

УДК 551.501.42

**ВАЛИДАЦИЯ ЛИДАРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В  
СТРАТОСФЕРЕ НАД ТОМСКОМ ПО АЭРОЛОГИЧЕСКИМ И  
СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ ЗА 2015-16 ГГ**

**В. Н. Маричев, Д. А. Бочковский**

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, 634055,  
г. Томск, площадь Академика Зуева, 1  
E-mail: marichev@iao.ru, moto@iao.ru

Проведено сравнение вертикального распределения температуры в нижней стратосфере по данным лидарных, радиозондовых и спутниковых измерений. В лидарных измерениях использовались рамановский и релеевский каналы приема рассеянного света на длинах волн 607 нм и 532 нм. С учетом пространственно-временной разнесенностью измерений получено достаточно хорошее качественное и количественное соответствие вертикальных профилей температуры. Показана перспективность использования метода комбинационного рассеяния света для измерения температуры в нижней стратосфере.

*Ключевые слова: температура, стратосфера, рамановское и релеевское рассеяние света, лидар, радиозонд, спутник "Аура"*

© Маричев В. Н., Бочковский Д. А., 2017

MSC 78A10

**VALIDATION OF LIDAR TEMPERATURE MEASUREMENTS IN THE  
STRATOSPHERE OVER TOMSK ON AEROLOGICAL AND SATELLITE DATA  
FOR 2015-16 YEARS**

**V. N. Marichev, D. A. Bochkovsky**

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS (IAO SB RAS), 634055, Tomsk, 1,  
Academician Zuev square, Russia  
E-mail: marichev@iao.ru, moto@iao.ru

The vertical temperature distribution in the lower stratosphere is compared with the data of lidar, radiosonde, and satellite measurements. In the lidar measurements, Raman and Rayleigh channels for receiving scattered light at wavelengths of 607 nm and 532 nm were used. Taking into account the spatio-temporal separation of the measurements, a qualitative and quantitative correspondence of the vertical temperature profiles was obtained. The prospects of using the Raman scattering method for measuring temperature in the lower stratosphere are shown.

*Key words: temperature, stratosphere, Raman and Rayleigh scattering of light, radar, radiosonde, "Aura" satellite.*

© Marichev V. N., Bochkovsky D. A., 2017

Ранее нами в работе [1] сообщалось об измерении температуры в тропосфере лидаром с приемным зеркалом диаметром 1м и передатчиком на базе эксимерного ХеС1-лазера. В лидаре использовался канал для приема СКР-сигналов на первом колебательно-вращательном переходе молекул азота. Возбуждение данного перехода молекул N<sub>2</sub>(384 нм) производилось излучением на длине волны 353 нм, получаемой, в свою очередь, при ВКР-преобразовании лазерного излучения с длиной волны 308 нм в кювете с водородом. В плане дальнейшего развития технологии измерений температуры в атмосфере была проведена модернизация вышеуказанного лидара. В лидаре были созданы три канала для приема сигналов СКР и упругого рэлеевского рассеяния света, что позволило охватить диапазон измерений температуры во всей стратосфере и нижней термосфере от 10 до 60 км. В качестве передатчика использовался Nd-YAG лазер с генерацией на второй гармонике 532 нм. Прием СКР-сигналов проводился на возбужденном излучением лазера колебательно -вращательном переходе молекул азота 607нм. Блок-схема лидара в его современном состоянии описана в работе [2]. Зондирование проводится в ночное время суток. Используемое вертикальное разрешение измерения сигнала (длина строба) составляет 192 м (при этом дискрет по стробу равен 12 м). Единичная серия измерений равнялось 10мин., а среднее время проведения измерений за ночь – около двух часов Восстановление температурных профилей из СКР-сигналов проводился через концентрацию молекул азота, т.е. через плотность атмосферы. Для расчета температуры Т по СКР-сигналам было получено выражение, аналогичное для расчета температуры по рэлеевским сигналам [1], [3]:

$$T(H) = \frac{P_1(H) * P_2(H)}{N(H) * H^2} * \left[ \frac{N(H_m)}{P_1(H_m) * P_2(H_m)} * T(H_m) * \frac{1}{R^*} * \int_{H_m}^H \frac{N(h) * h^2 * g(h) dh}{P_1(h) * P_2(h)} \right]$$

