

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.508.856, 551.510.413.2

Анализ корректности восстановления вертикального распределения температуры атмосферы из лидарных сигналов молекулярного рассеяния на главном лидаре Сибирской лидарной станции

С.М. Бобровников, В.И. Жарков[✉], Н.Г. Зайцев,
А.И. Надеев, Д.А. Трифонов*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 25.03.2022 г.;
после доработки 28.04.2022 г.;
принята к печати 15.06.2022 г.

Рассмотрены методические вопросы лидарных измерений вертикального распределения температуры атмосферы до высот 90 км. Метод основан на лидарных измерениях вертикального профиля молекулярной плотности атмосферы с использованием эффекта рэлеевского рассеяния. Обсуждаются результаты, полученные на модернизированном канале рэлеевского рассеяния лидара на базе главного зеркала Сибирской лидарной станции (СЛС) диаметром 2,2 м. Одна из проблем проведения измерений с использованием телескопов большого диаметра — гигантский динамический диапазон лидарных откликов, работа с которым требует особого внимания как к методике, так и к технике проведения экспериментов. В рамках решения этой проблемы предложена улучшенная методика восстановления температуры из лидарных сигналов обратного молекулярного рассеяния. Численные эксперименты подтвердили, что точность восстановления профиля температуры зависит от выбора положения точки калибровки и погрешности задания температуры в ней. Методика восстановления профиля температуры, когда точка калибровки выбрана в верхней части трассы зондирования, имеет достаточную устойчивость даже в условиях гигантского динамического диапазона лидарных откликов СЛС. При сравнении результатов восстановления температуры из реальных лидарных откликов с данными спутниковых измерений обнаружены существенные расхождения, связанные с искажающим влиянием аппаратных и атмосферных факторов на форму лидарного сигнала. Применение корректирующей процедуры на основе калибровки лидара позволяет существенно снизить погрешности измерений.

Ключевые слова: лидар, атмосфера, температура, молекулярное рассеяние; lidar, atmosphere, temperature, Rayleigh scattering.

Введение

Развитие лазерных методов дистанционного изучения атмосферы стимулировало создание лазерных локаторов (лидаров) различного назначения. Лидары востребованы для дистанционного определения целого набора характеристик атмосферы, например высотных профилей температуры, скорости и направления ветра, концентрации озона, содержания водяного пара [1, 2]. Среди всего набора различного рода лидаров особый класс составляют так называемые «мегалидары», предназначенные

для исследования атмосферы на больших высотах. Особенностью таких лидаров является использование гигантских приемных апертур в сочетании с источниками лазерного излучения с большой энергией в импульсе при высокой частоте следования импульсов.

Ведутся многолетние работы по созданию и модернизации лидарных систем на основе приемных зеркал большой апертуры (см., например, работы, которые выполнены на обсерватории ALOMAR в северной Норвегии (диаметр зеркала 1,7 м) [3]). К этому же классу лидаров относится и главный лидар Сибирской лидарной станции (СЛС) (диаметр зеркала 2,2 м). Большая апертура приемной оптической системы лидара позволяет значительно сократить время, необходимое для получения температурного профиля атмосферы по сигналам рэлеевского рассеяния, и повысить потолок зондирования.

* Сергей Михайлович Бобровников (bsm@iao.ru); Виктор Иванович Жарков (zharkov@iao.ru); Николай Геннадьевич Зайцев (ZaicevNG@iao.ru); Александр Иванович Надеев (nadeev@iao.ru); Дмитрий Александрович Трифонов (trifonov@iao.ru).

Однако одна из проблем проведения измерений с использованием телескопов большого диаметра – гигантский динамический диапазон лидарных откликов, работа с которым требует особого внимания как к методике, так и к технике проведения экспериментов.

Соотношения для интерпретации лидарных сигналов и расчета температуры по молекулярному рассеянию известны давно и представлены во многих работах [4, 5]. Метод определения температуры по оптическим сигналам рэлеевского рассеяния основан на идее совместного использования уравнения лазерного зондирования (лидарного уравнения) для определения коэффициента рэлеевского рассеяния, который прямо пропорционален плотности атмосферы, и уравнения состояния идеального газа (уравнение Менделеева–Клапейрона), определяющего зависимость плотности от температуры. Очевидно, что эффективность разрабатываемых алгоритмов во многом будет определяться степенью адекватности описания реального лидарного сигнала с помощью лидарного уравнения. Так, например, стандартная процедура коррекции лидарного сигнала на квадрат расстояния без корректного учета геометрического фактора лидара может привести к неадекватным результатам [6]. Кроме того, как показывает анализ, существующие общепринятые алгоритмы оценки температуры по сигналу молекулярного рассеяния не учитывают ряд малоизученных эффектов, возникающих в процессе передачи и преобразования оптического сигнала в приемопередающем тракте лидара. Все это в конечном счете приводит к некорректности проводимых расчетов и низкой достоверности получаемых результатов.

В настоящей работе рассмотрены вопросы исследования границ применимости и возможности совершенствования алгоритмов обработки лидарных сигналов при использовании эффекта рэлеевского рассеяния для измерения вертикального распределения температуры в стратосфере и мезосфере до высот 80–90 км.

