

## Лидарные наблюдения динамики аэрозолей и акустико-гравитационных волн

О.П. Борчевкина<sup>1,2</sup>, С.О. Адамсон<sup>3</sup>, О.С. Андриенко<sup>4</sup>,  
Г.В. Голубков<sup>3,5</sup>, Д.П. Губанова<sup>6,7</sup>, Ю.А. Дьяков<sup>3,8</sup>,  
М.А. Казарян<sup>9</sup>, И.В. Карпов<sup>1,2</sup>, М.Г. Голубков<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы  
и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН  
236010, г. Калининград, пр. Победы, 41, Россия

<sup>2</sup>Балтийский федеральный университет им. И. Канта  
236061, г. Калининград, ул. А. Невского, 14, Россия

<sup>3</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН  
119991, г. Москва, ул. Косыгина, 4, Россия

<sup>4</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1, Россия

<sup>5</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»  
123098, г. Москва, пл. Академика Курчатова, стр. 113, Россия

<sup>6</sup>Институт физики атмосферы им. Обухова РАН  
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3, Россия

<sup>7</sup>Институт физической химии им. Л.Я. Карпова  
105064, г. Москва, пер. Обухова, 3, Россия

<sup>8</sup>Genomic Reseach Center, Academia Sinica  
11529, Taipei, Paryska, 128, Taiwan

<sup>9</sup>Физический институт им. Лебедева РАН  
119333, г. Москва, Ленинский пр., 53, стр. 4, Россия

Поступила в редакцию 28.01.2020 г.

Представлены результаты лидарного зондирования тропосферного аэрозоля, выполненного в Калининграде (54° с.ш., 20° в.д.) с применением двухволнового атмосферного лидара (532 и 1064 нм), который позволяет проводить зондирование аэрозоля до высот 10–12 км. В результате измерений мощности рассеянного в тропосфере лидарного сигнала с 2011 по 2018 г. установлены особенности вертикальной структуры и динамики аэрозоля. Анализ результатов показал усиление волновой активности в диапазоне акустико-гравитационных волн в тропосфере во время прохождения солнечного терминатора.

**Ключевые слова:** тропосфера, лидар, акустико-гравитационные волны, аэрозоль; troposphere, lidar, acoustic-gravity waves, aerosol.

### Введение

Хорошо известно, что при изучении распространения радиоволн необходимо учитывать влияние не только атмосферных газов, но и аэрозолей антропогенного и естественного происхождения [1]. Хотя в весовом отношении концентрация веществ

в аэрозольном состоянии невелика, их влияние на процесс распространения электромагнитного излучения оказывается существенным из-за того, что аэрозольные частицы могут приводить к разделению зарядов в атмосфере и создавать значительные отрицательно заряженные зоны [2]. Это явление является причиной образования атмосферных электрических разрядов. Сами зоны плазмы могут оставаться практически невидимыми, но при этом служат эффективными рассеивателями электромагнитных волн.

Исследование кинетики зарядки частиц в атмосфере — крайне сложная задача, которую, однако, необходимо решать для учета искажений и потерь спутниковых радиосигналов [3]. Причина образования зарядов на аэрозольных частицах — появление свободных электронов в результате ионизации

\* Ольга Павловна Борчевкина (opsuslova@gmail.com); Сергей Олегович Адамсон (sergey.o.adamson@gmail.com); Олег Семенович Андриенко (aos@iao.ru); Геннадий Валентинович Голубков (koluranovo@gmail.com); Дина Петровна Губанова (digubanova@gmail.com); Юрий Алексеевич Дьяков (yuri\_dyakov@mail.ru); Мишик Айратович Казарян (kazarmishik@yahoo.com); Иван Викторович Карпов (ivkarпов@inbox.ru); Максим Геннадиевич Голубков (golubkov@chph.ras.ru).

воздуха потоками космических частиц. В обычных условиях вследствие ионизации космическими частицами образуется несколько десятков заряженных пар молекул атмосферных газов. Свободные электроны взаимодействуют с кислородом, и получившиеся отрицательные ионы эффективно осаждаются на субмикронных частицах, всегда присутствующих даже в самом чистом воздухе. Положительные ионы образуют тяжелые кластеры в реакциях с молекулами воды.

