

**Б.Д. Белан, В.К. Ковалевский, В.Е. Мелешкин, М.К. Микушев, Е.В. Покровский,  
Г.Н. Толмачев, В.М. Усманова, А.В. Щербатова, А.И. Щербатов**

## **ИЗМЕРЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОЗОНА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ SATOR С ПОМОЩЬЮ ОЗОНОЗОНДОВ**

Описывается опыт измерения вертикального распределения озона с помощью зондов, в которых реализован электрохимический метод. Приведены примеры полученных в ходе эксперимента SATOR вертикальных профилей озона.

Озон относится к числу наиболее важных микропримесей воздуха, которая выполняет в атмосфере защитную функцию. Поглощая жесткую ультрафиолетовую солнечную радиацию, озон предохраняет биосферу от ее пагубного воздействия. В последние годы актуальность исследования озоносферы еще более усилилась. Это связано с все возрастающим загрязнением воздуха, которое вызывает в вертикальном распределении озона двоякий эффект: уменьшение его концентрации в стратосфере и увеличение в приземном слое воздуха. Поэтому мировым сообществом в последние годы проблеме озона уделяется большое внимание.

Систематические измерения содержания озона ведутся на 130 станциях, 35 из которых находятся на территории СНГ. Однако на большинстве из этих станций фиксируется только общее содержание озона и лишь на некоторых проводятся измерения его вертикального распределения. Спутниковые же средства зондирования не позволяют пока получать достоверную информацию о вертикальных профилях озона ниже уровня 30 гПа [1]. Поэтому измерения вертикального распределения озона проводятся пока в основном при помощи озонозондов, состыкованных со стандартными метеорологическими радиозондами, реже при помощи ракет. Большие перспективы имеют в будущем и дистанционные (лазерные) методы зондирования.

До настоящего времени наиболее известными являются три типа озонозондов: оптические, хемилюминесцентные и электрохимические. Их принципы действия кратко описаны в [2, 3]. Первые измерения вертикального распределения озона были проведены еще в 1938–1939 гг. в США при помощи оптических озонозондов [4]. Но эти озонозонды, как и последующие [5–10], широкого распространения не получили. Это связано с невозможностью получения данных в тропосфере, большими погрешностями измерений и относительно высокой стоимостью зондов.

Хемилюминесцентные зонды использовались для зондирования в 1962–1964 гг. на некоторых станциях Северной и Центральной Америки, Гренландии. Однако этот тип зондов также не нашел широкого применения при использовании на газонаполненных оболочках. Причины этого явления не совсем ясны, принимая во внимание их малую инерционность, которая в конечном итоге является определяющей для ракетного зондирования [11]. Тем не менее попытки разработки таких зондов продолжают [12].

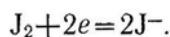
Наиболее широкое применение к настоящему времени получили электрохимические озонозонды. При помощи этих зондов ведутся регулярные измерения озона в Боулдере (США) и Пуне (Индия) с 1964 г., Тальвиле (Швейцария) с 1966 г. Впервые электрохимический озонозонд был предложен Брюэром и Мильфордом (Великобритания), а в дальнейшем в сочетании с радиозондом был разработан для серийного выпуска в США фирмой Mast Development Company [13]. Сейчас озонозонды такого типа применяются для сетевых наблюдений в США, Канаде, Индии, ФРГ [14, 15].

В 1981 г. в г. Томске по программе SATOR начато зондирование атмосферы при помощи озонозондов OSE-3 производства бывшей ГДР [16]. Целью запусков, кроме исследования вертикального распределения озона, было также сопровождение лидарных измерений этой компоненты. В настоящей статье приводятся некоторые из полученных результатов.

