

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ
И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.591

О.К. Костко, С.С. Хмелевцов, Ю.Г. Кауфман, Е.А. Светогоров, Г.А. Калягина

ЛАЗЕРНОЕ ОДНОЧАСТОТНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ СТРАТОСФЕРНОГО СЛОЯ ОЗОНА

Измерения стратосферного озона проведены на высоте 20–30 км с использованием одночастотного ли-
дара. Погрешность определения, концентрации, озона в лучшем случае составляет 5–10 %. Поэтому одно-
частотный лидар может быть использован для определения искусственных воздействий на озоновый слой.

1. Как известно, уравнение лазерного зондирования в дальней, зоне при однократном рассеянии
записывается в виде

$$N(H) = N_0 \eta K_0 S \Delta H H^{-2} [\sigma_{\text{па}}(H) + \sigma_{\text{ам}}(H)] q^2(H);$$

$$q^2(H) = \exp \left\{ -2 \int_{H_0}^H [\sigma_a(h) + \sigma_m(h) + \alpha_{O_3}(h)] dh \right\}. \quad (1)$$

С использованием моделей атмосферы [1] были рассчитаны значения $\sigma_{\text{па}}$, σ_m , $\sigma_{\text{пм}}$, σ_a , α_{O_3} и q для $\lambda = 308$. (Проведенный анализ [2] показывает, что поглощение такими газами как SO_2 , NO_2 , HNO_3 , H_2O_2 , N_2O_5 (интенсивно поглощающие излучение в области 300 нм) в рассматриваемом диапазоне высот можно не учитывать). Данные о сечениях молекулярного рассеяния и поглощения озона заим-
ствованы из [2]: $\sigma_m^0 = 5,59 \cdot 10^{-26} \text{ см}^2$; $\sigma_{\text{пм}}^0 = 6,71 \cdot 10^{-27} \text{ см}^2 \cdot \text{ср}^{-1}$; $\sigma_{O_3}^0 = 1,17 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2$.

Для нижней стратосферы (10–30 км) $\sigma_m > \sigma_a$, $\sigma_{\text{пм}} > \sigma_{\text{па}}$. Это условие выполняется и для высот
атмосферы $H > 30$ км.

Пусть сигналы обратного рассеяния принимаются с двух высот H_1 и H_2 , разделенных интервалом
стробирования ΔH . Тогда, пренебрегая величинами σ_a , $\sigma_{\text{па}}$ и учитывая, что $\sigma_m = \sigma_m^0 \rho$, $\sigma_{\text{пм}} = \sigma_{\text{пм}}^0 \rho$, получим

$$\frac{N(H_2)}{N(H_1)} = \frac{\rho(H_2)}{\rho(H_1)} \frac{H_1^2}{H_2^2} \exp \left\{ -2 \int_{H_1}^{H_2} [\sigma_m^0 \rho(h) + \sigma_{O_3}^0 [O_3(h)]] dh \right\}. \quad (2)$$

В формулах (1) и (2): N – число регистрируемых фотоэлектронов; N_0 – число излученных фото-
нов; η – квантовая эффективность ФЭУ; K_0 – коэффициент пропускания оптических систем; S –
площадь приемной антенны; ΔH – пространственное разрешение по высоте (интервал стробирования);
 H – высота зондируемого слоя атмосферы; $\sigma_{\text{па}}$, $\sigma_{\text{пм}}$, σ_a , σ_m – показатели обратного и общего аэрозоль-
ного и молекулярного рассеяния соответственно; α – показатель поглощения газами; q^2 – пропускание
лазерного излучения на трассе лидар – зондируемый слой – лидар; ρ – концентрация атомов и молекул
в атмосфере (далее для краткости плотность атмосферы).

Таблица

Сечения поглощения и молекулярного рассеяния

$\lambda, \text{ нм}$	$\sigma_m, \text{ см}^2$	$\sigma_{\text{пм}}^0, \text{ см}^2 \cdot \text{ср}^{-1}$	$\sigma_{O_3}^0, \text{ см}^2$
308	5,59 (–26)	6,71 (–27)	1,17 (–19)

Логарифмируя (2), получим

$$[O_3(\Delta H)] = \frac{1}{2\Delta H \sigma_{O_3}^0} \ln \frac{N_1 \rho_2 H_1^2}{N_2 \rho_1 H_2^2} - \frac{\sigma_m^0}{\sigma_{O_3}^0} \rho(\Delta H), \quad (3)$$

где $[O_3(\Delta H)]$ и $\rho(\Delta H)$ — средние величины в слое ΔH ; $N_1 = N(H_1)$; $\rho_1 = \rho(H_1)$ и т.д.

