

В.И. Демин¹, А.Ю. Карпечко², М.И. Белоглазов¹, Е. Кюро²

О роли турбулентного перемешивания в формировании приземных концентраций озона на Кольском полуострове

¹Полярный геофизический институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия²Финский метеорологический институт, г. Соданкюля, Финляндия

Поступила в редакцию 22.12.2005 г.

На основе данных вертикального озонзондирования в г. Соданкюля (Финляндия) и климатических значений максимальных высот слоя перемешивания над г. Апатиты рассчитаны концентрации озона на верхней границе слоя перемешивания. Показано, что регистрируемые в приземном слое в центральных районах Кольского п-ова максимальные концентрации озона не превышают его концентраций на верхней границе слоя перемешивания, что свидетельствует о доминировании турбулентного механизма формирования поля приземного озона в условиях Арктики.

Введение

Согласно классическим представлениям поступление озона в приземный слой происходит за счет его турбулентного переноса из более высоких слоев атмосферы. Кроме того, под воздействием ультрафиолетовой радиации возможна его фотохимическая генерация из углеводородов и окислов азота как естественного, так и искусственного происхождения. При этом вопрос о роли и соотношении динамических и фотохимических механизмов формирования поля приземного озона в условиях Арктики во многом остается открытым.

Так, по имеющемуся в настоящее время ряду наблюдений за концентрациями азотсодержащих газов в фоновых условиях высоких широт концентрация NO_x не превышает 0,01–0,05 млрд⁻¹ [1]. При таких условиях фотогенерация озона в приземном слое существенно балансируется химическим разрушением [2] и роль турбулентного притока озона сверху возрастает и, возможно, становится доминирующей. По мнению же авторов одномерной химической модели [3], большая часть озона в нижней тропосфере имеет фотохимическое происхождение. К выводу о значительной роли фотохимической генерации уже непосредственно на Кольском п-ове приходят и авторы другой одномерной химической модели, изложенной в [4, 5].

Однако результаты параллельных измерений, проведенных в 2002–2004 гг., показали, что максимальные концентрации озона в центре г. Апатиты, его ближайшем пригороде и в фоновом районе практически одинаковы, несмотря на различный уровень антропогенного загрязнения [6, 7]. При этом присутствие в городском воздухе веществ, являющихся предшественниками озона, никак не сказалось на максимальных значениях, включая период полярного дня и дни, наиболее благоприятные для фотохимической генерации озона в приземном слое. Это

позволило сделать вывод о незначительной роли фотохимической генерации озона в условиях Арктики вследствие неблагоприятных метеорологических условий (например, низких температур) и малой концентрации предшественников, а главным источником озона в приземном слое считать его турбулентный перенос сверху [6, 7].

В настоящей статье даны оценки средних максимальных приземных концентраций озона на Кольском п-ове, возможных за счет турбулентного обмена, исходя из особенностей вертикального распределения озона в регионе, и проведено сравнение полученных значений с результатами многолетних измерений.

Метод исследования и использованные данные

Из данных вертикального озонзондирования известно (см., например, http://www.fmi.fi/research_atmosphere/atmosphere_4.html), что отношение смеси озона (ПОСО) практически всегда возрастает (часто в несколько раз) от поверхности Земли к верхней границе пограничного слоя (1...2 км) до уровня 50–60 млрд⁻¹. Типичное вертикальное распределение озона в тропосфере схематически представлено на рис. 1.

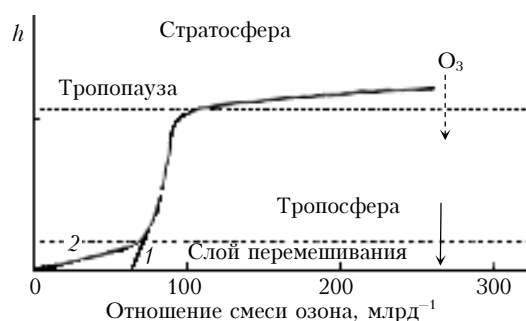


Рис. 1. Схематичное вертикальное распределение озона в нижней атмосфере в единицах отношения смеси