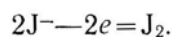
Озонозонд OSE-3 близок по принципу действия озонозону Брюэра-Маста (Brewer-Mast, Model 730). В них реализован метод, основанный на реакции озона с йодистым калием:



Когда в растворе находятся два электрода, к которым приложено небольшое напряжение, молекулы йода у катода образуют ионы



Под действием приложенного напряжения они движутся к аноду, где восстанавливается йод



Если же помешать возвращению восстановившегося йода обратно в раствор, то ток через ячейку будет пропорционален количеству озона, вступающего в реакцию с раствором. Данный метод отличается высокой чувствительностью, так как на 1 мкг реагирующего озона выделяется 5,3 мкг йода. Одним из главных его недостатков является неизбирательность. Так, оксиданты, например  $\text{NO}_2$ , вступают в реакцию подобно озону, другие вещества (восстановители), например  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ , вызывают обратную реакцию. В связи с изложенным предъявляются особые требования к составу озонгазовой смеси при проведении калибровок и к чистоте окружающего воздуха при предполетной подготовке прибора. Именно с этим связано большинство неудач при подготовке озонозондов и их выпуске в полет. Ячейка озонозонда OSE-3 выполнена из полистирола и имеет цилиндрическую форму. Она содержит цилиндрический катод, изготовленный из платиновой сетки (общая площадь около  $6 \text{ см}^2$ ), и анод, изготовленный из серебряной проволоки длиной 3 см, диаметром 0,5 мм. Материалы корпуса ячейки, подводящей трубки, поршня и корпуса насоса подобраны, исходя из условия минимального разрушения озона на пути к раствору [3]. Для еще большего уменьшения деструкции озона во время предполетной подготовки производится прокачка ячейки воздухом с максимально возможной концентрацией озона.

Функциональная схема озонозонда изображена на рис. 1 [16]. Воздух через ячейку 2 прокачивается насосом 3, приводимым в действие при помощи двигателя 4. Для обеспечения равномерного вращения двигателя и, как следствие, постоянного расхода воздуха через ячейку используется стабилизатор частоты вращения двигателя 5. Питание двигателя осуществляется от водоналивной батареи 6. Измерительный преобразователь 1 представляет собой преобразователь ток – частота. Его питание осуществляется от батареи радиозонда МАРЗ. При изменении тока через ячейку от 0 до 7 мкА частота на выходе преобразователя изменяется в пределах от 50 до 200 Гц. Все узлы озонозонда, за исключением батареи, расположены в пенопластовом корпусе, для того чтобы обеспечить температуру не ниже  $+2 \dots +7^\circ \text{C}$  к концу полета.

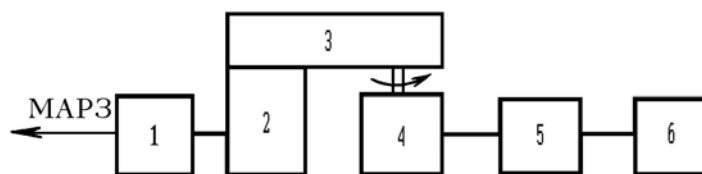


Рис. 1. Функциональная схема озонозонда OSE-3: 1 – измерительный преобразователь; 2 – ячейка; 3 – насос; 4 – двигатель насоса; 5 – стабилизатор двигателя; 6 – батарея питания двигателя

Ячейка озонозонда заполняется  $2 \text{ см}^3$  раствора, 1000 мг которого содержит  $2,522 \text{ г Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ,  $1,150 \text{ г NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $1,000 \text{ г KJ}$  [16]. У данного раствора точки кипения и замерзания совпадают при давлении около 6 гПа, поэтому измерения при давлении выше 6 гПа ненадежны. Фактически это давление является теоретическим пределом использования данного метода. Парциальное давление озона определяется по формуле

$$P_3 = 1,171t \frac{T}{T_0} if,$$

где  $t$  – время прокачки насосом  $100 \text{ см}^3$ ;  $T$  – температура насоса;  $T = 273,15 \text{ K}$ ;  $i$  – ток в мкА;  $f$  – поправка Брюэра на разрушение озона в заборном устройстве ( $f = 1,04$ ). На практике же для каждой ячейки существуют зависимости парциального давления озона от тока в виде графиков, которые проверяются и корректируются во время предполетной подготовки. Следует отметить, что в процессе работы возникают ошибки из-за изменения эффективности работы насоса от давления воздуха [17]. В методике, разработанной в ГДР, в этом случае вводится поправка в зависимости от давления и температуры ячейки. Эта поправка достигает 1% при  $P = 100 \text{ гПа}$ , 6,5% при 30 гПа, 17% при 10 и 26% при 6 гПа [15].

