

## АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ В НАБЛЮДЕНИЯХ ТРОПОСФЕРНЫХ И ИОНОСФЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАД КАЛИНИНГРАДОМ

О.П. Борчевкина<sup>1</sup>, И.В. Карпов<sup>1,2</sup>, А.И. Карпов<sup>1</sup>, А.В. Ильминская<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта

<sup>2</sup>Калининградский филиал ИЗМИРАН им. Н.В. Пушкина

e-mails: opsuslova@gmail.com; ivkarпов@inbox.ru; liahan@inbox.ru; a.ilminskaya@mail.ru

**Аннотация.** В работе представлены наблюдения вариаций параметров нижней атмосферы по данным атмосферного лидара над Калининградом (54°N, 20°E), а также вариаций параметров ионосферы по данным полного электронного содержания в период прохождения солнечного терминатора. Показано, что в период солнечного терминатора в атмосфере Земли генерируются волновые структуры с периодами акустико-гравитационных волн (АГВ) и высокочастотных внутренних гравитационных волн (ВГВ), которые распространяются до высот ионосферы.

### Введение

В настоящее время интерес к изучению распространения акустико-гравитационных волн (АГВ) и внутренних гравитационных волн (ВГВ) обусловлен попытками привлечения таких волн к объяснению связей динамических процессов в нижних и верхних слоях атмосферы (Laštovichka, 2006; Antonova et al., 2006; Yiğit et al., 2016). Наибольший интерес в этом случае привлекают короткомасштабные ВГВ и инфразвуковые волны, способные распространяться практически вертикально (Fritts and Alexander, 2003; Artru et al., 2004; Sauli and Boska, 2001; Yiğit and Medvedev, 2015). В настоящее время, существенный прогресс в развитии экспериментальных исследований верхней атмосферы позволил достоверно установить связь динамических процессов в нижней атмосфере с параметрами крупномасштабных неоднородностей верхней атмосферы и ионосферы (Hocke and Schlegel, 1996; Francis, 1975, Galushko et al, 1998; Plougonven and Zhang, 2014; Marty, 2010; Chernigovskaya et.al., 2015).

Наибольшие сложности возникают при исследовании параметров волн в нижней атмосфере. Для исследования вариаций параметров нижней атмосферы широко применяются методы лидарного зондирования, обладающие высокой информативностью и высоким пространственно-временным разрешением (Межерис, 1987; Ehard et al., 2014). В исследованиях структуры пространственных и временных вариаций ионосферы широко применяются методы, основанные на анализе сигналов навигационных спутников (ионосферный параметр – ПЭС (полное электронное содержание)). Методики исследования вариаций ПЭС с целью определения характеристик волновых процессов подробно рассмотрены в работах (Афраймович, Перевалова, 2006; Перевалова, Полякова, 2014; Суслова и др., 2013).

### Вариации параметров атмосферы

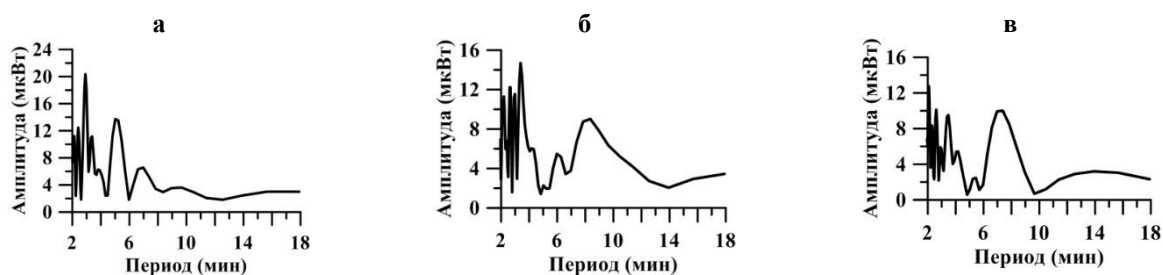
Наблюдения вариаций параметров нижней атмосферы осуществлены с применением атмосферного лидара (light identification detection and ranging) LSA-2с производства ООО «Обнинская фотоника» (Россия). Лидар LSA-2с - двухволновой лидар (532нм, 1064нм) предназначен для экологических наблюдений характеристик аэрозоля и позволяет проводить зондирование на расстояниях до 10-12км. Характеристики аэрозоля могут быть определены на различных высотах в атмосфере, в пределах длины трассы зондирования, при изменении угла наклона трассы к поверхности. Методы обработки результатов измерений, позволяющие определить коэффициенты обратного рассеивания в обоих каналах излучения, объемную концентрацию аэрозоля и эффективный радиус рассеивания, изложены в работах (Коршунов, 2009; Коршунов, 2007) и реализованы в виде программного комплекса для обеспечения измерений и их обработки на данном лидаре.

