

М.Ю. Катаев, Г.Г. Матвиенко, А.А. Мицель

ЗОНДИРОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ ВОЗДУХА, ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ ОДНОЧАСТОТНЫМ ЛИДАРОМ: АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Анализируется погрешность восстановления плотности воздуха, температуры и давления по данным зондирования одночастотным лидаром. За основу выбран лидар «БАЛКАН-3». Рассмотрены два варианта базирования лазерного источника – в космосе и на поверхности Земли.

Давление и температура относятся к стандартным метеопараметрам и измеряются на сети аэрологических станций с помощью радиозондов. Наибольшая высота подъемов радиозондов составляет около 30 км [1]. На высотах, превышающих 30 км, информацию о давлении и температуре получают посредством метеорологических ракет [2]. Определенные возможности по контролю температуры и давления на этих высотах имеют системы, реализующие лазерные методы зондирования параметров атмосферы, например, [3]. При этом наряду с лидарными исследованиями с поверхности Земли весьма эффективным может быть размещение лидаров на борту космических аппаратов. В этом случае привлекательным является охват измерениями всей земной атмосферы. После полета лидара NASA «LITE» в 1994 г. [4] и запуска российского лидара «БАЛКАН-1» в мае 1995 г. на станцию «МИР» [5] космические лидарные измерения стали реальностью.

Лазерный метод измерения рассматриваемых метеопараметров основан на явлении молекулярного рассеяния света. При отсутствии эффектов резонансного рассеяния и незначительной концентрации аэрозолей в атмосфере коэффициент обратного рассеяния $\beta_{pm} \gg \beta_{pa}$ и эхосигнал однозначно связан с коэффициентом молекулярного рассеяния, который в свою очередь пропорционален плотности атмосферы. Температура и давление воздуха рассчитываются с помощью уравнений гидростатики и состояния на основе данных о плотности атмосферы. Детальный обзор работ по лидарному измерению коэффициентов рассеяния и плотности воздуха дан в монографиях [2, 3]. В работе [6] приведены результаты измерения температуры стратосферы и мезосферы по молекулярному рассеянию света. Однако использование измерительных данных предполагает удовлетворение определенных точностных требований, которые применительно к климатологии, общей и прикладной метеорологии сводятся к допустимой погрешности по давлению 5–10% и температуре 5–25 К [2, 8]. Данная работа посвящена анализу погрешностей измерения плотности воздуха, температуры и давления методом лазерного зондирования по молекулярному рассеянию для космического и наземного лидаров.

В пренебрежении аэрозольным рассеянием решение лидарного уравнения относительно коэффициента молекулярного рассеяния имеет вид (общее решение данного уравнения можно найти в [9]):

а) для космического лидара

$$\alpha(z) = (S(z)/S_0) / \left\{ \alpha_0^{-1} + 2 \int_{z_0}^z [S(z')/S_0] dz' \right\}; \quad (1)$$

$$S(z) = U(z)(H - z)^2; \quad (2)$$

б) для наземного лидара

$$\alpha(z) = (S(z)/S_0) / \left\{ \alpha_0^{-1} - 2 \int_{z_0}^z [S(z')/S_0] dz' \right\}; \quad (3)$$

$$S(z) = U(z)z^2. \quad (4)$$

Здесь $U(z)$ – эхосигнал от рассеивающего объема на высоте z ; z_0 – высота калибровки лидара (высота, с которой мы хотим восстанавливать профиль коэффициента молекулярного рассеяния $\alpha(z)$); $\alpha_0 = \alpha(z_0)$; H – высота орбиты спутника (высота, на которой расположен лидар).

Плотность атмосферы $\rho(z)$ связана с объемным коэффициентом молекулярного рассеяния $\alpha(z)$ соотношением

$$\alpha(z) = \sigma\rho(z), \quad (5)$$

где σ – коэффициент молекулярного рассеяния на единичную плотность.

Таким образом, измеряя лидарные эхосигналы $U(z)$ по формулам (1)–(5), мы восстанавливаем коэффициент молекулярного рассеяния и затем плотность воздуха $\rho(z)$. Разумеется, область высот, в которой мы хотим получить $\rho(z)$ по оптическим рассеивающим свойствам, полностью определяется молекулярным рассеянием.