Методика оценки температуры

Анализ методики оценки температуры по рэлеевскому рассеянию разделим на две части. В первой части мы проанализируем способы прямого расчета коэффициента обратного молекулярного рассеяния из лидарного уравнения без привлечения дополнительной информации. Во второй части с учетом связи коэффициента обратного молекулярного рассеяния с концентрацией молекул в атмосфере будем исследовать эффективность существующих алгоритмов оценки вертикального температурного профиля.

Лидарное уравнение в общем виде может быть записано как [7, 8]:

$$S(h) = G(h)Ch^{-2}\beta(h)T_t^2(h), \quad (1)$$

где $S(h)$ – лидарный сигнал; h – расстояние до рассеивающего объема; $\beta(h)$ – коэффициент обратного

рассеяния; $T_t(h) = \exp\left(-\int_0^h \alpha(r)dr\right)$ – прозрачность

атмосферы; $\alpha(h)$ – коэффициент ослабления атмосферы; $G(h)$ – геометрический фактор лидара; C – константа, зависящая от параметров лидара.

В общем случае коэффициент обратного рассеяния, входящий в лидарное уравнение, может быть представлен как сумма молекулярного и аэрозольного коэффициентов обратного рассеяния $\beta(h) = \beta_m(h) + \beta_a(h)$. Коэффициенты молекулярного и аэрозольного ослабления $\alpha_m(h)$, $\alpha_a(h)$ будут определять суммарную прозрачность атмосферы

$$T_t^2(h) = T_m^2(h)T_a^2(h), \quad (2)$$

где

$$T_m^2(h) = \exp\left\{-2\int_0^h \alpha_m(r)dr\right\}, \quad T_a^2(h) = \exp\left\{-2\int_0^h \alpha_a(r)dr\right\}.$$

С учетом принятых обозначений лидарное уравнение примет вид

$$S(h) = CG(h)h^{-2}(\beta_m(h) + \beta_a(h))T_m^2(h)T_a^2(h). \quad (3)$$

Преобразуем лидарное уравнение, разделив вклады молекулярного и аэрозольного рассеяния для различных участков трассы (высоты) зондирования. Предположим, что на высотах выше точки калибровки ($h > H_0$) аэрозольным рассеянием можно пренебречь, тогда

$$S(h)_{h>H_0} = CG(h)h^{-2}\beta_m(h)T_m^2(H_0)T_a^2(H_0) \times \exp\left\{-2\int_{H_0}^h \alpha_m(r)dr\right\}. \quad (4)$$

Обозначив $C_1 = CT_m^2(H_0)T_a^2(H_0)$, получим выражение для лидарного сигнала на участке трассы, где аэрозольным рассеянием можно пренебречь:

$$S(h)_{h>H_0} = C_1G(h)h^{-2}\beta_m(h)\exp\left\{-2\int_{H_0}^h \alpha_m(r)dr\right\}. \quad (5)$$

Константа C_1 зависит как от параметров лидара, так и от величины ослабления на пути луча до области трассы с чисто молекулярным рассеянием.

Очевидно, что для корректного восстановления профиля температуры рассматриваемым методом необходимо обеспечить условия, при которых вкладом аэрозольного рассеяния в лидарный сигнал можно пренебречь. Именно поэтому при определении границ применимости метода предполагается, что вертикальное распределение концентрации аэрозолей экспоненциально спадает с высотой и, начиная с некоторой высоты, влиянием аэрозолей на рассеивающие свойства атмосферы можно пренебречь.

Из (5) следует, что если свободный от аэрозолей слой располагается выше отметки H_0 , то вклад фактора ослабления в лидарный сигнал до этой

точки можно представить в виде константы, определяющей ослабление сигнала атмосферными слоями, присутствующими до H_0 , и не влияющей на форму лидарного отклика от области, расположенной выше H_0 .

Если высота H_0 достаточно велика, то молекулярным ослаблением в области высот $h > H_0$ (стратосфера и мезосфера) можно пренебречь и принять, что $\exp\left\{-2\int_{H_0}^h \alpha_m(r)dr\right\} \approx 1$. Тогда из выражения (5)

найдем упрощенное соотношение для оценки профиля коэффициента обратного молекулярного рассеяния с точностью до константы:

$$\beta_m(h) = \frac{S(h)}{(C_1 G(h))h^2}, \quad h > H_0. \quad (6)$$

В том случае, когда ослаблением пренебречь нельзя, можно предложить более сложный алгоритм, позволяющий решить лидарное уравнение относительно коэффициента обратного рассеяния для случая, когда ослабление при решении уравнения в расчет не принимается.

Известно, что для нерезонансного молекулярного рассеяния при отсутствии поглощения объемный коэффициент рассеяния и коэффициент обратного рассеяния связаны через значение индикатрисы рассеяния назад. Объемный коэффициент рассеяния для линейно поляризованного излучения может быть найден как $\alpha_m(r) = K_\pi \beta_m(r)$, где $K_\pi = (8\pi/3)$ ср [9]. Тогда уравнение (5) можно переписать в виде

$$S(h)_{h>H_0} = C_1 G(h) h^{-2} \beta_m(h) \exp\left\{-2K_\pi \int_{H_0}^h \beta_m(r)dr\right\}. \quad (7)$$

Таким образом, если ослаблением за счет молекулярного рассеяния пренебречь нельзя, то коэффициент обратного рассеяния находится из решения трансцендентного уравнения (7). Попробуем найти решение этого уравнения для случая дискретных значений лидарного сигнала.

