

УДК 551.510.413.2: 551.508.856

Увеличение обратного аэрозольного рассеяния в нижней мезосфере в 2019–2021 гг. и его влияние на измерения температуры рэлеевским методом

В.А. Коршунов, Д.С. Зубачев*

НПО «Тайфун»

249038, г. Обнинск, Калужской обл., ул. Победы, 4

Поступила в редакцию 13.09.2021 г.

Представлены результаты лидарного зондирования аэрозольной компоненты нижней мезосферы на длинах волн 355 и 532 нм на лидарных станциях Росгидромета с 2012 по 2021 г. С 2018 г. наблюдается заметный рост отношения обратного рассеяния R в высотном диапазоне 50–70 км. Средний уровень R на высоте 70 км в 2019–2020 гг. достигал 1,25. Измерения температуры рэлеевским методом на длине волны 532 нм в этот период дают завышенные значения температуры в мезосфере на величину до +20 К. Использование двухволнового метода измерения температуры компенсирует эту погрешность.

Ключевые слова: аэрозоль, мезосфера, обратное рассеяние, лидар, солнечная активность, рэлеевский метод измерения температуры; aerosol, mesosphere, backscattering, lidar, solar activity, Rayleigh method for temperature measurements.

Введение

Известно, что в области стратосферы и нижней мезосферы присутствуют частицы метеорной дымки, являющиеся продуктом абляции метеороидов размерами в сотни микрон на высотах 75–120 км [1]. Наличие этих частиц подтверждено спутниковыми данными SOFIE (Solar Occultation For Ice Experiment) по поглощению излучения в затменной схеме измерений [2], а также результатами ракетных измерений с использованием ионных масс-спектрометров [3]. Согласно данным моделирования нанометровые частицы метеорной дымки не должны проявляться в рассеянии [1]. Тем не менее известны примеры достаточно продолжительных наблюдений аэрозольных слоев в верхней стратосфере – нижней мезосфере [4, 5].

В настоящее время на лидарных станциях Росгидромета проводятся совместные измерения температуры и аэрозоля в диапазоне высот от 30 до 70 км с помощью лидара АК-3, работающего на длинах волн 355 и 532 нм [6]. На базовой станции в Обнинске с 2012 г. ведутся регулярные измерения; на других лидарных станциях измерения выполняются эпизодически. С 2012 по 2017 г. в области стратосферы и нижней мезосферы над Обнинском периодически наблюдались аэрозольные слои с пиковым отношением обратного рассеяния $R = 1,1–1,2$ на длине волны 532 нм и среднемесечным уровнем R

в диапазоне 1,0–1,02 [7]. Для объяснения этих результатов привлекалась гипотеза о формировании укрупненной до десятков нанометров фракции частиц метеорной дымки. Дальнейшие наблюдения в Обнинске и на других лидарных станциях Росгидромета показали, что с 2018 г. произошло существенное увеличение R в высотном диапазоне 50–70 км.

В работе представлены результаты измерений в 2018–2021 гг. в сравнении с предшествующим периодом. Параллельно обсуждается вопрос о влиянии аэрозольного присутствия в мезосфере на результаты измерений высотных профилей температуры рэлеевским методом.

Методика измерений

Как известно, одноволновый метод рэлеевского рассеяния предполагает отсутствие аэрозольной компоненты на трассе зондирования. В [8, 9] предложен модернизированный метод рэлеевского рассеяния для совместного определения высотного профиля температуры и отношения обратного рассеяния по данным двухволнового зондирования. Ниже без вывода приводятся основные соотношения модернизированного метода.

Отношения обратного рассеяния $R(\lambda, h)$ на длинах волн $\lambda = 355$ и 532 нм находятся по формулам

$$R(355, h) - 1 = C[R(355, h) - 1],$$

$$R(532, h) = (1 - C) / [\exp(\Delta(h)) - C], \quad (1)$$

где h – высота над лидаром;

* Владимир Алексеевич Коршунов (korshunov@ratyphoon.ru); Дмитрий Сергеевич Зубачев (zubachev@ratyphoon.ru).

$$\Delta(h) = \ln[P(355, h)h^2] - 2\tau_m(355, h, h_p) - \left\{ \ln[P(532, h)h^2] - 2\tau_m(532, h, h_p) \right\}$$

– калиброванная разность логарифмов лидарных сигналов $P(\lambda, h)$, скорректированная на молекулярное ослабление (методика калибровки представлена в [7]), $\tau_m(\lambda, h, h_p)$ – оптическая толщина молекулярного ослабления между точками h и h_p , h_p – точка калибровки;

$$C = \frac{\beta_m(532)\beta_a(355)}{\beta_m(355)\beta_a(532)} \quad (2)$$

– априорная константа.

