

Кратковременная устойчивость функций восстановления температуры в традиционном чисто вращательном Рамановском лидарном методе

В.В. Герасимов^{1, 2*}

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

² *Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36*

Поступила в редакцию 13.04.2020 г.

В традиционном чисто вращательном Рамановском (ЧВР) методе температура воздуха определяется из лидарных сигналов с помощью функции восстановления температуры (ФВТ). Коэффициенты ФВТ определяются с помощью эталонного профиля температуры, взятого из модели атмосферы или данных радиозондов. В настоящей работе исследуется устойчивость ФВТ во времени, т.е. устанавливается, в какой мере можно использовать коэффициенты функций, определенные в один из дней измерительной кампании, для восстановления температуры в другие дни. Также анализируется ситуация, когда в один из дней измерений отсутствуют эталонные данные (например, из-за обрыва радиозонда) и коэффициенты ФВТ определяются по эталонным данным за оставшиеся дни. Устойчивость пяти ФВТ исследуется на примере ночных профилей температуры, полученных 6, 7 и 8 апреля 2015 г. с помощью ЧВР-лидара ИМКЭС СО РАН (г. Томск). Определена функция, восстанавливающая температуру тропосферы (3–9 км) с наименьшими ошибками за рассматриваемый трехдневный период.

Ключевые слова: комбинационное рассеяние, лидар, уширение спектральных линий, калибровочная функция, температура тропосферы; Raman scattering, lidar, spectral line broadening, calibration function, tropospheric temperature.

Введение

За последние несколько лет появились новые методы и алгоритмы восстановления вертикальных профилей температуры атмосферы из сигналов чисто вращательных Рамановских (ЧВР) лидаров [1–5]. Метод, предложенный в [6], в зарубежной научной литературе стали именовать «традиционным». В традиционном ЧВР лидарном методе температура воздуха T определяется из отношения интенсивностей $Q(T)$ обратнорассеянных лазерных сигналов, выделенных с помощью спектральных фильтров из двух полос ЧВР-спектра молекул N_2 и O_2 [7]. Отношение $Q(T)$, полученное из лидарных измерений, требует калибровки, поэтому $\ln Q(T)$ аппроксимируют калибровочной функцией (КФ) $f_c(T)$, часто выбираемой в виде полинома первой или второй степени от обратной температуры $1/T$ [7–16]. Коэффициенты КФ (калибровочные коэффициенты) определяются методом наименьших квадратов с использованием значений $Q(T)$ и эталонного профиля температуры. За эталонный берется профиль температуры модели атмосферы или профиль, полученный с помощью радиозонда, запускаемого одновременно с лидарными

измерениями. Для восстановления температуры T из лидарных данных необходима функция восстановления температуры (ФВТ) $T = T(\ln Q)$, выведенная из соответствующей КФ $f_c(T)$. Коэффициенты ФВТ и исходной КФ одинаковы, но сначала они определяются у КФ. Следует отметить, что ФВТ и исходная КФ могут не быть взаимно обратными, уравнение $f_c(T) = \ln Q(T)$ может не разрешаться относительно T или решение может иметь громоздкий вид. Эти обстоятельства накладывают ряд ограничений на функции, которые можно использовать в качестве калибровочных [17–19].

Новые методы [1, 2], не требующие регулярной калибровки лидара и запусков радиозондов, упростили процедуру получения профилей температуры, но не показали преимущества в точности ее определения. Поэтому традиционный метод не теряет своей актуальности, а последние исследования продемонстрировали возможность улучшения точности измерений с помощью новых ФВТ [17–20].

Во время измерительной кампании, проводимой в течение нескольких дней, часто создается ситуация, когда в один из дней измерений (дата X) отсутствуют эталонные данные по причине, например, обрыва радиозонда. Возникают вопросы, можно ли использовать калибровочные коэффициенты, определенные по эталонным данным за другую дату

* Владислав Владимирович Герасимов (gvvsnake@mail.ru).

(или даты Y) измерения, для восстановления температуры по лидарным данным за дату X и как это скажется на точности ее восстановления. Схожая ситуация может произойти также при проведении нескольких измерений в течение одной ночи. В этом случае обычно используются данные радиозонда, запущенного во время первого измерения, или данные двух зондов, запущенных в начале и конце периода измерений [15, 21].

В настоящей работе рассматривается трехдневный период измерений, в каждый из дней которого убираются эталонные профили, а калибровочные коэффициенты ФВТ определяются по эталонным данным за оставшиеся два дня. Для восстановления температуры из лидарных данных использовались пять нелинейных ФВТ [19, 20]. Устойчивость ФВТ исследуется на примере ночных профилей температуры, полученных 6, 7 и 8 апреля 2015 г. с помощью ЧВР-лидара, разработанного в Институте мониторинга климатических и экологических систем (ИМКЭС) СО РАН (г. Томск) [18]. Наиболее устойчивой во времени (из нескольких ФВТ) будет считаться функция, восстановленные с помощью которой профили суммарно наименее отличаются от эталонных значений температуры за измерительную кампанию.

Функции восстановления температуры

В атмосфере (особенно в тропосфере) линии ЧВР-спектра молекул N_2 и O_2 уширяются как за счет эффекта Доплера, так и за счет столкновений между собой. В [17] была получена КФ в общем аналитическом виде, которая учитывает уширение всех ЧВР-линий N_2 и O_2 при обработке лидарных сигналов:

$$\ln Q(T) = \dots + \frac{\alpha_{-4}}{T^2} + \frac{\alpha_{-3}}{T\sqrt{T}} + \frac{\alpha_{-2}}{T} + \frac{\alpha_{-1}}{\sqrt{T}} + \alpha_0 + \alpha_1\sqrt{T} + \alpha_2T + \alpha_3T\sqrt{T} + \dots = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \alpha_n T^{n/2}, \quad (1)$$

где α_n – калибровочные коэффициенты. На практике функцией (1) воспользоваться нельзя, поэтому в [19, 20] были рассмотрены девять КФ, представляющих собой частные случаи общей КФ (1) и в разной степени учитывающих уширение ЧВР-линий. Модельные и практические исследования показали, что пять из этих девяти КФ восстанавливают температуру тропосферы из лидарных сигналов с меньшими ошибками. Ниже мы рассмотрим только такие ФВТ без указания их исходных калибровочных функций. Каждая ФВТ i и ее калибровочные коэффициенты (A_i, B_i, C_i, D_i) для удобства пронумерованы ($i = 3, 4, 7, 8$ и 9) в полном соответствии с [19, 20].

