

А.М. Звягинцев

О РАЗРАБОТКЕ АЭРОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ОЗОНА В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЭРОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

Представлены результаты разработки аэрологических измерителей концентрации озона (озонозондов) в Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО). Описаны три типа измерителей озона: электрохимический, хемиллюминесцентный и полупроводниковый; два первых типа были исследованы в лабораторных и полевых условиях, третий – только в лабораторных. Экспериментальные электрохимические озонозонды разработки ЦАО показали метрологические характеристики на уровне лучших мировых образцов; в частности, корректирующий множитель, являющийся основным метрологическим показателем озонозонда, по результатам 20 выпусков в 5 пунктах на территории СНГ, проведенных различными операторами в 1991–1992 гг., составил $1,053 \pm 0,079$.

Достоинствами хемиллюминесцентного озонозонда являются быстродействие (что позволяет добиться высокого пространственно-временного разрешения), высокая чувствительность и простота предполетной подготовки. Полупроводниковый измеритель значительно дешевле остальных, что в перспективе может позволить проводить озонное зондирование вместе с аэрологическим, однако еще нуждается в доработке технологии изготовления и исследованиях метрологических характеристик. По результатам исследований сделан вывод о соответствии качества разработанных озонозондов существующим в международной практике требованиям и о возможности их использования в исследовательских целях.

В настоящее время для измерения профилей вертикального распределения озона (ВРО) в мире используют несколько типов аэрологических озонозондов, на которых наиболее распространены озонозонд ЕСС (от английской аббревиатуры словосочетания «электрохимическая концентрационная ячейка») конструкции У. Комхира [1, 2]. Его достоинствами являются: 1) достаточно высокие метрологические характеристики; 2) умеренные требования к квалификации оператора, сравнительная простота эксплуатации озонозонда и связанный с этим непродолжительный срок обучения, а также 3) неприхотливость к условиям предполетной подготовки (которую можно без особых затруднений выполнить в полевых условиях), в частности к возможным нарушениям правил эксплуатации недостаточно квалифицированным оператором. Вместе с тем этот озонозонд имеет и определенные недостатки, в частности: 1) довольно высокую стоимость (при выполнении озонного зондирования совместно со стандартным аэрологическим общая стоимость расходных материалов увеличивается примерно в 5 раз, поэтому его и проводят значительно реже регулярного аэрологического), а также общие недостатки, присущие озонозондам электрохимического типа: 2) невысокое быстродействие (около 30 с у поверхности земли; при подъеме быстродействие может только ухудшаться), что затрудняет разрешение тонкой структуры озонового слоя; 3) резкое ухудшение точности измерений на высотах более 25 км, обусловленное неконтролируемым падением производительности насоса; 4) практический потолок измерений на высоте около 32 км; 5) неудобства, связанные с использованием «мокрой химии» на этапе предполетной подготовки. В условиях России озонозонды нуждаются в стыковке с применяемой в стране системой передачи и обработки аэрологической информации. Поэтому с 1989 г. нами в Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО) было проведено исследование, имеющее целью разработку системы озонного зондирования, более пригодной для использования в России. В настоящей работе кратко изложены результаты разработки отечественного озонозонда и некоторые материалы его исследований. Кроме первичного измерителя озона (в дальнейшем – просто датчика) электрохимического типа, исследованы также возможности применения хемиллюминесцентного и полупроводникового датчиков.

Важнейшей метрологической характеристикой, свидетельствующей о точности измерений с помощью озонозонда, является корректирующий (в зарубежной литературе используют также термин «нормализующий») фактор K – отношение общего содержания озона (ОСО), измеренного с помощью достаточно точного наземного озонметра (например, спектрофотометра Добсона) к проинтегрированному измеренному профилю ВРО; в специальных метрологических исследованиях [3–5] для озонозонда ЕСС найдено, что K , полученный разными

группами операторов, лежит в диапазоне от 0,93 до 1,04, а его среднеквадратическое отклонение (СКО) для каждой из групп – около 0,07 (по результатам регулярных измерений в 1983–1987 гг. на станции NASA в Натале, Бразилия [6], множитель K составил $0,98 \pm 0,11$).

В Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО) к 1990 г. на основе собственной технологии автором был разработан электрохимический озонзонд [7–9], близкий по конструкции к озонзонду ЕСС-5а производства США, но отличающийся от него составом и технологией изготовления некоторых компонентов и использующий материалы только отечественного производства. Также была разработана (В.И. Ермаковым) система передачи информации от комбинации озонзонда с радиозондом типа МАРЗ на наземную радиолокационную станцию (РЛС) типа «Метеорит» (или «Метеорит-2»); информация о концентрации озона и стандартных метеопараметрах – температуре и влажности атмосферы – записывалась на бумажную ленту самопишущего устройства вместе с данными радиолокационного сопровождения.

Значения корректирующего множителя K при выпусках озонзондов

Станция	Время выпусков		Количество выпусков	K	СКО(K)
	год	месяц			
Волгоград	1991	6, 7	6	1,102	0,079
Ташкент	1991	5, 11	5	1,056	0,080
Душанбе	1991	11	4	1,012	0,082
Хорог	1991	11	2	1,115	0,092
Долгопрудный	1992	11	3	0,963	0,058
Все станции	1991–1992	–	20	1,053	0,079

По конструкции электрохимический озонзонд разработки ЦАО близок к наиболее распространенному в мире и считающемуся наиболее совершенным [4] озонзонду ЕСС производства «Science Pump Corp.», США. Озонзонд состоит из насоса производительностью около 3 мл/с и электрохимической концентрационной ячейки конструкции Комхира [1], которые заключены в защитный кожух. Выходной сигнал озонзонда – ток в диапазоне от 0,001 до 6 мкА. Масса озонзонда с двумя батареями питания типа 3336 – около 0,6 кг. Каждое единичное измерение концентрации озона осуществлялось 1 раз в 40 с, что соответствует быстродействию озонзонда (у всех электрохимических озонзондов постоянная времени равна 35–40 с в тропосфере и несколько увеличивается в стратосфере) и позволяет получить вертикальное разрешение около 300 м. Рассчитанный по результатам 20 выпусков в 5 пунктах на территории СНГ, проведенных различными операторами в 1991–1992 гг. [10–12], корректирующий множитель K для отечественного озонзонда составил $1,053 \pm 0,079$ (таблица), что по величине вполне приемлемо и находится на уровне соответствующего множителя для озонзонда ЕСС [3, 4]. Пример одновременных измерений профиля ВРО с помощью отечественного и зарубежного озонзондов при подъеме на баллоне приведен на рис. 1.

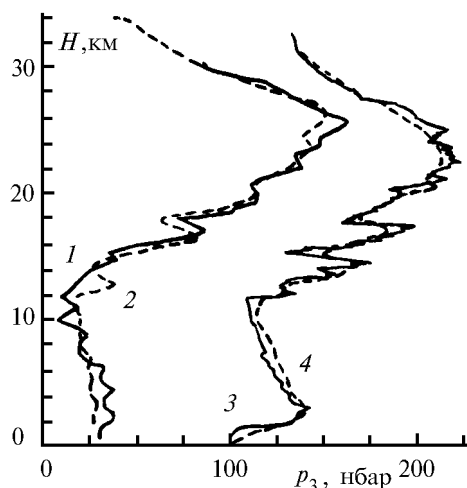


Рис. 1. Результаты одновременных измерений вертикального распределения озона 7 ноября в 07.30 (московское время) над Душанбе (1) и Хорогом (2) с помощью электрохимических озонзондов разработки ЦАО, а также 12 ноября 1992 г. в 12.35 (местное время) над Москвой с помощью озонзондов ЕСС-5а (3) и разработки ЦАО (4). Кривые 3 и 4 сдвинуты влево на 100 нбар

