

5. Zuo Xiao, Sai-guan Xiao, Yong-qiang Hao, Dong-he Zhang Morphological features of ionospheric response to typhoon // J. Geophys. Res., 2008. Vol. 112. No. A4. A04304.
6. Perevalova N.P., Polekh N.M. An investigation of the upper atmosphere response to cyclones using ionosonde data in Eastern Siberia and the Far East // Proc. of SPIE, 2008. V. 7296. P. 72960J1-72960J11. doi: 10.1117/12.823814.
7. Черниговская М.А., Шарков Е.А., Куркин В.И., Орлов И.И., Покровская И.В. Исследование временных вариаций ионосферных параметров в регионе Сибири и Дальнего Востока // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник научных статей. – М.: ООО "Азбука-2000", 2008. Вып. 5. Т. I. С. 567-574.
8. Черниговская М.А., Шарков Е.А. и др. Короткопериодные временные вариации ионосферных параметров в регионе Сибири и Дальнего Востока // Исследование Земли из космоса, 2008. № 6. С. 17-24.
9. Черниговская М.А., Куркин В.И., Орлов И.И., Шарков Е.А., Покровская И.В. Совместный анализ короткопериодных временных вариаций ионосферных параметров в регионе Сибири и Дальнего Востока и процессов тропического циклогенеза // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник научных статей. – М.: ООО "Азбука", 2009. Вып. 6. Т. II. С. 324-332.
10. Орлов И.И., Ильин Н.В. О текущих спектрах сигналов // Радиолокация. Навигация. Связь / Под ред. Борисова В.И. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2000. Т.1. С. 361-365.

**ДОЛГОПЕРИОДНЫЕ ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ВЕРХНЕЙ И СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЫ  
ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТАНОВОК СИБИРСКОГО РЕГИОНА  
LONG -TIME VARIATIONS OF MIDDLE AND UPPER ATMOSPHERE PARAMETERS ON  
THE BASE OF EAST-SIBERIAN GEOPHYSICAL OBSERVATORIES DATA.**

Шпынев Б.Г.<sup>1</sup>, Ойнац А.В.<sup>1</sup>, Медведева И.В.<sup>1</sup>, Черниговская М.А.<sup>1</sup>, Белинская А.Ю.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия;

<sup>2</sup>Алтае-Саянский филиал Геофизической службы СО РАН

*Long period variations of upper atmosphere parameters were investigated for the matter of their connection with tidal processes. Data of ground based optical instruments, data of the MLS device onboard AURA satellite, Incoherent Scatter data on electron density, temperature and ion composition, as well as GPS total electron content and ionosound data were used for the analysis. It was found that the most pronounced long time variations appeared due to changing of relative phase of solar thermal and lunar gravitational tides. It was founded that the main variations of upper atmosphere parameters are caused by wave-like processes of tidal origin. Global planetary waves are modulated by solar-lunar tides which work as trigger mechanism for generation of new circulation cells. This is a periodical process and it has a maximum in the mesosphere. The disturbing moved up into ionosphere and down into stratosphere, where it can be registered by radio and optic methods. Experimental data showed the most pronounced variations, which are harmonics of tidal waves .*

В настоящем исследовании рассматриваются вариации параметров верхней атмосферы Земли, которые имеют характерный период единицы и десятки дней. Основное внимание было уделено влиянию на долговременную динамику верхней атмосферы приливных процессов, которые оказывают регулярное и детерминированное воздействие на атмосферный газ. Возмущения верхней атмосферы и ионосферы Земли, как правило, обусловлены воздействиями снизу, и они активно изучаются в течение многих лет. Источниками таких возмущений могут быть атмосферные гравитационные волны, распространяющиеся из нижележащих слоев атмосферы и переносящие с собой момент количества движения и энергию. Различные источники, действующие в нижней и средней атмосфере (сейсмические события, метеорологические фронты и струйные течения, прохождение солнечного терминатора, стратосферные потепления, антропогенные воздействия и т.п.), возбуждают широкий пространственно-временной спектр внутренних гравитационных волн (ВГВ) [1]. При определенных условиях ВГВ достигают высот максимума ионосферы (~300-350 км), и на высотах ионосферы, проявляют свои свойства в виде перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ). Эти возмущения могут быть обнаружены радиофизическими и оптическими методами при активном или пассивном исследовании верхней атмосферы.