Относительная погрешность определения плотности воздуха δ_ρ равна погрешности восстановления $\alpha(z)$:

$$\delta_\rho^2 = \delta_\alpha^2 = \left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S_0}{S_0}\right)^2 \left[\left(\frac{\alpha(z)}{\alpha_0(S(z)/S_0)}\right)^2 - 2\delta(z-z_0) \frac{\alpha(z)}{\alpha_0(S(z)/S_0)} \right] + \left(\frac{\Delta\alpha_0}{\alpha_0}\right)^2 \left(\frac{\alpha(z)}{\alpha_0(S(z)/S_0)}\right)^2, \quad (6)$$

где

$$\left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2 = \left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 = \frac{U(z) + U_b + U_t}{nU^2(z)} \quad (7)$$

– относительная погрешность измерения эхосигналов, записанная в приближении пуассоновской статистики; U_b – сигнал фонового излучения; U_t – сигнал темнового тока; n – количество импульсов излучения; $\delta(\cdot)$ – дельта-функция;

$$(\Delta\alpha_0/\alpha_0)^2 = (\Delta P_0/P_0)^2 + (\Delta T_0/T_0)^2 \quad (8)$$

– относительная погрешность определения α_0 по данным радиозондирования метеорологических параметров $P_0 = P(z_0)$ и $T_0 = T(z_0)$; ΔP_0 , ΔT_0 – погрешности давления и температуры.

Для того чтобы получить формулы для расчета давления и температуры по измеренной плотности воздуха $\rho(z)$, необходимо воспользоваться двумя уравнениями – статике и состояния идеального газа (см., например, [10]):

$$dP = -g\rho dz, \quad \rho = P\mu/RT,$$

из которых следует

$$P(z) = P_0 - \int_{z_0}^z g\rho dz; \quad (9)$$

$$T(z) = \frac{1}{\rho(z)} \left[T_0 \rho_0 - \frac{\mu}{R} \int_{z_0}^z g\rho dz \right], \quad (10)$$

где $\rho_0 = \rho(z_0)$; R – универсальная газовая постоянная; μ – молекулярный вес воздуха; g – ускорение силы тяжести, равное [7]:

$$g(z) = g_0(\varphi)[R_3/(R_3 + z)]^2; \quad g_0(\varphi) = g_0(1 - a_1 \cos 2\varphi),$$

где $g_0 = 980,616 \text{ см}\cdot\text{с}^{-2}$ – ускорение силы тяжести на широте $\varphi = 45^\circ$; $R_3 = 6370 \text{ км}$ – средний радиус Земли; φ – широта места и $a_1 = 0,0026$.

Погрешности определения давления и температуры вычисляются по следующим формулам:

$$(\Delta P)^2 = (B/\sigma^2) + (\Delta P_0)^2 [1 - 2(A/\sigma P_0)]; \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
(\Delta T)^2 = & \left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha}\right)^2 T^2 + B^2 \left(\frac{\mu}{R\alpha}\right)^2 + C \frac{2T\mu}{R\alpha} + \left(\frac{\Delta\alpha_0}{\alpha_0}\right)^2 \left[T_0^2 \left(\frac{\Delta\alpha_0}{\alpha}\right)^2 - \frac{2TT_0}{S/S_0} - A \frac{2\mu}{R\alpha} \frac{\alpha_0 T_0}{\alpha} \right] + \\
& + (\Delta T_0)^2 \left[\frac{2T}{T_0} \frac{1}{S/S_0} + A \frac{2\mu}{R\alpha} \frac{\alpha_0}{\alpha} T_0 - \left(\frac{\alpha_0}{\alpha}\right)^2 \right]; \quad (12)
\end{aligned}$$

$$A = \int_{z_0}^z g\alpha \frac{\alpha dz'}{\alpha_0(S/S_0)}; \quad (13)$$

$$B = A^2 \left[\left(\frac{\Delta S_0}{S_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\alpha_0}{\alpha_0}\right)^2 \right]; \quad (14)$$

$$C = A \frac{\alpha}{\alpha_0(S/S_0)} \left[\left(\frac{\Delta S_0}{S_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\alpha_0}{\alpha_0}\right)^2 \right]. \quad (15)$$

Приведем результаты численного моделирования. Расчеты проведем для параметров космического лидара «БАЛКАН-3» [11]: $\lambda = 355$ нм, $E = 0,2$ Дж – энергия в импульсе; $f = 50$ Гц – частота посылки импульсов, $\Delta t = 2$ с – время накопления сигнала; $\Delta z = 3$ км – пространственное разрешение; $\eta = 0,1$ – квантовая эффективность ФЭУ; $NEP = 10^{-15}$ Вт·Гц $^{-1/2}$; $\theta = 0,5$ мрад – угол поля зрения приемного телескопа; $\Delta\lambda = 1,5$ нм – ширина полосы фильтра; $A_n = 0,385$ м 2 – площадь приемного телескопа.