При оцифровке лидарных сигналов система регистрации осуществляет квантование сигнала по трассе зондирования с заданным шагом Δh . Уравнение (7), опуская далее индекс $h > H_0$, удобно представить в дискретной форме

$$S(H_0 + i\Delta h) = C_1 G(h) (H_0 + i\Delta h)^{-2} \times \beta_m(H_0 + i\Delta h) \exp\left\{-2K_\pi \int_{H_0}^{H_0 + i\Delta h} \beta_m(r)dr\right\}, \quad (8)$$

где $i = 1, 2, \dots, K$; K — количество стробов по трассе зондирования.

Обозначив $H_0 + i\Delta h = h(i)$, рассмотрим отношение:

$$\frac{S(h(i+1))}{S(h(i))} = \frac{h(i+1)^{-2} \beta_m(h(i+1)) G(h(i+1))}{h(i)^{-2} \beta_m(h(i)) G(h(i))} \times$$

$$\times \exp\left\{-2K_\pi \int_{h(i)}^{h(i+1)} \beta_m(r)dr\right\}. \quad (9)$$

В результате получим рекуррентное уравнение для вычисления коэффициента обратного рассеяния

$$\begin{aligned} \beta_m(h(i+1)) \exp\left\{-2K_\pi \int_{h(i)}^{h(i+1)} \beta_m(r)dr\right\} = \\ = \frac{S(h(i+1)) h(i+1)^2 \beta_m(h(i)) G(h(i))}{S(h(i)) h(i)^2 G(h(i+1))}. \end{aligned} \quad (10)$$

Полагая, что внутри интервала дальности Δh коэффициент обратного рассеяния не меняется, окончательно получим

$$\begin{aligned} \beta_m(h(i+1)) \exp\{-2K_\pi \beta_m(h(i+1)) \Delta h\} = \\ = \frac{S(h(i+1)) h(i+1)^2 \beta_m(h(i)) G(h(i))}{S(h(i)) h(i)^2 G(h(i+1))}. \end{aligned} \quad (11)$$

Таким образом, рекуррентное соотношение (11) позволяет последовательно рассчитать коэффициент обратного рассеяния по трассе зондирования при известном заданном модельном или калибровочном значении коэффициента рассеяния в начальной точке на дальности H_0 .

Правая часть полученного уравнения содержит отношение значений лидарного сигнала в соседних точках трассы. Запишем правую часть уравнения (11) через функцию

$$\text{Re}(i) = \frac{S(h(i+1)) h(i+1)^2 G(h(i))}{S(h(i)) h(i)^2 G(h(i+1))}. \quad (12)$$

Тогда уравнение (11) примет вид

$$\begin{aligned} \beta_m(h(i+1)) \exp\{-2K_\pi \beta_m(h(i+1)) \Delta h\} = \\ = \text{Re}(i) \beta_m(h(i)). \end{aligned} \quad (13)$$

В отличие от других методик, в которых приходится пренебрегать ослаблением, выражение (13) позволяет находить коэффициент обратного рассеяния даже тогда, когда ослаблением за счет молекулярного рассеяния пренебречь нельзя.

Для аналитического решения трансцендентного уравнения (13) воспользуемся функцией Ламберта $W_0(x)$ [10]. С учетом принятых обозначений, сделав замену переменных и используя известное свойство функции Ламберта $W_0(xe^x) = x$, представим выражение (13) в виде

$$\beta_m(h(i+1)) = -\frac{W_0[-2K_\pi \Delta h \text{Re}(i) \beta_m(h(i))]}{2K_\pi \Delta h}. \quad (14)$$

Выражение (14) представляет собой рекуррентную формулу, которая позволяет получить профиль коэффициента обратного молекулярного рассеяния из отсчетов лидарного сигнала при заданном значении коэффициента в точке калибровки.

Таким образом, мы нашли способ определения вертикального распределения коэффициента обратного молекулярного рассеяния из лидарного сигнала и получили выражение для его вычисления с учетом влияния молекулярного ослабления и можем приступить к определению температуры атмосферы.

Для восстановления профиля температуры из значений коэффициента молекулярного рассеяния необходимо использовать зависимость коэффициента обратного молекулярного рассеяния от температуры и давления молекулярной рассеивающей среды.

Известно, что значение объемного коэффициента молекулярного рассеяния в газах прямо пропорционально величине сечения рассеяния $\sigma_m(\lambda)$ и концентрации молекул N [11]:

$$\alpha_m(\lambda) = \sigma_m(\lambda)N \quad (15)$$

(λ — длина волны).

Выражение для вычисления сечения рэлеевского рассеяния атмосферного воздуха определяется формулой Рэлея, полученной еще в 1899 г. [11]:

$$\sigma_m(\lambda) = \frac{8\pi^3(n^2 - 1)^2}{3N_L^2\lambda^4}, \quad (16)$$

где n — показатель преломления воздуха при нормальных условиях; N_L — число Лошмидта. Формула (16) позволяет вычислить сечение рэлеевского рассеяния по показателю преломления воздуха. При этом сечение рассеяния очень слабо зависит от давления и температуры [12].

Из уравнения состояния идеального газа $PV = N_m kT$ можно выразить концентрацию молекул через давление и температуру $N(P, T) = N_m/V = P/kT$, где P — давление; T — абсолютная температура; V — объем, содержащий количество молекул N ; k — постоянная Больцмана; N_m — количество молекул в объеме V .