Первые две функции (ФВТ 3 и 4) имеют по три калибровочных коэффициента (A_i, B_i, C_i):

$$T = \frac{C_3}{(\ln Q)^2 + B_3 \ln Q + A_3}, \quad (2)$$

$$T = \frac{\ln Q}{B_4 (\ln Q)^2 + A_4 \ln Q + C_4}. \quad (3)$$

Три следующие ФВТ 7, 8 и 9 представляют собой функции с четырьмя коэффициентами:

$$T = \frac{D_7}{(\ln Q)^3 + C_7 (\ln Q)^2 + B_7 \ln Q + A_7}, \quad (4)$$

$$T = \frac{(\ln Q)^2}{B_8 (\ln Q)^3 + A_8 (\ln Q)^2 + C_8 \ln Q + D_8}, \quad (5)$$

$$T = \frac{\ln Q}{C_9 (\ln Q)^3 + B_9 (\ln Q)^2 + A_9 \ln Q + D_9}. \quad (6)$$

Калибровочные функции, из которых выводятся указанные ФВТ, приведены в [19].

Измерение температуры с помощью ЧВР-лидара

Приведем основные характеристики ЧВР-лидара ИМКЭС СО РАН и особенности алгоритма восстановления температуры из его сигналов.

ЧВР-лидар ИМКЭС СО РАН

Исходные данные для исследования устойчивости ФВТ были получены с помощью ЧВР-лидара, разработанного в ИМКЭС СО РАН для измерения температуры атмосферы [18]. В качестве источника исходящих лидарных сигналов используется лазер Solar LS LQ529B, работающий на длине волны 354,67 нм (третья гармоника), с шириной спектральной линии $\sim 1 \text{ см}^{-1}$. Частота следования импульсов составляет 20 Гц, энергия в импульсе – 105 мДж, длительность импульса – 13 нс. Обратнорассеянные фотоны собираются прямофокусным телескопом с главным зеркалом диаметром 0,5 м и фокусным расстоянием 1,5 м. Полезные сигналы выделяются монохроматором с двумя дифракционными решетками. Оптическая схема, технические параметры передающей, принимающей систем и системы обработки сигналов лидара подробно приведены в [18].

Усреднение исходных лидарных сигналов

Для получения вертикального профиля температуры, уменьшения статистических погрешностей и улучшения отношения сигнал-шум в рамках традиционного ЧВР лидарного метода исходные лидарные данные необходимо сглаживать (усреднять) [7–19]. Процедура сглаживания зависит от характеристик конкретной лидарной системы и подбирается опытным путем. Для ЧВР-лидара ИМКЭС оптимальное сглаживание выглядит следующим образом. Исходные лидарные данные – фотоотсчеты N_L и N_H , регистрируемые в двух лидарных каналах, – усредняются переменным скользящим окном. Индексы L и H означают, что в данных каналах спектральными фильтрами выделяются линии ЧВР-спектра

молекул N_2 и O_2 с низкими и высокими значениями вращательного квантового числа J соответственно. Пространственное (вертикальное) разрешение усредненных лидарных данных $\Delta z = 24$ м, т.е. точки таких данных соответствуют высотам 24, 48, 72 м и т.д. Симметричное скользящее окно содержит $n = 2k + 1$ точек, где k — число точек с каждой стороны от центральной точки окна. Первые 10 точек лидарных данных сглаживаются окном размером $n = 3$ ($k = 1$). Для сглаживания каждых последующих 10 точек данных окно увеличивается на одну точку с обеих сторон от его центральной точки. Другими словами, имея длину $\Delta \bar{z} = (n - 1)\Delta z = 2k\Delta z = 48$ м в интервале высот от 0 до 240 м, скользящее окно увеличивается симметрично на 24 м снизу и сверху в каждом последующем 240-метровом высотном диапазоне. Пространственное разрешение усредненных данных равно длине окна. Например, скользящее окно включает $n = 2k + 1 = 27$ точек данных ($k = 13$) и имеет длину $\Delta \bar{z} = 624$ м на высоте 3 км, а на высоте 9 км $n = 2k + 1 = 77$ ($k = 38$) и $\Delta \bar{z} = 1824$ м.

Абсолютная $\Delta \bar{T}$ и относительная $(\Delta \bar{T}/\bar{T})$ статистические погрешности восстановления температуры из сглаженных лидарных сигналов (фотоотчетов) \bar{N}_L и \bar{N}_H уменьшаются в \sqrt{n} раз, т.е. $\Delta \bar{T} = \Delta T/\sqrt{n}$ и $(\Delta \bar{T}/\bar{T}) = (\Delta T/T)/\sqrt{n}$, где ΔT и $(\Delta T/T)$ — соответствующие погрешности восстановления температуры из исходных сигналов [18]. Уменьшенная мощность лазера, например из-за использования генераторов второй и третьей гармоник, и/или малое время накопления лидарных сигналов могут привести к большим статистическим погрешностям. В таком случае имеет смысл применить процедуру повторного сглаживания окном малого размера. Это приведет к незначительному ухудшению пространственного разрешения значений температуры, восстановленных из повторно сглаженных данных, но дополнительно уменьшит статистические погрешности в \sqrt{m} раз ($m = 2l + 1$):

$$\begin{aligned} \Delta \bar{\bar{T}} &= \Delta \bar{T}/\sqrt{m} = \Delta T/\sqrt{nm}, \\ \left(\frac{\Delta \bar{\bar{T}}}{\bar{T}}\right) &= \left(\frac{\Delta \bar{T}}{\bar{T}}\right) \frac{1}{\sqrt{m}} = \left(\frac{\Delta T}{T}\right) \frac{1}{\sqrt{nm}}, \end{aligned} \quad (7)$$

где m и l определяются аналогично ранее введенным числам n и k .

В случае ЧВР-лидара ИМКЭС значение отношения однократно сглаженных фотоотчетов $Q = \bar{N}_L/\bar{N}_H$ было повторно сглажено постоянным окном, включающим $m = 2l + 1 = 11$ ($l = 5$) точек отношения Q . Это привело к дополнительному уменьшению статистических погрешностей в $\sqrt{11} \approx 3,3$ раза. Пространственное разрешение повторно усредненных данных на высоте 9 км равно $\Delta \bar{\bar{z}} = 2(k + l)\Delta z = 2064$ м ($k = 38$, $l = 5$). Формулы для расчета статистических погрешностей восстановления температуры из исходных и сглаженных лидарных сигналов приведены в [19] для всех используемых ФВТ.