В настоящее время в исследованиях динамики нижней атмосферы широко распространены методы лидарного зондирования [4–6], позволяющие дистанционно определять различные атмосферные параметры: эффективный радиус частиц аэрозоля, их объемную концентрацию, коэффициент обратного рассеяния, коэффициент преломления среды и др. Преимущества лидаров заключаются в обеспечении высокого пространственного и временного разрешения измерений и возможности проведения длительных наблюдений. Это обусловило их широкое распространение в исследованиях динамики атмосферы и ее мониторинге. Методы лидарного зондирования основаны на эффектах упругого рассеяния лазерного излучения на частицах аэрозолей. По величине и форме рассеянного сигнала, принимаемого лидаром, можно судить о распределении аэрозоля и его характеристиках.

Распространяясь вдоль атмосферной трассы зондирования, лазерный импульс поглощается и рассеивается на молекулах и аэрозолях в атмосфере. Часть излучения, рассеянная атмосферой назад в направлении лидарной системы, может быть с помощью приемной аппаратуры собрана и сфокусирована на фотодетектор, который преобразует ее в электрический сигнал, пропорциональный падающему световому потоку. При этом расстояние до любого рассеивающего объема на трассе зондирования однозначно определяется по времени задержки с момента послышки лазерного импульса. Интенсивность принятого сигнала в каждый конкретный момент времени зависит как от свойств конкретного рассеивающего объема атмосферы, так и от характеристик всей атмосферной трассы зондирования на двойном пути – от лидара до рассеивающего объема и обратно [7].

В настоящей работе представлены результаты лидарного зондирования тропосферного аэрозоля в Калининграде ( $54^\circ$  с.ш.,  $20^\circ$  в.д.). В наблюдениях использовался двухволновой атмосферный лидар ЛСА-2С (ООО «Обнинская фотоника»), имеющий следующие технические характеристики: излучатель – Nd:YAG-лазер LS-2131; рабочие длины волн – 1064 и 532 нм; энергия накачки – до 25 Дж; частота повторения импульсов – не более 20 Гц; приемник обратного рассеянной радиации – телескоп типа квази-Кассегрена; диаметр главного зеркала приемного телескопа – 260 мм; фокусное расстояние – 1050 мм; время измерения одного профиля аэрозоля – не более 15 мин; фотоприемник канала 1064 нм – лавинный фотодиод с квантовой эффективностью фотокатода 40%; фотоприемник канала 532 нм – фото-

умножитель ФЭУ-10 с квантовой эффективностью фотокатода 10%; полуширина пропускания интерфильтра на длине волны 1064 нм (на уровне 0,5) – 3 нм; полуширина пропускания интерфильтра на длине волны 532 нм (на уровне 0,5) – 2 нм.

В [8] приводится описание алгоритма автоматического определения параметров аэрозоля. Он реализован в виде программного пакета для обработки результатов измерений ЛСА-2С с использованием корреляционных параметрических зависимостей между интегральными по спектру размерами характеристиками аэрозоля и отношением коэффициентов обратного рассеяния на длинах волн зондирования. Применяемый в наблюдениях лидар позволяет определять характеристики аэрозоля на дистанциях до 12 км.

Целью наблюдений было исследование особенностей динамики атмосферного аэрозоля в условиях возмущений, обусловленных прохождением солнечного терминатора.

## Результаты и обсуждение

### *Измерение параметров тропосферного аэрозоля*

Наблюдения динамики аэрозоля в области солнечного терминатора проводились с 2011 по 2018 г. Солнечный терминатор является регулярным источником возмущений состояния атмосферы. Следовательно, такие наблюдения позволяют выделить характерные особенности динамики тропосферного аэрозоля. На рис. 1–3 приведены результаты расчетов параметров аэрозоля для периода проведения зондирования с помощью программного пакета [8] в координатах высота (от поверхности земли до высоты 5 км) – время (от начала до конца периода зондирования).

На рис. 1 представлен эффективный радиус атмосферного аэрозоля, полученный по измерениям 14 декабря 2011 г. во время прохождения утреннего солнечного терминатора. Хорошо видны возмущения характеристик атмосферного аэрозоля. На рис. 2 представлен коэффициент обратного рассеяния атмосферного аэрозоля при излучении волны  $\lambda = 1064$  нм по наблюдениям 19 марта 2012 г.