Тогда выражение для зависимости объемных коэффициентов рэлеевского рассеяния от температуры и давления примет вид

$$\alpha_m(P, T) = \sigma_m(\lambda_0)N(P, T) = \sigma_m(\lambda_0)\frac{P}{kT}, \quad (17)$$

$$\beta_m(P, T) = \sigma_m^\pi(\lambda_0)\frac{P}{kT}, \quad (18)$$

где λ_0 — длина волны зондирующего излучения; σ_m^π — сечение молекулярного рассеяния в направлении назад.

Расчет по формуле (16) дает значение сечения молекулярного рассеяния на длине волны 532 нм $\sigma_m(532 \text{ нм}) = 4,42 \cdot 10^{-27} \text{ см}^2$ [11]. Однако абсолютное значение сечения рассеяния в дальнейших вычислениях не используется.

Выражение (17) позволяет дистанционно оценить температуру атмосферы по коэффициенту рэлеевского рассеяния при известном давлении. Для атмосферы температура и давление зависят в общем случае от пространственных координат и очень

существенно от высоты. Поскольку именно высота определяет значение потенциальной энергии молекулы в поле силы тяжести, то и распределение концентрации молекул по высоте определяется распределением Больцмана при заданной температуре. Барометрические формулы, полученные на основе уравнений гидростатического равновесия, описывают высотную зависимость температуры и давления с погрешностью менее 0,1%.

Сравнительный расчет профиля вертикального распределения температуры атмосферы проводился по двум алгоритмам. Сначала из лидарных сигналов рассчитывался коэффициент обратного рассеяния $\beta_m(h(i))$ по формулам (6), (11) и (13). Затем для оценки профиля температуры с учетом зависимости коэффициента молекулярного рассеяния от давления и температуры (17) использовалось известное выражение [4]:

$$T(h(i)) = \left\{ \beta_m(H_0)T(H_0) - \frac{mg}{k} \int_{H_0}^{h(i)} \beta_m(z) dz \right\} / \beta_m(h(i)), \quad (19)$$

где $T(H_0)$ — температура в точке калибровки, и выражение, предложенное в [13]:

$$T(h(i)) = \frac{mgdh}{k \cdot \log \left[1 + \frac{\beta_m(h(i))dh}{\sum_{j=i+1}^n \beta_m(h(j))dh + CIR} \right]}, \quad (20)$$

где m — средняя масса молекул воздуха; k — постоянная Больцмана; g — ускорение силы тяжести; CIR — калибровочная константа. CIR определяется по модели давления атмосферы выше трассы зондирования, а сечение обратного рассеяния сокращается при нормировке.

Один из недостатков предложенных алгоритмов оценки температурного профиля — привязка к калибровочным значениям только в одной точке: для вычислений по формуле (19) — в начале трассы, а для расчетов по формуле (20) — в ее конце.

Еще одним недостатком предложенных алгоритмов является то обстоятельство, что при выполнении измерений зачастую формируются условия, когда информация о профиле вертикального распределения температуры атмосферы, необходимая для калибровки, доступна только на ограниченном участке трассы зондирования и условия измерений не позволяют правильно выбрать точку калибровки. В этом случае предлагается использовать для калибровки любую априорную информацию о температурном профиле, применяя численный способ расчета коэффициентов аппроксимации, методом подбора параметров при наличии ограничений [14] (функция *lsqcurvefit*). Физический закон, для которого требуется подобрать параметры в виде температурного профиля, определяется лидарным уравнением (5).

При этом результаты лидарных измерений образуют набор K опытных данных $S(h(i))$, полученных в точках $(H_0 + i\Delta h)$. Решение базируется на методе наименьших квадратов, когда находится минимум выражения

$$\min_{T(i)} \sum_{i=1}^K \left[\frac{S(h(i), T(i))}{S(H_0)} - \frac{Sl(h(i))}{Sl(H_0)} \right]^2, \quad (21)$$

где $Sl(h)$ — реальный лидарный сигнал.

Использование метода аппроксимации позволяет наилучшим образом учесть априорную информацию и таким образом снизить погрешности восстановления профиля температуры. Недостатком метода является его высокая чувствительность к достоверности априорных предположений.

Результаты и обсуждение

Погрешность восстановления профиля температуры из лидарных сигналов молекулярного рассеяния зависит от множества факторов, например, статистической погрешности регистрации сигналов; систематических погрешностей, обусловленных неопределенностью оценки геометрического фактора (под геометрическим фактором будем понимать совокупность аппаратных и атмосферных факторов, влияющих на формирование оптического сигнала и искажающих его форму); устойчивости алгоритма восстановления при его численной реализации и т.д. Вопросам исследования точности и достоверности метода дистанционного определения вертикального распределения температуры атмосферы на основе эффекта рэлеевского рассеяния в последнее время уделяется много внимание [15].