Во время проведения измерений для сопровождения радиозонда использовалась РЛС «Метеор». Так как минимальная частота преобразователя озонозонда составляет 50 Гц для расширения диапазона считаемых импульсов в блоке МТ-32 РЛС «Метеор» были изменены параметры цепи С87, R141, С88 [18]. В первом цикле измерений озонозонд стыковался с радиозондом РКЗ-2. Для этого радиозонд РК.3-2 подвергся существенной переделке. Баропереклюатель заменялся электромеханическим коммутатором от радиозонда РКЗ-5, у которого разрезался сегмент, соответствующий времени измерения температуры. В выходную цепь блока преобразователя добавлялся истоковый повторитель. Импульсы преобразователя через истоковый повторитель, разделительную емкость и реле, управляемое через коммутатор, подавались непосредственно на управляющую сетку лампы измерительного генератора радиозонда. Измерительная цепь датчиков влажности и температуры во время передачи частоты озона отключалась. При лабораторных исследованиях и последующих измерениях не было обнаружено существенных отклонений в работе переделанного радиозонда и изменений характеристик измерительного преобразователя. Переделка радиозонда осуществлялась после проверки электрических параметров радиоблока. Контрольная проверка проводилась согласно [19].

В последующих циклах измерений озонзондов OSE-3 выпускался с радиозондом MAP3-2-1 [16, 20]. Методика подготовки OSE-3 к выпуску в целом соответствовала описанной в [16]. Основными этапами ее являются очистка ячейки путем промывки и прокачки воздуха с высокой концентрацией озона, формовка ячейки, «тренировка» ячейки и проверка градуировочного графика измерительного преобразователя.

Еще раз следует отметить, что на всех этапах предполетной подготовки основным требованием является предельная чистота окружающего воздуха. Во время подготовки озонзондов для проверки калибровки использовались генератор озона ГС-02 и хемилюминесцентный озономер З-02 П1, разработанные в ЛЭК (Ленинград).

Подъем зондов осуществлялся на обычных латексных оболочках. В процессе проведенных экспериментов не было обнаружено влияния «следов» керосина (бензина) на показания ячейки, как отмечалось в [3]. Тем не менее для уменьшения вероятности попадания паров керосина (бензина) в ячейку зонд привязывался к оболочке веревкой длиной 20–30 м.

Обработка данных радиозондирования производилась согласно [16, 19, 20]. Пересчет парциального давления озона в массовую концентрацию осуществлялся по формуле

$$\rho_3 = \frac{P_3}{0,1732 \cdot 10^{-3} T},$$

где  $\rho_3$  — концентрация озона, мкг/м<sup>3</sup>;  $P_3$  — парциальное давление озона, нбар;  $T$  — температура воздуха, К.

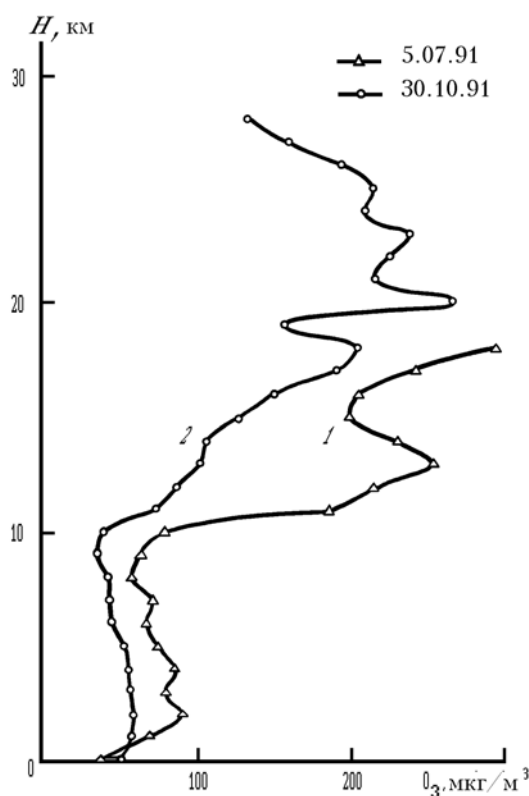


Рис. 2. Вертикальное распределение озона: 1 — 5 июля 1991 года; 2 — 30 октября 1991 года

На рис. 2 представлены два из полученных вертикальных профилей массовой концентрации озона. Профиль от 05.07.91 г. измерен при помощи озонзонда OSE-3 состыкованного с радиозондом РКЗ-2, а профиль от 30.10.91 г. — с радиозондом MAP3-2-1. Оба вертикальных профиля получены при образовании комплекса струйных течений, чем, по-видимому, объясняется наличие не одного, а двух максимумов [21].