Эталонные температурные точки для калибровки лидара

Температурные точки, полученные с помощью радиозонда, запущенного одновременно с измерениями на лидарной станции, наиболее часто используются в качестве эталонных для калибровки ЧВР-лидаров [3–5, 9–16, 18, 19, 21]. Под калибровкой лидара подразумевается определение коэффициентов используемых ФВТ. Тем не менее не все лидарные станции (к которым относится и станция ИМКЭС) располагают такими радиозондами. Следовательно, калибровку лидара можно осуществить по температурным данным радиозондов, запускаемых на ближайших к лидару метеорологических станциях. Как правило, метеостанции запускают радиозонды дважды в день (00:00 и 12:00 UTC), что уже накладывает ограничения на время проведения ночных лидарных измерений. Зондирование должно быть близко по времени к запускам радиозондов. Например, для Томска соответствующее местное время (LT) запусков радиозондов — 06:00 и 18:00, поэтому периоды ночных измерений делятся с октября по апрель.

Ближайшие к Томску (56,50° с.ш.; 84,95° в.д.) метеостанции, запускающие радиозонды дважды в день, находятся в Новосибирске (54,96° с.ш.; 82,95° в.д.) и Колпашеве (58,31° с.ш.; 82,95° в.д.) на расстоянии 210 и 242 км соответственно [18, 19]. Следовательно, использовать температурные данные этих станций для калибровки лидара в Томске напрямую нельзя. Для калибровки ЧВР-лидара ИМКЭС была разработана методика получения эталонных данных с помощью карт абсолютной барической топографии [18]. Для получения четырех эталонных точек в высотном диапазоне 3–9 км использовались карты для главных изобарических поверхностей 700, 500, 400 и 300 гПа с нанесенными на них изотермами. Для настоящего исследования еще шесть точек получались с помощью линейной интерполяции данных с учетом стабильности тропосферы на высотах выше пограничного слоя атмосферы (≥ 3 км) и ниже тропопаузы (< 9 –10 км) для средних широт. Полученные таким способом эталонные точки не позволяют восстанавливать температуру из лидарных данных с высокой точностью. Однако возможно провести сравнительный анализ ошибок восстановления с использованием различных ФВТ при одинаковых начальных условиях. Температурные профили, полученные с помощью радиозондов, и эталонные точки для калибровки лидара на исследуемые даты приведены в [22].

Результаты и их анализ

Проанализируем кратковременную устойчивость ФВТ на примере ночных измерений, проведенных 6, 7 и 8 апреля 2015 г. с помощью лидара ИМКЭС. Профили температуры тропосферы (3–9 км) восстанавливаются из лидарных данных с помощью ФВТ 3, 4, 7–9. Подробно рассмотрим результаты,

полученные при использовании ФВТ 4. Результаты восстановления профилей с остальными ФВТ приведены в [22].

Данные лидарных измерений

Исходные сигналы (фотоотсчеты), зарегистрированные в двух лидарных каналах 6 апреля, сглаженные сигналы и их отношения показаны на рис. 1. Лидарные сигналы накапливались в течение 120 мин (144000 лазерных выстрелов) в каждом периоде измерений: 6 апреля с 03:20 до 05:20 LT (или 21:20–23:20 UTC 5 апреля), 7 апреля с 03:07 до 05:07 LT (21:07–23:07 UTC 6 апреля) и 8 апреля с 03:00 до 05:00 LT (21:00–23:00 UTC 7 апреля) [22].

В качестве примера на рис. 2 приведен профиль температуры, восстановленный с помощью

ФВТ 4 из лидарных сигналов за 6 апреля. Абсолютная $\overline{\Delta T}$ и относительная ($\overline{\Delta T/T}$) статистические погрешности восстановления температуры из повторно сглаженного постоянным окном отношения $Q = \bar{N}_L/\bar{N}_H$ (т.е. $\bar{Q} = \overline{\bar{N}_L/\bar{N}_H}$) для простоты обозначены через ΔT и $(\Delta T/T)$. На рис. 2 также приведен модуль разности $|T_{\text{эт}} - T|$ эталонных температурных точек над Томском $T_{\text{эт}}$ [22] и соответствующих значений температуры T восстановленного профиля. Для сравнения показаны температурные данные радиозондов, запущенных с метеостанций Новосибирска и Колпашева 6 апреля в 06:00 LT (00:00 UTC). Значения коэффициентов ФВТ 4, определенных с помощью метода наименьших квадратов с использованием лидарных сигналов и эталонных профилей температуры за 6, 7 и 8 апреля, приведены на рис. 3.

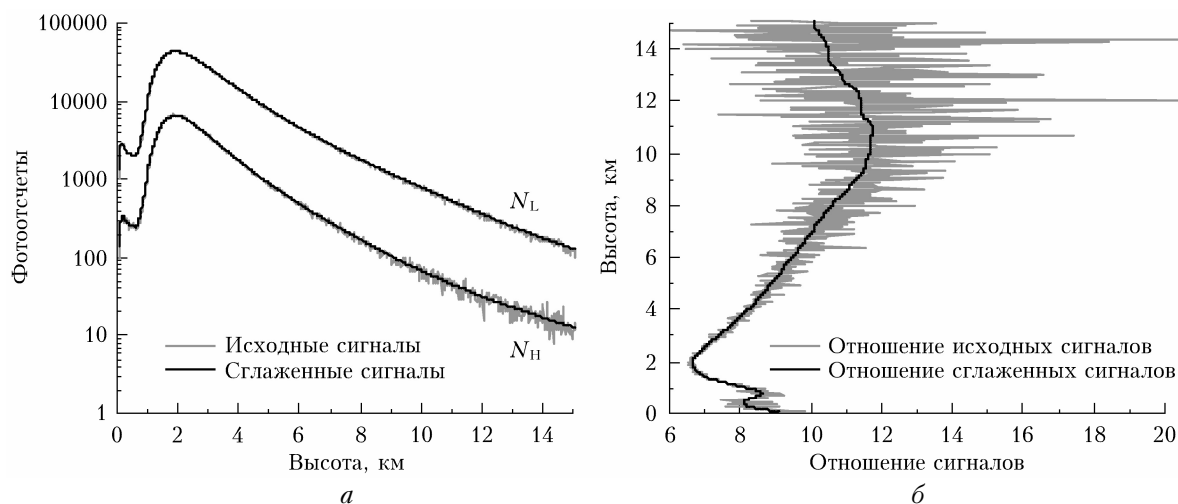


Рис. 1. Данные ночных измерений, полученные с помощью ЧВР-лидара ИМКЭС: исходные (N_L и N_H) и однократно сглаженные (\bar{N}_L и \bar{N}_H) фотоотсчеты, зарегистрированные в ближнем и дальнем к лазерной линии лидарных каналах 6 апреля 2015 г. (а); соответствующие отношения исходных N_L/N_H и сглаженных $Q = \bar{N}_L/\bar{N}_H$ фотоотчетов (б). Отношение Q дополнительно сглаживалось малым окном постоянного размера (см. раздел «Усреднение исходных лидарных сигналов»)

