

Б.Д. Белан, М.В. Панченко, С.А. Терпугова, Г.Н. Толмачев

ОЦЕНКА СТОКА ОЗОНА НА АЭРОЗОЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Проведены оценки влияния аэрозольных частиц на разрушение молекул озона. Показано, что в типичных оптико-метеорологических условиях приземной атмосферы на долю аэрозольных частиц приходится не более 20% от общего стока. При аномально большой запыленности атмосферы практически весь сток озона может осуществляться на аэрозоль. На примере данных самолетного зондирования, полученных во время проведения советско-американского пылевого эксперимента ДЮНА, оценен коэффициент гибели молекул озона на поверхности пылевых частиц $\gamma = 6 \cdot 10^{-5}$.

Среди многообразия процессов удаления микропримесей из воздуха наиболее изменчивым во времени и пространстве является механизм взаимодействия газов с аэрозольными частицами [1, 2]. Это обусловлено, с одной стороны, пространственно-временной изменчивостью аэрозольных частиц под воздействием большого комплекса геофизических и погодных факторов, большим разнообразием их физико-химических свойств, а с другой — сложной зависимостью гетерогенных реакций от состава частиц, количества микропримесей и их качественного состава.

До работы А. Питтока [3] сток атмосферного озона на аэрозоли предполагался пренебрежимо малым. В дальнейшем Р. Кейдл, П. Крутцен и Д. Экальт [4] провели оценку влияния аэрозольных частиц на содержание озона в стратосфере, где было получено, что около 5% уменьшения озона в нижней стратосфере обязано стоку озона на аэрозоль.

К настоящему времени изучению взаимосвязи между содержанием аэрозоля и озона посвящен ряд работ, подробный анализ которых проведен в работе Л.С. Ивлева [5].

При интерпретации экспериментальных данных, полученных в нижней атмосфере, вопрос о выделении аэрозольной составляющей в изменчивости содержания озона представляется наиболее сложной задачей. С одной стороны, наличие озона может способствовать возникновению аэрозольных частиц, а с другой — аэрозольные частицы могут обуславливать гибель молекул озона. Одним из главных факторов, существенно затрудняющих интерпретацию данных, является наличие в атмосфере процессов, которые одновременно изменяют: содержание озона и аэрозоля. При анализе данных приземных наблюдений существует проблема разделения стока озона на аэрозольные частицы и на подстилающую поверхность (см., например, [4]). В настоящей статье сделана попытка оценить скорость стока озона на аэрозольные частицы по данным наблюдений в реальной атмосфере.

Изменение концентрации озона в единице объема при стоке на поверхность аэрозольных частиц может быть представлено следующим выражением [2]:

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{m\bar{v}}{4} S\gamma, \quad (1)$$

где m — концентрация озона, г/см³; \bar{v} — средняя скорость движения молекул О₃, см/с; S — общая поверхность аэрозольных частиц в единице объема, см²/см³; γ — коэффициент гибели молекул озона на поверхности.

Для интерпретации экспериментальных данных выражение (1) удобно представить в следующем виде:

$$\frac{dm}{dt} = -cS, \quad (2)$$

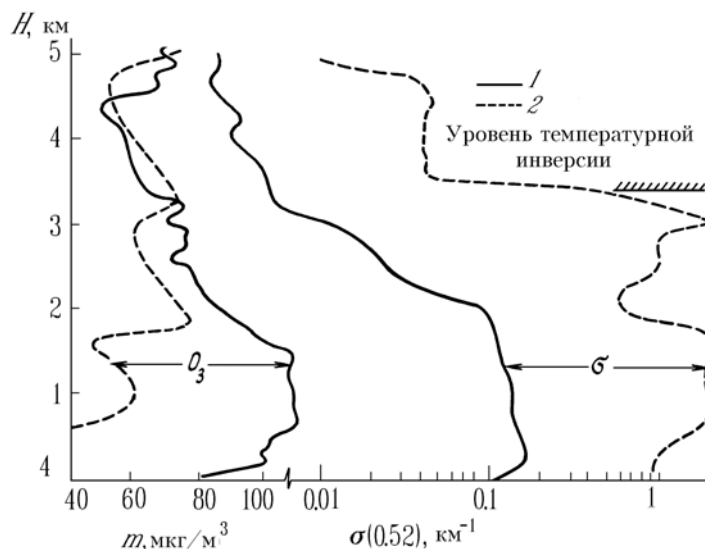
где c — скорость стока озона в единице объема на единичную поверхность аэрозольных частиц.