Здесь  $P_1(H)$ ,  $P_2(H)$  – прозрачность атмосферы от уровня расположения лидара до высоты H на длинах волн 532 и 607 нм,  $R^*$  – удельная газовая постоянная,  $g(h)$  – ускорение свободного падения,  $H_m$  – максимальная высота, с которой регистрируются достаточно надежные для обработки сигналы (так называемая высота калибровки, на которой задаются граничные значения температуры ( $H_m$ )). Сравнение лидарных измерений температурных профилей в нижней стратосфере, полученных методом СКР, проводилось с данными радиозондовых и спутниковых измерений. В качестве независимых данных были взяты профили температуры, полученные на аэрологической станции г. Новосибирска (удаление от Томска 210км) [4] и со спутника "Аура"[5]. Результаты лидарных измерений температуры, полученные за длительный период март-декабрь 2015г. и январь- сентябрь 2016 г. представлены на рис.1 и рис. 2.

Как видно из рисунков 1 и 2, измерениями по СКР-сигналам был освоен высотный диапазон от 10 до 25км. Выше для расчета температуры использовались сигналы рэлеевского рассеяния света, на которые в том числе производилась калибровка сигналов СКР. В большинстве случаев отмечается достаточно хорошее соответствие вертикального распределения температуры (ВРТ), полученное из лидарных, радиозондовых и спутниковых измерений. По представленным выше данным был рассчитан средний разброс измеренных значений температуры лидаром по сравнению со спутником "Аура"и радиозондом. Результаты расчета в виде вертикальных профилей отклонений приведены на рис. 3 и 4.

