

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКЛИКА ИОНОСФЕРЫ НА ВНЕЗАПНЫЕ СТРАТОСФЕРНЫЕ ПОТЕПЛЕНИЯ (ВСП) ПО ДАННЫМ СРЕДНЕШИРОТНЫХ СТАНЦИЙ

<sup>1</sup>А.В. Тимченко, <sup>1,2</sup>Ф.С. Бессараб, <sup>2</sup>Ю.Н. Кореньков, <sup>1,2</sup>О.П. Борчевкина, <sup>3</sup>К.Г. Ратовский

<sup>1</sup>Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия  
timchenko.leks@gmail.com

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

<sup>3</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

## STUDYING THE IONOSPHERIC RESPONSE TO SUDDEN STRATOSPHERIC WARMING (SSW), USING DATA FROM MID-LATITUDE STATIONS

<sup>1</sup>A.V. Timchenko, <sup>1,2</sup>F.S. Bessarab, <sup>2</sup>Y.N. Korenkov, <sup>1,2</sup>O.P. Borchevkina, <sup>3</sup>K.G. Ratovskiy

<sup>1</sup>Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia  
timchenko.leks@gmail.com

<sup>2</sup>Kaliningrad Branch of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS,  
Kaliningrad, Russia

<sup>3</sup>Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

**Аннотация.** В работе представлено исследование отклика ионосферного параметра во время внезапных стратосферных потеплений (ВСП). Цель работы состояла в том, чтобы проанализировать периоды вариаций критической частоты F2-слоя, которые могут ассоциироваться с периодами планетарных волн, возникающих в стратосфере в период ВСП. Для анализа были использованы средние значения  $f_oF2$ , измеренные на ионосферных станциях Калининград (54,6° N, 20° E) и Иркутск (53° N, 103° E) в периоды с декабря по март, для нескольких лет, в которые наблюдались сильные ВСП. Для всех рассматриваемых случаев общим является низкая солнечная активность. Для обнаружения во временной последовательности  $f_oF2$  колебаний с периодами планетарных волн нами применялся метод непрерывного вейвлет-преобразования. В работе особое внимание было уделено периодам: от 4 до 10 дней, 12–16 и 25–29.

**Ключевые слова:** внезапное стратосферное потепление, критическая частота F2-слоя, планетарные волны, вейвлет-анализ.

**Abstract.** The paper presents a study of the response of the ionospheric parameter during sudden stratospheric warming (SSW). The aim of the work was to analyze the periods of variations of the critical frequency of the F2-layer, which may be associated with the periods of planetary waves arising in the stratosphere during the SSW period. For the analysis, we used the average daily  $f_oF2$  values measured at the ionospheric stations Kaliningrad (54.6° N, 20° E) and Irkutsk (53° N, 103° E) in the periods from December till March, for several years in which strong SSW were observed. For all cases considered, low solar activity is common. To detect  $f_oF2$  oscillations with periods of planetary waves in a time sequence, we used the method of continuous wavelet transform. In the work, special attention was paid to periods: from 4 to 10 days, 12–16 and 25–29.

**Keywords:** SSW, planetary wave, critical frequency F2-region, wavelet analysis.

### ВВЕДЕНИЕ

Возросший интерес к проблеме волнового взаимодействия нижних слоев атмосферы и ионосферы связан с развитием измерительной техники и появлением новых экспериментальных данных [Mikhailov et al., 1998; Goncharenko, Zhang, 2008; Pancheva, Mukhtarov, 2011; Shpynev et al., 2015; Chernigovskaya et al., 2015]. Вопрос о связи метеорологических параметров и критических частот F-области ионосферы давно привлекает к себе внимание исследователей. Одной из причин, приводящей к изменению параметров ионосферы, могут являться внезапные стратосферные потепления (ВСП). Во время этого события происходит возбуждение волн различных масштабов, которые могут проникать до высот не только нижней термосферы, но и F2-области ионосферы. В настоящей работе мы ограничились исследованием сильных ВСП, так как влияние таких потеплений на параметры ионосферы должно быть нагляднее по сравнению со слабыми потеплениями. Даты, в которые были зафиксированы сильные ВСП были выбраны на основе критериев, приведенных в

работе [Palmeiro et al., 2015]. Полагая, что эффекты от ВСП в ионосфере могут маскироваться геомагнитными возмущениями, среди отобранных событий мы оставляли те, которые приходились на годы минимумов 11-летних циклов солнечной активности.

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОД

В настоящей работе используются данные наблюдений на ионосферных ст. Калининград и Иркутск за зимний период 1965/1966 гг., 1976/1977 гг., 1984/1985 гг., 1986/1987 гг., 2007/2008 гг. и 2008/2009 гг. Для последующего анализа использовались средние (с 10:00 LT до 14:00 LT) значения  $f_oF2$  за период декабрь–март.