Интенсивное турбулентное перемешивание вызывает выравнивание вертикального профиля озона в пределах слоя перемешивания (СП) так, что максимальные приземные концентрации озона приближаются к концентрации озона на его верхней границе (профиль 1 на рис. 1). Такое перемешивание при неустойчивой стратификации создается, например, термической турбулентностью, а при устойчивой (ночь или холодное полугодие) — за счет динамической турбулентности, создаваемой особенностями вертикального профиля ветра. Профиль 2 на рис. 1 соответствует условиям более ослабленного турбулентного обмена. Приведенная схема находит свое экспериментальное подтверждение при параллельных измерениях параметров стратификации и вертикального распределения озона в пограничном слое атмосферы (см., например, [8]).

Совершенно очевидно, что максимальные концентрации озона, которые возможны в приземном слое только за счет турбулентного перемешивания, не должны превышать концентраций озона на верхней границе СП (только при таких условиях поток озона направлен вниз). В противном случае речь может идти о явном присутствии источника озона в приземном слое (его фотохимическая генерация).

Таким образом, располагая данными о высотах СП и вертикальном распределении озона, можно оценить вклад турбулентного обмена в формирование максимальных значений ПОСО.

Расчет среднемесячных максимальных высот СП был произведен на основе модели пограничного слоя, изложенной в [9, 10], и средних многолетних значений коэффициента турбулентного обмена в г. Апатиты ($\varphi = 67,57^\circ$ с.ш., $\lambda = 33,40^\circ$ в.д.), полученных обработкой градиентных измерений [10].

Ввиду непродолжительности наблюдений (декабрь 2002 г. — март 2004 г.) вместо средних многолетних ПОСО в г. Апатиты были использованы аналогичные параметры (за 6 лет) для обсерватории Ловозеро ($\varphi = 67,97^\circ$ с.ш., $\lambda = 35,02^\circ$ в.д.), так как по данным параллельных наблюдений средние за месяц максимальные ПОСО в этих пунктах отличаются не более чем на 2 млрд^{-1} [7] (либо следует предположить, что средние высоты СП над Апатитами и Ловозеро, при расстоянии между ними 80 км, отличаются незначительно).

Ближайшей к г. Апатиты и обсерватории Ловозеро станцией вертикального озонзондирования является расположенная в 300 км к юго-западу обсерватория Соданкюля (Финляндия; $\varphi = 67,39^\circ$ с.ш., $\lambda = 26,65^\circ$ в.д.). Средние концентрации озона на верхней границе СП над г. Апатиты (и над Ловозеро) принимались равными концентрациям озона в Соданкюля на уровнях, соответствующих средним максимальным высотам СП над г. Апатиты в данном месяце.

Результаты и обсуждение

Полученные по изложенной выше методике среднемесячные ПОСО на верхней границе СП представлены на рис. 2. Там же отображены и среднемесячные максимальные значения ПОСО в Ловозеро.

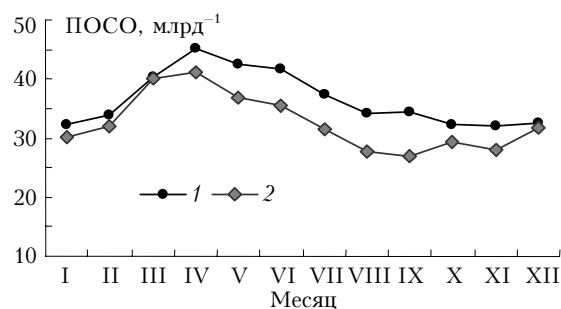


Рис. 2. Среднемесячные ПОСО над Соданкюля на высотах, соответствующих среднемесячным максимальным высотам СП над Апатитами (1), и среднемесячные максимальные ПОСО в Ловозеро (2)

В целом рассчитанная кривая достаточно хорошо воспроизводит особенности годового хода ПОСО на Кольском п-ове. Наименьшее расхождение между рассчитанными и измеренными величинами наблюдается в холодное полугодие (октябрь—март), а наибольшее — летом. Это вызвано тем, что в зимний период вертикальный профиль озона в приземном слое более выровнен из-за небольшой скорости разрушения озона над снежной поверхностью, в то время как летом существует значительный сток озона на поверхность и на первых метрах от земной поверхности (кривая 1 на рис. 1 имеет значительный изгиб влево [11]).