Вместе с тем аэростатные исследования 1988–1990 гг. показали, что в атмосфере могут существовать такие области высот, для измерений в которых во время подъема озонзонда на баллоне быстродействие электрохимического озонзонда оказывается недостаточным. Это обстоятельство стимулировало разработку более быстродействующего хемилюминесцентного озонзонда (автором и В.И. Ермаковым) [7,8]. Хемилюминесцентный озонзонд состоит из насоса производительностью около 10 мл/с, твердотельного хемилюминесцентного озончувствительного элемента (ХЛОЧЭ) и системы регистрации свечения на основе дешевого фотомножителя (был использован ФЭУ-27). ХЛОЧЭ представляет собой композиционный слой из галловой кислоты и кумарина-47 [8, 13], нанесенный на полимерную воздухопроницаемую подложку, и позволяет получить временное разрешение на уровне десятых долей секунды (см. [14]). По сравнению с озонзондом электрохимического типа хемилюминесцентный озонзонд обладает следующими преимуществами: 1) возможностью функционирования до любой достижимой высоты (практически до 45 км); 2) возможностью высокого вертикального разрешения (постоянная времени – около 1 с, а не 25); 3) простотой предполетной подготовки из-за отсутствия операций с растворами; 4) сравнительной простотой изготовления озонзонда. Его недостатком является нелинейность сигнала от концентрации озона, заметное изменение чувствительности ХЛОЧЭ во времени (в пределах 1 ч) и зависимость сигнала от предыстории подачи озono-воздушной смеси. Выходной сигнал хемилюминесцентного озонзонда – частотный в пределах от 30 до 1500 Гц. Его масса около 0,8 кг, из них 0,3 кг – батареи электропитания. Поскольку содержание озона в полете измерялось в относительных единицах, то при обработке результатов требовалось знание ОСО или какая-либо привязка к абсолютным единицам. На рис. 2 приведен пример совместных измерений концентрации озона на борту аэростата, из него видно, что в ряде случаев требуется разрешение, которое может обеспечить только хемилюминесцентный озонзонд (по всей видимости, указанная ситуация наблюдалась на границе облака). Применение хемилюминесцентного измерителя озона представляет значительный интерес для изучения мелкомасштабной изменчивости концентрации озона, особенно в самолетных исследованиях.

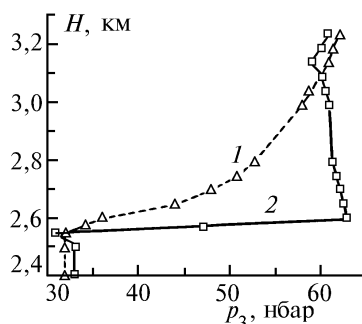


Рис. 2. Результаты одновременных измерений вертикального распределения озона с помощью электрохимического (1) и хемилюминесцентного (2) озонзондов 12.09.89 г. в 12.00 в г. Рильске (Курская обл.) во время подъема на аэростате (скорость подъема – 6 м/с)

Исследованные полупроводниковые сенсоры озона массой около 1 г были изготовлены в НИФХИ им. Л.Я. Карпова; методика их изготовления, использования и технические характеристики описаны в [15, 16]. Кроме озона, такие сенсоры проявляют чувствительность к водяному пару (но значительно меньшую, так что в приземном воздухе сигнал от озона доминирует), а также к окислам азота, хлору и другим малым газовым составляющим (но не большую, чем к равновеликой относительной концентрации озона). Поскольку чувствительность сенсора в свободной атмосфере к водяному пару относительно мала, а концентрации других мешающих определению озона малых составляющих существенно меньше концентрации озона, описанный сенсор перспективен для использования в аэрологических озонзондах. Стоимость полупроводникового сенсора на озон в условиях массового производства и применения сопоставима со стоимостью датчика влажности.

Полученные данные свидетельствуют, что электрохимический озонзонд разработки ЦАО по качеству получаемой информации соответствует требованиям, принятым в международной метеорологической практике, и может быть использован для проведения регулярных измерений ВРО в исследовательских целях. Достоинствами разработанного хемилюминес-

центного озонозонда являются быстродействие (что позволяет добиться высокого пространственно-временного разрешения), высокая чувствительность и простота предполетной подготовки, и он может использоваться как самостоятельно, так и в дополнение к электрохимическому озонозонду для получения тонкой структуры профиля вертикального распределения озона в исследовательских программах. Полупроводниковый измеритель значительно дешевле остальных, что в перспективе может позволить проводить озонное зондирование вместе с регулярным аэрологическим, однако еще нуждается в доработке технологии изготовления и исследованиях метрологических характеристик, особенно при наличии мешающих определению компонентов.