Рассмотрим погрешности такого метода определения концентрации озона. Они в основном суммируются из погрешностей за счет флуктуаций числа регистрируемых фотоэлектронов, неточности знания плотности атмосферы на уровнях зондирования и неточности знания расстояния до соответствующих слоев.

Используя известное выражение

$$\Delta [O_3(\Delta H)] = \sqrt{\left\{ \frac{\delta [O_3(\Delta H)]}{\delta H_1} \Delta H_1 \right\}^2 + \dots}, \quad (4)$$

где $[O_3(\Delta H)]$ — концентрация озона в слое ΔH , и считая, что $\rho(\Delta H) \approx \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}$, $\Delta H = H_2 - H_1$,

$\Delta N = \sqrt{N}$ (пуассоновское распределение), после дифференцирования по N_1 , N_2 , H_1 , H_2 , ρ_1 и ρ_2 величины $[O_3(\Delta H)]$, получим

$$\left\{ \frac{\partial [O_3(\Delta H)]}{\partial N_1} \Delta N_1 \right\}^2 + \left\{ \frac{\partial [O_3(\Delta H)]}{\partial N_2} \Delta N_2 \right\}^2 = \frac{1}{(2\Delta H \sigma_{O_3})^2} \left(\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2} \right); \quad (5)$$

$$\left\{ \frac{\partial [O_3(\Delta H)]}{\partial \rho_1} \Delta \rho_1 \right\}^2 + \left\{ \frac{\partial [O_3(\Delta H)]}{\partial \rho_2} \Delta \rho_2 \right\}^2 \approx 2(\Delta \rho)^2 \left[\left(\frac{1}{2\Delta H \sigma_{O_3} \rho} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_M^0}{2\sigma_{O_3}} \right)^2 \right]. \quad (6)$$

Формула (6) записана в предположении $\rho_1 = \rho_2 = \rho$, $\Delta \rho_1 = \Delta \rho_2 = \Delta \rho$. И наконец,

$$\left\{ \frac{\partial [O_3(\Delta H)]}{\partial H_1} \Delta H_1^* \right\}^2 + \left\{ \frac{\partial [O_3(\Delta H)]}{\partial H_2} \Delta H_2^* \right\}^2 \approx 2(\Delta H^*)^2 \left(\frac{1}{2\sigma_{O_3}^0 (\Delta H)^2} \ln \frac{N_1 \rho_2 H_1^2}{N_2 \rho_1 H_2^2} - \frac{1}{2\sigma_{O_3}^0} \frac{1}{\Delta H} \frac{1}{H} \right)^2 \quad (7)$$

Формула (7) записана в предположении $\Delta H_1^* \approx \Delta H_2^* = \Delta H^*$, $1/H_1 \approx 1/H_2 = 1/H$, где ΔH_1^* и ΔH_2^* — погрешность определения высот атмосферы. Таким образом, окончательно погрешность определения концентрации озона при одночастотном зондировании определяется тремя слагаемыми (5)–(7).

Для последующих оценок выберем параметры конкретного лидара, например, близкие к параметрам одного из последних лидарных озонметров [3]. Энергия излучения на 308 нм — 200 мДж, $\eta = 0,2$; $K_0 = 1,6 \cdot 10^{-1}$; $S \approx 1,96 \cdot 10^3 \text{ см}^2$ ($D = 50 \text{ см}$); $\Delta H = 2 \cdot 10^5 \text{ см}$.

Расчет показывает, что практически погрешность измерения озона определяется формулами (5) и (6). В лучшем случае при $\Delta \rho = 1\%$ и $\Delta H^* = 10 \text{ м}$ общая погрешность составляет единицы–десятки процентов, возрастая в несколько раз при $\Delta \rho = 3\%$ и $\Delta H^* = 100 \text{ м}$. Рис. 1 иллюстрирует данные вычислений.