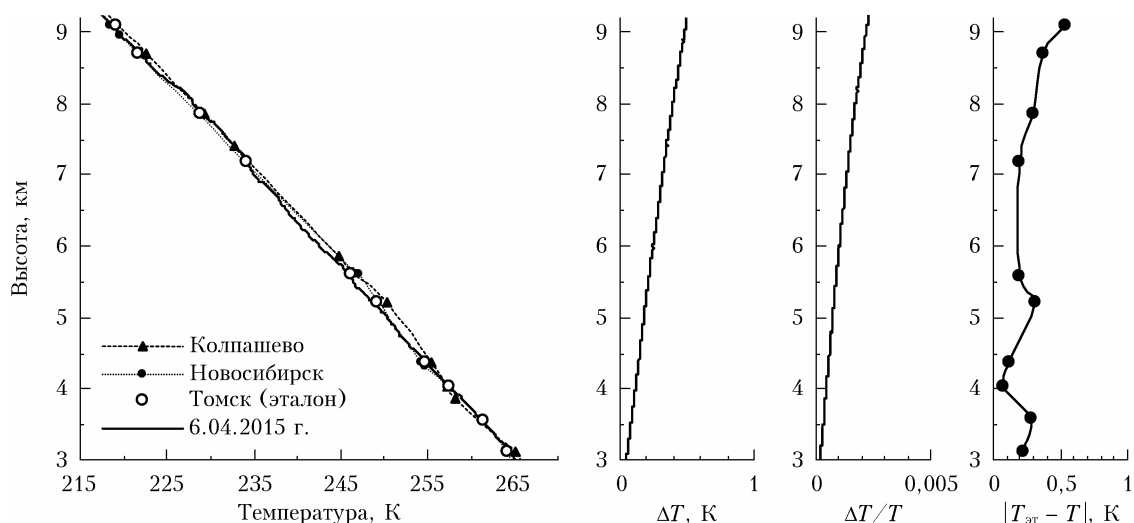


Рис. 2. Профиль температуры тропосферы, восстановленный с помощью ФВТ 4 из отношения сглаженных сигналов за 6 апреля; ΔT и $(\Delta T/T)$ – абсолютная и относительная статистические погрешности; $|T_{\text{эт}} - T|$ – модуль разности эталонных температурных точек и соответствующих значений температуры восстановленного профиля

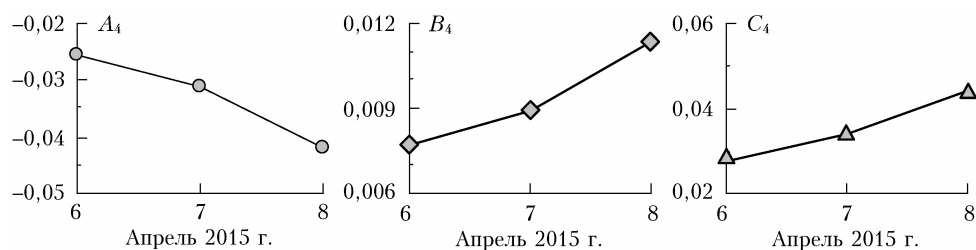


Рис. 3. Значения коэффициентов ФВТ 4, определенных по эталонным и лидарным данным за 6, 7 и 8 апреля 2015 г.

В табл. 1 приведены средние значения модуля разности $\langle T_{\text{эт}} - T \rangle$ для ФВТ 3, 4, 7–9. Усреднение проводится по числу эталонных точек (в рассматриваемых случаях – по десять точек на каждый период измерений).

Т а б л и ц а 1

Функция восстановления температуры	$\langle T_{\text{эт}} - T \rangle$, К		
	6 апреля	7 апреля	8 апреля
ФВТ 3	0,32	0,70	0,84
ФВТ 4	0,26	0,62	0,93
ФВТ 7	0,22	0,61	0,40
ФВТ 8	0,23	0,61	0,46
ФВТ 9	0,22	0,61	0,43

П р и м е ч а н и е. Полужирным выделены наименьшие значения $\langle T_{\text{эт}} - T \rangle$ для каждого периода измерений (6, 7 и 8 апреля).

Хорошо видно, что использование ФВТ 7–9 приводит к меньшим ошибкам измерения температуры, чем использование ФВТ 3 и 4. Наилучшей функцией среди всех, очевидно, является ФВТ 7.

Устойчивость ФВТ

Для анализа устойчивости ФВТ во времени рассмотрим два случая. В первом предполагается, что для каждого периода лидарных измерений (6, 7 и 8 апреля) есть соответствующие эталонные тем-

пературные точки для калибровки лидара. Это позволит оценить, в какой мере можно использовать коэффициенты, определенные в каждый из дней измерительной кампании, для восстановления температуры в остальные дни. Во втором случае анализируется ситуация, когда в один из дней измерений эталонные данные отсутствуют (например, из-за обрыва радиозонда), но они есть для остальных дней. Коэффициенты ФВТ в такой день рассчитываются по коэффициентам, определенным в оставшиеся дни.

На рис. 4, а приведены четыре профиля температуры, восстановленные из данных лидарного зондирования за 6 апреля. По данным за 6 апреля (см. рис. 1, б) первые три профиля (6.04, 7.04 и 8.04) восстанавливались с помощью ФВТ 4 с коэффициентами A_4 , B_4 и C_4 , определенными 6, 7 и 8 апреля соответственно (рис. 3). Далее предполагалось, что эталонные точки и, следовательно, калибровочные коэффициенты за 6 апреля отсутствуют, поэтому четвертый профиль (Сред. 7, 8.04) восстанавливался с помощью коэффициентов, усредненных за 7 и 8 апреля. При определении средних значений A_4 , B_4 и C_4 использовалось взвешенное среднее, для вычисления которого полагалось, что вес коэффициентов в каждый последующий ($i + 1$) и предыдущий день ($i - 1$) в 2 раза меньше, чем в день i . Таким образом, каждое среднее взвешенное значение A_4 , B_4 и C_4 за 6 апреля определялось как сумма соответствующих коэффициентов за 7 апреля с весом $2/3$ и 8 апреля с весом $1/3$.