Так, анализ влияния статистических погрешностей на результаты расчета температуры по формуле (19) для пуассоновской модели статистики фотоотсчетов лидарного сигнала можно найти в [4, 16]. В [17] утверждается, что расчеты профиля температуры по формулам (19) и (20) дают полное совпадение и оба алгоритма одинаково устойчивы к точности калибровочных данных. Для проверки адекватности упомянутых выше алгоритмов расчета мы провели численное моделирование процесса восстановления профиля температуры двумя различными способами по следующей схеме:

1) генерация лидарного сигнала при использовании профиля температуры, полученного по данным микроволнового радиометра Microwave Limb Sounder (MLS), установленного на борту спутника Aura, работающего в рамках программы «NASA Earth Observing System» (EOS) [18];

2) обратное восстановление профиля температуры по алгоритмам с использованием формул (19) и (20).

Расчеты по формулам (19) и (20) в дальнейшем на рисунках обозначены как классический алгоритм и расчет по формуле с логарифмом соответственно. Расчет температуры по формуле (19) не требует знания величины сечения молекулярного рассеяния и может быть использован для различных

газов или их смесей. Главное, чтобы выполнялось условие неизменности сечения с высотой.

На рис. 1 представлены результаты расчетов и восстановления вертикального распределения температуры для случая, когда сигнал рассчитывается из лидарного уравнения по модели атмосферы (модельный лидарный сигнал).

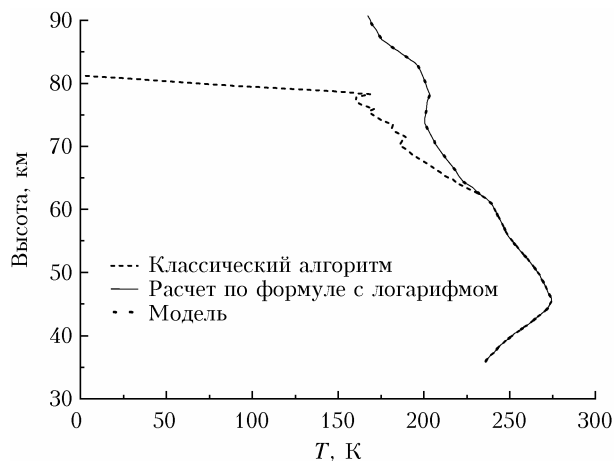


Рис. 1. Результаты расчетов профиля температуры с использованием модельного лидарного сигнала

Видно, что расчет по формуле (19) приводит к некорректным результатам вследствие накопления ошибок при численном интегрировании. Начиная с высот 60 км оценки температуры по формуле (19) кардинально отличаются от исходного распределения температуры по модели. Распределение температуры, полученное в результате расчета по формуле (20) (калибровка осуществлялась на высоте 90 км), с высокой точностью совпадает с моделью (на графике они неразличимы). Очевидно, что при использовании (19) необходимо позаботиться о дополнительных методах регуляризации.

На рис. 2 показаны вертикальные распределения температуры, рассчитанные для случая, когда используется пуассоновская модель статистики фотоотсчетов лидарного сигнала. Средние значения числа фотоотсчетов модельного лидарного сигнала устанавливались близкими к значениям, ожидаемым в реальном лидарном сигнале. На рис. 2, б приведен расчетный профиль после усреднения.

На рис. 3 представлены результаты расчетов вертикального распределения температуры из реальных лидарных сигналов, полученных на лидаре СЛС с приемным зеркалом диаметром 2,2 м [19].

На рис. 3, б показан результат восстановления после сглаживания сигналов калмановским фильтром. Привязка профиля осуществлялась в точке на высоте 35 км. Как видно из рис. 3, вертикальное распределение температуры по лидарным сигналам существенно отличается от модельного.

Таким образом, результаты расчетов вертикального распределения температуры из модельного лидарного сигнала (см. рис. 2) существенно отличаются от результатов расчетов из реального

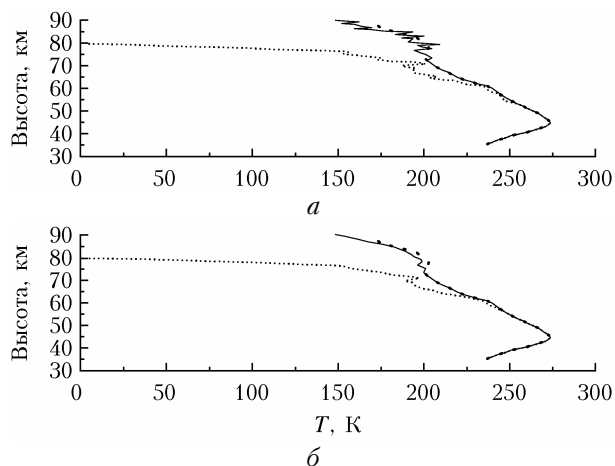


Рис. 2. Результаты восстановления профиля температуры для модельного лидарного сигнала: *а* — с использованием пуассоновской модели статистики фотоотсчетов; *б* — после применения процедуры сглаживания; обозначение см. на рис. 1