Высота орбиты принята 300 км, а условия зондирования соответствуют ночной стороне планеты. Калибровка лидара предполагает использование аэрологических данных на высоте $z_0 = 30$ км, $\Delta T_0 = 0,5$ К, $\Delta P_0 = 0,5 \cdot 10^{-3}$ атм для наземной и спутниковой схем зондирования. Атмосфера предполагалась безоблачной, а метеоусловия соответствовали лету средних широт.

Результаты численного моделирования представлены на рис. 1–3. Рис. 1 показывает возрастание относительных погрешностей измерения плотности воздуха с увеличением высоты. Причем если это возрастание до высот 50–60 км происходит сравнительно медленно, то для больших высот существенно быстрее. При всех параметрах лидара погрешность для космического лидара несколько больше погрешности для наземного лидара. Сказывается большая дальность зондирования в случае космического монтажа лидара. Увеличение энергии импульсов лазера и времени накопления сигналов приводит к уменьшению погрешности измерения плотности воздуха. В целом погрешность достигает 10% на высоте 52,5 км для лидара «БАЛКАН-3» в космосе и на 62,5 км для наземного размещения этого лидара.

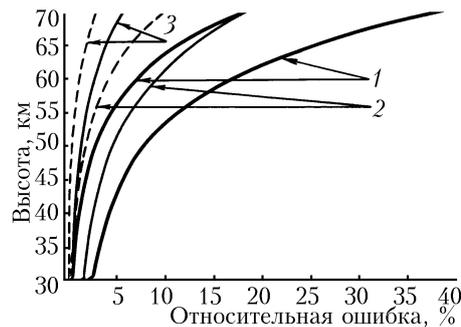


Рис. 1. Высотные профили погрешности измерений плотности воздуха лидарами с параметрами, соответствующими лидару «БАЛКАН-3» (1), энергия импульсов излучения увеличена до 0,5 Дж (2), а также увеличено время накопления до 20 с (3). Сплошные кривые – космическое, штриховые – наземное базирование лидаров

На рис. 2 и 3 представлены результаты оценки абсолютной погрешности давления и температуры соответственно. Как следует из рис. 2, абсолютная погрешность определения давления резко возрастает с увеличением высоты от 30 до 35–40 км, а затем это возрастание существенно замедляется и погрешность практически остается постоянной на высотах более 40–45 км. Значения погрешности измерения давления космическим лидаром заметно больше, чем при наземном

базировании лидара с такими же параметрами. Увеличение потенциала лидаров за счет роста энергии лазерных импульсов и времени накопления сигналов приведет к резкому уменьшению погрешности. Если оценить относительную погрешность определения давления, то можно отметить, что для лидара «БАЛКАН-3» она достигает значения 10% на высоте 45 км. В случае его размещения на Земле погрешность 10% будет наблюдаться на высоте 55 км. Лидар с повышенным потенциалом ($E = 0,5$ Дж и $\Delta t = 20$ с) будет иметь погрешность 10% на высоте 65 км.

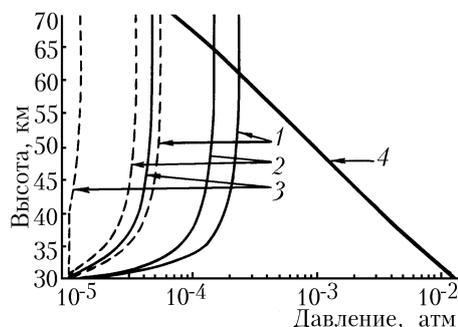


Рис. 2. Абсолютная погрешность восстановления профиля давления (4) лидарами с параметрами такими же, как на рис. 1. Сплошные кривые – космическое, штриховые – наземное базирование лидаров