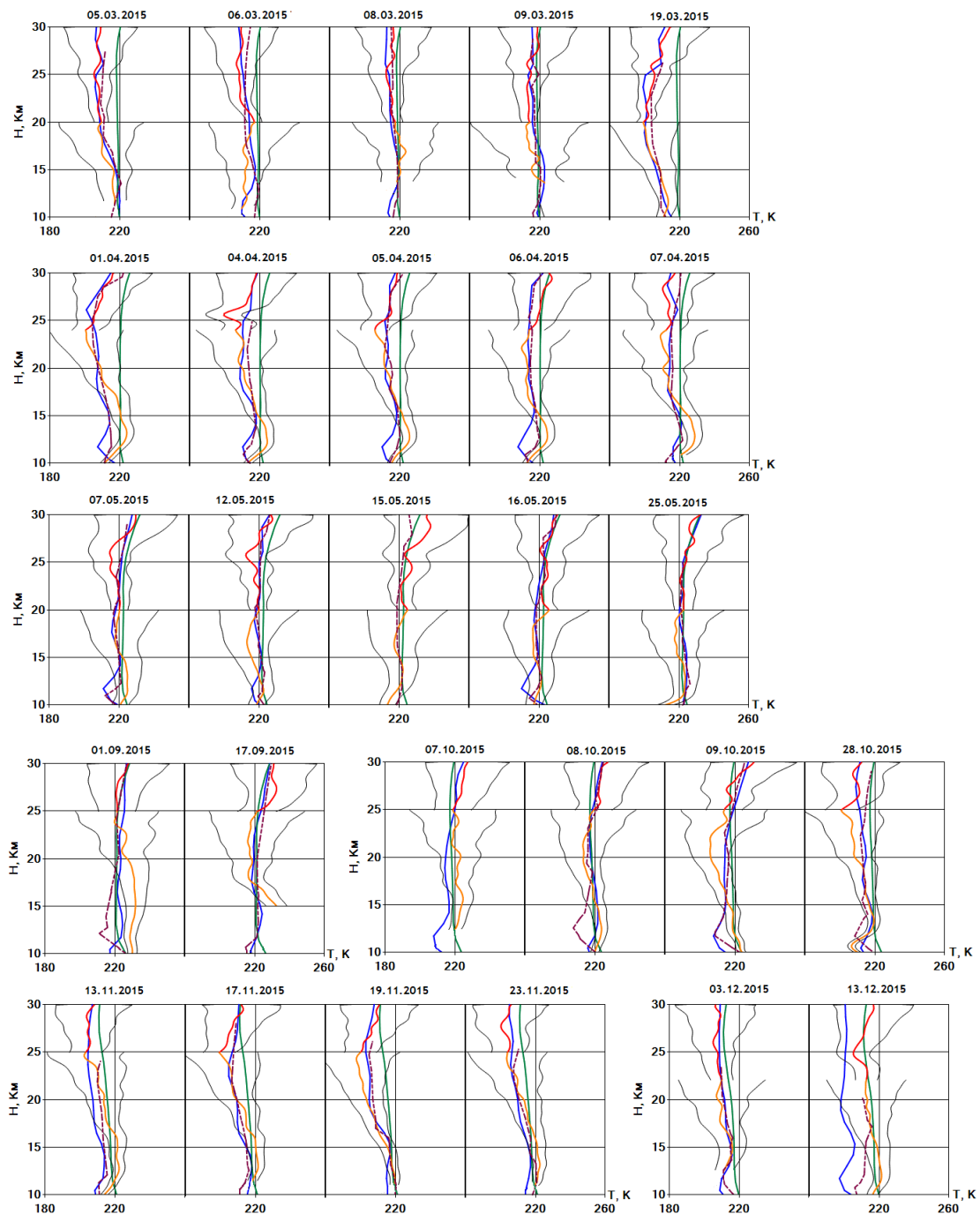


Рис. 1. Результаты измерений температуры лидаром в сравнении с радиозондовыми и спутниковыми измерениями. Кривые цвета: желтого - лидар, СКР; красного -лидар, релеевское рассеяние; черного - стандартное отклонение лидарных измерений; синего - спутник "Аура"; зеленого - модель CIRA-86[6]. Штриховая кривая - радиозонд

На рисунке 3 в левой части показаны вертикальные профили отклонений между лидарными и спутниковыми измерениями температуры, выполненные в теплый (март - октябрь, зеленая кривая) и холодный (месяцы ноябрь - февраль, красная кривая) период года. В правой части указано количество измеренных профилей температуры, представленных в расчете.