Объемная концентрация атмосферного аэрозоля в наблюдениях 13 ноября 2012 г. во время прохождения вечернего солнечного терминатора показана на рис. 3. Особо стоит отметить увеличение объемной концентрации аэрозоля на высотах 2–3 км в момент прохождения солнечного терминатора. Все сеансы лидарного зондирования проводились в ясную погоду.

Выполненные наблюдения позволили выделить основные особенности изменения состояния атмосферы во время прохождения солнечного терминатора. Как видно из рис. 1–3, возмущения характеристик атмосферного аэрозоля возникают до прохождения солнечного терминатора и носят периодический характер (период порядка 20 мин). Заметим, что такие периодические возмущения наблюдались во всех сеансах измерений. Они появлялись до восхода солнца и продолжались в течение 1–2 ч после него.

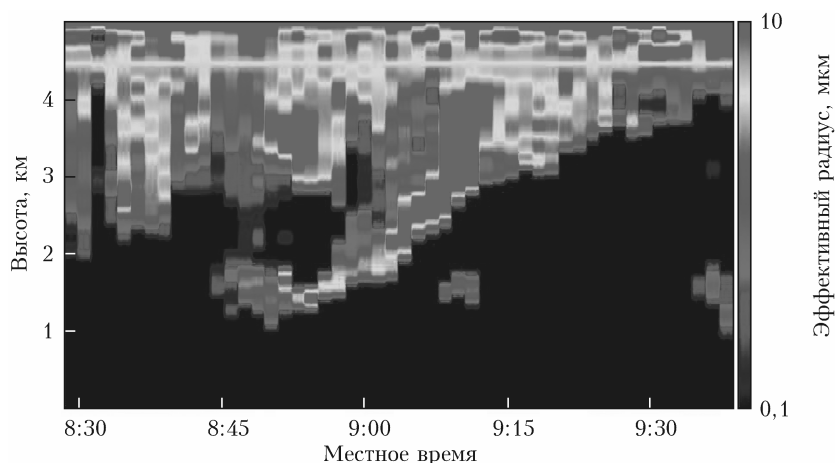


Рис. 1. Эффективный радиус тропосферного аэрозоля. Время наблюдения – 8:29–9:41 14 декабря 2011 г.; высота по лучу от поверхности Земли – до 5 км; время прохождения солнечного терминатора – 8:55

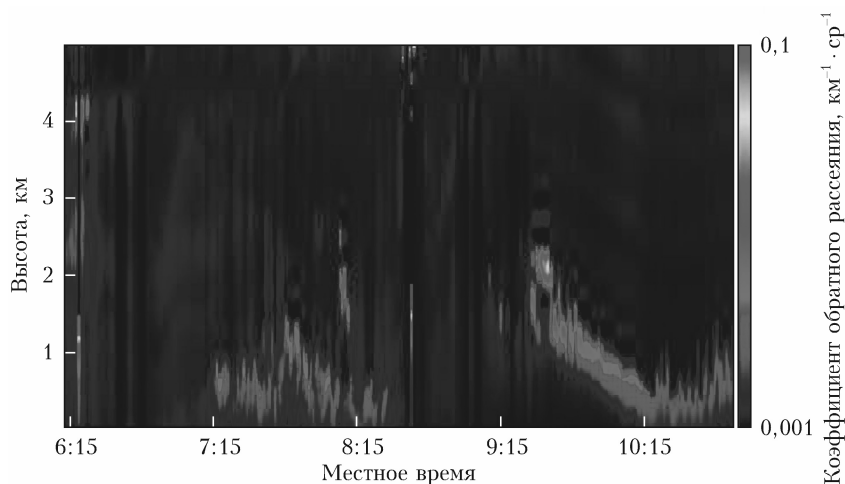


Рис. 2. Коэффициент обратного рассеяния атмосферного аэрозоля. Время наблюдения – 6:15–11:06 19 марта 2012 г.; высота по лучу от поверхности Земли – до 5 км; время прохождения солнечного терминатора – 7:43;  $\lambda = 1064$  нм

