину $H_{c.п}$. В летний период она меняется в среднем от 300–400 до 1300–1500 м. Если считать, что вертикальный профиль озона над обс. Соданкюля отражает характерный региональный профиль, то интенсивное турбулентное перемешивание способно вызвать повышение приземных концентраций озона в среднем до 45 ppb. Как показывают наблюдения, более чем в 98% случаев величина ПКО на Кольском п-ве в летний период, включая и период полярного дня, не превышает 40–45 ppb (таблица).

Повторяемость дневных значений ПКО летом (июнь–июль) в Ловозеро (период наблюдений 1999–2003 гг.)

| Градация ПКО, ppb | Повторяемость, % |
|-------------------|------------------|
| 0...5 | 0 |
| 5...10 | 0,24 |
| 10...15 | 4,2 |
| 15...20 | 18,2 |
| 20...25 | 30,5 |
| 25...30 | 20,5 |
| 30...35 | 14,0 |
| 35...40 | 9,0 |
| 40...45 | 2,1 |
| 45...50 | 1,4 |
| 50...55 | 0,07 |
| Более 55 | 0 |

Величину $H_{c.п}$ определяют экспериментально с помощью аэрологической диаграммы, используя данные радиозондирования и метеорологические наблюдения за максимальной температурой воздуха.

На аэрологической диаграмме максимальная за сутки $H_{c.п}$ находится как точка пересечения кривой вертикального распределения температуры с линией, проходящей по сухой адиабате через точку максимума наземной температуры воздуха [3–6]. В тех случаях, когда на аэрологической диаграмме отмечается безразличная стратификация или кривая состояния проходит не более чем на 1°C левее кривой стратификации, верхняя граница слоя перемешивания находится на той высоте, где эти условия нарушаются [7].

По данным аэрологического зондирования в г. Кандалакша в 16 ч (время московское) была рассчитана высота слоя перемешивания для июля–августа 2003 г. При этом мы учитывали, что максимальная температура воздуха в этот период наблюдается около 15 ч [8], поэтому определяемая $H_{c.п}$ примерно соответствует ее максимальному значению или коррелирует с ней.

Зависимость максимальной среднечасовой величины ПКО в Апатитах от максимальной $H_{c.п}$ для Кандалакши представлена на рис. 1.

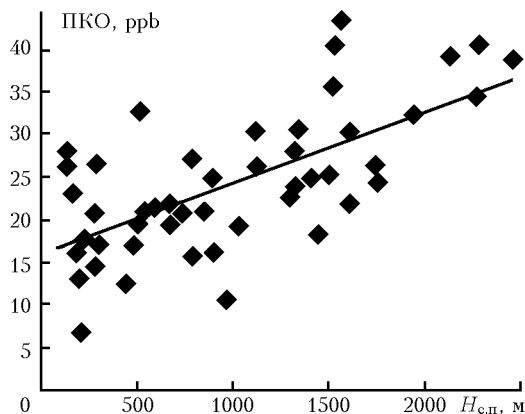


Рис. 1. Связь максимальных дневных концентраций озона в г. Апатиты и максимальной высоты слоя перемешивания (июль–август 2003 г.)

Уравнение регрессии в распределении на рис. 1

$$[\text{O}_3]_{\max} = (0,0082 \pm 0,0015) H_{c.п} + (15,7 \pm 1,8).$$

Разброс точек относительно прямой вызван, очевидно, различным вертикальным профилем озона в разные дни при одинаковой высоте слоя перемешивания. По всей вероятности, на промежутках времени в несколько дней, когда можно пренебречь процессами адвекции и не произойдет существенной деформации вертикального профиля, связь между $H_{c.п}$ и ПКО будет еще выше.

Согласно синоптическому анализу в период 5–9 июля 2003 г. над Кольским полуостровом находилась стационарная арктическая воздушная масса. На рис. 2 представлена зависимость между максимальными дневными ПКО и соответствующими максимальными $H_{c.п}$ в этот период. Данный пример показывает, что корреляция должна заметно улучшиться при использовании вертикального профиля озона непосредственно над пунктом наблюдения в качестве второго предиктора.

