

В.М. Климкин, В.Г. Соковиков, В.Н. Федорищев, В.А. Чикуров

ДВА ВИДА СУТОЧНЫХ ВАРИАЦИЙ ОЗОНА В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 9.04.99 г.

Принята к печати 5.05.99 г.

Обобщены результаты измерений суточного хода O_3 в приводных слоях атмосферы прибрежных ($50 \div 100$ км от суши) морских акваторий в средних широтах в летнее время. Установлено, что в приводных слоях атмосферы имеют место два периода накопления O_3 – дневной и вечерний. Накопление завершается быстрым спадом O_3 во второй половине ночи. Анализ простейшей трехрезервуарной схемы суточного хода O_3 показывает, что для приводной атмосферы характерны не только суточные вариации генерации O_3 , но и суточные вариации скоростей стока.

Природа озона (источков и стоков) в нижних частях тропосферы – это объект длительной дискуссии. В моделях Х. Юнга тропосферный озон является результатом переноса O_3 из стратосферы [1], согласно другим моделям озон в тропосфере и пограничном слое атмосферы образуется в результате фотохимических процессов [2, 3]. Одна из характерных особенностей временного поведения плотности O_3 в нижней приземной части атмосферы – это существование ее суточных вариаций. Этому вопросу посвящены многочисленные экспериментальные исследования [4, 5], показывающие высокую изменчивость формы и абсолютных значений O_3 . Обобщение и систематизация в последовательном ряду суток данных по суточным вариациям O_3 в пограничном слое позволят лучше понять механизмы формирования тропосферного озона.

На сегодняшний день многочисленные результаты измерений O_3 в пограничном слое тропосферы свидетельствуют о том, что суточные вариации озона в пограничном слое следуют суточному солнечному циклу. Общим признаком суточных вариаций O_3 является минимум его плотности в утренние часы, в то время как максимум плотности озона не всегда совпадает с максимумом потока солнечной радиации. С ростом высоты, начиная примерно с 50 м, амплитуда вариаций уменьшается, и при высотах более $300 \div 500$ м суточные вариации практически не видны.

Однако в пограничном слое наблюдаются и другие «странные» виды суточных вариаций [4], с первого взгляда не связанные с суточными изменениями потока солнечной радиации. Такие вариации могут содержать несколько максимумов, или максимумы могут приходиться на ночное время и т.д.

Нами проводились многочисленные наблюдения вариаций озона в различных географических точках на суше и на море. Изменения выполнялись в летние месяцы: как правило, в июле и в августе в средних широтах с помощью хемилюминесцентного озонметра (рис. 1) с размещением пробозаборника на высоте $1 \div 10$ м над уровнем местности или моря. Измерения проводились вблизи г. Томска, в морских портах России при стоянке судна и в открытом море как на станциях, так и на ходу судна при удалении на $50 \div 100$ км от берегов. Тропосфера вблизи г. Томска явля-

ется типичным примером континентальной тропосферы. В районах морских портов тропосфера находится под влиянием моря или суши в зависимости от направления движения воздушных масс и в средних широтах подвержена бризу. В море на удалении $50 \div 100$ км от берегов атмосферу по отношению к O_3 можно считать морской, так как время перемещения воздушных масс на такие дальности при стандартной ветровой обстановке (~ 5 м/с) равно $\sim 0,5$ сут.

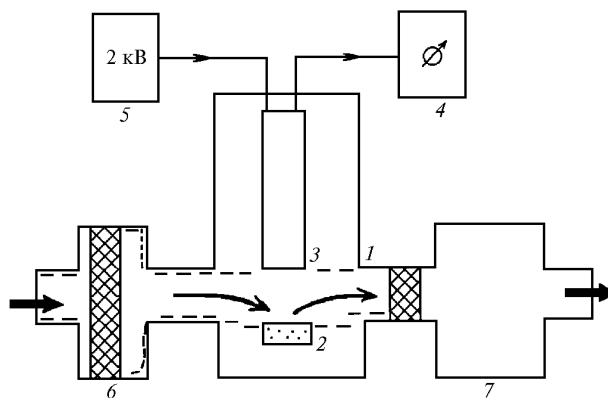


Рис. 1. Схема озонметра: 1 – контейнер; 2 – таблетка красителя; 3 – ФЭУ; 4 – счетчик фотонов; 5 – источник питания ФЭУ; 6 – фильтры; 7 – побудитель

На рис. 2 кривыми 1–5 представлены образцы записей суточных вариаций озона: в Томске – 1, в Черном и Японском морях – 2, 4, в порту вблизи г. Владивостока – 5 и Тихом океане в районе Петропавловска-на-Камчатке – 3. Как видно из записей, кривые, характеризующие суточные ходы O_3 в морях (Черное море, 30 км западнее Пицунды, Авачинская бухта, 50 км восточнее Петропавловска-Камчатского, Японское море, 100 км восточнее Владивостока) не имеют какой-либо структуры, максимумы плотности O_3 приходятся на ночные часы местного летнего времени. Суточный ход O_3 в глубине континента, как правило, содержит компоненты различных временных масштабов, проявляющихся на записях в виде значительного шума.