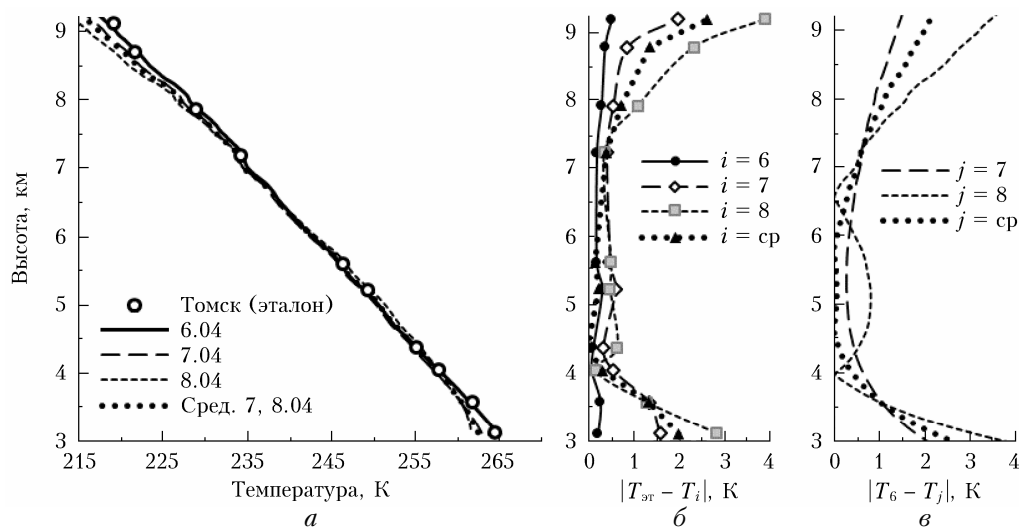


Рис. 4. Профили температуры, восстановленные с помощью ФВТ 4 из лидарных данных за 6 апреля (а); модули разностей $|T_{\text{эт}} - T_i|$ (б) и $|T_6 - T_j|$ (в) (см. описание в тексте)

Средние взвешенные значения коэффициентов ФВТ 4 за 7 апреля определялись как сумма значений коэффициентов за 6 и 8 апреля с одинаковым весом 1/2. Соответствующий профиль (Сред. 6, 8.04) приведен на рис. 5, а. Аналогично средние A_4 , B_4 и C_4 за 8 апреля вычислялись как сумма коэффициентов за 6 апреля с весом 1/3 и 7 апреля с весом 2/3 – этот профиль (Сред. 6, 7.04) приведен на рис. 6, а.

Для оценки устойчивости ФВТ рассматривались две характеристики. На рис. 4, б приведены модули разностей $|T_{э\tau} - T_i|$ ($i = 6, 7, 8$ и «ср»), что соответствует профилям 6.04, 7.04, 8.04 и Сред. 7, 8.04, представленным на рис. 4, а). Максимальное отличие эталонной температурной точки от значения профиля T_8 составляет 3,9 К на высоте 9,1 км. Отметим, что разность $|T_{э\tau} - T_6|$ на рис. 4, б представляет собой разность $|T_{э\tau} - T|$ на рис. 2.

На рис. 4, в приведена вторая характеристика – модули разностей $|T_6 - T_j|$ ($j = 7, 8$ и «ср»). Максимальные значения $|T_6 - T_7|$, $|T_6 - T_{ср}|$ и $|T_6 - T_8|$ не превышают 2,1; 2,6 и 3,8 К соответственно. Профиль T_6 считается эталонным в разностях $|T_6 - T_j|$ (рис. 4, в), поскольку он восстановлен с помощью эталонных точек, полученных одновременно с исходными лидарными данными. Заметные искажения профилей температуры и большие значения $|T_{э\tau} - T_i|$ и $|T_6 - T_j|$ на краях высотного интервала 3–9 км можно объяснить следующим образом. На высотах 3–4 км имеет место неполное перекрытие пятна лазерного пучка и поля зрения приемной системы лидара, тогда как на высотах выше 8 км обратнорассеянный сигнал уже ослаблен, что приводит к уменьшению отношения сигнал-шум и точности восстановления температуры. На рис. 5 и 6 приведены профили температуры, восстановленные

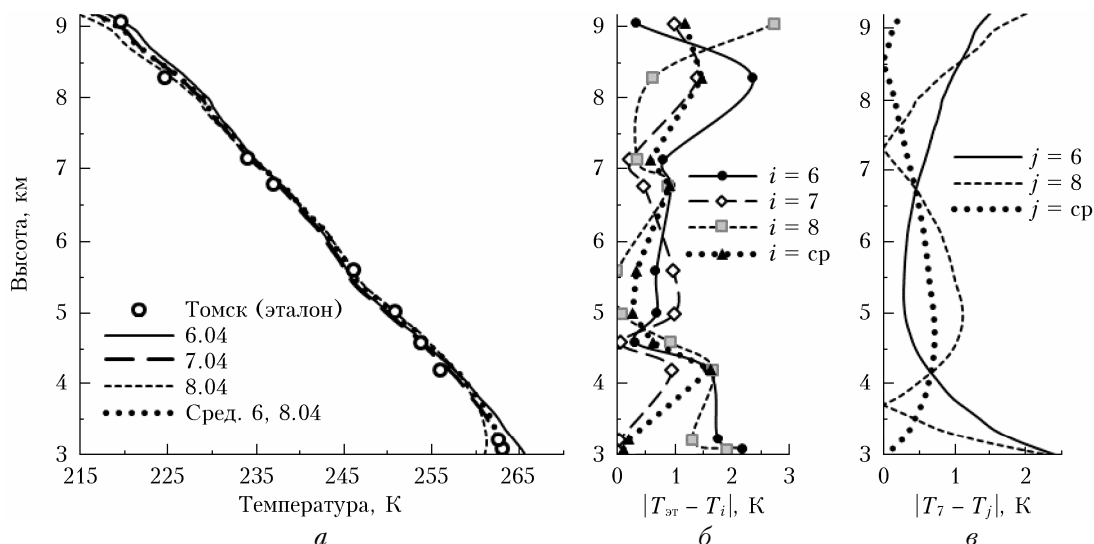


Рис. 5. Профили температуры, восстановленные с помощью ФВТ 4 из лидарных данных за 7 апреля (а); модули разностей $|T_{э\tau} - T_i|$ (б) и $|T_7 - T_j|$ (в) (см. описание в тексте)