Для анализа были привлечены результаты, полученные в условиях пылевой бури во время комплексного Советско-американского эксперимента в районе г. Душанбе в сентябре 1989 г. В процессе эксперимента с 14 по 25 сентября осуществлялось регулярное самолетное зондирование вертикальных профилей метеопараметров, концентрации озона, оптических и микрофизических характеристик аэрозоля в диапазоне высот 0—6 км.

В дни, предшествующие пылевому выносу, в нижних слоях атмосферы происходило постепенное накопление озона. На высотах 2—6 км вариации озона ото дня ко дню были незначительны. Мощный пылевой вынос, зарегистрированный в ночь с 19 на 20.09.89 г., доставил в район наблюдения большое количество пылевых частиц, с появлением которых стало наблюдаться снижение содержания озона в нижних слоях атмосферы.

На рисунке представлены вертикальные профили массовой концентрации озона и коэффициента аэрозольного рассеяния $\sigma(\lambda = 0,52 \text{ мкм})$ для относительно чистых условий (18.09.89 г.) и пыльной бури (21.09.89 г.). (К сожалению, во время максимального выноса, где оптическая толщина достигала значений $\tau \sim 10$, вылет самолета-лаборатории был невозможен по условиям видимости в аэропорту г. Душанбе).

Из рисунка видно, что с появлением пылевых частиц в нижних слоях произошло существенное уменьшение содержания озона, в то время как в надыверсионном слое ($H > 3,4 \text{ км}$) структура вертикального профиля O_3 практически не изменилась. Этот факт позволяет предполагать, что в изменении содержания озона в условиях пыльной бури адвективные процессы играют значительно меньшую роль, чем влияние, обусловленное аэрозольными частицами.



Вертикальные профили массовой концентрации озона и коэффициента аэрозольного рассеяния: 1 — относительно чистые условия; 2 — пылевой вынос

Большие оптические толщи ($\tau \sim 10$, 20.09.89 и $\tau \sim 3$, 21.09.89 г.) значительно ослабляют радиационные и фотохимические процессы образования озона в этот период, и при проведении оценок этими процессами можно пренебречь.

Для оценки величины стока озона на аэрозольные частицы рассмотрим изменение его содержания в столбе воздуха с площадью основания 1 см^2 . В качестве верхней границы был определен уровень температурной инверсии (3,4 км). Для того чтобы исключить из рассмотрения сток озона на поверхность и возможное воздействие местных локальных источников озона, нижняя граница была выбрана на уровне $H = 500 \text{ м}$.

За время существования пыльной мглы в районе измерения (примерно 2 суток) общее содержание озона в этом столбе уменьшилось на $\Delta m \sim 10 \text{ мкг}$. Средняя поверхность аэрозольных частиц S в этом же объеме воздуха составила $\sim 10 \text{ см}^2$. Ее рассчитывали по данным фотоэлектрического счетчика. В отличие от обычного состояния атмосферы, когда значительное число частиц с размерами $r < 0,2 \text{ мкм}$ находится вне пределов измерения счетчика, использование фотоэлектрического счетчика в условиях пыльной мглы вполне оправдано, поскольку подавляющее число частиц имеет размеры $r > 0,2 \text{ мкм}$ и надежно фиксируется фотосчетчиком [6].

В соответствии с выражением (2) средняя скорость стока озона c в единице объема оценивается как $5 \cdot 10^{-11} \text{ г/см}^2 \cdot \text{с}$. Более точное значение удалось получить при рассмотрении короткого промежутка времени, когда иными процессами можно пренебречь с большей уверенностью. Для этого была проведена оценка скорости стока за 3 ч 20 мин между двумя последовательными зондированиями 21 сентября 1989 г.