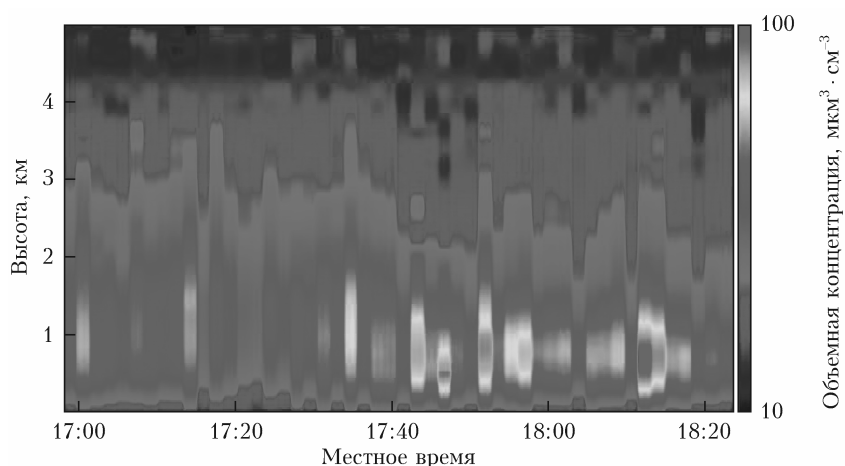


Рис. 3. Объемная концентрация атмосферного аэрозоля. Время наблюдения – 16:55–18:25 13 ноября 2012 г.; высота по лучу от поверхности Земли – до 5 км; время прохождения солнечного терминатора – 17:39

На сегодняшний день лидарное зондирование – это единственный метод, который может обеспечить временное и пространственное разрешение, необходи-

мое для выявления вкладов инфразвуковых и внутренних гравитационных волн во всем диапазоне высот от тропосферы до нижней термосферы [9–11].

Полученные результаты показывают, что в области терминатора на высотах тропосферы возбуждаются акустико-гравитационные волны (АГВ) с периодами 5–25 мин.

Теоретические оценки влияния АГВ этого частотного диапазона на реализацию связей динамических процессов в различных слоях атмосферы представлены в [12, 13]. Однако спектральные характеристики волн, возбуждаемых в области солнечного терминатора на высотах тропосферы, на сегодняшний день изучены мало. Повышенный интерес вызывают исследования инфразвуковых и короткомасштабных составляющих АГВ с периодами, близкими к периоду Вайсяля–Брента [14]. Волны этого частотного диапазона способны распространяться практически вертикально и, не испытывая рефракции, достигать высот ионосферы. Таким образом, они могут принимать участие в формировании ионосферных неоднородностей, возникающих над эпицентрами метеорологических и сейсмических возмущений в нижней атмосфере и на поверхности Земли [15, 16].

### **Вариации интенсивности лидарного сигнала**

Очевидно, что лидарные наблюдения позволяют существенно увеличить объем информации о характеристиках волновых процессов в тропосфере. В [17] предложен метод определения частотных характеристик АГВ, основанный на исследовании

вариаций интенсивности рассеянного в атмосфере лидарного сигнала. Авторы предположили, что вариации интенсивности лидарного сигнала на фиксированной высоте обусловлены вариациями атмосферных параметров. Метод позволяет определять частотные характеристики атмосферных возмущений с высоким временным разрешением (порядка 1 мин) во всей области лидарного зондирования. Для анализа частотных характеристик вариаций лидарного сигнала используется вейвлет-преобразование, которое обеспечивает двумерную развертку исследуемого одномерного нестационарного сигнала, что позволяет анализировать сигнал одновременно во временной и в частотной областях [18, 19]. В настоящей работе использовался вейвлет Морле.

На рис. 4 приведены результаты вейвлет-анализа вариаций мощности рассеянного в атмосфере лидарного сигнала на высоте 7 км в наблюдениях, выполненных 19 марта 2012 г. и 22 октября 2014 г. Видно, что прохождение утреннего терминатора сопровождается повышением амплитуд колебаний с периодами около 20 мин, 10–14 мин, менее 6 мин. Наблюдается усиление амплитуд вариаций сигнала во время прохождения как утреннего, так и вечернего солнечных терминаторов.

Всего с 2011 по 2018 г. было проведено более 20 серий лидарного зондирования в разные времена года и разное время суток. Отметим, что во всех наблюдениях отмечается схожий характер поведения тропосферного аэрозоля в момент прохождения солнечного терминатора.