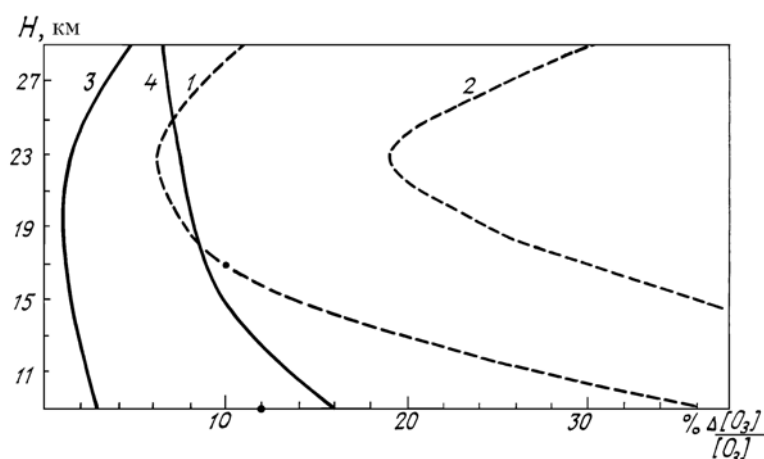


Рис. 1. Погрешность определения концентрации озона при одночастотном (штриховые) и двухчастотном (сплошные кривые) зондировании. Параметры лидара указаны в тексте. Число импульсов зондирования — 10^4 . Кривые 1, 3 — $\Delta \rho / \rho = 1\%$, $\Delta H^* = 10 \text{ м}$; 2, 4 — $\Delta \rho / \rho = 3\%$, $\Delta H^* = 100 \text{ м}$

Для сравнения на этом же рисунке приведены результаты расчетов погрешностей при двухчастотном зондировании ($\lambda = 353 \text{ нм}$, $E_0 = 50 \text{ мДж}$, число зондирующих импульсов 10^4).

Совершенно очевидно, что для определения малоизменяющихся долговременных трендов, где требуется точность измерений озона порядка 1–2%, можно использовать только двухчастотное зондирование. При этом повышение потенциала лидара (увеличение энергии излучения, площади приемной антенны, частоты повторения импульсов) не приводит к более высокой точности определения концентрации озона в области высот 10–20 км. Погрешности, вносимые заданием профиля плотности атмосферы, в случае двухчастотного зондирования значительно меньше, чем погрешность за счет измерения высоты атмосферы. Если считать, что минимальное значение $\Delta H^* = 10$ м, то максимальная погрешность определения $\Delta[\text{O}_3]/\text{O}_3$ составит на $H \sim 20 - 25$ км величину $\sim 1\%$.

Совершенно иным образом обстоит дело при одночастотном зондировании. Ошибка за счет введения в расчет распределения величины ρ играет определяющую роль. Поэтому при одночастотном зондировании в лучшем случае возможно измерение концентрации стратосферного озона с точностью единицы – десятки процентов. Такой метод зондирования пригоден для решения только специальных задач, связанных, например, с существенными локальными изменениями концентрации озона. В этом случае возможно использовать профиль температуры, полученной с помощью радиозонда.

Используя известные формулы $\rho = P/kT$, $P = P_0 e^{\frac{gM}{RT}H}$ (P_0 – давление у поверхности), T – температура. Остальные обозначения (общепринятые) получим:

$$\rho_2 = P_0 \exp\left(-\frac{gM}{RT_2} H_2\right) / kT_2; \quad \rho_1 = P_0 \exp\left(-\frac{gM}{RT_1} H_1\right) / kT_1;$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{T_1}{T_2} \exp\left[-\frac{gM}{R} \left(\frac{H_2}{T_2} - \frac{H_1}{T_1}\right)\right]. \quad (8)$$

Из (8) и (2)

$$\frac{N_2 H_2^2 T_2}{N_1 H_1^2 T_1} \exp\left[\frac{gM}{R} \left(\frac{H_2}{T_2} - \frac{H_1}{T_1}\right)\right] = q^2(H_1, H_2). \quad (9)$$

Для $\lambda = 308$ нм

$$q^2(H_1, H_2) \simeq q_m^2(H_1, H_2) q_{\text{O}_3}^0(H_1, H_2) = \exp\left\{-2 \int_{H_1}^{H_2} [\sigma_m^0 \rho(h) + \sigma_{\text{O}_3}^0 [\text{O}_3(h)]] dh\right\}; \quad (10)$$

$$[\text{O}_3(\Delta H)] \simeq \frac{[\text{O}_3(H_1)] + [\text{O}_3(H_2)]}{2} = \frac{1}{2\Delta H \sigma_{\text{O}_3}^0} \left[\ln \frac{N_1 H_1^2 T_1}{N_2 H_2^2 T_2} - \frac{gM}{R} \left(\frac{H_2}{T_2} - \frac{H_1}{T_1}\right) - \sigma_m^0 \Delta H \frac{P_0}{k} \left[\frac{1}{T_2} \exp\left(-\frac{gM}{RT_2} H_2\right) + \frac{1}{T_1} \exp\left(-\frac{gM}{RT_1} H_1\right) \right] \right]. \quad (11)$$