Приливное гравитационное воздействие на атмосферный газ является не самым мощным, однако регулярным и детерминированным эффектом, т.е. амплитуда и фаза гравитационного воздействия может быть точно рассчитана. В отличие от солнечного излучения, которое относительно спонтанно, гравитационное воздействие носит детерминированный, хотя и не строго периодичный характер. Даже при относительно слабом, по сравнению с солнечным излучением, воздействии на земную атмосферу, гравитационные силы могут существенно влиять на динамические процессы в верхней атмосфере.

Наибольший эффект в возмущении параметров нейтральной атмосферы оказывают глобальные колебания, описываемые волнами Россби [3]. Движителем этих волн являются процессы глобального перераспределения энергии в атмосфере Земли, а их период определяется собственными частотами колебаний атмосферы. По мере поступления энергии в атмосферу, период этих волн со временем возрастает, до тех пока не совпадет по фазе со стационарной приливной волной, распространяющейся, в основном, ниже 85 км. В результате резонанса этих двух волн происходит усиление волны Россби 1-го типа, и переход ее в критический режим, который приводит к смене регулярной циркуляции в верхней атмосфере, и к трансформации энергии в тепло или к передаче энергии другим атмосферным регионам. Этот процесс повторяется циклически. Исследование зимних стратосферных потеплений Sudden Stratospheric Warming (SSW) привело к пониманию того, что приливные процессы являются важным фактором, инициирующим изменение циркуляции, задающим периодичность этих глобальных процессов [2], и это изменение проявляется в динамике разных областей верхней атмосферы.

В настоящей работе долговременная динамика параметров верхней атмосферы исследовалась на предмет зависимости от приливных вариаций, которые специально рассчитывались для региона наблюдения. Для анализа были использованы данные наземных оптических наблюдений, данных прибора MLS на спутниках AURA, данные некогерентного рассеяния по электронной концентрации и температурам и ионному составу на высотах ионосферы, данные ионозонда и данные GPS по глобальному содержанию.

Динамика гравитационного ускорения рассчитывалась по упрощенной формуле:

Вертикальная составляющая приливной силы (на единицу массы) изменяет силу тяжести на величину [8],

$$F_v = 3G \frac{mr}{R^3} \left( \cos^2 \chi - 1/3 \right) \quad (1)$$

где  $G$  — гравитационная постоянная,  $m$  - масса Луны,  $r$  - расстояние от центра Земли,  $R$  - расстояние от Земли до Луны,  $\chi$  - зенитный угол Луны.

Сила тяжести уменьшается на поверхности Земли, когда Луна находится в зените или надире, на 0,1 мгал ( $\text{см}/\text{с}^2$ ), или на  $1 \times 10^{-7}$  своей величины, и увеличивается на половину этой величины в тех местах Земли, где Луна в рассматриваемый момент восходит или заходит.

Горизонтальная составляющая приливных сил равна 0, когда Луна находится в зените, надире или на горизонте, и максимальна, когда зенитное расстояние Луны равно  $45^\circ$  и достигает 0,08 мгал:

$$F_h = 3/2G \frac{mr}{R^3} \sin 2\chi \quad (2)$$

Вариации ускорения свободного падения вследствие притяжения Луны рассчитывались по формуле