Поскольку за это время наблюдалось и некоторое уменьшение содержания аэрозольных частиц, то c в выражении (2) оценивалась как:

$$c = \frac{m_0 - m(T)}{\int_0^1 S(t) dt}, \quad (3)$$

где S — площадь поверхности частиц.

В этом случае величина скорости стока c оказалась равной $3,9 \cdot 10^{-11} \text{ г/см}^2 \cdot \text{с}$. С учетом данных зондирования температуры воздуха и того, что среднее содержание озона \bar{m} за этот промежуток вре-

мени изменилось незначительно, удается оценить коэффициент гибели молекул озона γ в выражении (1). При среднем содержании озона $60 \cdot 10^{-12} \text{ г/см}^3$ и средней скорости движения молекул $3,9 \cdot 10^4 \text{ см/с}$ величина коэффициента гибели молекул озона $\gamma = 6 \cdot 10^{-5}$.

По данным [2, 4] величина γ для частиц почвенного, жидкокапельного и кристаллического аэрозоля лежит в пределах $10^{-4} \pm 10^{-6}$. Полученная нами оценка γ находится в пределах этого же интервала и близка к его верхней границе.

Таким образом, уникальность ситуации во время вторжения пылевых выносов, когда влияние источников и иных стоков озона пренебрежимо мало, позволила в явном виде описать роль аэрозоля в разрушении озона и достаточно корректно оценить коэффициент гибели молекул озона на поверхности пылевых частиц.

В случае проведения наблюдений озона и аэрозоля в приземном слое атмосферы, что являлось одной из важных задач в программе SATOR, продемонстрированный выше достаточно простой подход к оценке роли аэрозоля в разрушении озона не правомерен.

Во-первых, существенную роль в стоке озона начинает играть поверхность Земли и растительности, а во-вторых, существуют собственные независимые временные ритмы стоков и источников озона и аэрозоля; и наконец, их суточные вариации, обусловленные влиянием метеопараметров, существенно затрудняют интерпретацию полученных данных.

Измерения летнего цикла программы SATOR проводились круглосуточно с 21 июня по 7 июля 1991 г.

Для того чтобы оценить роль аэрозоля в разрушении озона, воспользуемся данными, полученными для темного времени суток (с 22-00 до 6-00), когда с определенной уверенностью можно предположить отсутствие фотохимических процессов образования озона и до минимума снижается действие промышленных источников озона и озонобразующих веществ. При интерпретации данных ночных измерений следует принять во внимание, что в ночных условиях синхронно со снижением концентрации озона отчетливо проявляется увеличение содержания аэрозольных частиц, обусловленное их накоплением в приземном слое (с падением температуры подстилающей поверхности снижается турбулентный и конвективный вынос аэрозоля в вышележащие слои атмосферы) и повышением относительной влажности воздуха, существенно увеличивающей объем и поверхность аэрозольных частиц. О синхронности этих процессов можно судить по рассчитанному нами коэффициенту взаимной корреляции между концентрацией озона и коэффициентом рассеяния ρ_m , σ , величина которого для ночных условий летнего цикла оказалась равной $\rho \approx -0,7$. Учитывая сильную межсуточную изменчивость концентрации озона и аэрозоля в течение цикла измерений, а также то, что данные получены в локальном объеме и на них существенно сказываются пространственные неоднородности измеряемых величин, ограничимся лишь оценкой для осредненных данных.

Средние значения оценивались по корреляционной диаграмме для величин $m_0 - m(T)$ и $\int_0^T S(t)dt$,

где временные интервалы T брались между различными сроками наблюдений и составляли от 2 до 8 ч.

В условиях Томска, в отличие от Душанбе, основную долю аэрозоля составляли частицы мелкодисперсной фракции, большая часть которых находится вне пределов чувствительности фотоэлектрического счетчика. Поэтому для оценки площади поверхности частиц мы воспользовались данными измерений коэффициента рассеяния $\sigma(\lambda = 0,52 \text{ мкм})$ и его связь с поверхностью аэрозольных частиц S , которая приближенно в рамках однопараметрической модели [7, 8] может быть записана

$$S \approx 6 \cdot 10^{-5} \sigma, \quad (4)$$

где S — площадь поверхности аэрозольных частиц, $\text{см}^2/\text{см}^3$; σ — коэффициент аэрозольного рассеяния, км^{-1} .

