

УДК 551.510.42

## «ЛОЗА-С» – базовый лидар российского сегмента лидарных станций сети СНГ (CIS-LiNet)

Ю.С. Балин<sup>1</sup>, Г.П. Коханенко<sup>1</sup>, М.Г. Клемашева<sup>1</sup>, И.Э. Пеннер<sup>1</sup>,  
С.В. Насонов<sup>1</sup>, С.В. Самойлова<sup>1</sup>, А.П. Чайковский<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1, Россия

<sup>2</sup>Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси,  
220072, г. Минск, пр. Независимости, 68, Беларусь

Поступила в редакцию 24.11.2017 г.

Стационарный лидар «ЛОЗА-С» предназначен для исследования аэрозольных полей пограничного слоя тропосферы в высотном диапазоне 0,05–15 км, а также кристаллических облаков с использованием поляризационного блока с линейной и круговой поляризацией излучения. В лидаре полностью реализована схема одновременного наблюдения сигналов упругого и комбинационного рассеяния при облучении среды на лазерных длинах волн 1064, 532 и 355 нм. Лидар построен на основе лазера LOTIS-2135 на Nd:YAG и приемного зеркального телескопа системы Кассегрена диаметром 300 мм. Кроме эхо-сигналов упругого рассеяния, регистрируемых в аналоговом режиме, в режиме счета фотонов регистрируются сигналы комбинационного рассеяния на молекулярном азоте (387 и 607 нм) и на водяном паре (407 нм). Для охвата указанного высотного диапазона используются два приемных телескопа – ближней и дальней зоны, при этом регистрация сигналов осуществляется одними и теми же фотоприемниками.

*Ключевые слова:* лидар, многоволновое зондирование, линейная и круговая поляризация, аэрозоль, кристаллические облака; lidar, multiwavelength sounding, linear and circular polarization, aerosol, crystal clouds.

В настоящее время большинство развитых стран мира, реализуя национальные и международные научные программы по контролю оптического и термодинамического состояния атмосферы, используют лидарные комплексы, расположенные как на своих национальных территориях, так и вне их. В качестве примера приведем арктическую лидарную станцию США [1], лидары фирмы SIBATA сети станций NIES (Япония) в Китае, Корею и Монголии [2].

В начале XXI в. девятнадцать европейских лидарных станций из одиннадцати стран были объединены на общей методологической основе в Европейскую исследовательскую лидарную сеть для контроля пространственно-временного распределения аэрозольных полей атмосферы над европейской территорией [3]. Позднее с целью изучения трансграничного переноса аэрозольных примесей, вызванных песчаными бурями пустынь Гоби и Такла-Макан, была создана Азиатская лидарная сеть [4], объединяющая научные группы Китая, Японии, Кореи.

В русле этих интеграционных международных процессов в 2004 г. шесть научных организаций России, Беларуси и Кыргызстана создали лидарную сеть СНГ (CIS-LiNet) [5], охватывающую территорию от Минска до Владивостока.

Лидары всех этих сетей представляют собой крупные стационарные аппаратные комплексы, оснащенные различными типами лазерных передатчиков, фотоприемников и каналов регистрации многоволнового упругого и спонтанного комбинационного рассеяния (СКР) света.

«ЛОЗА-С» – стационарный многоволновой поляризационный лидар подобного типа. Он построен на основе лазера LOTIS-2135 на Nd:YAG и двух приемных телескопов: основного и вторичного. Основной зеркальный телескоп системы Кассегрена диаметром 300 мм позволяет осуществлять регистрацию сигналов с расстояния 700 м, что устраняет сигнал от ближней зоны, величина которого выходит за рамки динамического диапазона фотоприемников. Второй телескоп с объективом диаметром 20 мм, расположенный в непосредственной близости от лазера, служит для приема сигналов из ближней зоны (50–1500 м). Основными параметрами лидара являются: энергия излучения на длинах волн: 1064 нм – 140 мДж, 532 нм – 120 мДж, 355 нм – 40 мДж; диаметр зондирующего пучка – 50 мм; расходимость – 0,5 мрад; поле зрения приемника – 1 мрад.