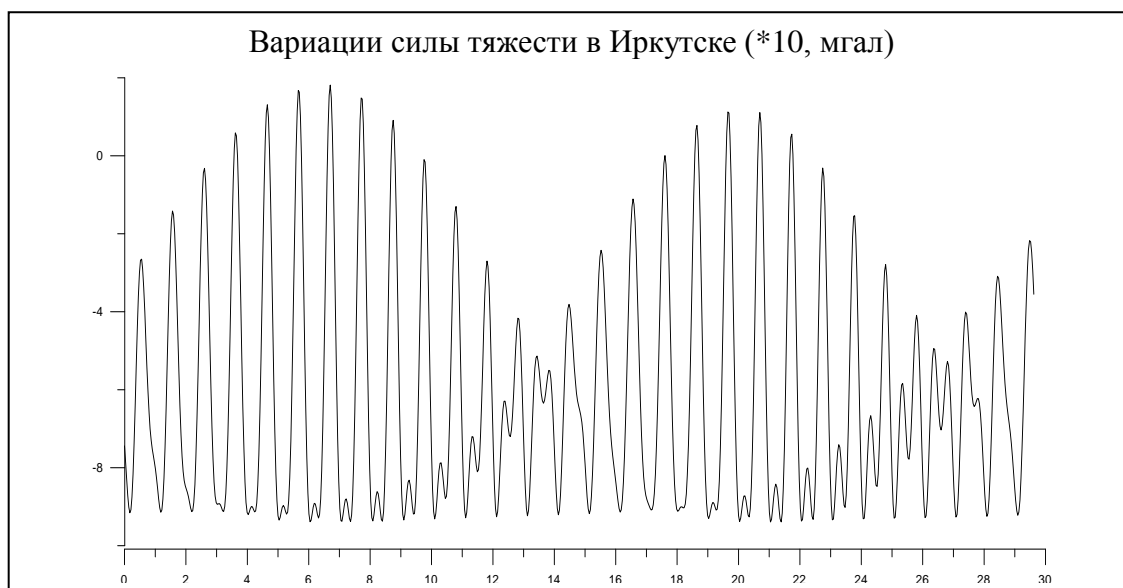
$$\frac{g_M}{g} \cong \frac{3GM_M \frac{R_E}{R_M^3} (\cos^2 \chi_M - 1/3)}{GM_E / R_E^2} = 9.64 \cdot 10^{-8} \left( \cos^2 \chi_M - 1/3 \right), \quad (3)$$

которая получена в рамках приближения гидростатического равновесия. При дальнейшем анализе мы использовали только относительные вариации  $g_M$ , и искали соответствующие периоды в экспериментальных данных.

Для обработки рядов наблюдений нами был использован алгоритм поиска периодичностей, основанный на идеологии текущих спектров переменных величин [9]. Преимуществом данного подхода является возможность исследования временных вариаций спектра величины, что

особенно важно при рассмотрении приливных волн, вариации которых зависят от сезона года и времени суток.

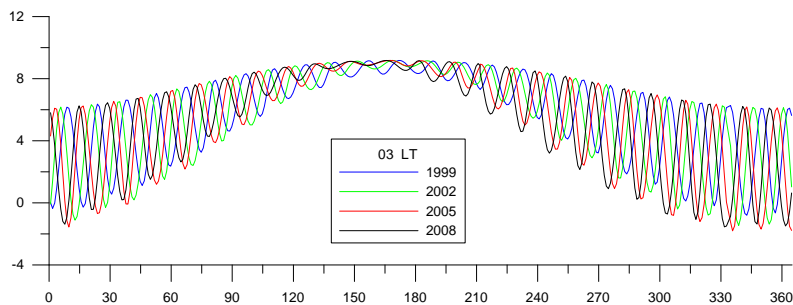
Пример приливных вариаций, рассчитанных по формуле (3) представлен на рис.1.



Вариации на рис.1 являются суперпозицией вариаций зенитного угла Луны и Солнца, и основными являются суточная, полусуточная, 14-дневная и 29-дневная гармоники. Текущий спектр приливных вариаций сравнивался с текущими спектрами параметров верхней атмосферы. На основе этого анализа были сделаны следующие выводы.

Спектр приливных колебаний является достаточно сложным, чтобы интерпретировать его в виде гармонической функции. Причиной того является полусуточная вариация (Рис.1), которая периодически изменяет эффективную частоту приливных колебаний. При наблюдении свечения в линии 558нм этот эффект отражается в резком усилении полусуточных колебаний, которое наблюдается с периодом около 3.5 суток. Такие колебания также характерны при наблюдениях мезосферы во время зимних стратосферных потеплений [7].