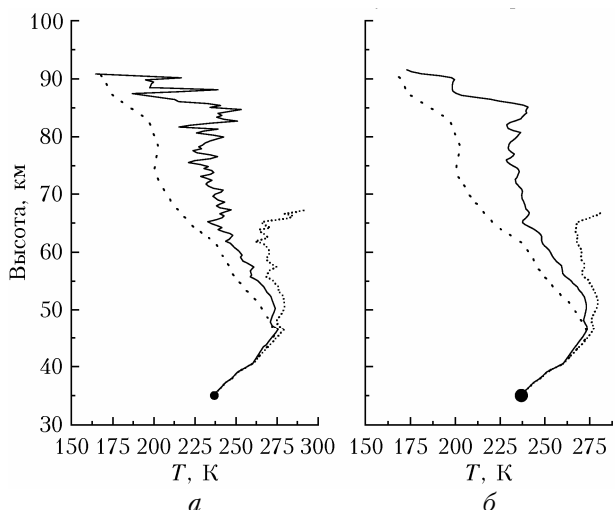


Рис. 3. Восстановленные профили температуры из сигнала, полученного на лидаре СЛС: *а* — без сглаживания; *б* — после процедуры сглаживания; обозначение см. на рис. 1

сигнала (рис. 3). Это говорит о том, что реальный лидарный сигнал отличается от модельного и неудовлетворительно описывается лидарным уравнением. Очевидно, что существует некий неизвестный нам фактор, не учтенный в лидарном уравнении. Для выяснения причин несоответствия проанализируем форму реального лидарного сигнала и обсудим ряд предположений о причинах возможных искажений.

На рис. 4, *а* приведены модельный и реальный лидарные сигналы, скорректированные на квадрат высоты. В масштабе рисунка заметно небольшое отличие формы реального сигнала от модельного. При этом максимальное отклонение приходится на участок трассы 53 км. Очевидно, существует некоторый искажающий фактор, приводящий к нарушению формы сигнала. Именно он и не позволяет адекватно восстанавливать профиль температуры.

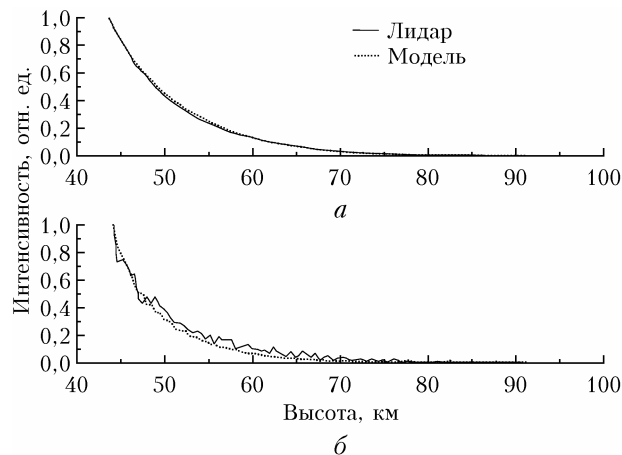


Рис. 4. Результаты корректировки лидарного сигнала на квадрат высоты: *а* — сравнение модельного и реального лидарных сигналов; *б* — сравнение разницы фотоотсчетов в соседних строках для модельного и реального лидарных сигналов, приведенных к одной интенсивности на высоте 45 км

Алгоритм восстановления температуры предполагает численное дифференцирование сигнала и оперирует с изменениями сигнала по дальности. Из рис. 4 следует, что нормированные производные по дальности (разница фотоотсчетов в соседних строках, приведенная к одной интенсивности) реального и модельного лидарных сигналов имеют еще большие отличия, чем сами сигналы. Предположительные причины искажения реального лидарного сигнала могут быть следующими.

1. Искажения лидарного сигнала при фотодетектировании, связанные с нелинейностью и эффектами последовательности в фотодетекторе и регистрирующей аппаратуре [20].
2. Влияния геометрического фактора лидара.
3. Нарушение соглашения о чисто молекулярном рассеянии из-за присутствия аэрозолей [22].
4. Нарушение условия стационарности процесса при длительном накоплении лидарного сигнала, требующее учета тренда среднего коэффициента ослабления на участках трассы до точки калибровки (нарушение условия постоянства константы C_1).
5. Влияние атмосферной турбулентности в условиях узкого поля зрения приемной системы лидара, приводящее к дополнительным флуктуациям сигнала при длительном накоплении.
6. Возможное нарушение условия локального гидродинамического равновесия на высотах более 85 км.
7. Изменение ускорения свободного падения с высотой.

Таким образом, для анализа причин, вызывающих искажения лидарного сигнала, требуется выполнить большой объем экспериментальных и теоретических исследований, требующих значительных материальных и временных затрат. Однако для начала можно попытаться как-то скорректировать искажающий фактор и добиться приемлемого результата восстановления профиля температуры.

Попытаемся скорректировать лидарный сигнал $SI(h)$ путем калибровки при использовании

температурного профиля по данным спутникового радиометра. Предположив, что форма лидарного сигнала искажена за счет влияния неконтролируемых факторов, можно рассчитать отношение

$$G(h) = Sl(h)/Sm(h) \quad (22)$$

($Sm(h)$ — лидарный сигнал, рассчитанный из лидарного уравнения для профиля температуры по данным спутникового радиометра).

Примем в качестве гипотезы, что это отношение является неким аналогом геометрического фактора $G(h)$, на который необходимо корректировать лидарный сигнал, и влияние этого фактора проявляется линейно. Тогда при дальнейших измерениях будем восстанавливать профиль температуры из лидарного сигнала, скорректированного на фактор $G(h)$. На рис. 5 представлены результаты применения процедуры коррекции к лидарному сигналу при измерениях в течение 3 ч с двумя профилями с накоплением сигнала по 1,5 ч. По одной из реализаций лидарного сигнала определялся фактор искажений. По второй реализации проводилось восстановление профиля температуры.