\* Юрий Степанович Балин (balin@iao.ru); Григорий Павлович Коханенко (kokh@iao.ru); Марина Георгиевна Клемашева (magina@iao.ru); Иоганес Эрнстович Пеннер (penner@iao.ru); Сергей Владимирович Насонов (nsvtsk@gmail.com); Светлана Викторовна Самойлова (ssv@seversk.tomsknet.ru); Анатолий Павлович Чайковский (chaikov@light.basnet.by, chaikov@dragon.basnet.by).

Кроме эхо-сигналов упругого рассеяния, лидар регистрирует сигналы СКР на молекулярном азоте (387 и 607 нм) и водяном паре (407 нм). Сигналы оцифровываются аналого-цифровыми преобразователями и счетчиками фотонов и записываются в компьютер. Затем на основании зарегистрированных сигналов по разработанным алгоритмам производится восстановление оптических и микрофизических характеристик аэрозоля.

В поляризационных измерениях используется длина волны 532 нм, при этом для изменения поляризации излучателя от линейной к круговой на выходе зондирующего луча устанавливается четверть-волновая  $\lambda/4$  кварцевая пластинка. В приемном телескопе на пути рассеянного излучения расположена призма Волластона, которая формирует два пучка со взаимно ортогональной поляризацией. Перед призмой также размещена  $\lambda/4$  пластинка. Два ФЭУ одновременно регистрируют поляризационные компоненты сигнала в измерительных каналах.

Приемо-передающий блок размещается на поворотной колонке, позволяющей сканировать в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

В процессе разработки лидара были решены следующие технические задачи:

1. Одновременная регистрация лидарных сигналов в одном сеансе зондирования на всех длинах волн в аналоговом и счетно-фотонном режимах [6].

2. Регистрация лидарных сигналов в максимально возможном высотном диапазоне, от приземного слоя до стратосферы, с помощью двух приемных телескопов – ближней и дальней зоны – на одних и тех же фотоприемниках [7].

3. Реализована возможность поочередного использования линейной и круговой поляризации зондирующего излучения, что позволяет осуществлять контроль областей с хаотической и преимущественной ориентациями частиц в перистых облаках [8].

4. Создана линейка унифицированных фотоприемных модулей, обеспечивающих регистрацию ли-

дарных сигналов в диапазоне 0,28–1,50 мкм в режимах аналогового сигнала и счета фотонов на основе ФЭУ и лавинных фотодиодов [9].

5. Разработаны алгоритмы и программный пакет для расчета профилей оптических [10] характеристик атмосферного аэрозоля по данным лидарного СКР-зондирования [11].

Примеры сигналов упругого и комбинационного рассеяния в тропосфере, полученные с помощью лидара «ЛОЗА-С», показаны на рис. 1.

Набор данных лидарных измерений позволяет восстанавливать три коэффициента обратного рассеяния  $\beta_a(\lambda_{0i}, z)$  для  $\lambda_{0i} = 355, 532, 1064$  нм и два коэффициента ослабления  $\sigma_a(\lambda_{0i}, z)$  для  $\lambda_{0i} = 355, 532$  нм.

Погрешности определения этих оптических коэффициентов максимальны в УФ-области и составляют ~20% ( $\sigma$ ) и ~10% ( $\beta$ ) в пограничном слое атмосферы [12]. Используемый нами алгоритм численного дифференцирования позволяет снизить ошибки до ~10% ( $\sigma$ ) и ~5% ( $\beta$ ), в т.ч. и для свободной тропосферы [13]. Спектральный набор оптических коэффициентов и уровень погрешностей их оценивания позволяют восстанавливать высотные распределения микрофизических характеристик аэрозоля. Проверка работоспособности разработанных алгоритмов и адекватности восстанавливаемого распределения частиц по размерам проводилась путем сравнения с результатами, полученными другими методами.