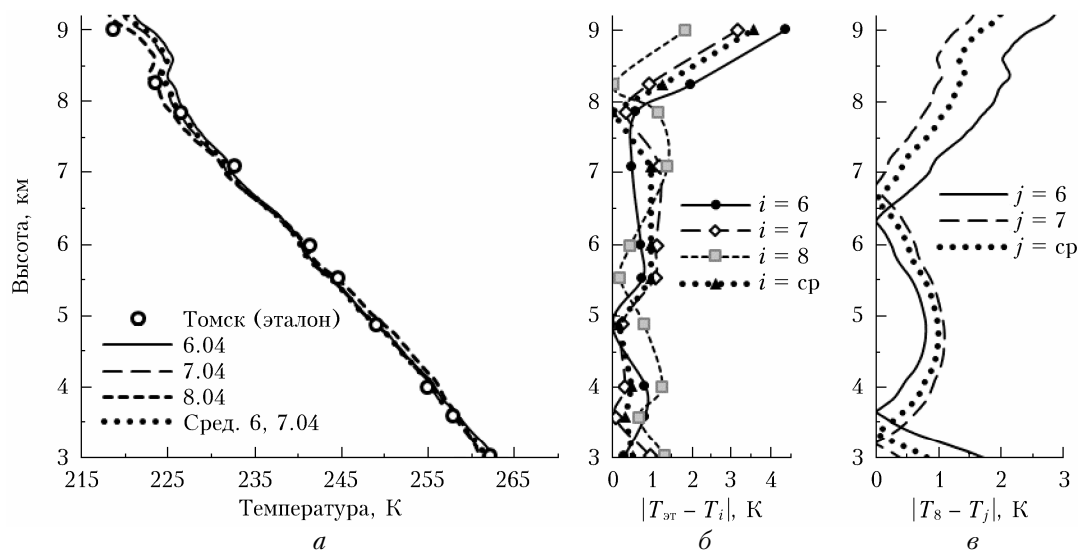


Рис. 6. Профили температуры, восстановленные с помощью ФВТ 4 из лидарных данных за 8 апреля (а); модули разностей $|T_{э\tau} - T_i|$ (б) и $|T_8 - T_j|$ (в) (см. описание в тексте)

по лидарным данным за 7 и 8 апреля (все характеристики аналогичны приведенным на рис. 4). Профили T_7 и T_8 считаются эталонными в разностях $|T_7 - T_j|$ (рис. 5, в) и $|T_8 - T_j|$ (рис. 6, в).

По предложенным характеристикам (рис. 4–6) трудно однозначно судить о степени отличия температурных профилей друг от друга. Например, на рис. 5, в видно, что на высотах между 4,2 и 6,7 км величина $|T_7 - T_6|$ меньше, чем остальные разности, $|T_7 - T_8|$ меньше в высотных диапазонах 3,5–4,2 и 6,7–7,6 км, тогда как $|T_7 - T_{cp}|$ меньше остальных на высотах 3,0–3,5 и 7,6–9,2 км. То же самое справедливо для разностей $|T_6 - T_j|$ (рис. 4, в) и $|T_8 - T_j|$ (рис. 6, в), поэтому далее рассматривались их усредненные величины. На рис. 7 приведены усредненные по числу эталонных точек значения модулей разностей $\langle |T_{эт} - T_i| \rangle$, на рис. 8 – усредненные по высотному диапазону 3–9 км значения модулей разностей $\langle |T_6 - T_j| \rangle$, $\langle |T_7 - T_j| \rangle$ и $\langle |T_8 - T_j| \rangle$.

Температурный профиль, восстановленный из лидарных и эталонных данных за одну и ту же дату, будет точнее (ближе к эталону), чем профиль, восстановленный с использованием эталонных данных за любую другую дату. Это связано с нестабильностью в оптических и электронных системах лидара, из-за которой необходима регулярная перекалибровка ЧВР-лидаров [7]. Поэтому $\langle |T_{эт} - T_6| \rangle$ (рис. 7, а), $\langle |T_{эт} - T_7| \rangle$ (рис. 7, б) и $\langle |T_{эт} - T_8| \rangle$ (рис. 7, в) ожидаемо оказались наименьшими в соответствующие даты измерений. При отсутствии эталонных точек в первый или последний день измерительной кампании к наилучшему результату приводит использование эталонных точек за ближайшее соседнее число. Например, по лидарным данным

как за 6 апреля, так и за 8 апреля температура восстанавливается с меньшими разностями $\langle |T_{эт} - T_i| \rangle$ с помощью калибровочных коэффициентов, полученных по эталонным точкам за 7 апреля. Почти такую же точность восстановления профилей за 6 и 8 апреля дает использование средних взвешенных значений A_4 , B_4 и C_4 (рис. 7, а и в). Разница между $\langle |T_{эт} - T_7| \rangle$ и $\langle |T_{эт} - T_{cp}| \rangle$ составляет $\sim 0,04$ К на рис. 7, а и менее 0,02 К на рис. 7, в.

Если эталонных данных нет за среднюю дату измерений (7 апреля), то однозначно лучшим вариантом будет использование средних взвешенных значений калибровочных коэффициентов, определенных в соседние дни (6 и 8 апреля) (рис. 7, б). К такому же выводу мы приходим при анализе второй характеристики – усредненных значений $\langle |T_6 - T_j| \rangle$, $\langle |T_7 - T_j| \rangle$ и $\langle |T_8 - T_j| \rangle$ (рис. 8). Таким образом, при восстановлении температуры с помощью ФВТ 4 можно рекомендовать использование средних взвешенных значений калибровочных коэффициентов при отсутствии эталонных данных в любой день измерительной кампании.

Для определения самой устойчивой функции среди исследуемых ФВТ 3, 4, 7–9 проведен сравнительный анализ обеих характеристик и их усредненных значений, представленных в [22]. Анализ показал, что профили, восстановленные с помощью ФВТ 7–9, сильно искажены на границах высотного интервала 3–9 км. Это говорит о слабой временной устойчивости этих функций уже в интервале трех дней измерений. В табл. 2 приведены усредненные значения характеристик устойчивости ФВТ, из которых видно, что ФВТ 3 и 4 более стабильны: по четыре величины (за 7 и 8 апреля) у ФВТ 3 и 4 меньше, чем у ФВТ 7–9. Наиболее устойчива

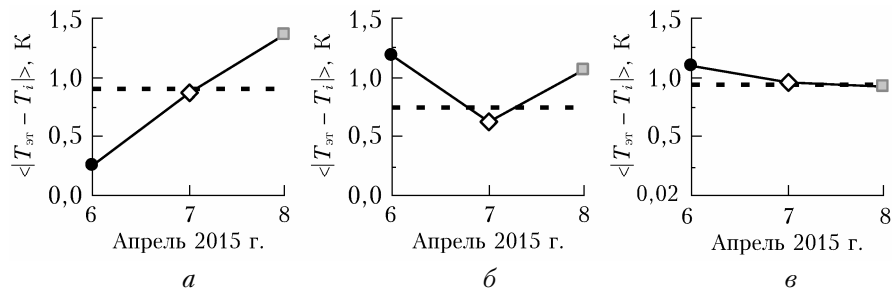


Рис. 7. Усредненные по числу эталонных точек величины $\langle |T_{эт} - T_i| \rangle$ ($i = 6, 7, 8$ и «ср»), полученные по лидарным данным за 6 (а), 7 (б) и 8 апреля (в) 2015 г. Пунктирная линия соответствует $i = \langle \text{ср} \rangle$