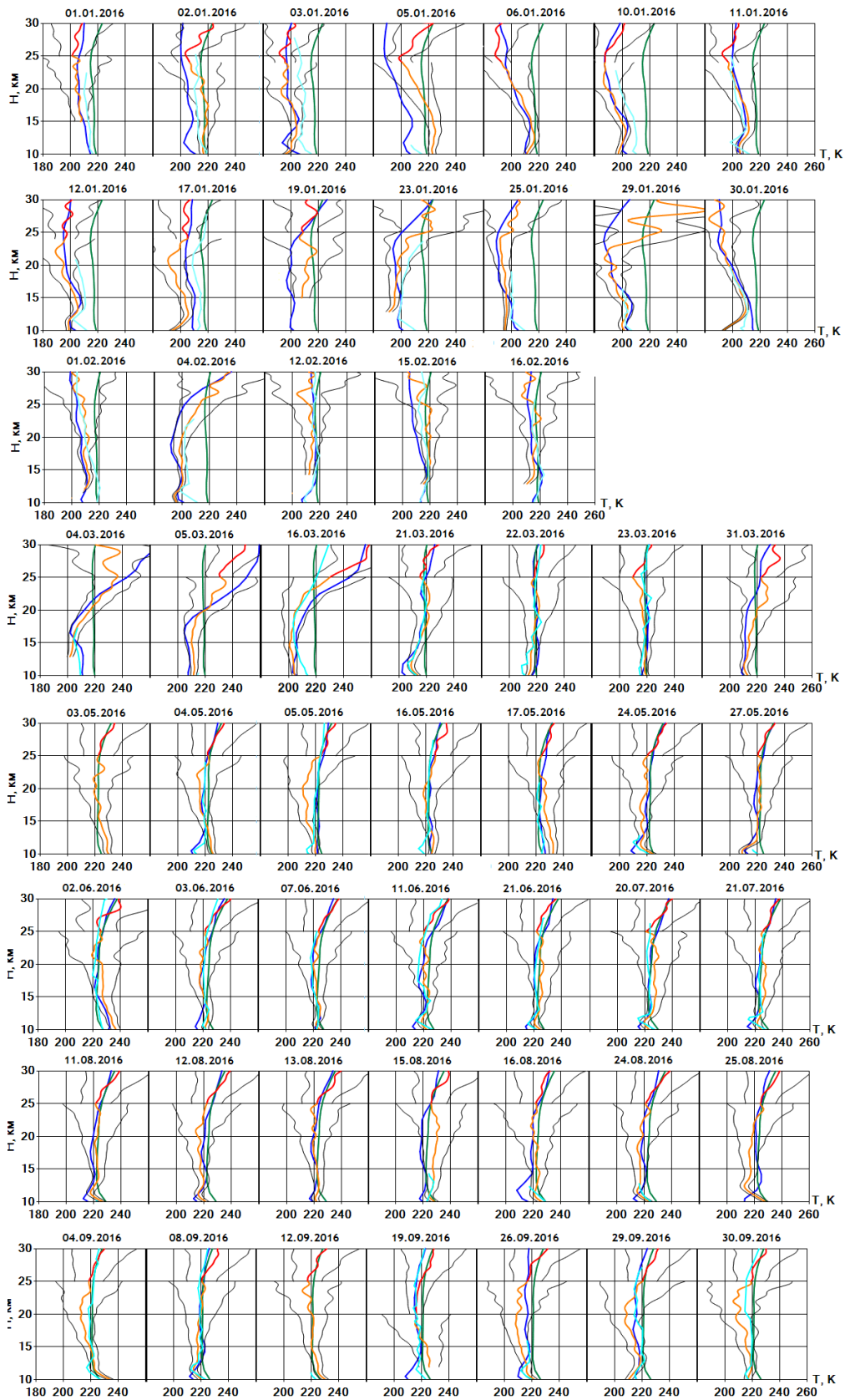


Рис. 2. Кривая голубого цвета - радиозонд. Остальные обозначения аналогичные рис.1

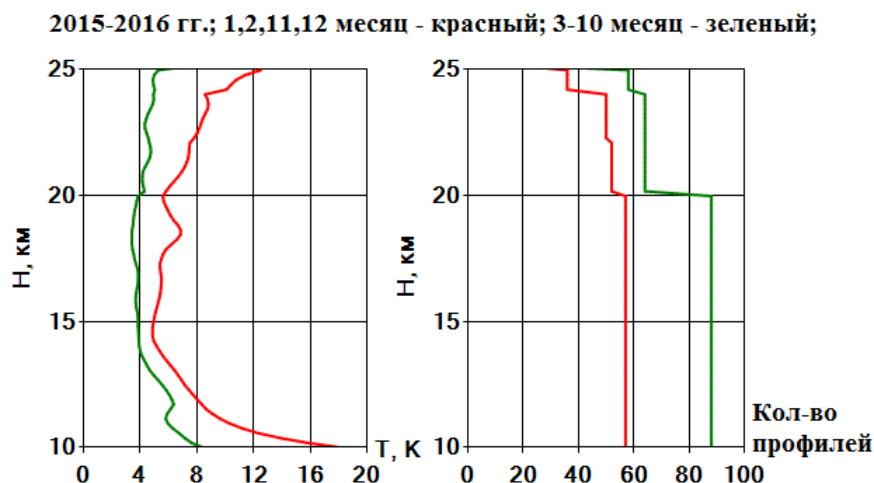


Рис. 3. Разброс измерений температуры лидаром по отношению к измерениям со спутника "Аура"

