

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ И ИОНОСФЕРЫ С ПЕРИОДАМИ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В КАЛИНИНГРАДЕ

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

### RESEARCH INTO VARIATIONS OF THE ATMOSPHERE AND IONOSPHERE PARAMETERS WITH PERIODS OF ACOUSTIC-GRAVITY WAVES IN KALININGRAD

<sup>1</sup>O.P. Borchevkina, <sup>1,2</sup>I.V. Karpov, <sup>1</sup>R.Z. Dadashev, <sup>1</sup>A.I. Karpov, <sup>1</sup>A.V. Piminskaya, <sup>1,2</sup>A.V. Radievsky

В работе приведены результаты анализа наблюдений вариаций параметров атмосферы и ионосферы над Калининградом (52° N, 22° E). Наблюдения параметров ионосферы выполнены на основе приема сигналов навигационных спутников, вариаций параметров нижней атмосферы – методом лидарного зондирования. Наблюдения проводились в периоды прохождения солнечного терминатора (СТ) и в условиях локальных метеовозмущений. В анализе наблюдений были выделены характеристики вариаций параметров акустико-гравитационных (АГВ) и внутренних гравитационных (ВГВ) волн с характерными периодами от 2 до 20 мин. Усиление вариаций ионосферы с такими периодами может быть обусловлено АГВ, распространяющимися из области СТ в нижней атмосфере. Также рассмотрены вариации параметров ионосферы в периоды сильных локальных метеорологических возмущений в Калининградском регионе и выявлены морфологические особенности реакции ионосферы на такие возмущения.

In paper present results of the analysis of observations of ionosphere and atmosphere parameters variations in Kaliningrad (52° N, 22° E) are presented in work. Observations of ionospheric parameters are based on the receiving of signals from navigation satellites, variations in the parameters of the lower atmosphere - by the lidar sounding. The observations were made during the passage of the solar terminator (ST) and in terms of local meteorological disturbances. Characteristics of the parameter variations of acoustic-gravity waves AGWs and internal gravity waves GWs with periods 2–20 min were identified in the analysis of observations. In the observations of ionospheric variations of the total electron content (TEC) in the ionosphere also reveal variations with periods of AGWs and GWs. Variations of ionospheric parameters during periods of strong local meteorological disturbances in the Kaliningrad region are also considered and morphological features of ionospheric response to such disturbances are revealed.

#### Введение

Гипотезы о влиянии процессов в нижней атмосфере на состояние верхней атмосферы и ионосферы основываются на представлениях о генерации акустико-гравитационных (АГВ) и внутренних гравитационных (ВГВ) волн в нижней атмосфере и их распространении в верхнюю атмосферу. Многочисленные экспериментальные исследования обнаруживают возмущения параметров верхней атмосферы и ионосферы, вызванные развитием сильных метеорологических возмущений, сейсмическими событиями на поверхности, цунами, порождаемыми подводными землетрясениями. Поэтому изучение процессов генерации АГВ и ВГВ в нижней атмосфере представляет интерес для подтверждения справедливости таких представлений [Artru, 2004; Григорьев, 1999]. Физические механизмы, реализующие такие связи различных слоев атмосферы и определяющие морфологические признаки ионосферных возмущений, остаются недостаточно изученными [Романова, 1995; Fritts, 2003; Laštovichka, 2006].

#### Вариации параметров нижней атмосферы, определенные методом лидарного зондирования

Характеристики вариаций параметров нижней атмосферы определялись по наблюдениям атмосферного лидара. Результаты этих наблюдений представлены в работе [Суслова, 2013]. Анализ результатов наблюдений выявил ряд особенностей в динамике АГВ в области солнечного терминатора. Как известно, солнечный терминатор является глобальным и регулярным источником возмущений всех слоев атмосферы [Сомиков, 1991].

В наблюдениях определялась интенсивность рассеянного лидарного сигнала на обеих длинах волн. Наблюдения проводились сериями длительностью

несколько часов. Гармонический анализ результатов наблюдений применяется для определения частотных характеристик вариаций интенсивности сигнала. Основное внимание уделяется изучению динамики АГВ и ВГВ с периодами от 2 до 16 мин. Предполагается, что такие АГВ могут распространяться до высот верхней атмосферы и ионосферы. На рис. 1 показаны изменения спектров изучаемых вариаций на различных высотах в периоды прохождения СТ. Как видно из рисунка прохождение СТ сопровождается усилением амплитуд вариаций акустических составляющих и ВГВ с периодами близкими к периоду Вейселя–Брента. Наблюдения выполнялись в различные сезоны с 2011 по настоящее время и во всех сериях наблюдений отмечались изменение структуры АГВ и ВГВ вариаций сходные показанным на рис. 1.