Рис.2 Интенсивность приливных волн ночной атмосфере



Сезонное распределение интенсивности приливных колебаний зависит от времени суток. Зимой наибольшая амплитуда волн проявляется ночью, летом – в дневные часы. На рис.2 приведены интенсивности приливных колебаний для ночных условий в Иркутске. Видно, что зимняя ночная атмосфера наиболее подвержена влиянию приливов. Так как наблюдения в оптическом диапазоне обычно проводятся именно в темное время суток, наиболее значимые результаты по приливным вариациям как раз относятся к зимнему периоду. Летом наблюдается обратная картина, и максимальная амплитуда приливных волн наблюдается в дневные часы. Эти вариации отчетливо наблюдаются в критических частотах и высоте максимума слоя F2 при вертикальном зондировании ионосферы, когда вариации этих параметров достигают десятков процентов.

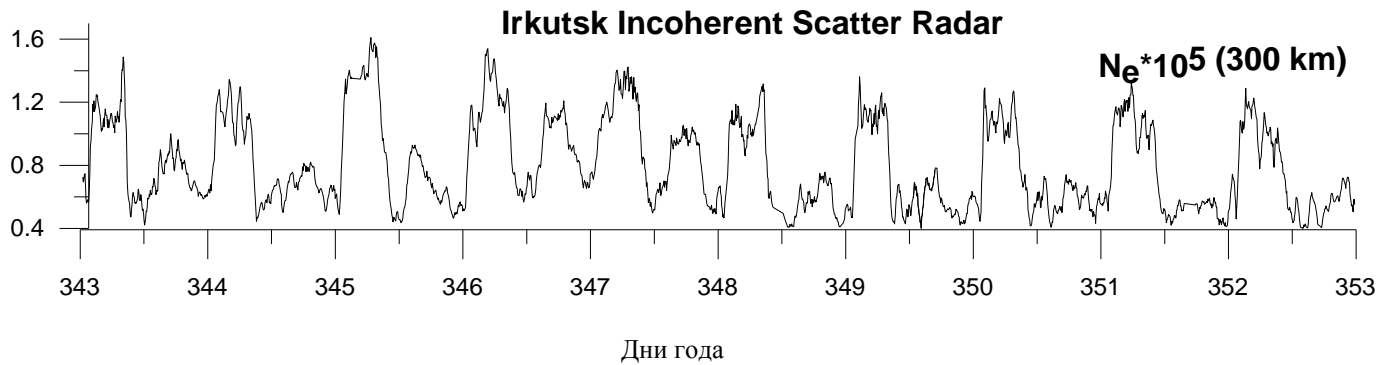


Рис.3 Межсуточные вариации электронной концентрации на высоте 300км.

На рис.3 представлены вариации концентрации электронов на высоте 300км по данным Иркутского радара некогерентного рассеяния в Декабре 2007 года. Начало каждого суток соответствует 8 часам локального времени, поэтому первый суточный максимум соответствует условиям дневной ионосферы, второй максимум соответствует ночному максимуму, который возникает вследствие притока плазмы из сопряженной летней ионосферы [10]. Из рисунка отчетливо видно волнообразное увеличение ночного максимума, который в 346 и 347 дни становится сравнимым по величине с дневным максимумом. В то же время дневные значения электронной концентрации таких вариаций не испытывают. Данный пример отчетливо показывает усиление ночной приливной волны. Хотя вариации параметров ионосферы обусловлены не непосредственно приливными силами, а сложным процессом, приводящим к изменению скорости меридионального нейтрального ветра, тем не менее ведущим механизмом этих вариаций является именно гравитационный прилив.