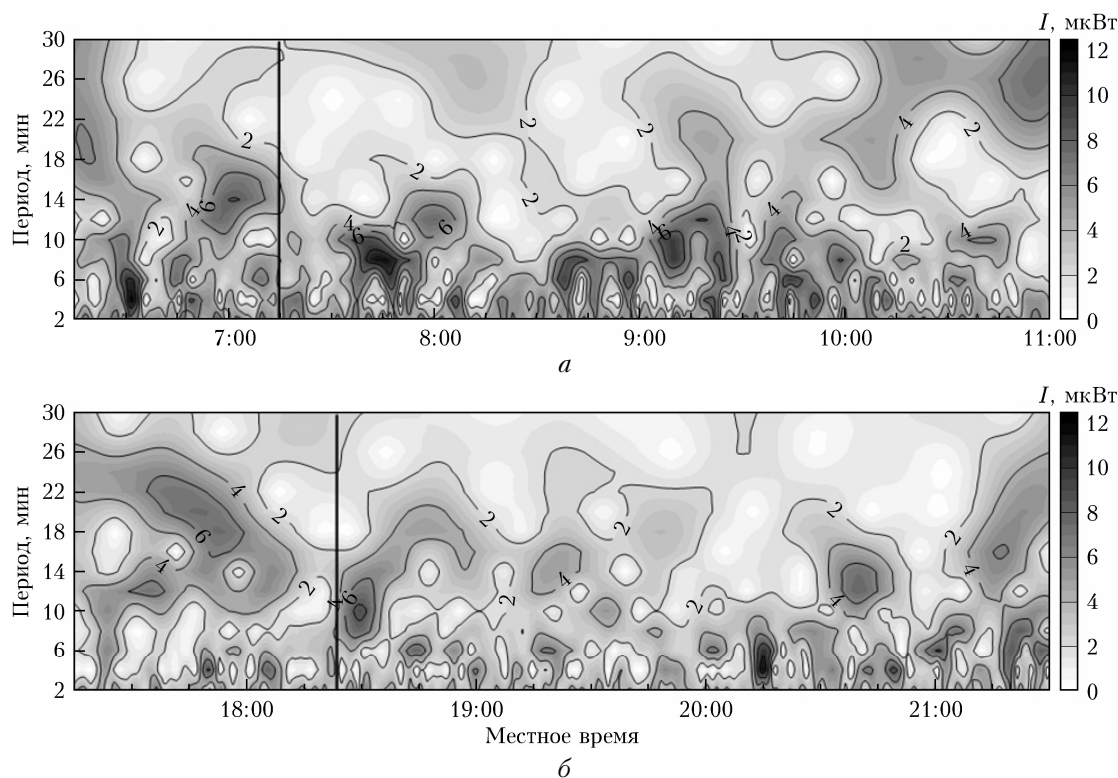


Рис. 4. Результаты вейвлет-анализа вариаций мощности лидарного сигнала на  $\lambda = 1064$  нм на высоте 7 км в наблюдениях: *a* – 19 марта 2012 г.; *б* – 22 октября 2014 г.

## Лидарное зондирование в период солнечного затмения

Солнечные затмения являются важным источником возмущений атмосферы и приводят к значительным изменениям параметров среды и возбуждению широкого спектра атмосферных волн. Частичное солнечное затмение 20 марта 2015 г. над Калининградом началось в 10:50 и закончилось в 13:08 по местному времени. В максимальной фазе затмения перекрытие солнечного диска составляло 77%. Лидарное зондирование 20 марта 2015 г. проводилось с 6:15 до 18:20 по местному времени. В наблюдениях определялась временная зависимость мощности рассеянного в атмосфере лидарного сигнала, отражающая частотные характеристики вариаций параметров атмосферы на различных высотах в области наблюдений. Результаты представлены на рис. 5.