Традиционно для исследования дисперсного состава атмосферного аэрозоля применяются счетчики частиц. На ГОР станции ИОА СО РАН [14] ведутся наблюдения с использованием диффузионного спектрометра аэрозолей (ДСА) для частиц с радиусами меньше 0,11 мкм и фотоэлектрического счетчика Grimm 1.109 в диапазоне 0,14÷8 мкм. Результаты наземных и высотных (лидар «ЛОЗА-С», 0,5÷1,2 км) измерений 24 сентября 2013 г. приведены на рис. 2. Средние радиусы мелких и крупных частиц близки и неплохо восстанавливаются при измерении различными инструментами. Для грубодисперсной фракции

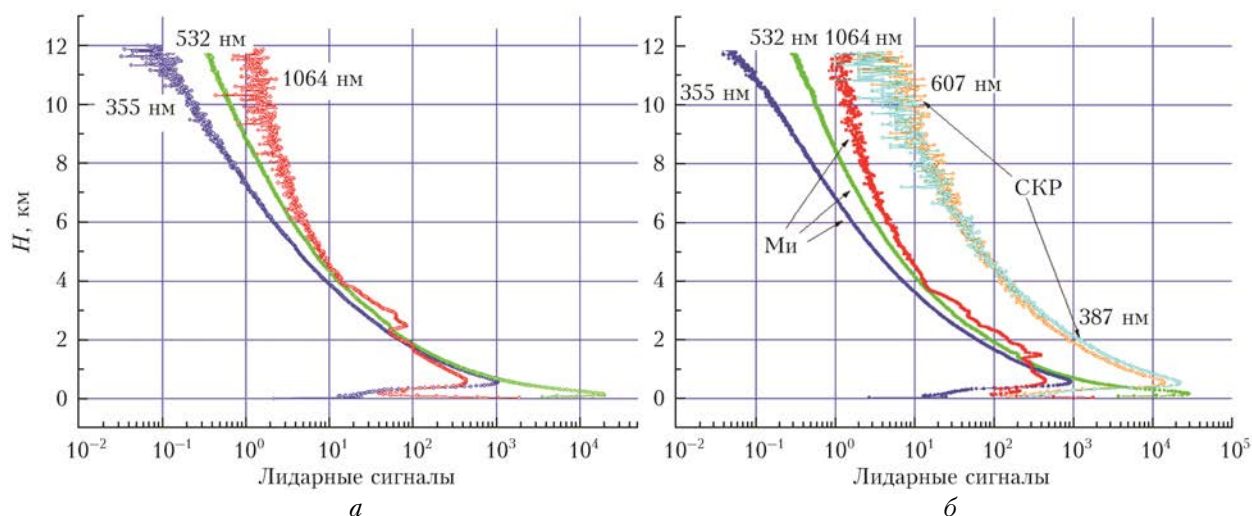


Рис. 1. Примеры лидарных сигналов «ЛОЗА-С»: *a* – сигналы упругого рассеяния на различных длинах волн при зондировании в дневное время; *б* – сигналы упругого и спонтанного комбинационного рассеяния при зондировании в ночное время

аэрозоля отмечена смещенная оценка параметров функции распределения, что обусловлено информативной недостаточностью лидарных измерений в ИК-области спектра длин волн.

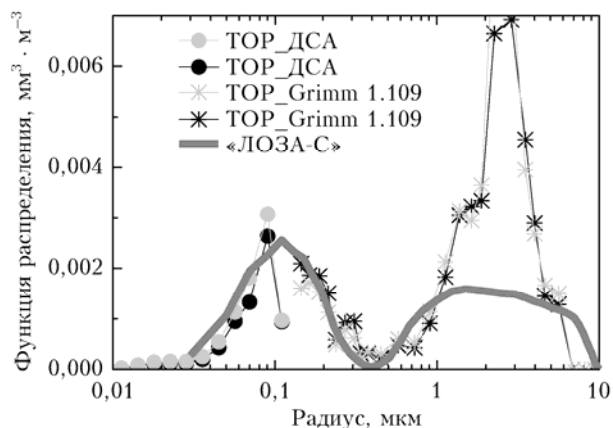


Рис. 2. Сопоставление результатов измерений функций распределения частиц по размерам наземными (ТОР станция, ДСА и Grimm 1.109) и дистанционными («ЛОЗА-С») средствами

Примеры исследования вертикальной структуры аэрозольных полей с помощью лидара «ЛОЗА-С» можно найти также в работах [15, 16].