Из рис. 2 видно также, что регистрируемые на Кольском п-ове средние максимальные ПОСО не превышают аналогичных значений на верхней границе слоя перемешивания.

В пользу данного вывода свидетельствует также сравнение результатов измерений ПОСО в Ловозеро и на вершине г. Ловчорр (1095 м, Хибинский горный массив, $\varphi = 67,6^\circ$ с.ш., $\lambda = 33,7^\circ$ в.д.; расстояние по горизонтали между Ловозеро и г. Ловчорр около 60 км, между г. Апатиты и станцией на горе Ловчорр — 20 км).

По нашим оценкам, среднемесячные максимальные высоты СП в регионе меняются от 300 м зимой до 900—1050 м в летние месяцы. В июне (полярный день) станция мониторинга на г. Ловчорр оказывается на высоте, примерно соответствующей верхней границе слоя перемешивания (1050 м) над окружающими равнинами. В период полярного дня горно-долинная циркуляция в Хибинах не развита [12] и динамика озона на г. Ловчорр в значительной степени определяется динамическими процессами в свободной атмосфере (типичный для приземного и пограничного слоев суточный ход ПОСО на г. Ловчорр отсутствует). Известно также, что натекание потока на препятствие приводит к появлению вертикальной составляющей, в результате чего воздух снизу с меньшим содержанием озона поступает на верхние части гор. По этой причине ПОСО на вершине г. Ловчорр несколько меньше, чем на той же высоте в свободной атмосфере (среднемесячные ПОСО на г. Ловчорр в среднем за год на $3,4 \text{ млрд}^{-1}$ меньше среднемесячных ПОСО на высоте 1095 м над г. Соданкюля по данным озонзондов).

Однако и при таком занижении среднечасовые ПОСО в Ловозеро (рис. 3), как правило, не превышают значений ПОСО на г. Ловчорр (несколько случаев превышения (не более $1-2 \text{ млрд}^{-1}$) приходится на периоды сильного тумана на г. Ловчорр с видимостью менее 100 м, когда имеет место дополнительный сток озона за счет взаимодействия с капельным аэрозолем).

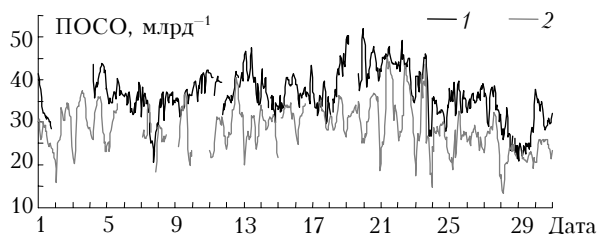


Рис. 3. Среднечасовые ПОСО на г. Ловчорр (1) и в Ловозеро (2) в июне 2005 г.

Наибольшая разница между ПОСО на г. Ловчорр и ст. Ловозеро наблюдается в ночные часы при небольшой высоте Солнца (полярный день) и наименьшая — в послеполуденные, когда турбулентный обмен в пограничном слое наиболее развит [13]. Естественные вариации турбулентных потоков в течение суток, по всей видимости, определяют и суточный ход озона в приземном слое [6, 7].

Выше уже сообщалось, что авторами [6, 7] не было обнаружено признаков заметной фотохимической генерации озона на Кольском п-ове. В [6, 7, 14] отмечалось также, что суточные вариации озона в регионе во все сезоны качественно хорошо согласуются с общепринятыми представлениями о суточном ходе динамических процессов в приземном и пограничном слоях. Приведенные здесь оценки, согласно которым максимальные приземные концентрации озона в регионе не превышают значений, характерных для верхней границы слоя перемешивания, также свидетельствуют о доминирующей роли динамических процессов (турбулентного обмена) в нижней тропосфере в формировании поля приземного озона в Арктике.