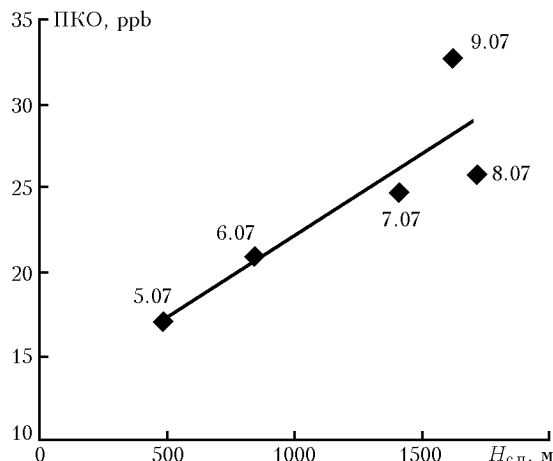


Рис. 2. Связь максимальных дневных концентраций озона в г. Апатиты и максимальной высоты слоя перемешивания в период 5–9.07.03 г.

Вторая причина разброса состоит в том, что описанный выше метод не учитывает динамической турбулентности, порождаемой вертикальным сдвигом ветра. Последнее приводит к тому, что метод становится практически неприменимым в периоды прохождения атмосферных фронтов.

Тем не менее коэффициент корреляции между максимальными высотами слоя перемешивания и максимальными величинами ПКО высок и равен 0,70, что демонстрируется подобием их межсуточных вариаций (рис. 3).

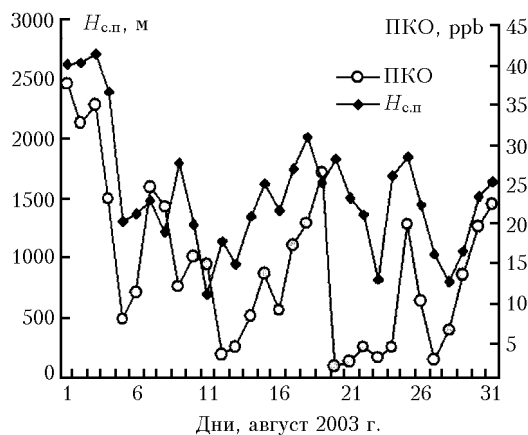


Рис. 3. Изменения максимальной высоты слоя перемешивания и максимальной дневной концентрации озона в г. Апатиты в августе 2003 г.

Отметим, что положительная корреляция между выбранными параметрами может свидетельствовать, на наш взгляд, о преимущественно динамическом происхождении приземного поля озона в атмосфере высоких широт, потому что в случае преобладания процессов фотохимической генерации озона в приземном слое (как это часто наблюдается в средне- и низкоширотных индустриально развитых районах) нужно было бы ожидать отрицательную корреляцию, так как в этом случае большей высоте слоя перемешивания соответствовали бы меньшие концентрации.

Динамика пограничного слоя атмосферы имеет ряд общих черт с колебаниями температуры воздуха в приземном слое, так как оба процесса определяются изменением радиационного баланса подстилающей поверхности. Отсюда становится понятной высокая корреляция суточного хода ПКО и температуры воздуха в летний период [9]. Наличие связи между ПКО и $H_{c.п}$ позволяет объяснить наблюдаемую корреляцию между суточным ходом температуры воздуха и приземной концентрацией озона, так как изменение температуры воздуха всего на несколько градусов может существенно отразиться на высоте слоя перемешивания. К примеру, увеличение приземной температуры воздуха «только» на 5 °С (с 25 до 30 °С) для температурного профиля 26.07.2003 г. приведет к подъему верхней границы слоя перемешивания с 1,9 до 3,5 км, а следовательно, и к значительному подъему ПКО.

На основе установленной связи между $H_{c.п}$ и максимальными дневными ПКО можно объяснить и ряд особенностей динамики приземного озона, вызванных сменой синоптических процессов, исходя из того, что характер стратификации в нижних слоях атмосферы, а значит, и высота слоя перемешивания, различны в разных воздушных массах и синоптических объектах [10–12]. Продемонстрируем это на примере изменений ПКО в периоды прохождения холодных фронтов (ХФ) над Кольским полуостровом.