При наличии аэрозоля выражение для высотного профиля температуры имеет вид

$$T(h) = \frac{1}{E(h)} \left(T(h_c) + \frac{\mu g}{R_g} \int_h^{h_c} E(h') dh' \right), \quad (3)$$

где $E(h) = [F(h)R(h_c)]/[F(h_c)R(h)]$, $F(h) = P(h)h^2 \times \exp\left(-2 \int_h^{h_c} \sigma_m(h') dh'\right)$, $R(h)$ – отношение обратного

рассеяния (индекс длины волны опущен), h_c – точка привязки, в которой температура задается априори, $\sigma_m(h)$ – коэффициент молекулярного ослабления; g – ускорение силы тяжести; μ – молярная масса атмосферного воздуха; R_g – универсальная газовая постоянная.

Поскольку $E(h)$ в (3) экспоненциально возрастает с уменьшением высоты, то на расстоянии $\sim 10 \div 15$ км ниже h_c формула (3) переходит в уравнение

$$T(h) = \frac{\mu g}{R_g} \int_h^{h_c} \frac{F(h')}{R(h')} dh' \frac{R(h)}{F(h)}. \quad (4)$$

Реально величина $F(h)/R(h)$ вносит вклад в интеграл в (4) лишь в ограниченной области высот от h до $h + \Delta h$, где $\Delta h = 10 \div 15$ км.

Точка привязки h_c выбиралась в диапазоне высот от 68 до 72 км. Для задания температуры в точке привязки использовались среднемесячные данные спутниковых измерений MLS Aura в районе Обнинска, усредненные с 2012 по 2015 г.

Результаты измерений

На рис. 1 представлен временной ход $R - 1 = \beta_a/\beta_m$, где β_a и β_m – коэффициенты обратного аэрозольного и молекулярного рассеяния на $\lambda = 532$ нм по данным измерений в Обнинске. Показано среднее по высотному слою (55–65 км) значение $\langle R - 1 \rangle$ с 2012 до середины 2021 г.

Из рис. 1 видно, что в течение 2018 г. произошел рост $\langle R - 1 \rangle$ от величины, близкой к 0, до 0,05. В 2019–2020 гг. текущее среднемесячное значение колеблется около уровня 0,05; доверительный интервал на уровне 95% составляет $\pm 0,025$. В конце 2019 г. наблюдалось кратковременное скачкообразное увеличение $\langle R - 1 \rangle$ до очень большого для данного высотного диапазона значения $\sim 0,3$. Возможно, этот всплеск связан с метеорными потоками.

На рис. 2 показаны средние высотные профили $\langle R - 1 \rangle$ для периодов 2014–2017 гг. (406 измерений) и 2019–2021 гг. (169 измерений) над Обнинском. Видно, что во второй период содержание аэрозоля на высотах от 50 до 70 км существенно выросло.

В отдельные промежутки времени подобные измерения проводились на лидарных станциях в Знаменске Астраханской обл. и Новосибирске. Примеры полученных высотных профилей приведены на рис. 3. Видно, что с 2018 по 2019 г. в этих пунктах также имело место повышенное обратное рассеяние в верхней стратосфере – нижней мезосфере.