#### Определение частотных характеристик вариаций полного электронного содержания в ионосфере в период прохождения солнечного терминатора

Спутниковые радиотехнические системы, в том числе и глобальные навигационные системы GPS и ГЛОНАСС, активно используются в различных сферах человеческой деятельности [Афраймович, 2006]. Спектральный анализ вариаций ПЭС при исследовании ионосферных возмущений, генерируемых в области СТ, выявил присутствие вариаций с периодами внутренних гравитационных и инфразвуковых волн [Суслова, 2013]. На рисунках отчетливо проявляется асимметрия в появлении инфразвуковых вариаций (периоды менее 8 мин.). Ночью они практически отсутствуют и проявляются через 15–30 мин после прохождения СТ. На вечернем СТ тенденция к уменьшению амплитуд инфразвуковых гармоник отмечается только через 1–1.5 ч после прохождения СТ. Результаты проведенного анализа

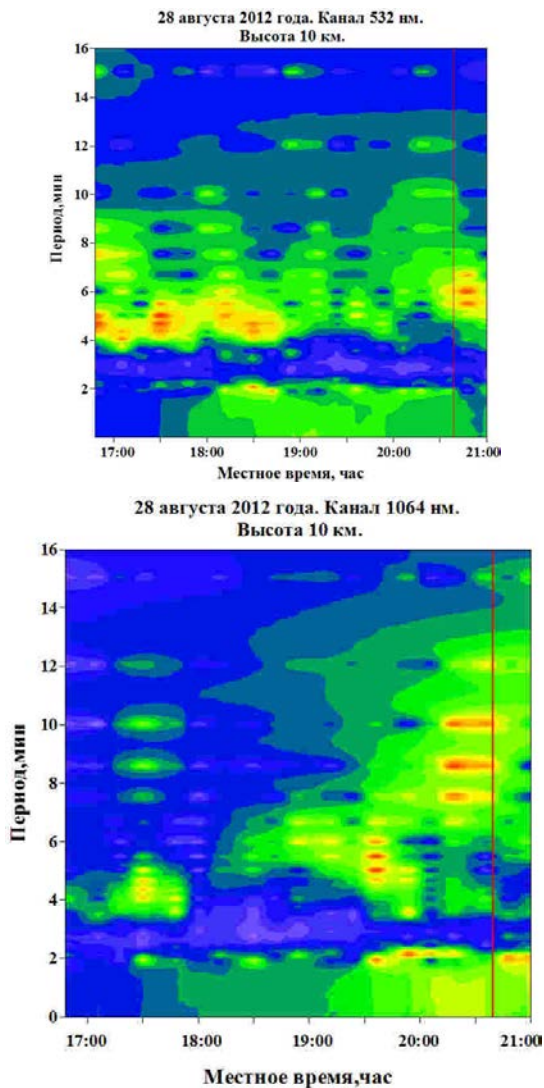


Рис. 1. Изменения спектров изучаемых вариаций на различных высотах в периоды прохождения солнечного терминатора.

наблюдений вариаций ПЭС вдоль пролетов спутников подтверждают существование инфразвуковых вариаций в области СТ. Наблюдаемая асимметрия в появлении инфразвуковых вариаций позволяет предположить, что инфразвуковые волны возбуждаются не на высотах ионосферы, а значительно ниже, учитывая временную задержку в появлении вариаций 15–30 мин. Отсутствие инфразвуковых колебаний в ночное время может быть связано с особенностью распространения акустико-гравитационных волн в верхней атмосфере. Так в работе [Карпов, 2014] показано, что для АГВ с периодами меньше периода Вяйсяля–Брента в верхней атмосфере наблюдается волноводное распространение. Причем высота верхней границы волновода определяется высотой области диссипации АГВ на высотах 200–250 км. Это означает, что в ночных условиях ионосферный слой лежит значительно выше волновода АГВ на высотах 300–400 км. Следовательно, в наблюдениях сигналов спутников на ночной стороне АГВ в волноводе не будут оказывать влияние на прохождение сигналов. На дневной стороне ионосфера будет располагаться на высотах 200–250 км, т. е. непосредственно в области волновода АГВ. Это и обеспе-