Принцип действия лидара основан на измерении интенсивности рассеяния лазерного излучения аэрозолями атмосферы. Лидар посылает в атмосферу короткий импульс света и принимает обратно сигнал обратного рассеяния. Спектр таких сигналов показывает интегральную динамику изменения тонкого атмосферного слоя. Рассеяние света в атмосфере происходит молекулами воздуха (Релеевское рассеяние), так и частицами аэрозоля. Таким образом, наличие аэрозоля в атмосфере увеличивает сигнал обратного рассеяния по сравнению с чистой атмосферой, и концентрация аэрозоля может быть определена как функция расстояния и интенсивности сигнала на фоне чистой атмосферы.

Для построения пространственно-временного ряда наблюдений разработана программа обработки результатов лидарного зондирования нижней атмосферы и получения спектральных характеристик рассеянного лидарного сигнала «E-LIS» (elaboration lidar signal), свидетельство о государственной

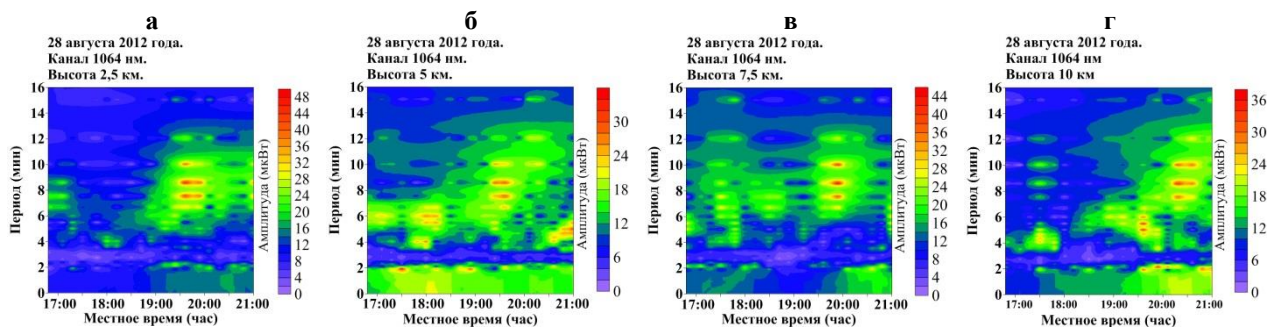
регистрации программы ЭВМ № 2016616204 от 08 июня 2016 года. Программа обработки результатов лидарного зондирования нижней атмосферы и получения спектральных характеристик рассеянного лидарного сигнала E-LIS» может применяться для обработки и анализа наблюдений рассеянных сигналов по данным зондирования атмосферы с применением двухволнового аэрозольного лидара LSA-2с. А также спектрального анализа вариаций интенсивности рассеянного сигнала в период наблюдений. Программа применяется при анализе результатов лидарного зондирования и позволяет представить в наглядном виде динамику рассеянного лидарного сигнала и его спектральные характеристики. Программа включает в себя программу сбора лидарных данных и модули, позволяющие выполнить процедуры гармонического анализа данных наблюдений. Программа применяется для обработки и анализа наблюдений рассеянных сигналов по данным зондирования атмосферы с применением двухволнового аэрозольного лидара LSA-2с, а также спектрального анализа вариаций интенсивности рассеянного сигнала в период наблюдений. Спектральный анализ временных рядов наблюдаемых параметров позволил определить частотные диапазоны, характерные для вариаций атмосферных и ионосферных параметров на различных высотах. Наблюдаемый на приемнике рассеянный лидарный сигнал отражает интегральную динамику атмосферы на траектории луча распространения. На приемнике лидара наблюдается рассеянный сигнал, который отражает интегральную динамику атмосферы на траектории луча распространения.