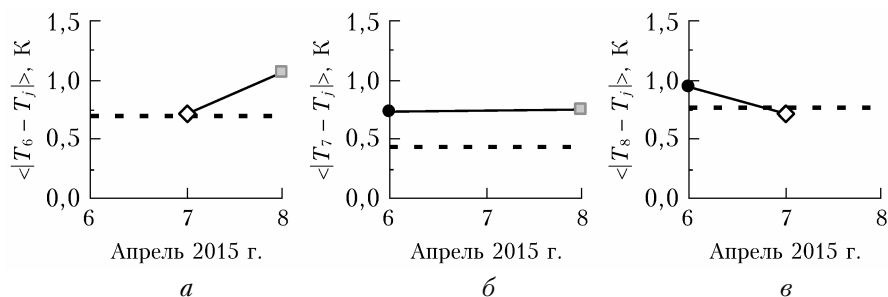


Рис. 8. Усредненные по высотному диапазону 3–9 км величины $\langle |T_6 - T_j| \rangle$ ($j = 7, 8$ и «ср») (а), $\langle |T_7 - T_j| \rangle$ ($j = 6, 8$ и «ср») (б), $\langle |T_8 - T_j| \rangle$ ($j = 6, 7$ и «ср») (в). Пунктирная линия соответствует $j = \langle \text{ср} \rangle$

Усредненные характеристики устойчивости ФВТ

Функция восстановления температуры	6 апреля		7 апреля		8 апреля	
	$\langle T_{\text{эт}} - T_{\text{ср}} \rangle$, К	$\langle T_6 - T_{\text{ср}} \rangle$, К	$\langle T_{\text{эт}} - T_{\text{ср}} \rangle$, К	$\langle T_7 - T_{\text{ср}} \rangle$, К	$\langle T_{\text{эт}} - T_{\text{ср}} \rangle$, К	$\langle T_8 - T_{\text{ср}} \rangle$, К
ФВТ 3	0,96	0,72	0,95	0,54	0,89	0,82
ФВТ 4	0,91	0,70	0,75	0,44	0,94	0,77
ФВТ 7	0,73	0,71	1,09	0,68	1,05	1,12
ФВТ 8	0,83	0,61	1,61	0,88	1,05	1,10
ФВТ 9	0,84	0,60	1,59	0,89	1,05	1,11

во времени (по крайней мере, в трехдневном интервале измерений) ФВТ 4 с тремя наименьшими средними значениями из шести. Анализ суммарных отклонений восстановленных профилей от эталонных данных позволяет сделать такое же заключение.

В табл. 3 представлены следующие параметры: Σ_1 – сумма значений $\langle T_{\text{эт}} - T_{\text{ср}} \rangle$ за 6–8 апреля; Σ_2 – сумма значений $\langle T_6 - T_{\text{ср}} \rangle$, $\langle T_7 - T_{\text{ср}} \rangle$ и $\langle T_8 - T_{\text{ср}} \rangle$; и $\Sigma = \Sigma_1 + \Sigma_2$ – сумма значений шести указанных средних величин.

Таблица 3

Суммы отклонений профилей от эталона

Функция восстановления температуры	Σ_1 , К	Σ_2 , К	$\Sigma = \Sigma_1 + \Sigma_2$, К
ФВТ 3	2,80	2,08	4,88
ФВТ 4	2,60	1,91	4,51
ФВТ 7	2,87	2,51	5,38
ФВТ 8	3,49	2,59	6,08
ФВТ 9	3,48	2,60	6,08

Видно, что суммы отклонений меньше у ФВТ 3 и 4 (в сравнении с ФВТ 7–9) и ФВТ 4 является наилучшей по всем трем параметрам.

Заключение

На примере серии ночных измерений, проведенных 6, 7 и 8 апреля 2015 г. с помощью ЧВР-лидара ИМКЭС СО РАН, исследованы точность восстановления температурных профилей в каждый из дней измерений при использовании ФВТ 3, 4, 7–9 и кратковременная устойчивость рассматриваемых функций за трехдневный период. Для этой цели проведен сравнительный анализ параметров, характеризующих степень отличия восстановленных профилей от эталонных данных: модулей разностей $|T_{\text{эт}} - T_i|$, $|T_6 - T_j|$, $|T_7 - T_j|$ и $|T_8 - T_j|$; средних значений разностей $\langle T_{\text{эт}} - T_i \rangle$, $\langle T_6 - T_j \rangle$, $\langle T_7 - T_j \rangle$ и $\langle T_8 - T_j \rangle$; сумм значений $\langle T_{\text{эт}} - T_{\text{ср}} \rangle$ за 6–8 апреля и сумм значений $\langle T_6 - T_{\text{ср}} \rangle$, $\langle T_7 - T_{\text{ср}} \rangle$ и $\langle T_8 - T_{\text{ср}} \rangle$.

Анализ показал, что использование ФВТ 7–9 для восстановления температуры из лидарных и эталонных данных за один и тот же период измерений приводит к меньшим ошибкам, чем использование ФВТ 3 и 4 (см. табл. 1). Наилучшей функцией среди всех является ФВТ 7. Это полностью согласуется с выводами, сделанными как на основании модельных расчетов [19, 20], так и после

обработки данных зондирования за 2 октября 2014 г. и 1 апреля 2015 г., полученных с помощью лидара ИМКЭС [19].

Оценка устойчивости функций позволяет сделать следующие выводы: 1) ФВТ 3 и 4 более стабильны, чем ФВТ 7–9 (табл. 2); 2) ФВТ 8 и 9 наименее стабильны и не рекомендованы к использованию во время измерительных компаний, в один или несколько дней которых отсутствуют эталонные данные; 3) для восстановления температуры с помощью ФВТ 3, 4 и 7 можно рекомендовать средние взвешенные значения калибровочных коэффициентов при отсутствии эталонных данных в любой день измерительной кампании; 4) наиболее устойчивой функцией во времени (по крайней мере, в трехдневном интервале измерений) является ФВТ 4 (табл. 3). Ввиду разнообразия конструкций и технических особенностей разных ЧВР лидарных систем наиболее стабильные ФВТ могут отличаться для каждой конкретной лидарной системы.