Эффект усиления приливных волн также наблюдался нами на данных полного электронного содержания системы GPS, в температурах мезосферы по данным прибора TIDI на спутнике AURA, в таких характеристиках ионосферы, как минимальная частота отражения по данным ионозондов. Рассмотренные процессы являются важным фактором атмосферной динамики, особенно в среднеширотной атмосфере, где приливные силы максимальны. В глобальном масштабе атмосферные приливы являются регуляторами общей циркуляции верхней атмосферы. Этот эффект наиболее выражен в изменения поля скоростей нейтрального ветра в мезосфере и стратосфере, которые исследовались нами по данным спутника SABER. Из данных измерений видно, что вариации интенсивности приливных волн приводят к циклической смене глобальной циркуляции, когда зональный ветер меняет свое направление на противоположное, нарушая стабильный западный перенос. В этих процессах большую роль играет долготная неоднородность приливной волны, инициирующая создание новых ячеек циркуляции.

В качестве основных выводов можно сформулировать следующие положения:

- 1) Наибольшее влияние на спектр долговременных вариаций параметров верхней атмосферы имеют волнообразные процессы, обусловленные изменением относительной фазы солнечного и лунного приливов, которые на средних широтах имеют максимальную амплитуду.
- 2) Атмосферные приливы часто являются не источником возмущения параметров атмосферы, а спусковым механизмом, запускающим генерацию новых ячеек циркуляции, которые повторяются циклически и перераспределяют энергию между разными областями верхней атмосферы.
- 3) Зарождаясь в нейтральной атмосфере, долгопериодные возмущения проявляются также на высотах ионосферы, где могут легко диагностироваться радиофизическими и оптическими методами. Связь разноплановых данных экспериментальных наблюдений в единую систему, управляемую приливными процессами является перспективной задачей физики верхней атмосферы.

#### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 09-05-00757.

**Литература:**

1. *Hocke K., Schlegel K.* A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982-1995 // *Ann. Geophys.*, 1996. Vol. 14. P. 917-940.
2. *Liu, H.-L., and R. G. Roble*, A study of a self-generated stratospheric sudden warming and its mesospheric–lower thermospheric impacts using the coupled TIME-GCM/CCM3, *J. Geophys. Res.*, 107(D23), 4695, doi:10.1029/2001JD001533, 2002.
3. *Rossby C. G. et al.* // *J. Mar. Res.* 1939. Vol. 2. P. 38.
4. *Siskind, D. E., L. Coy, and P. Espy (2005)*, Observations of stratospheric warmings and mesospheric coolings by the TIMED SABER instrument, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L09804, doi:10.1029/2005GL022399.
5. *Dowdy, A. J., R. A. Vincent, D. J. Murphy, M. Tsutsumi, D.M. Rigglin, and M. J. Jarvis (2004)*, The large-scale dynamics of the mesosphere–lower thermosphere during the Southern Hemisphere stratospheric warming of 2002, *Geophys. Res. Lett.*, 31, 14102, doi:10.1029/2004GL020282.
6. *Liu, H.-L., and R. G. Roble (2005)*, Dynamical coupling of the stratosphere and mesosphere in the 2002 Southern Hemisphere major stratospheric sudden warming, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L13804, doi:10.1029/2005GL022939.
7. *Azeem, S. M. I., E. R. Talaat, G. G. Sivjee, H.-L. Liu, and R. G. Roble (2005)*, Observational study of the 4-day wave in the mesosphere preceding the sudden stratospheric warming events during 1995 and 2002, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L15804, doi:10.1029/2005GL023393.
8. *Молоденский М. С.*, Упругие приливы, свободная нутация и некоторые вопросы строения Земли, //«Тр. Геофизического института АН СССР», 1953, № 19;
9. *Орлов И.И., Ильин Н.В.* О текущих спектрах сигналов // *Радиолокация. Навигация. Связь / Под ред. Борисова В.И.* Воронеж: Изд-во ВГУ, 2000. Т.1. С. 361-365.
10. *Mikhailov A.V., Förster M., Leschinskaya T.Yu.* On the mechanism of the post-midnight winter  $N_m F_2$  enhancements: dependence on solar activity, *Ann. Geophysicae*, V.18, 1422-1434, 2000.