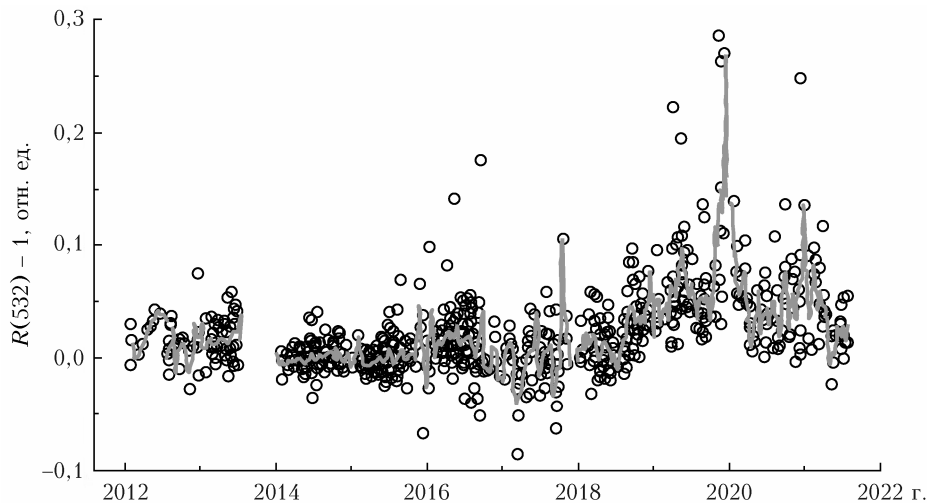


Рис. 1. Временной ход величины $\langle R - 1 \rangle$ в слое 55–65 км над Обнинском: точки – отдельные измерения, сплошная линия – текущее среднемесячное значение

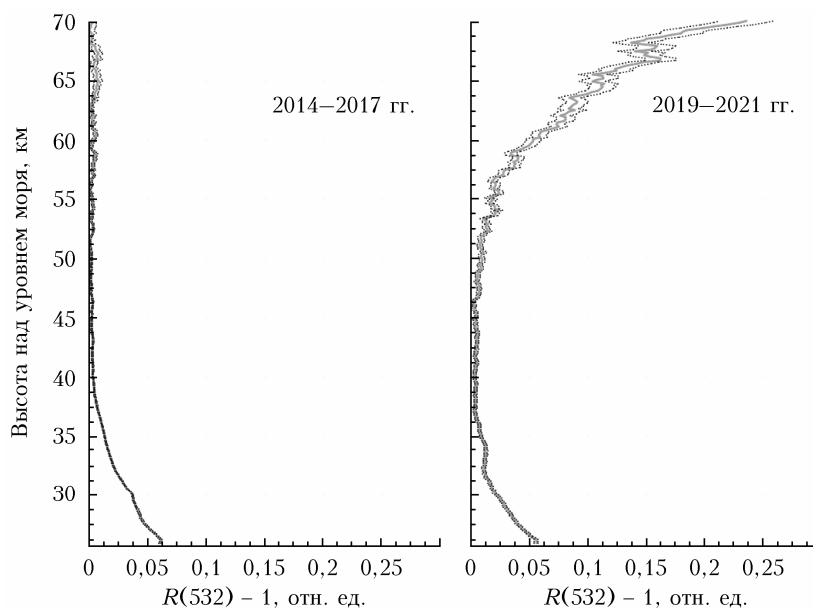


Рис. 2. Средние многолетние высотные профили $\langle R - 1 \rangle$ над Обнинском