В соответствии с описанной выше процедурой и учетом выражения (4) средняя поверхность аэрозольных частиц оказалась $\bar{S} \approx 6 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{см}^3$. При среднем содержании озона $\bar{m} = 25 \text{ мкг/м}^3$ в течение ночного времени отмечалась убыль озона со средней скоростью $\sim 2,5 \text{ мкг/м}^3$ за 1 ч.

Для оценки стока озона на аэрозольные частицы воспользуемся двумя значениями коэффициента гибели молекул озона $\gamma = 10^{-5}$ и $\gamma = 10^{-4}$, величину которых, исходя из литературных источников, можно рассматривать как среднюю и максимальную соответственно.

Расчет по формуле (1) показывает, что для различных значений γ в нашем эксперименте сток озона можно оценить как $\Delta m = 0,05 \text{ мкг/м}^3$ в час для $\gamma = 10^{-5}$ и $\Delta m = 0,5 \text{ мкг/м}^3$ в час для $\gamma = 10^{-4}$.

Для рассматриваемых нами условий проведения летнего цикла программных наблюдений только от 2 до 20% убыли озона может быть обусловлено его стоком на аэрозольные частицы.

Таким образом, для иллюстрации роли аэрозольных частиц в разрушении молекул озона в настоящей статье рассмотрены два достаточно контрастных примера:

— первый, характеризующий условия аномально большого содержания частиц в нижнем 3-километровом слое атмосферы во время пылевого выноса показывает наличие в естественной атмосфере ситуаций, когда практически весь сток озона осуществляется на аэрозольные частицы:

— второй, на наш взгляд, — типичный для приземных условий, когда основную роль в разрушении озона играют иные процессы, а на долю аэрозольных частиц приходится не более нескольких десятков процентов от общего стока.

Исходя из проведенного анализа и полученных оценок можно сделать вывод, что в обычных атмосферных условиях с удалением от земной поверхности роль аэрозоля в разрушении молекул озона будет возрастать, а вблизи организованных источников аэрозольных выбросов, по-видимому, следует ожидать полного исчезновения озона на поверхности частиц.

1. Химия нижней атмосферы /Под ред. С. Расула. М.: Мир, 1976. 408 с.
2. Перов С. П., Хргиан А. Х. Современные проблемы атмосферного озона. Л.: Гидрометеониздат, 1980. 288 с.
3. Pittock A. B. //J. Atm. Sci. 1966. V. 23. № 5. P. 538–542.
4. Cadle R. D., Crutzen P., Ehhalt D. //J. Geophys. Res. 1975. V. 80. № 24. P. 3381–3385.
5. Ивлев Л. С. //Атмосферный озон. Л., 1988. С. 63–79.
6. Белан Б. Д., Исаков А. А., Лукшин В. В. и др. //V Всесоюз. совещ. по атмосфер. оптике (Тезисы докл.). Томск, 1991. С. 29.
7. Кабанов М. В., Панченко М. В., Пхалагов Ю. А. и др. Оптические модели прибрежных атмосферных дымок. Новосибирск: Наука, 1988. 201 с.
8. Горчаков Г. И., Емиленко А. С., Свириденков М. А. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО 1981. Т. 17. № 1. С. 39–49.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
26 марта 1992 г.

B. D. Belan, M. V. Panchenko, S. A. Terpugova, G. N. Tolmachev. An Estimate of the Ozone Sink on Aerosol Particles.

This paper presents estimations of the aerosol influence on the process of the ozone molecules destruction. It is shown that under typical optical-meteorological conditions in the ground atmospheric layer the aerosol particles make not more than 20 percent of the total ozone sink. On the other hand, in conditions of anomalously large aerosol content in the atmosphere, practically, the entire ozone sink is due to aerosol. The value of the coefficient of the ozone molecules annihilation on the dust particles surface was estimated to be $\gamma = 6 \cdot 10^{-5}$ according to data obtained during the joint Soviet-American Dust Experiment «DUNE».