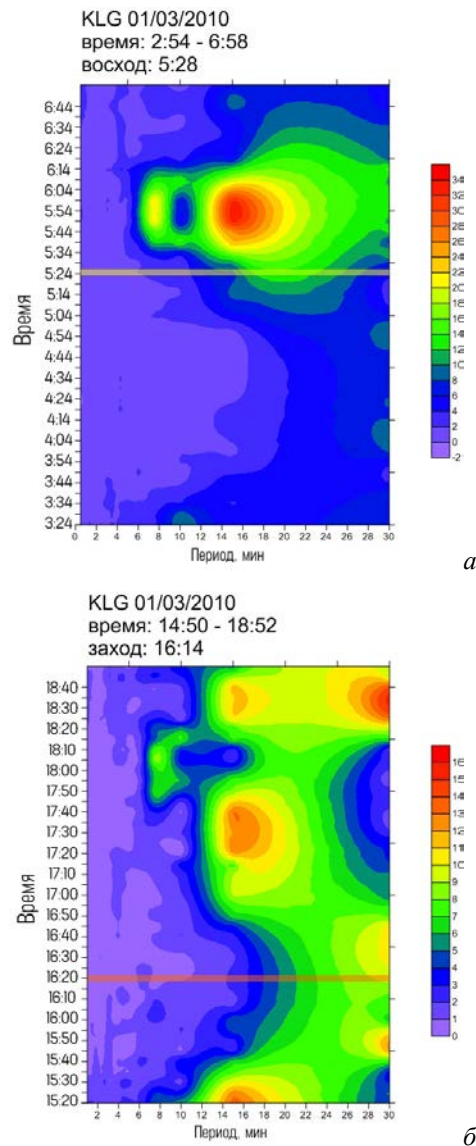


Рис. 2. Изменение спектра вариаций ТЕС с периодами менее 30 мин в наблюдениях при прохождении утреннего терминатора (а) и вечернего терминатора (б). Белая линия – момент появления терминатора.

чит возможность наблюдения АГВ в дневных условиях. Следовательно, возможной причиной асимметрии в появлении инфразвуковых вариаций ПЭС является суточные изменение высоты ионосферного слоя и существование атмосферного волновода для инфразвуковых волн.

### Вариации параметров ионосферы в периоды метеовозмущений

Наблюдения вариаций ПЭС в периоды циклонической активности также выявляют усиление вариаций ионосферы с периодами 2–20 мин [Полякова, 2013]. Очевидно, что возбуждение этих составляющих вариаций ионосферы связано с локальными метеорологическими возмущениями. В теоретическом исследовании [Карпов, 2014] показывается, что распространение волн этого диапазона в верхней атмосфере сопровождается формированием крупномасштабного возмущения верхней атмосферы и, в частности, с локальным нагревом над областью возмущений в нижней атмосфере. Появление области

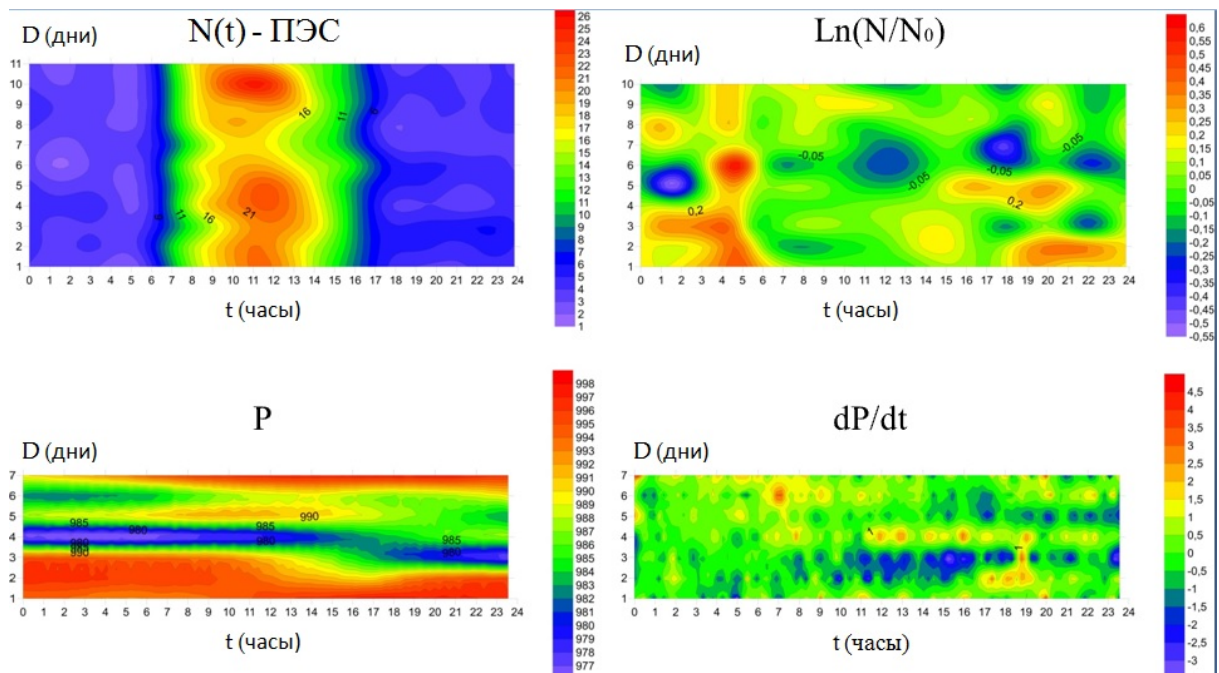


Рис. 3. Пространственные картины распределения ПЭС, давления  $P$ , изменения давления и логарифма отношения ПЭС в период локального шторма 10 января 2014 г.