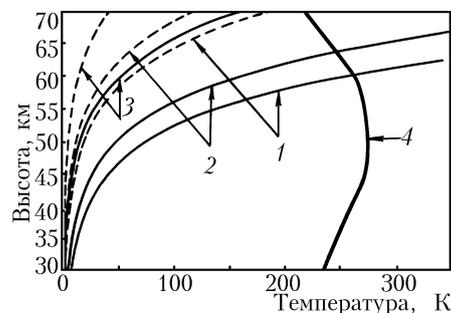


Рис. 3. Абсолютная погрешность восстановления профиля температуры (4) лидарами с такими же параметрами, как на рис. 1. Сплошные кривые – космическое, штриховые – наземное базирование лидаров

Погрешности лидарных измерений температуры незначительно увеличиваются с ростом высоты до 40–45 км. На больших высотах погрешность начинает резко увеличиваться, особенно для космических лидаров, достигая на 55–60 км значений, близких к величинам самой температуры. В то же время для наземного лидара повышенного потенциала ($E = 0,5$ Дж и $\Delta t = 20$ с) погрешность не превышает 40 К на высотах до 70 км. Оценивая относительную погрешность измерения температуры, следует заметить, что значение 10% наблюдается на высоте 40 км для лидара «БАЛКАН-3» в космосе и на высоте 55 км для наземного размещения лидара. Относительная погрешность приобретает значения, близкие к 100% на высотах 50 и 70 км соответственно.

На основе проведенных оценок можно сделать следующие выводы:

1. Восстановление коэффициента молекулярного рассеяния, температуры и давления более точно определяется с поверхности Земли, чем из космоса. Это связано со значительным увеличением расстояния (см. формулу (2)) от космического аппарата до исследуемого объема атмосферы по сравнению с расстоянием в случае наземного расположения лидара.
2. Увеличение энергетики и времени накопления сигнала приводит к значительному уменьшению погрешности восстановления молекулярного коэффициента рассеяния, температуры и давления.
3. Восстановление давления и температуры с погрешностью, не превышающей 10%, возможно в диапазоне высот 30–40 км и с погрешностью до 100% до высот 60 км (давление) и 55 км (температура) при зондировании из космоса лидаром с параметрами «БАЛКАН-3».

1. Зуев В.Е., Комаров В.С. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 264 с.
2. Брасье Г., Соломон С. Аэронавигация средней атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 414 с.
3. Зуев В.Е., Зуев В.В. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы. СПб: Гидрометеоздат, 1992. 232 с.
4. McCormic M.P., Winker D.M., Browell E.V. et al. // Bulletin American Meteorological Society. 1993. V. 74. N 2. P. 205–214.
5. Зуев В.Е., Балин Ю.С., Зуев В.В. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. N 12. С. 1718–1725.
6. Бондаренко С.Л., Бурлаков В.Д., Гришаев М.В., Зуев В.В., Маричев В.Н., Правдин В.Л. Лазерное зондирование температуры стратосферы и мезосферы по молекулярному рассеянию света // Тез. докл. II Межреспубл. симп. «Оптика атмосферы и океана», Томск, 1995. С. 228–229.
7. Матвеев Л.Т. Общий курс метеорологии. Л.: Гидрометеоздат, 1976. 639 с.
8. ESA SP-1143: Report of the Consultation meeting, C. Reading coordinator. May 1991. ESA Publ. Div. ESTEC, Noordwijk. The Netherlands. 32 p.
9. Laser monitoring of the Atmosphere / Ed. by Hinkley E.D. Springer-Verlag. 1976. 312 p.
10. Мак-Ивен М., Филлипс Л. Химия атмосферы. М.: Мир, 1978. 271 с.

И. Матвиенко Г.Г., Зуев В.Е., Зуев В.В., Шаманаев В.С., Коханенко Г.П., Мицель А.А., Буранский А.И., Белоусов С.Е. Космический лидар для исследования глобального распределения озона и аэрозоля // Тез. докл. II Межреспубл. симп. «Оптика атмосферы и океана». Томск, 1995. С. 230–231.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
16 ноября 1995 г.

M.Yu. Kataev, G.G. Matvienko, A.A. Mitsel. **Sounding of Air Density, Pressure, and Temperature by Single-frequency Lidar: Analysis of Errors.**

The error of reconstructing the air density, temperature, and pressure from the data of the sounding by the single-frequency lidar «BALKAN-3» is analyzed in the paper. Two variants of the laser source location in the space and on the Earth surface are considered.