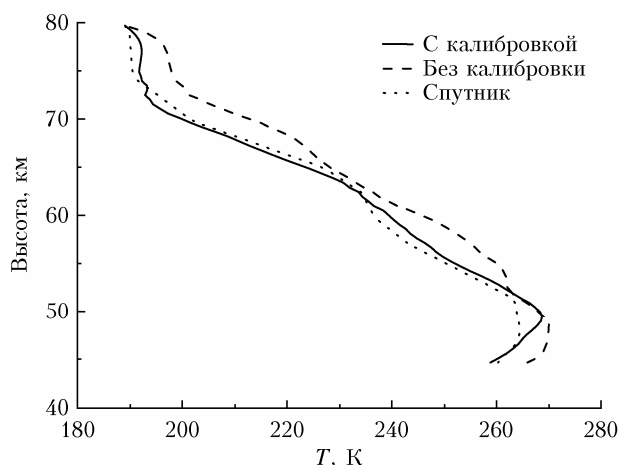


Рис. 5. Сопоставление восстановленных вертикальных распределений температуры атмосферы из лидарного сигнала без учета искажающего фактора и после применения процедуры коррекции

Как видно из рис. 5, процедура коррекции приводит к существенному уменьшению рассогласования лидарных и спутниковых данных и позволяет надеяться на получение адекватных результатов восстановления профиля температуры атмосферы из лидарных измерений. Дальнейшие усилия по совершенствованию аппаратуры и методики измерений следует направить на поиск путей устранения искажающих факторов, возникающих как при формировании, так и при регистрации лидарного сигнала.

Заключение

В работе сделана оценка корректности восстановления вертикального профиля температуры из лидарных сигналов рэлеевского рассеяния.

1. Предложен способ определения коэффициента молекулярного рассеяния из лидарного откли-

ка с учетом молекулярного ослабления за счет аналитического решения трансцендентного уравнения.

2. Расчетами доказано, что точность восстановления профиля температуры зависит от выбора точки калибровки и ее погрешности. Расчет профиля по формуле (20), когда точка калибровки выбирается сверху, обладает большей устойчивостью и точностью по сравнению с расчетами по формуле (19) с точкой калибровки в начале трассы.

3. При восстановлении профиля температуры из реальных лидарных сигналов было обнаружено существенное отличие формы сигнала, не поддающееся описанию в рамках лидарного уравнения, приводящее к неверным результатам восстановления температуры. Введение корректирующего фактора, найденного в процессе калибровочных измерений при использовании данных спутникового радиометра, позволило добиться хороших результатов восстановления профиля температуры до высот 80–90 км.

4. Требуется проведение дополнительных экспериментальных и теоретических исследований для поиска причин искажения формы лидарного сигнала, приводящего к значительным ошибкам при восстановлении вертикального профиля температуры из сигналов рэлеевского рассеяния.

5. Существующие методики восстановления профиля допускают некоторый произвол процедуры калибровки, позволяющий подогнать измеренный профиль температуры к спутниковому профилю путем сглаживания и за счет манипуляций калибровочными константами. При этом всегда возникает вопрос о достоверности полученного результата.

Финансирование. Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Атмосфера» при частичной финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2021-661) и в рамках государственного задания ИОА СО РАН (№ 121031500341-3).

Список литературы

1. *Лазерный контроль атмосферы* / под ред. Э.Д. Хинкли. М.: Мир, 1979. 416 с.
2. *Weitkamp C. Lidar, Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005. 456 p.
3. *Von Zahn U., von Cossart G., Fiedler J., Fricke K.H., Nelke G., Baumgarten G., Rees D., Hauchecorne A., Adolfsen K. The ALOMAR Rayleigh/Mie/Raman lidar: Objectives, configuration, and performance* // *Ann. Geophys.* 2000. V. 18, N 7. P. 815–833. DOI: 10.1007/s00585-000-0815-2.
4. *Зуев В.В., Ельников А.В., Бурлаков В.Д. Лазерное зондирование средней атмосферы*. Томск: РАСКО, 2002. 352 с.
5. *Philbrick C.R., Schmidlin F.J., Grossmann K.U., Lange G., Offermann D., Baker K.D., Krankowsky D., von Zahn U. Density and temperature structure over northern Europe* // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1985. V. 47, N 1–3. P. 159–172. DOI: 10.1016/0021-9169(85)90131-X.
6. *Bobrovnikov S.M., Zharkov V.I., Nadeev A.I., Trifonov D.A. Analysis of the efficiency of methods for retrieval of vertical profile of atmospheric temperature from molecular scattering at the main lidar of the Sibe-*