Для исследования волновых возмущений в нижней атмосфере выбирался период прохождения солнечного терминатора (СТ). СТ является регулярным источником возмущений параметров среды на всех высотах атмосферы (Сомников, 1991). На рис.1 показаны спектры вариаций интенсивности рассеянного в атмосфере лидарного сигнала на различных высотах в наблюдениях, выполненных в августе 2012 г. и включающих прохождение солнечного терминатора над Калининградом. Анализ проводился на канале 1064 нм. В анализе наблюдений основное внимание уделялось выделению вариаций с периодами от 2 до 20 мин., вызванных распространением инфразвуковых и короткомасштабных внутренних гравитационных волн.



**Рисунок 1.** Спектр вариаций интенсивности рассеянного в атмосфере лидарного сигнала на высотах 1 км (а), 5 км (б), 10 км (в).

Результаты анализа спектров показали, что наиболее важный вклад в вариации лидарного сигнала вносят гармоники с периодами 2-10 мин. Это позволяет нам рассмотреть динамику изменения характеристик таких вариаций в течение наблюдений. С этой целью интервал наблюдений разбивается на отрезки длительностью ~20 мин, для которых определяется спектральные характеристики вариаций. На данных рисунках показаны изменения спектров лидарных сигналов в диапазоне 2-16 мин на различных высотах (рис. 2а-г). На рисунках проявляется область солнечного терминатора (~19.00 LT). Проявление области СТ видно в изменении интенсивности принимаемого рассеянного сигнала. В измерениях 28 августа 2012 года видно проявление вариаций параметров атмосферы с периодами до 2 минут (АГВ) и с периодами 4-10 минут (ВГВ). Также отчетливо видно разделение АГВ и ВГВ составляющих (частота акустического обрезания).



**Рисунок 2.** Динамический спектр вариаций параметров атмосферы 28 августа 2012 года на разных высотах.

## Вариации параметров ионосферы

В настоящее время объем экспериментальных исследований ионосферы основывается на методах приема сигналов навигационных спутников GPS и ГЛОНАСС (Афраймович, Перевалова, 2006; Ясюкевич и др., 2013).

Учитывая важность инфразвукового диапазона вариаций ТЕС в данной работе развивается процедура выделения вариаций ТЕС в области солнечного терминатора по наблюдениям пролетов отдельных спутников. Это обеспечит более точное определение частотных характеристик вариаций ТЕС и временной диапазон их появления в точке наблюдения.

Разработанный и программно реализованный механизм спектрального анализа вариаций ТЕС и определения динамического спектра вариаций по наблюдениям сигналов отдельных спутников системы GPS, свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016617118. Программа расчета изменения спектра вариаций параметров ионосферы в течение наблюдений сигналов отдельных спутников глобальных навигационных систем "DSTEC" (*dinamical spectrum of total electron content*) – интеллектуальная система обработки результатов и расчета спектральных характеристик вариаций полной электронной концентрации на трассе «спутник - станция приема сигналов». С применением разработанной процедуры может выполняться анализ динамических спектров ТЕС в период прохождения солнечного терминатора на станциях приема сигналов навигационных спутников.

Алгоритм методики определения частотных характеристик вариаций ТЕС можно разделить на следующие этапы:

1. Отбор спутников, период наблюдения которых над станцией наблюдения приходится на прохождение солнечного терминатора;
2. Считывание данных ТЕС, времени пролета спутника и траектории движения спутника;
3. Вычисление дифференциального ТЕС по наблюдениям. Анализ дифференциального ТЕС обычно используется для выделения высокочастотных составляющих вариаций;
4. Расчет динамического спектра вариаций дифференциального ТЕС.