Результаты поляризационного зондирования в основном касаются кристаллических облаков. Использование линейной и круговой поляризации излучения лазера и измерение компонент вектор-параметра Стокса позволяют оценивать не только степень деполаризации, но и направление преимущественной ориентации частиц перистых облаков [17, 18].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение № 14.613.21.0077 — уникальный идентификатор RFMEFI61317X0077).

1. *Razakov I.A., Eloranta E.W., Hedrick J.P., Holz R.E., Kuehn R.E., Garcia J.P.* A High spectral resolution lidar designed for unattended operation in the Arctic // 21st International Laser Radar Conference, July 8–12, 2002. Quebec, Canada. P 57.
2. *Sibata Scientific Technology Ltd.* [Electronic resource]. URL: <http://www.sibata.co.jp> (last access: 9.11.2017).
3. *Bösenberg J., Ansmann A., Baldasano J.M., Balis D., Böckmann C., Calpini B., Chaikovskiy A., Flamant P., Hågård A., Mitev V., Papayannis A., Pelon J., Resendes D., Schneider J., Spinelli N., Trickl T., Vaughan G., Visconti G., Wiegner M.* EARLINET: A European aerosol research lidar network // *Advances in Laser Remote Sensing* / A. Dabas, C. Loth, J. Pelon (eds.). Paris: Editions de L'Ecole Polytechnique, 2001. P. 155–158.
4. *Murayama T., Sugimoto N., Uno I., Kinoshita K., Aoki K., Hagiwara N., Liu Z., Matsui I., Sakai T., Shibata T., Arao K., Sohn B.-J., Won J.-G., Yoon S.-C., Li T., Zhou J., Hu H., Abo M., Iokibe K., Koga R., Iwasaka Y.* Ground-based network observation of Asian dust events of April 1998 in East Asia // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 18345–18359.
5. *Чайковский А.П., Иванов А.П., Балин Ю.С., Ельников А.В., Тулинов Г.Ф., Плюсин И.И., Букин О.А.,*

*Чен Б.Б.* Лидарная сеть CIS-LiNet для мониторинга аэрозоля и озона: методология и аппаратура // *Оптика атмосф. и океана.* 2005. Т. 18, № 12. С. 1066–1072.