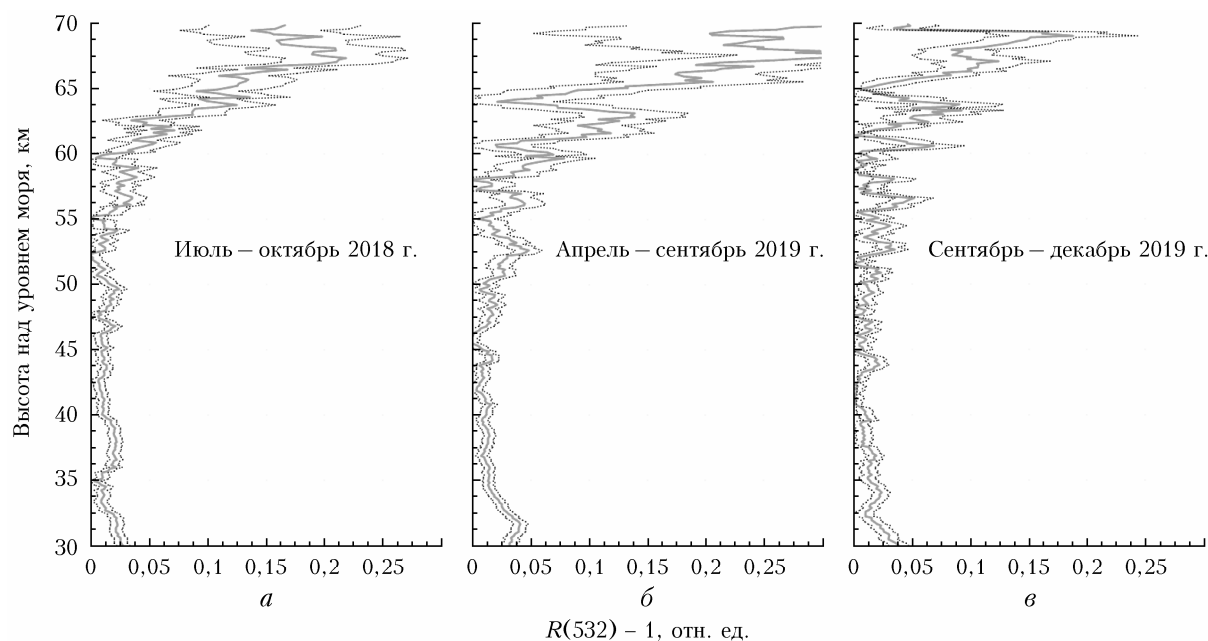


Рис. 3. Средние высотные профили $\langle R - 1 \rangle$ для отдельных временных периодов, полученные по измерениям в Новосибирске (а, б) и Знаменске (в)

Можно предположить, что полученные данные типичны для всей области средних широт Северного полушария.

Обращает на себя внимание тот факт, что наблюдаемое увеличение обратного рассеяния произошло в годы минимума солнечной активности при переходе от 24-го к 25-му солнечному циклу. Отмеченное во «Введении» появление аэрозольных слоев в стратосфере – нижней мезосфере также приходилось на годы минимумов 21–22-го [4] и 23–24-го [5] солнечных циклов. Возможные механизмы влияния солнечной активности на аэрозоль в этой области атмосферы требуют отдельного исследования.

Влияние аэрозоля на определение температуры методом рэлеевского рассеяния

Одним из следствий высокого содержания аэрозоля в мезосфере является его заметное влияние на определение температуры одноволновым рэлеевским методом. На рис. 4 показаны средние за 2019–2021 гг. высотные профили температуры, рассчитанные по данным зондирования над Обнинском стандартным рэлеевским методом на $\lambda = 532$ и 355 нм в сравнении с данными спутниковых

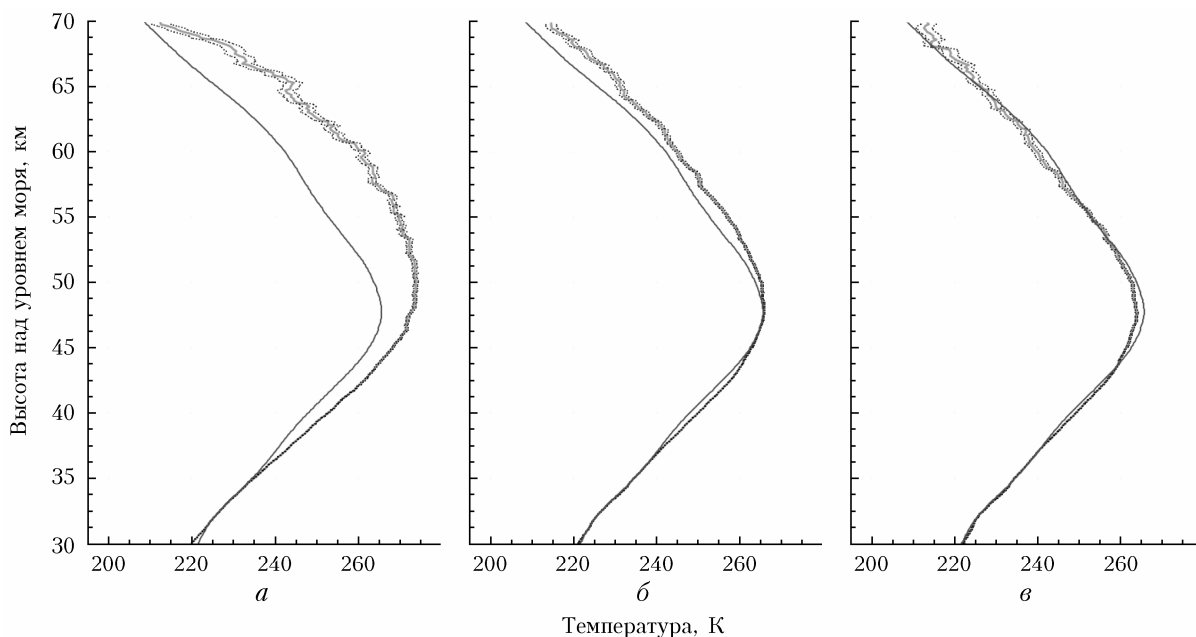


Рис. 4. Средние за 2019–2021 гг. высотные профили температуры (тройные линии – средние с коридором среднеквадратического отклонения от среднего), рассчитанные одноволновым рэлеевским методом на $\lambda = 532$ (а) и 355 нм (б) и модернизированным двухволновым рэлеевским методом (в) в сравнении с измерениями MLS Aura (сплошные тонкие линии)

измерений MLS Aura. При расчете этих профилей $R(h)$ в уравнении (3) полагалось равным 1.