Однако для более полного анализа необходима дополнительная аэросиноптическая информация, которую пока получить не удалось.

В заключение следует отметить, что озонзонд OSE-3 относительно сложен в эксплуатации и требует довольно широкого комплекса оборудования при предполетной подготовке. Тем не менее следует отметить его высокую надежность при точном соблюдении методики подготовки озонзонда к выпуску.

1. Атмосфера. Справочник. Л.: Гидрометеониздат. 1991. 346 с.

2. Павлов Н. Ф. Аэрология, радиометеорология и техника безопасности. Л.: Гидрометеониздат, 1980. С. 180–182.

3. Зайцева Н. А. Аэрология. Л.: Гидрометеондат, 1990. С. 230–237.
4. Colbentz W. W., Stair R. // J. Res. U. S. Nat. Bur. Stand. 1939. V. 22. P. 295–303.
5. Vassy A. // J. Sci. Mat. 1958. V. 10. P. 63–64.
6. Pätzold H. K. // Hesse W. Handbuch D. Aerologie. Berlin, 1961. P. 458–531.
7. Бритаев А. С., Иозенас В. А. // Тр. ЦАО. 1968. Вып. 70. С. 58–65.
8. Kobayashi J. // Proc. Ozone Symp. Albuquerque. 1964. Geneva, 1985. P. 23.
9. Froment G. // Annal. Geoph. 1969. V. 25. № 1. P. 159–163.
10. Piscalar F. // Proc. Ozone Symp. Albuquerque. 1964. Geneva, 1965. P. 24.
11. Тишин С. В. // Фотохимические процессы земной атмосферы. М.: Наука, 1990. С. 167–170.
12. Ермаков Е. И., Игнатов В. П., Комоцков А. В. и др. // Атмосферный озон. М.: Гидрометеондат, 1990. С. 35–37.
13. Brever A. W., Milford K. R. // Proc. Roy. Soc. Ser. A. 1960. V. 256. P. 470.
14. Mani A., Sreedharan C. R. // Pure Appl. Geophys. 1973. V. 106–108. № 5–7. P. 1180–1191.
15. Ronnenbeck K., Sonntag D. // Z. Meteorol. 1976. Bd. 26. H1. S. 15–20.
16. Ozonsonde OSE-3. // Meteorologischer Dienst der DDR Aerologisches Observatorium. DDR, Lindenberg, 1987. № 1231. S. 3–15.
17. Dutsh H. U. // NCAR Tech. Note. 1966. № 10. P. 411.
18. Король О. Г., Черняк Р. Д. Основы радиолокации и метеорологические радиолокационные устройства. Л.: Гидрометеондат, 1971. 265 с.
19. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 4. Аэрологические наблюдения на станциях. Часть IIIa. Температурно-ветровое зондирование атмосферы системой «Метеорит» РКЗ. Л.: Гидрометеондат, 1973. С. 76–93, 98–131.
20. Методические указания по производству радиозондирования атмосферы с помощью малогабаритных радиозондов МАРЗ на наземных и судовых аэрологических станциях. Выпуск 53. М.: Гидрометеондат, 1986. С. 11–19.
21. Белан Б. Д. // Атмосферный озон. Л.: Гидрометеондат, 1987. С. 270–274.

Институт оптики атмосферы СО РАН,  
Томск

Поступила в редакцию  
26 марта 1992 г.

B. D. Belan, V. K. Kovalevskii, V. E. Meleshkin, M. K. Mikushev,  
E. B. Pokrovskii, G. N. Tolmachev, V. M. Usmanova, A. V. Shcherbatova,  
A. I. Shcherbatov. **Measurements of the Ozone Vertical Distribution in the Atmosphere with the Ozone-Sondes in the Complex SATOR Experiment.**

An experiment on measuring the ozone Vertical distribution using electro-chemical technique is described. Examples of ozone vertical profiles obtained during SATOR experiment are presented.