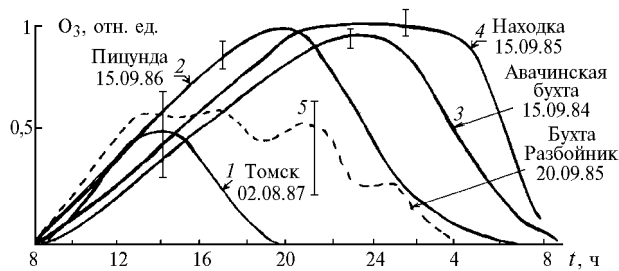


Рис. 2. Записи суточных вариаций O_3 в различных географических точках

Как видно из записей на рис. 2, различия в суточных вариациях тропосферного O_3 в море и на суше носят принципиальный характер. В связи с этим целесообразно называть их морскими и континентальными типами суточных вариаций. Их обобщенные виды представлены на рис. 3. Внешнее отличие их в том, что для пограничного слоя континентальной тропосферы максимум плотности озона приходится на 12÷13 ч дня, т.е. близок суточному максимуму потока солнечной радиации, а для пограничного слоя морской тропосферы максимум O_3 сдвинут на время ~12 ч, т.е. приходится на вечернее и ночное время. Мы часто наблюдали, например, суточные изменения O_3 с максимумами, которые соответствовали 2÷3 ч ночи. Общим свойством суточных вариаций в нижнем слое морской и континентальной тропосферы является минимум плотности озона в утренние часы, обычно около 6÷8 ч. Следует также отметить, что максимальные и средние значения плотности O_3 в приводном пограничном слое тропосферы, как правило, больше, нежели в тех же слоях атмосферы над континентом. Мы считаем, что наблюдаемые в экспериментах разнообразные виды суточных вариаций O_3 в пограничном слое летней тропосферы средних широт являются производными от двух указанных выше.

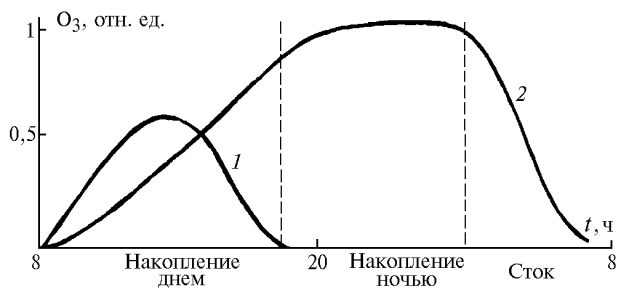


Рис. 3. Обобщенные виды континентального 1 и морского 2 видов суточных вариаций озона

Например, суточные вариации O_3 в портах в основном морские, но наблюдались случаи и смешанного временного распределения (см. кривую 5 на рис. 2). В этой связи следует также отметить, что суточные вариации O_3 в Крыму [4] и на побережье Италии [6] являются типичными случаями континентального, морского и смешанного хода концентрации O_3 . Естественно, что наблюдаемые нами конкретные образцы суточных вариаций озона соответствуют теплему времени года в средних широтах Северного полушария.

Весьма интересным и информативным является вопрос о влиянии ограниченных участков суши, например островов, на пространственное распределение озона в атмосфере их прибрежных акваторий. С этой целью были

выполнены записи вариаций O_3 при движении судна в ночное время вблизи островов различной площади. Выбор ночного времени связан с тем, что в это время континентальный суточный ход концентраций O_3 имеет минимум, а морской близок к максимуму, т.е. различия в концентрации O_3 на суше и на море в это время максимальны.

В результате экспериментов установлено, что с наветренной стороны островов в пограничном слое атмосферы имеется обычное состояние плотности O_3 для этого времени суток, а с подветренной стороны островов концентрация O_3 ниже и характеризуется существенной пространственно-временной изменчивостью, т.е. имеет место смешанный вид суточных вариаций. В этих экспериментах пространственно-временные вариации содержания O_3 , связанные с проходом воздушной массы над сушей, прослеживались на расстояниях до 1 км от береговой черты островов. На рис. 4 представлены типичная схема эксперимента и образцы записей сигналов озонметра при прохождении судна мимо острова. Как видно из записей, в ветровой тени острова имеют место глубокие вариации плотности O_3 .