Поскольку привязка производится к спутниковой модели, то, как видно из рис. 4, в области привязки на высоте 70 км профиль приближается к спутниковым данным. Ниже, где привязка перестает оказывать влияние на восстанавливаемый профиль температуры, наблюдается положительное смещение рассчитанных значений температуры относительно спутникового профиля. Максимальное смещение на $\lambda = 532$ нм достигает +20 К, на $\lambda = 355$ нм составляет $\sim +5$ К. Меньшее смещение на 355 нм связано с более низкими значениями $R(h)$ на этой длине волн.

Остановимся на вопросе о знаке смещения температуры, в данном случае положительном. Для объяснения этого факта обратимся к соотношению (4). Величина $F(h) \sim \beta_m(h)R(h)$, поэтому из (4) следует

$$T(h) = \frac{\mu g}{R_g} \int_h^{h_c} \beta_m(h') dh' \frac{1}{\beta_m(h)}. \quad (5)$$

В стандартном рэлеевском методе определения температуры считается, что $R(h) = 1$, и тогда для температурного профиля (обозначим его $T_R(h)$) из (4) получаем

$$T_R(h) = \frac{\mu g}{R_g} \int_h^{h_c} \beta_m(h') R(h') dh' \frac{1}{\beta_m(h) R(h)}. \quad (6)$$

Из сравнения (5) и (6) следует, что смещение $T_R(h)$ относительно $T(h)$ положительное, если $R(h)$ возрастает с высотой, что и имело место в рассматриваемых измерениях.

В периоды минимального аэрозольного присутствия влияние аэрозоля на измерения температуры в среднем не так заметно. В [10] проводилось сравнение данных измерений температуры рэлеевским методом на $\lambda = 355$ и 532 нм с 2008 по 2013 г. В целом получено совпадение результатов измерений на двух длинах волн. В отдельные периоды, в частности с 2005 по 2008 г., отмечалось завышение температуры на $\lambda = 532$ нм в пределах до +2,5 К, но оно было отнесено авторами на счет инструментальных погрешностей. Однако нельзя исключить, что это явление тоже могло быть связано с присутствием аэрозоля, так как период 2005–2008 гг. относится к минимуму солнечной активности 22–23-го солнечных циклов, когда в мезосфере появлялись аэрозольные слои [5].

Использование двухволнового метода измерения исключает рассмотренные выше смещения температуры (рис. 4, в), а остающиеся расхождения с измерениями MLS Aura находятся в тех же пределах, что и в период низкого содержания аэрозоля [9].

Заключение

В работе представлены результаты совместных измерений температуры и аэрозольной компоненты верхней стратосферы – нижней мезосферы с помощью модернизированного рэлеевского метода на длинах волн 355 и 532 нм. Измерения, проведенные на лидарных станциях Росгидромета, показали, что с 2018 г. произошел заметный рост отношения обратного рассеяния R в высотном диапазоне 50–70 км. Средний уровень R на высоте 70 км в 2019–2020 гг. достиг 1,25. Наблюдаемое увеличение обратного рассеяния произошло в годы минимума солнечной

активности при переходе от 24-го к 25-му солнечному циклу. Известные из литературы случаи наблюдения аэрозольных слоев в верхней стратосфере – нижней мезосфере относились к предыдущим периодам минимума солнечной активности.

Повышенное содержание аэрозоля оказывает заметное влияние на измерения температуры одно-волновым рэлеевским методом. Показано, что измерения рэлеевским методом на длине волны 532 нм в период 2019–2021 гг. дают смещенные на величину до +20 К значения температуры в мезосфере по отношению к спутниковым измерениям MLS Aura, в то время как двухволновый метод исключает указанные смещения, а остающиеся расхождения с измерениями MLS Aura находятся в тех же пределах, что и в период низкого содержания аэрозоля.