При $R = 8,31 \cdot 10^3$ Дж/кмоль, K , $M = 28,966$ кг/кмоль, $g = 9,81$ м/с², $gM/R = 3,42 \cdot 10^{-2}$ К/м, $\sigma_m^0(308 \text{ нм})/k = 3,78 \cdot 10^{-7} \text{ с}^2 \cdot \text{К}/\text{кг}$, $\sigma_{\text{O}_3}^0(308 \text{ нм}) = 1,17 \cdot 10^{-23} \text{ м}^2$ получим расчетную формулу:

$$[\text{O}_3(\Delta H)] = 4,27 \cdot 10^{22} \frac{1}{\Delta H} \left[\ln \frac{N_1 H_1^2 T_1}{N_2 H_2^2 T_2} - 3,42 \cdot 10^{-2} \left(\frac{H_2}{T_2} - \frac{H_1}{T_1}\right) - 3,78 \cdot 10^{-7} P_0 \Delta H \left[\frac{1}{T_2} \exp\left(-3,42 \cdot 10^{-2} \frac{H_2}{T_2}\right) + \frac{1}{T_1} \exp\left(-3,42 \cdot 10^{-2} \frac{H_1}{T_1}\right) \right] \right], \quad (12)$$

где $\Delta H = H_2 - H_1$, $N(H_1) = N_1$ и т. д., все значения выражаются в системе единиц СИ.

Последний член в правой части (12) меньше второго: на 10 км их значения равняются 0,01 и 0,31 соответственно, на 18 км – $5 \cdot 10^{-3}$ и 0,316 соответственно, на 18 км – $5 \cdot 10^{-3}$ и 0,316 и далее (с ростом высоты) их разность возрастает.

Поэтому для расчетов можно использовать формулу

$$[\text{O}_3(\Delta H)] \simeq 4,27 \cdot 10^{22} \frac{1}{\Delta H} \ln \frac{N_1 H_1^2 T_1}{N_2 H_2^2 T_2} - \frac{1,46 \cdot 10^{21}}{\Delta H} \left(\frac{H_2}{T_2} - \frac{H_1}{T_1}\right). \quad (13)$$

Рассчитаем погрешность величины $[\text{O}_3(\Delta H)]$, определяемой формулой (13).

Опуская промежуточные выкладки, получаем

$$\Delta [O_3(\Delta H)] \approx \sqrt{2 \left\{ \Delta H^* \left[4,27 \cdot 10^{22} \left(\frac{1}{(\Delta H)^2} \ln \frac{N_1 H_1^2}{N_2 H_2^2} + \frac{2}{\Delta H H} \right) + \frac{1,46 \cdot 10^{21}}{T \Delta H} \right] \right\} + 1,83 \cdot 10^{45} \left(\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2} \right) \frac{1}{(\Delta H)^2} + 2 \left[\Delta T \left(4,27 \cdot 10^{22} \frac{1}{\Delta H T} + \frac{1,46 \cdot 10^{21} H}{\Delta H T^2} \right) \right]^2}. \quad (14)$$

В формуле (14) $H = (H_1 + H_2)/2$, $T = (T_1 + T_2)/2$. Первый член под корнем в (14) характеризует погрешность за счет определения высоты, второй определяется погрешностью сигналов, третий — погрешностью определения температуры.

При точности измерения температуры радиозондом $\Delta T = 2$ К и при параметрах лидара, приведенных выше, получим, например, на высоте 18 км $\Delta [O_3(\Delta H)] = 3,8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, т.е. $\Delta [O_3(\Delta H)] / [O_3(\Delta H)] \approx 9\%$. При этом основную погрешность вносит последний член в правой части (14), равный $1,2 \cdot 10^{35} \text{ см}^{-6}$. Для сравнения первый член правой части (14) равен $2,7 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-6}$, второй $1,7 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-6}$.

2. Распределение концентрации озона было получено с помощью специально разработанного лидарного озонметра.

Приемная система лидара — телескоп типа Ньютона. Сферическое зеркало диаметром 70 см (фокусное расстояние — 235 см) юстируется в небольших пределах в горизонтальной оправе, жестко связанной с основанием установки.