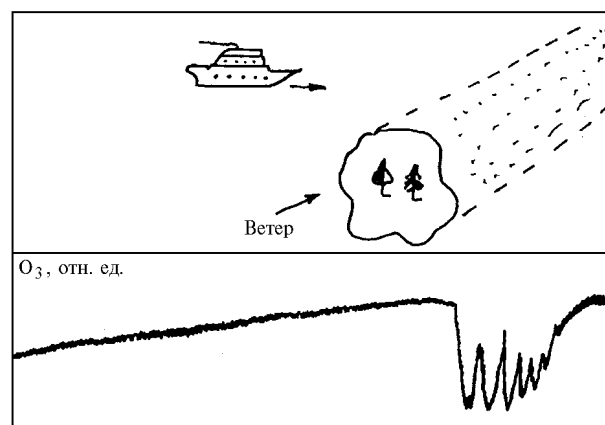


Рис. 4. Схема эксперимента и запись пространственного распределения плотности озона

Эти эксперименты наглядно подтверждают неоднократно выдвигаемое предположение о том, что гибель O_3 в приземном слое тропосферы и суточные вариации O_3 являются результатом взаимодействия O_3 с элементами подстилающих поверхностей. В этом плане указанное выше деление суточных вариаций на морской и континентальный типы является естественным.

Отметим отличительные особенности морского типа суточных вариаций O_3 . Во-первых, это накопление O_3 в приводном слое атмосферы во второй половине дня, т.е. в то время, когда солнечная активность падает. Во-вторых, существует период медленного накопления O_3 после захода солнца. Продолжительность вечернего и ночного накопления O_3 может составлять 5÷10 ч. В-третьих, указанные периоды накопления O_3 завершаются относительно быстрым падением плотности O_3 , характерное время такого падения 2÷3 ч. Подобные морские суточные вариации O_3 регистрировались также другими авторами [6–8].

Как известно, величины «стока» O_3 сушей и водной поверхностью различны, причем величина стока O_3 водной поверхностью в несколько раз меньше [9]. Однако приведенные выше принципиальные различия в суточном ходе O_3 на суше и в море не могут быть объяснены указанными выше различиями в величинах стока.

Представим, например, процессы генерации и гибели O_3 в виде трехрезервуарной схемы, изображенной на рис. 5: 3 – резервуар истока (тропосфера), 2 – резервуар текущих значений O_3 (приповерхностный слой тропосферы), 1 – резервуар стока (подстилающая поверхность); α_2 и α_3 – скорости генерации O_3 в резервуарах 2 и 3, τ_{32} , τ_{21} – времена процессов перехода O_3 из резервуара 3 в резервуар 2 и из 2 в 1 соответственно. Такие схемы хорошо известны, ими описываются процессы накопления изотопов, разгорания люминесценции и т.д. В частности, система кинетических уравнений для плотности O_3 в резервуаре 2 в предположении, что с момента времени $t = 0$ процессы генерации озона отключены, т.е. $\alpha_3 = \alpha_2 = 0$, имеет следующее решение:

$$N_2 = N_{20} [(\gamma + 1) \exp(-t/\tau_{21}) - \gamma \exp(-t/\tau_{32})],$$

где $\gamma = (N_{30}/N_{20}) [\tau_{21}/(\tau_{21} - \tau_{32})]$, а N_{20} и N_{30} – плотности молекул O_3 в резервуарах 2 и 3 в момент времени $t = 0$.

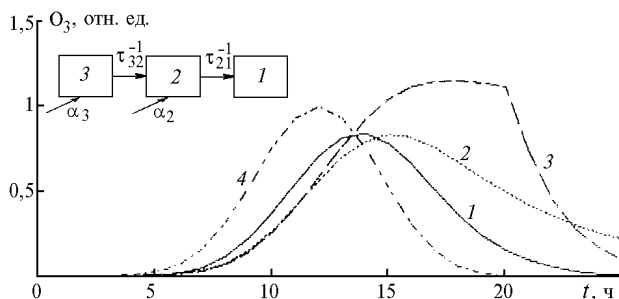


Рис. 5. Трехрезервуарная схема формирования суточных вариаций озона и результаты расчета: кривые 1 – суточные вариации над континентом; 2 – иллюстрация деформации суточных вариаций при увеличении τ_{21} в 3 раза; 3 – кривая суточных вариаций при разделении процессов генерации и гибели озона во времени; 4 – процесс генерации озона