1. Bardeen C.G., Toon O.B., Jensen E.J., Marsh D.R., Harvey V.L. Numerical simulations of the three-dimensional distribution of meteoric dust in the mesosphere and upper stratosphere // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. P. D17202.
2. Hervig M.E., Brooke J.S.A., Feng W., Bardeen C.G., Plane J.M.C. Constraints on meteoric smoke composition and meteoric influx using SOFIE observations with models // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2017. V. 122. P. 13,495–13,505.
3. Stude J., Aufmhoff H., Schlager H., Rapp M., Arnold F., Strelnikov B. A novel rocket-borne ion mass spectrometer with large mass range: Instrument description and first-flight results // *Atmos. Meas. Tech.* 2021. V. 14. P. 983–993.
4. Черемисин А.А., Границкий Л.В., Мясников В.М., Ветчинкин Н.В. Дистанционное зондирование в ультрафиолетовом диапазоне аэрозольного слоя в окрестности стратосферы с борта космической астрофизической станции «Астрон» // *Оптика атмосф. и океана.* 1998. Т. 11, № 10. С. 1111–1117.
5. Бычков В.В., Пережогин А.С., Шевцов Б.М., Маричев В.Н., Матвиенко Г.Г., Белов А.С., Черемисин А.А., Пережогин Ал.С. Лидарные наблюдения появления аэрозолей в средней атмосфере Камчатки в 2007–2011 гг. // *Оптика атмосф. и океана.* 2012. Т. 25, № 1. С. 87–93; *Bychkov V.V., Perezhogin A.S., Shevtsov B.M., Marichev V.N., Matvienko G.G., Belov A.S., Cheremisin A.A.* Lidar observations of aerosol occurrence in the middle atmosphere of Kamchatka in 2007–2011 // *Atmos. Ocean. Opt.* 2012. V. 25, N 3. P. 228–235.
6. Иванов В.Н., Зубачев Д.С., Коршунов В.А., Сахигареев Д.Г. Сетевой лидар АК-3 для зондирования средней атмосферы: устройство, методы измерений, результаты исследований // *Тр. ГГО.* 2020. Вып. 598. С. 155–187.
7. Коршунов В.А., Мерзляков Е.Г., Юдаков А.А. Наблюдения метеорного аэрозоля в верхней стратосфере – нижней мезосфере методом двухволнового лидарного зондирования // *Оптика атмосф. и океана.* 2018. Т. 31, № 10. С. 805–814; *Korshunov V.A., Merzlyakov E.G., Yudakov A.A.* Observations of meteoric aerosol in the upper stratosphere – lower mesosphere by the method of two-wavelength lidar sensing // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 1. P. 45–54.
8. Коршунов В.А., Зубачев Д.С., Мерзляков Е.Г., Якоби Ч. Результаты определения аэрозольных характеристик средней атмосферы методом двухволнового лидарного зондирования и их сопоставление с измерениями метеорного радиоэхо // *Оптика атмосф. и океана.* 2014. Т. 27, № 10. С. 862–868; *Korshunov V.A., Zubachev D.S., Merzlyakov E.G., Jacobi Ch.* Aerosol parameters of middle atmosphere measured by two-wavelength lidar sensing and their comparison with radio meteor echo measurements // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 1. P. 82–88.
9. Коршунов В.А., Зубачев Д.С. Определение параметров волновых возмущений средней атмосферы по данным лидарных измерений // *Оптика атмосф. и океана.* 2015. Т. 28, № 11. С. 993–1002; *Korshunov V.A., Zubachev D.S.* Determining the parameters of wave disturbances of the middle atmosphere from lidar measurements // *Atmos. Ocean. Opt.* 2016. V. 29, N 2. P. 152–161.
10. Wing R., Hauchecorne A., Keckhut P., Godin-Beekmann S., Khaykin S., McCullough E.M., Mariscal J.-F., d’Almeida É. Lidar temperature series in the middle atmosphere as a reference data set – Part 1: Improved retrievals and a 20-year cross-validation of two co-located French lidars // *Atmos. Meas. Tech.* 2018. V. 11. P. 5531–5547.

V.A. Korshunov, D.S. Zubachev. Increase in the aerosol backscattering ratio in the lower mesosphere in 2019–2021 and its influence on the temperature measurements by the Rayleigh method.

The measurements of aerosol backscattering ration in the lower mesosphere by means of sounding at two wavelengths of 355 and 532 nm at lidar stations of Roshydromet from 2012 to 2021 are presented. Appreciable increase in the backscattering ratio R has been observed in the altitude range 50–70 km since 2018. In 2019–2020, the average R attained 1.25 at an altitude of 70 km. The temperature measurements by the Rayleigh method at 532 nm in this period show a positive bias of the temperature of up to +20 K. The two-wavelength temperature measurement method allows one to eliminate this error.