Видно, что наименьшее отклонение около 4 К в интервале высот 13 -25 км отмечается в для теплого периода. Это может объясняться стабилизацией термического режима в указанный период. Для холодного периода отклонение колеблется от 4 К на уровне 15 км и достигает 16 К на высотах 10 и 25 км. Такие колебания могут быть обусловлены возмущениями стратосферы, вызванными в целом стратосферными потеплениями. Поэтому в измерениях данного периода в значительной степени сказывается пространственно-временное разнесение измерений. Кроме того, рост отклонений на нижних высотах отражают локальные свойства динамики вертикального распределения температуры, тогда как на более высоких уровнях проявляются его глобальные свойства. Скачок разброса измерений на высотах 24 - 25 км. связан с уменьшением статистики исходных данных. Аналогичные результаты расчета для сравнения лидарных и радиозондовых измерений представлены на рис.4.

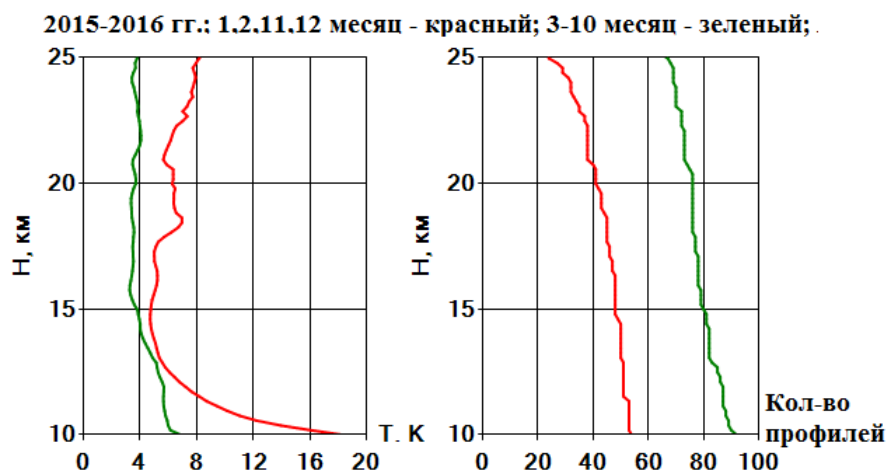


Рис. 4. Разброс измерений температуры лидаром по отношению к радиозондовым измерениям аэрологической станции г. Новосибирска.

Здесь также меньший разброс данных наблюдается для теплого периода года, причем профиль отклонения аналогичен сравнению со спутниковыми измерениями.

В холодный период года в интервале высот 13 - 25 км разброс измерений находится в коридоре 4 - 8 К. Резкое возрастание разброса на нижних высотах 10 -12 км до 16 -20К, как в предыдущем случае, может быть вызвано локальными свойствами динамики ВРТ с учетом пространственно-временного разнесения измерений (напоминаем, что расстояние между лидарной и аэрологической станциями 210 км).

Таким образом, сравнение данных лидарных и радиозондовых, а также спутниковых измерений температуры дало достаточно хорошее качественное и количественное согласие. Полученный результат показал перспективность лидарного СКР-канала с использованием первого колебательно-вращательного перехода молекул азота на длине волны 607 нм при накачке лазерной гармоникой с длиной волны 532 нм для измерения температуры в нижней стратосфере. При одновременной работе на каналах рамановского и рэлеевского рассеяния света, как это было показано нами в работе [7], были получены протяженные профили температуры в области высот от 7 до 60км, охватывающую верхнюю тропосферу и среднюю атмосферу.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ НШ4714.2014.5, и гранта РФФИ № 16-05-00901