В летний период (с июня по август включительно) температура воды на поверхности Баренцева моря составляет 4–8 °С, что оказывается ниже температуры находящегося над ним воздуха. Поэтому воздушные массы материкового или атлантического происхождения здесь охлаждаются и приобретают устойчивую стратификацию. Причем механизм охлаждения весьма эффективен: согласно [13] «откачка» энергии от нижнего слоя атмосферы для нагревания и испарения верхнего слоя воды при температуре поверхности 4–8 °С составляет 150–250 Вт/м², в то время как радиационный приток тепла оказывается даже меньше – примерно 100–130 Вт/м². Когда сформированная над морем воздушная масса поступает в тыл циклона, в начале своего пути она устойчива и становится неустойчивой только при выходе на сушу.

В начальный период пребывания морского арктического воздуха над сушей, в тылу ХФ, его неустойчивость ограничена самыми нижними слоями атмосферы и лишь по мере прогревания снизу будет возрастать. В этом случае величина ПКО при прохождении ХФ, вследствие конвергенции воздушных потоков и усиленной динамической турбулентности, резко возрастет в момент прохождения фронта, но после его прохождения уменьшится в течение нескольких часов. В последующем – по мере прогревания поступившего воздуха – неустойчивость и высота слоя перемешивания возрастает, а значит, и возрастает ПКО. Кроме того, восстанавливается «правильный» суточный ход. Например, 3 июля 2003 г. высота слоя перемешивания перед ХФ была более 1500 м, а 4 июля менее 800 м, что, естественно, сказалось и на максимальных концентрациях озона

в приземном слое – 44 и 16 ppb соответственно. Поступившая воздушная масса имела весьма низкую температуру, а разность максимальных температур 3 и 4 июля превысила 10 °С. В условиях сплошной облачности трансформация поступившей воздушной массы заняла несколько дней. По мере ее прогревания снизу росла мощность слоя перемешивания и одновременно приземные концентрации озона (рис. 4). Однако при другом соотношении высот слоя перемешивания картина может быть и иной.

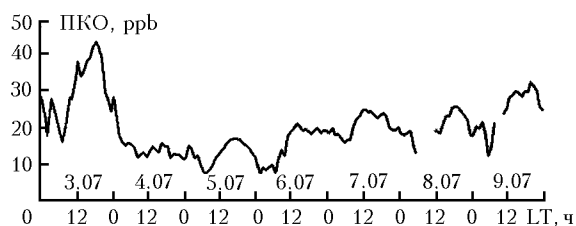


Рис. 4. Изменения приземной концентрации озона в г. Апатиты в период 3–10.07.03 г.

В теплом секторе циклона 24 июля 2003 г. (рис. 5) в условиях, когда в слое 240–370 м наблюдалась изотермия, а в слое 580–850 м инверсия, высота слоя перемешивания не превышала 200 м и КПО в дневные часы уменьшилась до 10 ppb, так как приподнятая инверсия «перекрыла» доступ к верхним слоям тропосферы. Прохождение ХФ привело к разрушению «запирающих» слоев, к усилению турбулентного обмена и к возрастанию концентрации озона вечером того же дня до 33 ppb.

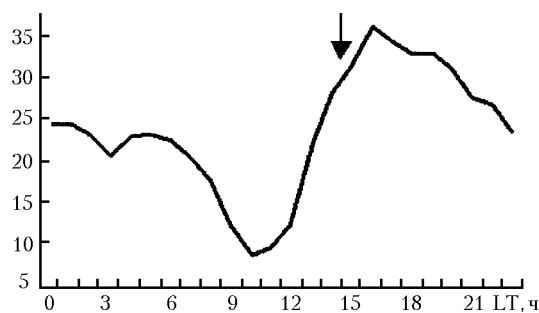


Рис. 5. Изменения приземной концентрации озона в г. Апатиты при прохождении холодного фронта 24.07.03 г. (момент прохождения указан стрелкой)

В зимний период, когда стратификация атмосферы устойчива, приведенная выше методика определения высоты слоя перемешивания становится неприменимой. Однако представляется возможность провести оценку, исходя из того, что существует тесная связь между высотой слоя перемешивания и высотой пограничного слоя [3].