На рис. 5 представлен вариант численных решений уравнений трехрезервуарной схемы в предположении, что фотохимические процессы генерации озона в тропосфере как над сушей, так и над морем имеют равные скорости и их можно моделировать синусоидальным законом (кривая 4) с полупериодом ~ 12 ч. Другие источники озона, такие как вынос озона из верхних слоев тропосферы, не учитывались. Величины τ_{21} и τ_{32} подбирались как для суши, так и для моря по критерию наилучшего согласия формы расчетных кривых с экспериментальными. Как видно из решений (кривая 1), удается подобрать такие τ_{21} и τ_{32} , при которых ход O_3 континентальной тропосферы удовлетворительно описывается этой моделью. Однако для приводной тропосферы такая модель не описывает указанных выше наиболее важных черт суточных вариаций ни при

каких значениях τ_{21} и τ_{32} . Если, например, принять, что характерные времена разрушения O_3 морской водой в 3 раза больше, чем сушей [9], то решение имеет вид, представленный кривой 2 на рис. 5, не воспроизводящей экспериментальные зависимости.

Существенно лучше экспериментальный суточный ход O_3 в море описывается более сложными моделями, например кривая 3 соответствует модели разделения во времени процессов генерации и стока – а именно отсутствию стока в период $8 \div 22$ ч, а в период $22 \div 8$ ч сток равен стоку на сушу.

Поиск решений, удовлетворительно описывающих временное поведение O_3 в морской тропосфере (см., например, кривую 3 на рис. 5), показал, что наблюдаемое в эксперименте суточное поведение O_3 с максимумом в ночное время может формироваться следующими процессами, приводящими к непостоянству во времени стока озона в тропосфере над морем: бризом, если «континентальная» тропосфера может достигать района измерений спустя $6 \div 8$ ч после захода солнца; наличием в морской тропосфере источника озона, имеющего суточный ход генерации O_3 , сдвинутый на $6 \div 8$ ч по отношению к фотохимическому процессу генерации O_3 в атмосфере; существованием особого суточного хода стока озона в тропосфере над морем, максимум которого приходится на вторую половину ночи.

Авторы признательны И.И. Ипполитову и **О.А. Пазикову** за поддержку работы в период морских экспедиций.

1. Юнге Х. Химический состав и радиоактивность атмосферы. М.: Мир, 1965. 424 с.
2. Петров С.П., Хргиан А.Х. Современные проблемы атмосферного озона. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 287 с.
3. Chanuvides W.L., Wolker J.C.G. A Time-Dependent Photochemical Model for Ozon near the Ground // J. Geophys. Res. 1976. V. 81. N 3. P. 413–420.
4. Борисов В.В., Ивлев Л.С., Сирота В.Г. Временные вариации концентрации озона в приземном слое атмосферы. Атмосферный озон // Труды VI Всесоюзного симпозиума. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. С. 143–146.
5. Logan J.A. Ozon in Rural Areas of the United States // J. of Geophys. Res. 1989. V. 94. N D6. P. 8511–8532.
6. Giovanelli G., Geargiadis T. Transport of Photochemical Ozon Along the Western Adriatic Shore // Nuevo cimento. 1985. V. 8. N 6. P. 727–742.
7. Regener V.N. Distruction of Atmospheric Ozon of the Ocean Surface // Arch. Met. Geophys. Biokl. 1974. Ser. A. 23. P. 131–135.
8. Lenschow H., Pearson R.I., Stankov B.B. Measurements of Ozon vertical flux to ocean and forest // J. Geophys. Res. 1982. C. 87. N 11. P. 8833–8837.
9. Galbally E., Roy C.R. Destruction of ozon at the earths surface // Quart. J. R. Met. Soc. 1980. V. 106. P. 599–620.

V.M. Klimkin, V.G. Sokovikov, V.N. Fedorishchev, V.A. Chikurov. Two Types of the Ozon Diurnal Variation in Boundary Atmospheric Layer.

Measurement results on the O_3 diurnal behaviour in the above-water atmospheric layers of coastal marine aquatories (50 to 100 km from the land) for summer seasons of mid-latitudes are generalized for many years. Two periods of the O_3 accumulation – day and night – were found. The accumulation period is followed by fast decrease of the O_3 in the second period of night. Analysis of the simplest three-reservoir scheme of the O_3 diurnal behaviour shows that the above-water atmosphere is characterized by diurnal variation both of the O_3 generation and rates of destruction.