На рис. 3 показаны изменяющиеся во время наблюдений спектры вариаций ПЭС в ионосфере на станции Калининград (54.42° N, 20.27° E) 1 марта 2010 года и 08 февраля 2011 года в периоды прохождения утреннего и вечернего терминаторов. Анализ вариаций ПЭС с периодами АГВ и инфразвуковых волн позволил более детально представить динамику этих составляющих вариаций в период наблюдений.

Как видно из рисунков, повышение амплитуд вариаций ПЭС с периодами 4–10 мин отмечается в освещенной области ионосферы – после прохода утреннего и перед проходом вечернего терминатора. Продолжительность усиления активности в этом частотном диапазоне составляет ~1–2 ч.

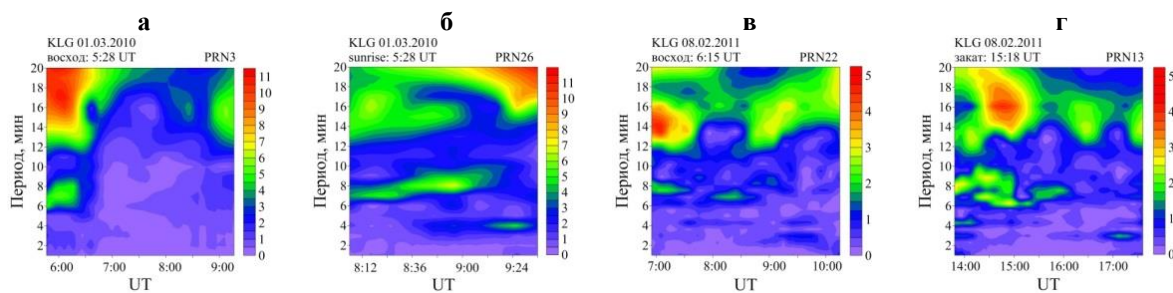


Рисунок 3. Динамический спектр вариаций ПЭС 1 марта 2010 года (а, б) и 8 февраля 2011 года (в, г)

## Выводы

В работе представлены экспериментальные исследования волновой изменчивости атмосферы. Основное внимание уделялось изучению инфразвука, АГВ и короткомасштабных ВГВ с периодами до 20 мин, источниками возмущения которых являются солнечный терминатор.

Экспериментальные исследования, проведенные в Калининграде в 2011-2012 году показали, что:

1. Повышение амплитуд вариаций параметров нижней атмосферы и ионосферы с периодами 2-10 минут при прохождении СТ над пунктом наблюдений. Обнаружено резкое уменьшение амплитуд вариаций атмосферных параметров с периодами 3-5 минут, что связано с различием частот акустических и внутренних гравитационных волн, возбуждаемых в области СТ (частота акустического обрезания).
2. Вариации ионосферного параметра ПЭС с периодами АГВ (6-10 минут) также отчетливо проявляются при прохождении СТ и продолжают в течение 1-2 часов в освещенной области ионосферы.
3. Результаты анализа спектров атмосферных и ионосферных вариаций выявляют наличие гармоник с одинаковыми периодами. Это позволяет предположить, что такие вариации могут иметь один источник возбуждения.

4. Особенностью генерации коротких ВГВ утренним и вечерним СТ является наличие небольшого временного запаздывания после прохождения терминатора и усилением волновой активности. Характерно, что величина этого запаздывания растет с высотой. Высокочастотные возмущения связанные с терминатором проявляются в ионосферных наблюдениях только в освещенной области. Наблюдаемые особенности проявления высокочастотных вариаций в области терминатора могут быть объяснены существованием атмосферного волновода для акустико-гравитационных волн с периодами меньше периода Вайсяля-Брента в верхней атмосфере.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований грант № 15-05-01665 и проектной части государственного задания Министерства образования и науки РФ № 3.1127.2014/К.