Автор благодарит В.В. Зуева, В.Л. Правдина, А.В. Павлинского и Д.П. Мордус (Нахтигалову) за помощь в получении лидарных данных и эталонных температурных точек.

1. Weng M., Yi F., Liu F., Zhang Y., Pan X. Single-line-extracted pure rotational Raman lidar to measure atmospheric temperature and aerosol profiles // Opt. Express. 2018. V. 26, N 21. P. 27555–27571.
2. Mahagammulla Gamage S., Sica R.J., Martucci G., Haeffele A. Retrieval of temperature from a multiple channel pure rotational Raman backscatter lidar using an optimal estimation method // Atmos. Meas. Tech. 2019. V. 12, N 11. P. 5801–5816.
3. Chen H., Chen S.Y., Zhang Y.C., Guo P., Chen H., Chen B.L. Robust calibration method for pure rotational Raman lidar temperature measurement // Opt. Express. 2015. V. 23, N 16. P. 21232–21242.
4. He J., Chen S., Zhang Y., Guo P., Chen H. A novel calibration method for pure rotational Raman lidar temperature profiling // J. Geophys. Res.: Atmos. 2018. V. 123, N 19. P. 10925–10934.
5. Yan Q., Wang Y., Gao T., Gao F., Di H., Song Y., Hua D. Optimized retrieval method for atmospheric temperature profiling based on rotational Raman lidar // Appl. Opt. 2019. V. 58, N 19. P. 5170–5178.
6. Cooney J.A. Measurement of atmospheric temperature profiles by Raman backscatter // J. Appl. Meteorol. 1972. V. 11, N 1. P. 108–112.
7. Lidar: Range-resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere / Claus Weitkamp (ed.). New York: Springer-Verlag, 2005. V. 102. 456 p.

8. *Arshinov Yu.F., Bobrovnikov S.M., Zuev V.E., Mittev V.M.* Atmospheric temperature measurements using a pure rotational Raman lidar // *Appl. Opt.* 1983. V. 22, N 19. P. 2984–2990.
9. *Nedeljkovic D., Hauchecorne A., Chanin M.L.* Rotational Raman lidar to measure temperature from the ground to 30 km // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1993. V. 31, N 1. P. 90–101.
10. *Behrendt A., Reichardt J.* Atmospheric temperature profiling in the presence of clouds with a pure rotational Raman lidar by use of an interference-filter-based polychromator // *Appl. Opt.* 2000. V. 39, N 9. P. 1372–1378.
11. *Di Girolamo P., Marchese R., Whiteman D.N., Demoz B.B.* Rotational Raman Lidar measurements of atmospheric temperature in the UV // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31, N 1. P. L01106.
12. *Бобровников С.М., Надеев А.И.* Сравнение методов обработки сигнала при дистанционном измерении температуры по чисто вращательным спектрам комбинационного рассеяния // *Оптика атмосф. и океана.* 2010. Т. 23, № 7. С. 580–584; *Bobrovnikov S.M., Nadeev A.I.* Comparison of signal processing methods in remote temperature measurements by pure rotational Raman spectra // *Atmos. Ocean. Opt.* 2010. V. 23, N 6. P. 523–527.
13. *Newsom R.K., Turner D.D., Goldsmith J.E.M.* Long-term evaluation of temperature profiles measured by an operational Raman lidar // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2013. V. 30, N 8. P. 1616–1634.
14. *Lee III R.B.* Tropospheric temperature measurements using a rotational Raman lidar: Ph.D. dissertation. [Electronic resource]. Hampton University, Hampton, Virginia. 2013. 112 pp. URL: <https://pqdtopen.proquest.com/doc/1437652821.html?FMT=ABS> (last access: 12.04.2020).
15. *Jia J., Yi F.* Atmospheric temperature measurements at altitudes of 5–30 km with a double-grating-based pure rotational Raman lidar // *Appl. Opt.* 2014. V. 53, N 24. P. 5330–5343.
16. *Li Y.J., Lin X., Yang Y., Xia Y., Xiong J., Song S.L., Liu L.M., Chen Z.W., Cheng X.W., Li F.Q.* Temperature characteristics at altitudes of 5–80 km with a self-calibrated Rayleigh–rotational Raman lidar: A summer case study // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 2017. V. 188. P. 94–102.
17. *Gerasimov V.V., Zuev V.V.* Analytical calibration functions for the pure rotational Raman lidar technique // *Opt. Express.* 2016. V. 24, N 5. P. 5136–5151.
18. *Zuev V.V., Gerasimov V.V., Pravdin V.L., Pavlinskiy A.V., Nakhtigalova D.P.* Tropospheric temperature measurements with the pure rotational Raman lidar technique using nonlinear calibration functions // *Atmos. Meas. Tech.* 2017. V. 10, N 1. P. 315–332.
19. *Gerasimov V.V.* Comparative analysis of calibration functions in the pure rotational Raman lidar technique // *Appl. Phys. B.* 2018. V. 124, N 7. P. 134.
20. *Герасимов В.В.* Влияние столкновительного уширения линий на точность измерения температуры тропосферы с помощью чисто вращательных Рамановских лидаров // *Оптика атмосф. и океана.* 2020. Т. 33, № 1. С. 14–24.
21. *Ya-Juan L., Sha-Lei S., Fa-Quan L., Xue-Wu C., Zhen-Wei C., Lin-Mei L., Yong Y., Shun-Sheng G.* High-precision measurements of lower atmospheric temperature based on pure rotational Raman lidar // *Chin. J. Geophys.* 2015. V. 58, N 21. P. 313–324.
22. URL: <https://drive.google.com/open?id=1AajZVv6ZrXdSZtCdBQzC114sOEtwtV7N> (last access: 12.04.2020).

V.V. Gerasimov. Short-term stability of temperature retrieval functions in the traditional pure rotational Raman lidar technique.

In the traditional pure rotational Raman (PRR) technique, air temperature is retrieved from lidar signals with a temperature retrieval function (TRF). The TRF coefficients are determined using a reference temperature profile from a model of the atmosphere or radiosonde data. In this work, we study the stability of several TRFs in time, i.e., we investigate to what extent the TRF coefficients determined on one of the measurement campaign days can be used to retrieve temperature on other days. We also analyze the situation when the reference data are absent on one of the measurement days (for example, due to a radiosonde fall) and the TRF coefficients are determined from the reference data over the remaining days. The stability of five TRFs is studied on the example of nighttime temperature profiles that were obtained using the IMCES PRR lidar (Tomsk) on April 6, 7, and 8, 2015. The function which retrieves the temperature in the troposphere (3–9 km) with the least errors for the considered three-day period has been determined.