Выводы

1. Проведен расчет среднемесячных максимальных высот слоя перемешивания для центральных районов Кольского п-ова и среднемесячных значений ПОСО на верхней границе СП, исходя из данных ближайшей станции вертикального озонзондирования в Соданкюля (Финляндия).
2. Показано, что наблюдаемые в регионе в приземном слое среднемесячные максимальные ПОСО,

включая период полярного дня, не превышают средних концентраций озона на верхней границе СП, что свидетельствует о доминировании турбулентного механизма формирования поля приземного озона в условиях Арктики.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 05-05-64271).

1. Honrath R.E., Jaffe D.A. Measurement of nitrogen oxides in the Arctic // *Geophys. Res. Lett.* 1990. V. 17. N 5. P. 611–614.
2. Wayne R.P. *Chemistry of atmospheres.* Oxford: Clarendon Press, 1991. 448 p.
3. Mauzeral D.I., Jacob D.J., Fan S.-M., Bradshaw J.D., Gregory G.L., Satch G.W., Blake D.R. Origin of tropospheric ozone at remote high northern latitudes in summer // *J. Geophys. Res. D.* 1996. V. 101. N 2. P. 4175–4188.
4. Румянцев С.А., Ролдугин В.К. Взаимодействие малых газовых составляющих атмосферы с антропогенными загрязнителями воздуха в высокошпротном промышленном районе // *Экол. химия.* 2003. Т. 12. № 2. С. 69–78.
5. Ролдугин В.К., Румянцев С.А., Карпечко А.Ю., Белоглазов М.И. Вариации приземного озона и интенсивность ультрафиолетового излучения на Кольском п-ове // *Оптика атмосф. и океана.* 2004. Т. 17. № 7. С. 598–604.
6. Демин В.И., Белоглазов М.И., Еланский Н.Ф. Некоторые результаты мониторинга приземного озона на Кольском п-ове при разных уровнях антропогенного загрязнения атмосферы // *Экол. химия.* 2004. Т. 13. № 3. С. 142–150.
7. Демин В.И., Белоглазов М.И., Еланский Н.Ф. Некоторые результаты мониторинга приземного озона на Кольском полуострове (1999–2003 гг.) // *Метеорол. и гидрол.* 2005. № 10. С. 10–20.
8. Локощенко М.А., Хапаев В.А. Влияние температурной стратификации на вертикальные профили озона в нижней атмосфере // Тезисы докл. конф. «Состав атмосферы и электрические процессы». Борок, 17–19 мая 2005. С. 24–25.
9. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеонздат, 1985. 272 с.
10. *Климатические условия распространения примесей в атмосфере:* Справочное пособие. Л.: Гидрометеонздат, 1983. 328 с.
11. Ровинский Ф.Я., Егоров В.И. Озон, окислы азота и серы в нижней атмосфере. Л.: Гидрометеонздат, 1986. 184 с.
12. *Микроклимат СССР* / Под ред. И.А. Гольцберг. Л.: Гидрометеонздат, 1986. 215 с.
13. Десяткова В.А. Микроаэрологические исследования нижнего километрового слоя атмосферы. Л.: Гидрометеорологическое изд., 1957. 144 с.
14. 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.

V.I. Demin, A.Yu. Karpechko, M.I. Beloglazov, E. Kyroev. **On the role of the turbulent mixing in formation of the ground-level ozone concentration in the Kola Peninsula.**

The average monthly maximal ground-level ozone concentrations are calculated on the basis of the climatic values of the maximal altitude of the mixing layer above Apatity-city and of the data of the nearest ozone-sounding station (Sodankyla, Finland). It is shown that the monthly average maximal ground-level ozone concentrations in the Kola Peninsula do not exceed the average ozone concentrations at the upper border of the mixing layer. This is indicative of the turbulent mechanism formation of the ground-level ozone field in Arctic.