Согласно климатическим данным [3], среднее значение коэффициента турбулентности в г. Апатиты в ноябре–декабре составляет 0,04 м²/с. Это соответствует средней высоте слоя перемешивания около 250 м. Исходя из средних профилей озона над обс. Соданкюля, получаем средние максимальные концентрации озона в приземном слое примерно 25–30 ppb. Средние максимальные значения в Ловозеро составляют обычно 28 ppb в декабре, 26 в январе и 28 в феврале.

При неизменной синоптической обстановке в зимний период отсутствуют суточные изменения коэффициента турбулентности [3] и высоты слоя перемешивания, поэтому постоянство турбулентных потоков обуславливает примерное постоянство и уровня ПКО, что соответствует реально наблюдаемой картине.

Таким образом, приведенные примеры свидетельствуют об исключительно важной роли термодинамического состояния нижней тропосферы в формировании приземных концентраций озона в атмосфере высоких широт. Учет этого обстоятельства позволяет в терминах атмосферной динамики объяснить вариации ПКО, наблюдающиеся в экспериментальных квазифоновых измерениях на Кольском полуострове.

Авторы выражают искреннюю признательность инженерному и дежурному персоналу обс. «Ловозеро», Апатитского полигона и лаборатории «Атмосфера Арктики» за техническое обеспечение долговременных измерений на Кольском полуострове.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 02-05-64114 и 02-05-79148), INTAS (грант № 01-0016), INCO-COPERNICUS (грант № ICA2-ST-2000-10038), а также Программы фундаментальных исследований ОФН РАН «Физика атмосферы: электрические процессы, радиофизические методы исследований» (гос. контракт № 10002-251/ОФН-12/059-063/060603-547).

1. *Ozone Data for the World* // Canad. Environ. service / WMO: Downsview-Ontario. 1974–2001.

2. *Звягинцев М.А., Кузнецова И.Н.* Изменчивость приземного озона в окрестностях Москвы: результаты десятилетних регулярных наблюдений // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2002. Т. 38. № 4. С. 486–495.
3. *Климатические условия распространения примесей в атмосфере: Справочное пособие.* Л.: Гидрометеониздат, 1983. 328 с.
4. *Безуглая Э.Ю.* Мониторинг состояния загрязнения атмосферы в городах. Л.: Гидрометеониздат, 1984. 200 с.
5. *Безуглая Э.Ю.* Метеорологический потенциал и климатические особенности загрязнения воздуха городов. Л.: Гидрометеониздат, 1980. 184 с.
6. *Берлянд М.Е.* Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1975. 448 с.
7. *Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Часть 1.* Л.: Гидрометеониздат, 1986. 703 с.
8. *Справочник по климату СССР. Вып. 2. Ч. 1.* Л.: Гидрометеониздат, 1965. 144 с.
9. *Tarasova O.A., Karpetchko A.Yu.* Atmospheric chemistry and physics accounting for local meteorological effects in the ozone time-series of Lovozero (Kola Peninsula) // Atmos. Chem. Phys. 2003. V. 3. N 6. P. 941–949.
10. *Хромов С.П.* Основы синоптической метеорологии. Л.: Гидрометеониздат, 1948. 696 с.
11. *Зверев А.С.* Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеониздат, 1977. 712 с.
12. *Локощенко М.А., Семенченко Б.А., Каллистратова М.А., Пекур М.С.* О связи с синоптическими условиями высоты слоя перемешивания. // Оптика атмосф. и океана. 1994. Т. 7. № 7. С. 977–985.
13. *Романов В.Ф., Арискина Н.В., Васильев В.Ф., Лагун В.Е.* Энергетика атмосферы в полярных областях. Л.: Гидрометеониздат, 1987. 296 с.

V.I. Demin, M.I. Beloglazov, N.F. Elansky. On relation between the surface ozone concentration and the mixing layer height.

The analysis of variability of the surface ozone concentration (SOC) is carried out depending on some dynamic processes in the Arctic atmosphere. The results of SOC measurements and aerologic sounding on the Kola Peninsula, as well as INTERNET meteorological data are used. The regression dependence of the maximal hourly average SOC on the maximal mixing layer height (MLH) is found; the correlation coefficient is equal to 0.7. Based on the fact that MLH is different in different air masses, the features of the surface ozone dynamics due to alternation of synoptic processes are explained.