1. Komhyr W. D. // *Ann. Geophys.* 1969. V. 25. N 1. P. 203–210.
2. Перов С. П., Хргиан А. Х. *Современные проблемы атмосферного озона*. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 280 с.
3. Hilsenrath E., Attmannspacher W., Bass A. et al. // *J. Geophys. Res.* 1986. V. 91. ND12. P. 13137–13152.
4. Beekmann M., Ancellet G., Martin D. et al. // *Atm. Environ.* 1995. V. 29. N 9. P. 1027–1042.
5. Kerr J. B., McElroy C. T., Fast H. et al. *Third WMO intercomparison of the ozonesondes used in the global ozone observing system (Vanscoy, Canada 13–24 May 1991)*. Geneva, 1982. (WMO Rep. N. 27). 64 p.
6. Kirchhoff V. W. J. H., Barnes R. A., Torres A. L. // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. ND6. P. 10899–10909.
7. Ермаков В. И., Звягинцев А. М., Игнатов В. М. и др. // *Исследование атмосферного озона*. М.: Гидрометеиздат, 1992. С. 127–131.
8. Звягинцев А. М., Альбрехт Г. Ю., Петерс Г. // *Метеорология и гидрология*. 1993. N 1. С. 88–93.
9. Zvyagintsev A. M., Perov S. P., Ryabov Yu. A. // *Ozone in the Troposphere and Stratosphere. Proc. Quadr. Ozone Symp.* 1992. P. 839–841.
10. Звягинцев А. М. // *Известия РАН. Сер. ФАО*. 1995. Т. 31. N 1. С. 88–91.
11. Авдюшин С. И., Данилов А. Д., Железнякова А. И. и др. // *Известия РАН. Сер. ФАО*. 1995. Т. 31. N 1. С. 34–40.
12. Бекорюков В. И., Борисов Ю. А., Звягинцев А. М. и др. // *Известия РАН. Сер. ФАО*. 1994. Т. 30. N 6. С. 807–811.
13. Sahand S., Speuser W., Schurath U. // *Phys.-Chem. Behav. Atmos. Pollutante. Proc. 4th Eur. Symp. Stresa*. 23–25 Sept. 1986. Dordrecht et al. 1987. P. 33–44.
14. Еланский Н. Ф., Копров Б. М., Соколов Д. Ю. и др. // *Известия РАН. Сер. ФАО*. 1995. Т. 31. N 1. С. 109–114.
15. Takada T., Suzuki K., Nakane M. // *Technical Digest of the 4 Int. Meet. Chem. Sensor. Tokyo, September 13–17, 1992*. 1992. P. 470–473.
16. Belysheva T. V., Gutman E. E., Shomina I. A. et al. // *Eurosensors VIII Conference, France, Toulouse, Sept. 25–28, 1994. Abstracts*. P. 312.

Центральная аэрологическая обсерватория,
г. Долгопрудный Московской обл.

Поступила в редакцию
2 апреля 1996 г.

A. M. Zvyagintsev. On Development of Ozonesondes at Russian Central Aerological Observatory.

The results of the ozonesondes developing at Russian Central Aerological Observatory (CAO) are presented. Three different types of ozonesonde are described: electrochemical, chemiluminescent and semiconductor; two first types were investigated under laboratory and field conditions, the third type was investigated only under laboratory conditions. The precision of the experimental CAO electrochemical ozonesondes was similar to that of well-known ECC-ozonesondes, i.e., the average correction factor for the CAO sondes obtained at balloon routine network stations of the former Soviet Union was 1.053 ± 0.079 (in 20 flights). The advantages of the chemiluminescent ozonesonde are the following: fast time-response (which allows one to get a high time-spatial resolution), high sensitivity, simple preparation before sounding, and the possibility to be used at all altitudes. The semiconductor sensor is the cheapest but needs in further metrological investigations and technological development. The developed CAO sondes due to their quality are found to be applicable to the balloon investigations.