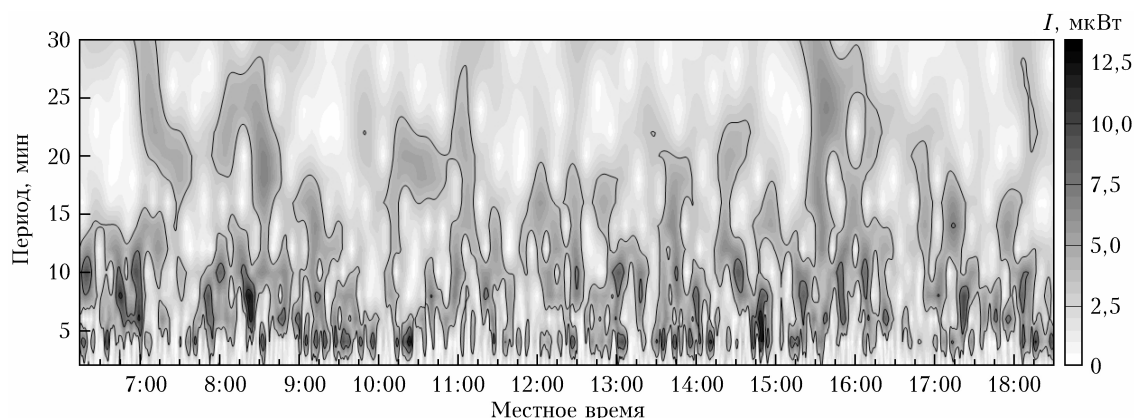


Рис. 5. Вейвлет-анализ наблюдений мощности рассеянного в атмосфере лидарного сигнала на высоте 10 км; канал зондирования – 1064 нм; измерения проводились 20 марта 2015 г. в период солнечного затмения

Как видно из рисунка, повышение волновой активности в диапазонах инфразвуковых волн (~5 мин) и внутренних гравитационных волн (~10–25 мин) отмечается во время прохождения солнечного терминатора (6:40), а также на начальной фазе затмения (11:00) и после его окончания (13:10). В течение главной фазы затмения волновая активность в рассматриваемом диапазоне АГВ снижается. Интересно, что в наблюдениях ионосферных параметров были выявлены схожие вариации полного электронного содержания ТЕС (Total Electron Content) в изучаемом диапазоне АГВ [20].

### Заключение

Анализ характеристик атмосферного аэрозоля и мощности рассеянного в атмосфере лидарного сигнала показал, что в условиях прохождения солнечного терминатора, а также солнечного затмения в тропосфере возбуждаются АГВ с периодами от 5 до 25 мин. В наблюдениях вариаций ионосферных параметров также отмечается повышение волновой активности в этом частотном диапазоне во время

прохождения солнечного терминатора. Анализ лидарных наблюдений в тропосфере дает дополнительную информацию для физической интерпретации связи динамических процессов в различных слоях атмосферы. Полученные результаты демонстрируют широкие возможности метода лидарного зондирования в исследованиях волновых процессов в тропосфере.

Очевидно, что этот метод может быть также полезен для мониторинга верхних слоев атмосферы. Установление текущих параметров плазмы *D*- и *E*-слоев ионосферы позволит решить задачу о времени задержки сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS) и существенно сократить ошибку позиционирования [21].

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 0082-2019-0017, № АААА-А19-119010990034-5).

1. *Kuverova V.V., Adamson S.O., Berlin A.A., Bychkov V.L., Dmitriev A.V., Dyakov Y.A., Eppelbaum L.V., Golubkov G.V., Lushnikov A.A., Manzhelii M.I., Morozov A.N., Nabiev S.S., Shapovalov V.L., Suvorova A.V., Golubkov M.G.* Chemical physics of *D* and *E* layers of the ionosphere // *Adv. Space Res.* 2019. V. 64, N 10. P. 1876–1886.
2. *Голубков Г.В., Манжель М.И., Берлин А.А., Лушников А.А.* Основы радиохимической физики атмосферы Земли // *Хим. физика.* 2016. Т. 35, № 1. С. 5–20.
3. *Голубков Г.В., Манжель М.И., Карпов И.В.* Химическая физика верхней атмосферы // *Хим. физика.* 2011. Т. 30, № 5. С. 55–60.
4. *Межерис Р.* Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
5. *Mitchell N.J., Thomas L., Prichard I.T.* Gravity waves in the stratosphere and troposphere observed by lidar and MST radar // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1994. V. 56, N 8. P. 939–947.
6. *Банух В.А., Смелихо И.Н.* Когерентные доплеровские ветровые лидары в турбулентной атмосфере. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2013. 304 с.
7. *Кориунов В.А.* О восстановлении интегральных параметров тропосферного аэрозоля по данным двухволнового лидарного зондирования // *Изв. РАН. Физика атмосф. и океана.* 2007. Т. 43, № 5. С. 671–687.