- rian lidar station // *Proc. SPIE*. 2021. V. 12086. P. 1208612-1–7. DOI: 10.1117/12.2616676.
7. Fernald F.G. Analysis of atmospheric lidar observations: Some comments // *Appl. Opt.* 1984. V. 23, N 5. P. 652–653.
8. Zhenzhu Wang, Dong Liu, Chenbo Xie, Jun Zhou. An iterative algorithm to estimate LIDAR ratio for thin cirrus cloud over aerosol layer // *J. Opt. Soc. Korea*. 2011. V. 15, N 3. P. 209–215. DOI: 10.3807/JOSK.2011.15.3.209.
9. McCartney E.J. Optics of the atmosphere: Scattering by molecules and particles. New York: John Wiley & Sons, 1976. 408 p.
10. Corless R.M., Gonnet G.H., Hare D.E.G., Jeffrey D.J., Knuth D.E. On the Lambert W function // *Adv. Comput. Math.* 1996. V. 5, N 1. P. 329–359.
11. *Laser Monitoring of the atmosphere* / E.D. Hinkley (ed.). Berlin: Springer, 1976. 312 p.
12. Edlén B. The refractive index of air // *Metrologia*. 1966. V. 2, N 2. P. 71–80.
13. Hauchecorne A., Chanin M.L. Density and temperature profiles obtained by lidar between 35 and 75 km // *Geophys. Res. Lett.* 1980. V. 7, N 5. P. 565–568. DOI: 10.1029/GL007i008p00565.
14. *Документация Matlab* // ЦИТМ Экспонента. М., 2021. URL: <http://www.docs.exponenta.ru> (дата обращения: 20.04.2021).
15. Marlton G., Charlton-Perez A., Harrison G., Polichtchouk I., Hauchecorne A., Kekchut P., Wing R., Leb-lanc Th., Steinbrecht W. Using a network of temperature lidars to identify temperature biases in the upper stratosphere in ECMWF reanalyses // *Atmos. Chem. Phys.* 2021. V. 21. P. 6079–6092.
16. Зуев В.В., Маричев В.Н., Бондаренко С.Л. Исследование точностных характеристик восстановления профилей температуры по лидарным сигналам молекулярного рассеяния // *Оптика атмосфер. и океана*. 1996. Т. 9, № 12. С. 1615–1619.
17. Зуев В.В., Маричев В.Н., Бондаренко С.Л., Долгий С.И., Шарабарин Е.В. Лидарные измерения температуры по рэлеевскому рассеянию света в нижней стратосфере за период май–декабрь 1995 г. // *Оптика атмосфер. и океана*. 1996. Т. 9, № 10. С. 1386–1393.
18. Schoeberl M.R., Douglass A.R., Hilsenrath E., Bhartia P.K., Beer R., Waters J.W., Gunson M.R., Froidevaux L., Gille J.C., Barnett J.J., Levelt P.F., De-Cola P. Overview of the EOS Aura mission. // *IEEE Transac. Geosci. Remote Sens.* 2006. V. 44, N 5. P. 1066–1074. DOI: 10.1109/TGRS.2005.861950.
19. Bobrovnikov S.M., Gorlov E.V., Zharkov V.I., Zaitsev N.G., Nadeev A.I., Trifonov D.A., Gridnev Y.V. Measurement of atmospheric temperature in the range of 40–90 km at the Siberian lidar station using molecular scattering signal // *Proc. SPIE*. 2021. V. 11916. P. 119162I-1–5. DOI: 10.1117/12.2602070.
20. Zaitsev N.G., Nadeev A.I., Trifonov D.A. Optimization of the molecular scattering signal registration system at the Siberian lidar station for the photon counting mode // *Proc. SPIE*. 2021. V. 11916. P. 11916N-1–7. DOI: 10.1117/12.2606359.
21. Бобровников С.М., Горлов Е.В., Жарков В.И., Трифонов Д.А. Методика юстировки и оценка размера кружка рассеяния главного зеркала Сибирской лидарной станции // *Оптика атмосфер. и океана*. 2020. Т. 33, № 7. С. 559–564. DOI: 10.15372/AOO20200709; Bobrovnikov S.M., Gorlov E.V., Zharkov V.I., Trifonov D.A. Alignment technique and quality check of the primary mirror of the Siberian lidar station // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020. V. 33, N 6. P. 696–701. DOI: 10.1134/S1024856020060081.
22. Коршунов В.А., Зубачев Д.С. Увеличение обратного аэрозольного рассеяния в нижней мезосфере в 2019–2021 гг. и его влияние на измерения температуры рэлеевским методом // *Оптика атмосфер. и океана*. 2022. Т. 35, № 1. С. 32–36. DOI: 10.15372/AOO20220105.

S.M. Bobrovnikov, V.I. Zharkov, N.G. Zaitsev, A.I. Nadeev, D.A. Trifonov. Analysis of the correctness of retrieval of vertical atmospheric temperature distribution from lidar signals of molecular scattering at the main lidar of the Siberian lidar station.

The methodological issues of lidar measurements of the vertical distribution of atmospheric temperature up to altitudes of 90 km are considered. The method is based on the lidar measurements of the atmospheric molecular density vertical profile using the Rayleigh scattering effect. The results obtained in the upgraded channel of the Rayleigh scattering of the lidar based on the main mirror of the Siberian lidar station with a diameter of 2.2 m are discussed. An improved technique for the retrieval of temperature from molecular backscattering lidar signals is proposed. Numerical experiments have shown that the accuracy of the temperature profile retrieval depends on the choice of the position of the calibration point and the error in setting the temperature in it. The temperature profile retrieval technique, when the calibration point is chosen at the top of the sounding path, is more stable and provides a smaller error compared to calculations provided that the calibration point is chosen at the beginning of the path. The comparison of the results of temperature retrieval from the real lidar responses with the satellite measurement data revealed significant discrepancies associated with the distorting instrumental and atmospheric effects on the shape of the lidar signal. The use of a correction procedure based on the lidar calibration can significantly reduce measurement errors.