## **Список литературы**

- Artru J., Farges T. and Lognonné P. Acoustic waves generated from seismic surface waves: propagation properties determined from Doppler sounding observations and normal-mode modelling. *Geophysical Journal International*. 158, 1067–1077, 2004.
- Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Ratovsky K.G. Meteorological effects of ionospheric disturbances from vertical radio sounding data. *J. Atmos. and Sola-Terr. Phys.* 136, 235–243, 2015.
- Ehard B., Achtert P., Gumbel J. Long-term lidar observations of wintertime gravity wave activity over northern Sweden. *Ann. Geophys.* 32, 1395-1405, 2014.
- Yigit E., Medvedev A. Internal wave coupling processes in Earth's atmosphere. *Adv. Space Res.* 55, 983–1003, 2015.
- Francis S.H. A theory of medium-scale traveling ionospheric disturbances. *J. Geophys. Res.* 79, 5245-5259, 1974
- Fritts, D. C., and Alexander M. J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere. *Reviews of Geophysics*. 41, 1 -64, 2003.
- Galushko, V.G., Paznukhov, V.V., Yampolski, Y.M., Foster, J.C. Incoherent scatter radar observations of AGW/TID events generated by the moving solar terminator. *Ann. Geophysicae* 16, 821-827, 1998.
- Hocke K. and Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and Traveling ionospheric disturbances: 1982-1995. *Ann. Geophys.* 14, 917-940, 1996
- Laštovická J. Forcing of the ionosphere by waves from below *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 68, 479–497, 2006.
- Marty, J., Ponceau D., and Dalaudier F. Using the International Monitoring System infrasound network to study gravity waves. *Geophys. Res. Lett.* 37, L19802, 2010.
- Plougonven, R., and F. Zhang. Internal gravity waves from atmospheric jets and fronts. *Rev. Geophys.* 52 (1), 33–76, 2014.
- Sauli P., Boska J. Tropospheric events and possible related gravity wave activity effects on the ionosphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 63, 945–950, 2001.
- Yigit E., Knížova P. K., Georgieva K., Ward W. A review of vertical coupling in the Atmosphere-Ionosphere system: Effects of waves, sudden stratospheric warmings, space weather, and of solar activity. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 141, 1–12, 2016.
- Антонова В.П., Дунгенбаева К.Е., Зализовский А.В., Инчин А.С., Крюков С.В., Сомсиков В.М., Ямпольский Ю.М. Различие спектров акустико-гравитационных волн в дневные и ночные часы, обусловленное неравновесными эффектами в атмосфере. *Геомаг. и аэр.* 46 (1), 106-114, 2006.
- Афраймович Э. Л., Первалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск, 2006.
- Коршунов В.А. Алгоритм автоматизированной обработки данных двухволнового лидарного зондирования на наклонных трассах. *Экологическое приборостроение*. 12, 3- 10, 2009.
- Коршунов В.А. О восстановлении интегральных параметров тропосферного аэрозоля по данным двухволнового лидарного зондирования. *Известия РАН, Физика атмосферы и океана*. 43(5), 671-687, 2007
- Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. – М.: Мир, 1987. – 550 с
- Первалова Н. П., Полякова А. С. Сравнительный анализ возмущений ПЭС над зонами действия тропических циклонов в северо-западной части Тихого океана. *Солнечно-земная физика*. 1(1), 63-74, 2014.
- Сомсиков В.М. Волны в атмосфере, обусловленные солнечным, терминатором. *Геомаг. и аэр.* 31(1), 1-12, 1991
- Суслова О.П., Карпов И.В., Радиевский А.В. Частотные характеристики вариаций параметров тропосферы и ионосферы в периоды прохождения солнечного терминатора. *Химическая физика*. 32(9), 77-80, 2013.
- Ясюкевич Ю. В., Первалова Н. П., Едемский И. К., Полякова А. С. Отклик ионосферы на гелио- и геофизические возмущающие факторы по данным GPS: монография. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013.