6. *Многоволновый лидарный комплекс для контроля оптического состояния атмосферы:* Пат. 106966. Россия, G01W 1/00. Балин Ю.С., Байрашин Г.С., Коханенко Г.П., Клемашева М.Г., Пеннер И.Э., Самойлова С.В.; ИОА СО РАН. № 2011109501/28; Заявл. 14.03.2011. Опубл. 27.07.2011. Бюл. № 21.
7. *Лидарный комплекс для контроля оптического состояния атмосферы:* Пат. 116652. Россия, G01S 17/95. Балин Ю.С., Коханенко Г.П., Клемашева М.Г., Пеннер И.Э., Самойлова С.В.; ИОА СО РАН. № 2011119792/28; Заявл. 17.05.2011. Опубл. 27.05.2012. Бюл. № 15.
8. *Поляризационный лидар для зондирования атмосферы:* Пат. 126851. Россия, G01W 1/00. Балин Ю.С., Коханенко Г.П., Клемашева М.Г., Пеннер И.Э., Самойлова С.В.; ИОА СО РАН. № 2012146700/28; Заявл. 1.11.2012. Опубл. 10.04.2013. Бюл. № 10.
9. *Слесарь А.С., Чайковский А.П., Иванов А.П., Денисов С.В., Король М.М., Осипенко Ф.П., Балин Ю.С., Коханенко Г.П., Пеннер И.Э.* Фотоприемные модули для лидарных станций в сети CIS-LiNet // *Оптика атмосф. и океана.* 2013. Т. 26, № 12. С. 1073–1081.
10. *Chaikovskiy A.P., Grudo Ya.O., Karol Ya.A., Lopatin A.Yu., Chaikovskaya L.I., Denisov S.V., Osipenko F.P., Slesar A.S., Korol M.M., Balin Yu.S., Samoilova S.V., Kochanenko G.P., Penner I.E., Wang Z., Du L., Chen C.* Regularizing algorithm and processing software for raman lidar-sensing data // *J. Appl. Spectrosc.* 2015. V. 82, N 5. P. 779–787.
11. *Самойлова С.В., Пеннер И.Э., Коханенко Г.П., Балин Ю.С.* Совместное восстановление микрофизических характеристик, комплексного показателя преломления и функции распределения частиц по размерам по лидарным измерениям // *Оптика атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 7. С. 581–588.
12. *Pappalardo G., Amodeo A., Pandolfi M., Wandinger U., Ansmann A., Bösenberg J., Matthias V., Amiridis V., De Tomasi F., Frioud M., Iarlori M., Komguem L., Papayannis A., Rocadenbosch F., Wang X.* Aerosol lidar intercomparison in the framework of the EARLINET project: 3. Raman lidar algorithm for aerosol extinction, backscatter, and lidar ratio // *Appl. Opt.* 2004. V. 43. P. 5370–5385.
13. URL: [www.earlinet.org](http://www.earlinet.org) (NA3 folder) (last access: 12.11.2017).
14. URL: <http://lop.iao.ru/activity/?id=tor> (last access: 13.11.2017).
15. *Самойлова С.В., Балин Ю.С., Коханенко Г.П., Пеннер И.Э.* Исследование вертикального распределения тропосферных аэрозольных слоев по данным многочастотного лазерного зондирования. Часть 2. Вертикальное распределение оптических характеристик аэрозоля в видимом диапазоне // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22, № 12. С. 1123–1134; *Samoilova S.V., Balin Yu.S., Kokhanenko G.P., Penner I.E.* Investigation of the vertical distribution of tropospheric aerosol layers from multifrequency laser sensing data. Part 2: The vertical distribution of optical aerosol characteristics in the visible region // *Atmos. Ocean. Opt.* 2010. V. 23, N 2. P. 95–105.
16. *Самойлова С.В., Балин Ю.С., Коханенко Г.П., Пеннер И.Э.* Исследование вертикального распределения тропосферных аэрозольных слоев по данным многочастотного лазерного зондирования. Часть 3. Спектральные особенности вертикального распределения оптиче-

ских характеристик аэрозоля // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 3. С. 216–223; *Samoilova S.V., Balin Yu.S., Kokhanenko G.P., Penner I.E.* Investigation of the vertical distribution of tropospheric aerosol layers from multifrequency laser sensing data. Part 3: Spectral peculiarities of the vertical distribution of the optical characteristics // Atmos. Ocean. Opt. 2012. V. 25, N 3. P. 208–215.

17. *Balin Yu., Kaul B., Kokhanenko G., Penner I.* Observations of specular reflective particles and layers in crystal clouds // Opt. Express. 2011. V. 19, iss. 7. P. 6209–6214.  
18. *Borovoi A., Balin Y., Kokhanenko G., Penner I., Konoshonkin A., Kustova N.* Layers of quasi-horizontally oriented ice crystals in cirrus clouds observed by a two-wavelength polarization lidar // Opt. Express. 2014. V. 22, iss. 20. P. 24566–24573.

*Yu.S. Balin, G.P. Kokhanenko, M.G. Klemasheva, I.E. Penner, S.V. Nasonov, S.V. Samoilova, A.P. Chaikovsky.* **“LOSA-S” – a basic lidar of the Russian segment of CIS-LiNet.**

Stationary lidar “LOSA-S” is intended for the study of aerosol fields in the boundary layer of the troposphere in the altitude range 0.05–15 km, as well as for the study of crystal clouds using the polarization unit with linear and circular radiation polarization. The scheme of simultaneous observation of elastic and Raman scattering signals when irradiating the medium at wavelengths of 1064, 532, and 355 nm is implemented in the lidar. The lidar is based on a LOTIS-2135 Nd:YAG laser and a Cassegrain receiving specular telescope with a diameter of 300 mm. In addition to the return signals of elastic scattering recorded in the analog mode, the lidar records Raman scattering signals on molecular nitrogen (387 and 607 nm) and water vapor (407 nm) in the photon counting mode. To cover the aforementioned altitude range, two receiving telescopes are used in the lidar for near and far zones; the signals are recorded by the same photodetectors.