локального нагрева в верхней атмосфере должно приводить к изменениям электронной концентрации в ионосфере вследствие усиления влияния рекомбинационных процессов. Следовательно, соответствующие изменения состояния ионосферы должны проявляться в наблюдениях метеорологических возмущений. Для анализа состояния ионосферы в периоды метеовозмущений были отобраны наиболее сильные штормы на территории Калининградской области за последние пять лет, которые не сопровождались геомагнитными возмущениями. Для характеристик метеорологической обстановки использовалось атмосферное давление. [Афраймович, 2006]. На рис. 3 показаны пространственные картины распределения ПЭС и давления в период локального шторма 10 января 2014 г. Место провалов в значениях ПЭС в день шторма объясняется тем, что усиление меридиональной компоненты ведет к понижению плазмы ионосферы. Исследование изменения давления показало падение давления на третий день, которое продолжается до 19–20 ч вечера, а потом давление начинает расти. Низкое давление в день метеорологического возмущения характерно отражается в понижении значений ПЭС в ионосфере. Аналогично проделанные операции по всем другим ярким штормам показывают, что результат закономерен и схож для всех случаев.

### Выводы

Проведенное комплексное исследование показало, что результаты анализа спектров атмосферных и ионосферных вариаций выявляют наличие гармоник с одинаковыми периодами (5–7 мин). Это позволяет предположить, что такие вариации могут иметь один источник возбуждения. Повышение амплитуд

вариаций параметров нижней атмосферы и ионосферы с периодами 2–10 мин отчетливо прослеживается в периоды прохождения солнечного терминатора над пунктом наблюдений. В области солнечного терминатора отмечается усиление волновых возмущений с периодами меньше периода Вьяйсяля–Брента (меньше 6 мин). Высоочастотные возмущения связанные с терминатором проявляются в ионосферных наблюдениях преимущественно 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 Вьяйсяля–Брента в верхней атмосфере. Ионосферные наблюдения в периоды метеовозмущений выявляют понижение тока в условиях сильных локальных метеовозмущений. Статистический метод анализа динамики ионосферы указывает, что возмущения ионосферы не являются случайными процессами.

Работа проводилась в рамках проекта «Физические механизмы формирования реакции верхней атмосферы и ионосферы на процессы в нижней атмосфере и на поверхности Земли» (Государственное задание Министерства образования и науки РФ, конкурсная часть, задание № 3.1127.2014/К. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 15-05-01665.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Афраймович Э.Л., Первалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАНМ, 2006. 480 с.  
 Григорьев Г.И. Акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли (обзор) // Изв. вузов. Радиофиз. 1999. Т. XLII, № 1. С. 3–20.

Карпов И.В., Кшевещкий С.П. Механизм формирования крупномасштабных возмущений в верхней атмосфере от источников АГВ на поверхности Земли // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2014. № 4. С. 217–227.

Полякова А.С., Перевалова Н.П. Сравнительный анализ возмущений полного электронного содержания над зонами действия девяти тропических циклонов // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2013. Т. 10, № 2. С. 197–205.

Романова Н.Н., Якушкин И.Г. Внутренние гравитационные волны в нижней атмосфере и источники их генерации (обзор) // *Известия АН РАН. Физика атмосферы и океана*. 1995. Т. 31, № 2. С. 163–186.

Сомсиков В.М. Волны в атмосфере, обусловленные солнечным, терминатором // *Геомагнетизм и аэрономия*. 1991. Т. 31, № 1. С. 1–12.

Суслова О.П., Карпов И.В., Радиевский А.В. Частотные характеристики вариаций параметров тропосферы и ионосферы в периоды прохождения солнечного терминатора. *Химическая физика*. М.: Наука, 2013. Т. 32. № 9. С. 77–80.

Artru J., Farges T., Lognonne P. Acoustic waves generated from seismic surface waves: propagation properties determined from Doppler sounding observations and normal-mode modeling // *Geophys. J. Int.* 2004. V. 158. P. 1067–1077.

Fritts D.C., Alexander M.J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere // *Rev. Geophys.* 2003. V. 41, iss. 1. P. 3–1–3–64.

Laštovíčka J. Forcing of the ionosphere by waves from below // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2006. V. 68, N 3–5. P. 479–497.

<sup>1</sup>*Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия*

<sup>2</sup>*Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Калининград, Россия*