## Список литературы

- [1] Зуев В. В., Маричев В. Н., Бондаренко С. Л., Долгий С. И., Шарабарин Е. В., “Предварительные результаты зондирования температуры в тропосфере СКР-лидаром на первом колебательно-вращательном переходе молекул азота”, *Оптика атмосферы и океана*, **9:12** (1996), 1609-1611. [Zuev V. V., Marichev V. N., Bondarenko S. L., Dolgiy S. I., Sharabarin E. V., “Predvaritel’nye rezul’taty zondirovaniya temperatury v troposfere SKR-lidarom na pervom kolebatel’no-vrashchatel’nom perekhode molekul azota”, *Optika atmosfery i okeana*, **9:12** (1996), 1609-1611].
- [2] Marichev V. N., Bochkovskii D. A., “Validation of lidar measurements of temperature in the lower stratosphere using aerological and satellite data”, *Proceedings of SPIE*, **100353V** (2016), 100353V-1 - 100353V-5.
- [3] Зуев В. В., Маричев В. Н., Бондаренко С. Л., “Лидарные измерения температуры по рэлеевскому рассеянию света в нижней стратосфере за период май-декабрь 1995г.”, *Оптика атмосферы и океана*, **9:10** (1996), 1386–1393. [Zuev V. V., Marichev V. N., Bondarenko S. L., “Lidarnye izmereniya temperatury po releevskomu rasseyaniyu sveta v nizhney stratosfere za period may-dekabr’ 1995g.”, *Optika atmosfery i okeana*, **9:10** (1996), 1386–1393].
- [4] <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
- [5] <http://mirador.gsfc.nasa.gov>
- [6] Rees D., Barnett J. J., Labitske K., “COSPAR International Reference Atmosphere: 1986. Part II, Middle Atmosphere Models”, *Adv. Space Res*, **10:12** (1990).
- [7] Маричев В. Н., “Комбинированный метод оптического зондирования нижней и средней атмосферы”, *Оптика атмосферы и океана*, **29:3** (2016), 210–215. [Marichev V. N., “Kombinirovannyy metod opticheskogo zondirovaniya nizhney i sredney atmosfery”, *Optika atmosfery i okeana*, **29:3** (2016), 210–215].

## Список литературы (ГОСТ)

- [1] Зуев В. В., Маричев В. Н., Бондаренко С. Л., Долгий С. И., Шарабарин Е. В. Предварительные результаты зондирования температуры в тропосфере СКР-лидаром на первом колебательно-вращательном переходе молекул азота // *Оптика атмосферы и океана*. 1996. Т. 9. № 12. С.1609-1611

- [2] Marichev V. N., Bochkovskii D. A. Validation of lidar measurements of temperature in the lower stratosphere using aerological and satellite data // Proceedings of SPIE. 2016. vol. 100353V. С.100353V-1–100353V-5
- [3] Зуев В. В., Маричев В. Н., Бондаренко С. Л. Лидарные измерения температуры по релеевскому рассеянию света в нижней стратосфере за период май-декабрь 1995 г // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 10. С. 1386–1393
- [4] <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
- [5] <http://mirador.gsfc.nasa.gov>
- [6] Rees D., Barnett J. J., Labitske K. COSPAR International Reference Atmosphere: 1986. Part II, Middle Atmosphere Models // Adv. Space Res. 1990. vol. 10. no. 12
- [7] Маричев В. Н. Комбинированный метод оптического зондирования нижней и средней атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2016. vol. 29. no. 3. С. 210–215

**Для цитирования:** Маричев В.Н., Бочковский Д.А. Валидация лидарных измерений температуры в стратосфере над Томском по аэрологическим и спутниковым данным за 2015-16 гг // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки.* 2017. № 4(20). С. 57-63. DOI: 10.18454/2079-6641-2017-20-4-57-63

**For citation:** Marichev V. N., Bochkovsky D. A. Validation of lidar temperature measurements in the stratosphere over Tomsk on aerological and satellite data for 2015 - 16 years, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2017, **20**: 4, 57-63. DOI: 10.18454/2079-6641-2017-20-4-57-63

Поступила в редакцию / Original article submitted: 28.11.2017