Экимерный лазер, (модель 1701), излучает на длине волны 308 нм. Благодаря установке в излучателе неустойчивого резонатора, расходимость излучения не превышает 0,5 мрад, что позволяет обойтись без коллимирующей системы. Энергия, импульса лазера около 70 мДж, частота повторения импульсов — до 50 Гц. Лазер жестко закреплен на основании лидара в горизонтальном, положении, выходной луч отклоняется вверх юстируемым зеркалом с высоким коэффициентом отражения на рабочей длине волны.

Для регистрации сигнала обратного рассеяния применяется одноканальный фотоблок. В состав фотоблока входят: сменная диафрагма, формирующая поле зрения телескопа (в пределах 4—11 мин); узел отсечки, представляющий собой механический obturator, перекрывающий мощный поток излучения, рассеянный в ближней зоне; две кассеты, позволяющие ослаблять световой поток в 3,5; 10 и 30 раз с помощью нейтральных фильтров и осуществлять селекцию по 2—3 длинам волн с помощью, интерференционных фильтров; фотоумножитель, работающий в режиме счета фотонов; предварительный усилитель и дискриминатор — формирователь, служащие для уменьшения шума и формирования одноэлектронных импульсов, поступающих на счетчик системы регистрации.

Использовался; также: ФЭУ-1,40 «ФОТОН», обладающий повышенной чувствительностью в ультрафиолетовой области спектра ($\eta \approx 0,2$). Малая длительность одноэлектронного импульса (5—7 нс) и низкий темновой ток позволяли регистрировать в режиме счета фотонов сигнал в большом динамическом диапазоне.

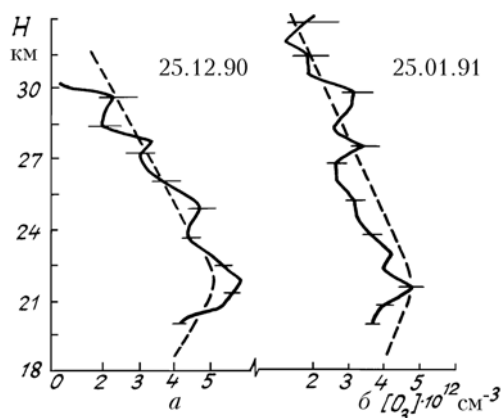


Рис. 2. Результаты измерений концентрации озона в Обнинске

В качестве информационно-измерительной системы лидара используются электронные блоки от разработанных ранее лидаров серии «МАКЕТ» [2]. Управление работой осуществляется от ЭВМ «Электроника-60», позволяющей суммировать сигнал обратного рассеяния от $3 \cdot 10^4$ импульсов излучения. Блок управления излучателем и отсечкой ближней зоны ограничивает частоту следования импульсов 20 Гц. Программа управления работой лидара позволяет в режиме диалога вводить необходимые данные в систему: дальность ближней зоны (до 30 км), длину стробов (75—1500 м), полную высоту измерения (до 100 км), частоту повторения и количество импульсов. После этого процесс

измерения идет автоматически. Полученная информация хранится на магнитных дисках в виде файлов, в которых содержится дата измерения и комментарии.

Лазер закреплен под телескопом и не выступает за габариты рамы-основания, внутри которой расположены блоки питания, насос водяного охлаждения лазера. Благодаря этому, лидар занимает минимальную площадь, при этом существенно сокращена длина коммуникаций.

Измерения высотных профилей концентрации озона были начаты в Обнинске в октябре 1990 г. при одночастотном режиме.

На рис. 2 приведены результаты некоторых измерений профилей концентрации озона в сравнении с модельным распределением озона [1].

Предполагается, что в дальнейшем эксперименты будут продолжены в двухчастотном режиме.

1. Ипполитов И. И. и др. //Спектроскопические методы зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1985. С. 4–44.
2. Захаров В. М., Костко О. К., Хмелевцов С. С. Лидары и исследование климата. Л.: Гидрометеопиздат, 1990. 320 с.
3. Claude H., Wege K. //14 Intern. Laser Radar Conf. June 20–24, 1988. Italy. Conf. Abstracts.: P. 392–395.

Научно-производственное, объединение «Тайфун», Обнинск
ПО «Совинтервод», Москва

Поступила в редакцию
24 октября 1991 г.

O. K. Kostko, S. S. Khmelevtsov, Yu. G. Kaufman, E. A. Svetogorov,
G. A. Kalyagina. **Measurements of the Stratospheric Ozone Using a Single-Frequency Lidar.**

Atmospheric ozone measurements in the 20 to 30 km altitude range were made using a single-frequency lidar system. The errors of single-frequency method are about 5 to 10%. Thus a single-frequency lidar can be used for the determination of an artificial influence on the ozone layer.