8. *Кориунов В.А.* Алгоритм автоматизированной обработки данных двухволнового лидарного зондирования на наклонных трассах // Эколог. приборы и системы. 2009. № 12. С. 3–10.
9. *Rauthe M., Gerding M., Lobbken F.-J.* Seasonal changes in gravity wave activity measured by lidars at mid-latitudes // Atmos. Chem. Phys. 2008. V. 8, N 22. P. 6775–6787.
10. *Blanc E., Farges T., Le Pichon A., Heinrich P.* Ten year observations of gravity waves from thunderstorms in Western Africa // J. Geophys. Res.: Atmos. 2014. V. 119, N 11. P. 6409–6418.
11. *Ehard B., Achtert P., Gumbel J.* Long-term lidar observations of wintertime gravity wave activity over northern Sweden // Ann. Geophys. 2014. V. 32, N 11. P. 1395–1405.
12. *Hickey M.P., Walterscheid R.L., Schubert G.* Gravity wave heating and cooling of the thermosphere: Roles of the sensible heat flux and viscous flux of kinetic energy // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2011. V. 116. P. A12326.
13. *Karpov I.V., Kshevetskii S.P.* Numerical study of heating the upper atmosphere by acoustic-gravity waves from a local source on the Earth's surface and influence of this heating on the wave propagation conditions // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2017. V. 164. P. 89–96.
14. *Hines C.O.* Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights // Can. J. Phys. 1960. V. 38, N 11. P. 1441–1481.
15. *Исаев Н.В., Костин В.М., Беляев Г.Г., Овчаренко О.Я., Трушкина Е.П.* Возмущения верхней ионосферы, вызванные тайфунами // Геомагнетизм и аэронавигация. 2010. Т. 50, № 2. С. 253–264.
16. *Петрухин Н.С., Пелиновский Е.Н., Бацына Е.К.* Безотражательные акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли // Геомагнетизм и аэронавигация. 2012. Т. 52, № 6. С. 854–860.
17. *Карпов И.В., Кшевецкий С.П., Борчевкина О.П., Радиевский А.В., Карпов А.И.* Возмущения верхней атмосферы и ионосферы, инициированные источниками акустико-гравитационных волн в нижней атмосфере // Хим. физика. 2016. Т. 35, № 1. С. 59–64.
18. *Астафьева Н.М.* Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физ. наук. 1996. Т. 166, № 11. С. 1145–1170.
19. *Столбова А.А.* Разработка и программная реализация алгоритмов непрерывного вейвлет-преобразования временных рядов с регулярной дискретизацией // Программные продукты и системы. 2017. Т. 30. № 4. С. 765–769.
20. *Борчевкина О.П., Карпов И.В., Карпов А.И.* Наблюдения акустико-гравитационных волн в период солнечного затмения 20 марта 2015 года в Калининграде // Хим. физика. 2017. Т. 36, № 12. С. 51–55.
21. *Голубков Г.В., Голубков М.Г., Манжелий М.И.* Ридберговские состояния в D-слое ионосферы и ошибки позиционирования системы GPS // Хим. физика. 2014. Т. 33, № 2. С. 64–77.

*O.P. Borchevkina, S.O. Adamson, O.S. Andrienko, G.V. Golubkov, D.P. Gubanova, Yu.A. Dyakov, M.A. Kazaryan, I.V. Karpov, M.G. Golubkov.* Lidar observation of aerosol dynamics and acoustic-gravity waves.

The results of lidar probing of tropospheric aerosols in Kaliningrad, Russia (54°N, 20°E) are presented. The observations used a two-wave atmospheric lidar (with wavelengths of 532 and 1064 nm), which allows investigation of properties of troposphere up to altitudes of 10–12 km. The measurements carried out in the period 2011–2018 made it possible to determine the features of the vertical structure and the dynamics of aerosol particles. The analysis of the observations revealed intensification of the waves in the range of acoustic-gravity waves in the troposphere during the passage of a solar terminator.