Поиск осцилляций в вариациях  $f_oF2$  во время ВСП выполнялся с помощью непрерывного вейвлет-преобразования. В качестве базисной функции использовался вейвлет-Морле. Для наиболее наглядного представления результатов мы использовали квадраты вейвлет-коэффициентов разложения временного ряда  $f_oF2$ , которые имеют смысл спектральной энергии. Полученные коэффициенты затем

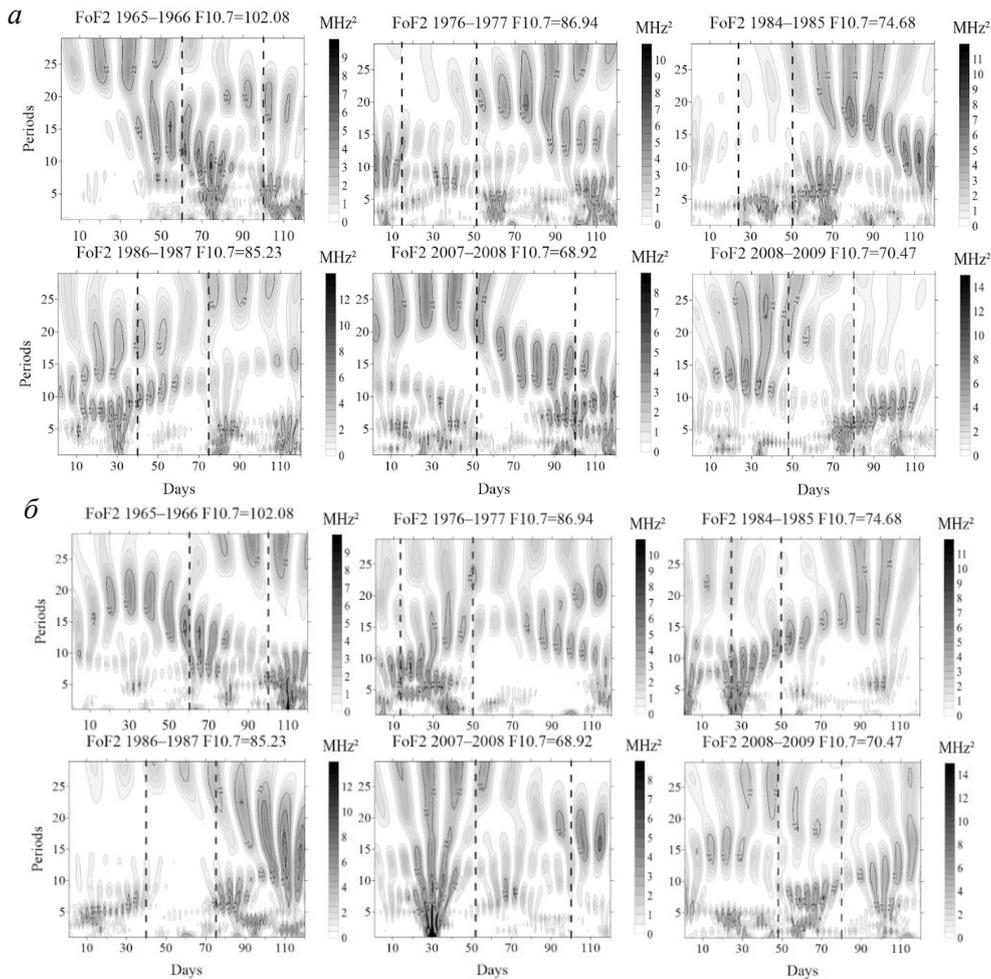


Рис. 1. Квадраты вейвлет-коэффициентов вариаций  $f_oF2$  для станции: *a* — Калининград, *б* — Иркутск. Пунктирными линиями выделены периоды потепления

были нормализованы с помощью метода LIM (Local Intermittency Measure) [Farge, 1992]:

$$LIM_{a,t_0} = \frac{|W(a, t_0)|^2}{\langle |W(a, t_0)|^2 \rangle_t},$$

где  $W(a, t_0)$  — коэффициент вейвлет-преобразования,  $a$  — период вариаций,  $t$  — время, угловые скобки означают усреднение.

Для определения моментов начала и окончания ВСП, нами использовались значения температуры на уровне 10 гПа (высота около 30 км) по данным базы реанализа Центра прогнозирования окружающей среды/национального центра атмосферных исследований (NCEP/NCAR) США [Kalnay et al., 1996].

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты вейвлет-анализа вариаций критической частоты слоя F2 для ионосферной станции Калининград, представлены на рис. 1, *a*. На горизонтальной оси отмечен номер дня, начиная с 1 декабря, на вертикальной — периоды колебаний в сутках. На рисунках наиболее отчетливо выражены колебания с периодами близкими к периоду и половине периода вращения Солнца (25–29 и 12–15 дней соответственно), а также колебания, периоды которых часто

связывают с планетарными волнами (4–10 дней).

Как видно на рис. 1 амплитуда 25–29 дневных колебаний уменьшается либо до, либо во время ВСП. Во время изучаемых зим периоды преобладающих по амплитуде колебаний плавно изменялись. На рисунке этот эффект наблюдается в виде характерных «трендов» — растущих или убывающих. Эти «тренды» могут менять свой характер в течение одной зимы, как например, в 1977 г. Во время ВСП в большинстве случаев присутствуют 12–15 дневные колебания, близкие к половине периода обращения Солнца, исключением являются зимы 1985 и 2009 гг. Изменение амплитуды 4–10 дневных колебаний, которые ассоциируются с планетарными волнами, носит также достаточно сложный характер. В разные годы для них видны как нисходящие, так и восходящие «тренды». Кроме того, в каждую из наблюдаемых зим наблюдается значительное уменьшение амплитуды 4–10 дневных колебаний, однако только в половине случаев эти эффекты приходятся на время потепления.

Поведение осцилляций  $f_oF2$  в Иркутске несколько отличается, однако общая тенденция сохраняется. Колебания с периодами 25–29 дней выражены не так ярко, как в Калининграде, но уменьшение амплитуды также наблюдается. Исключением является

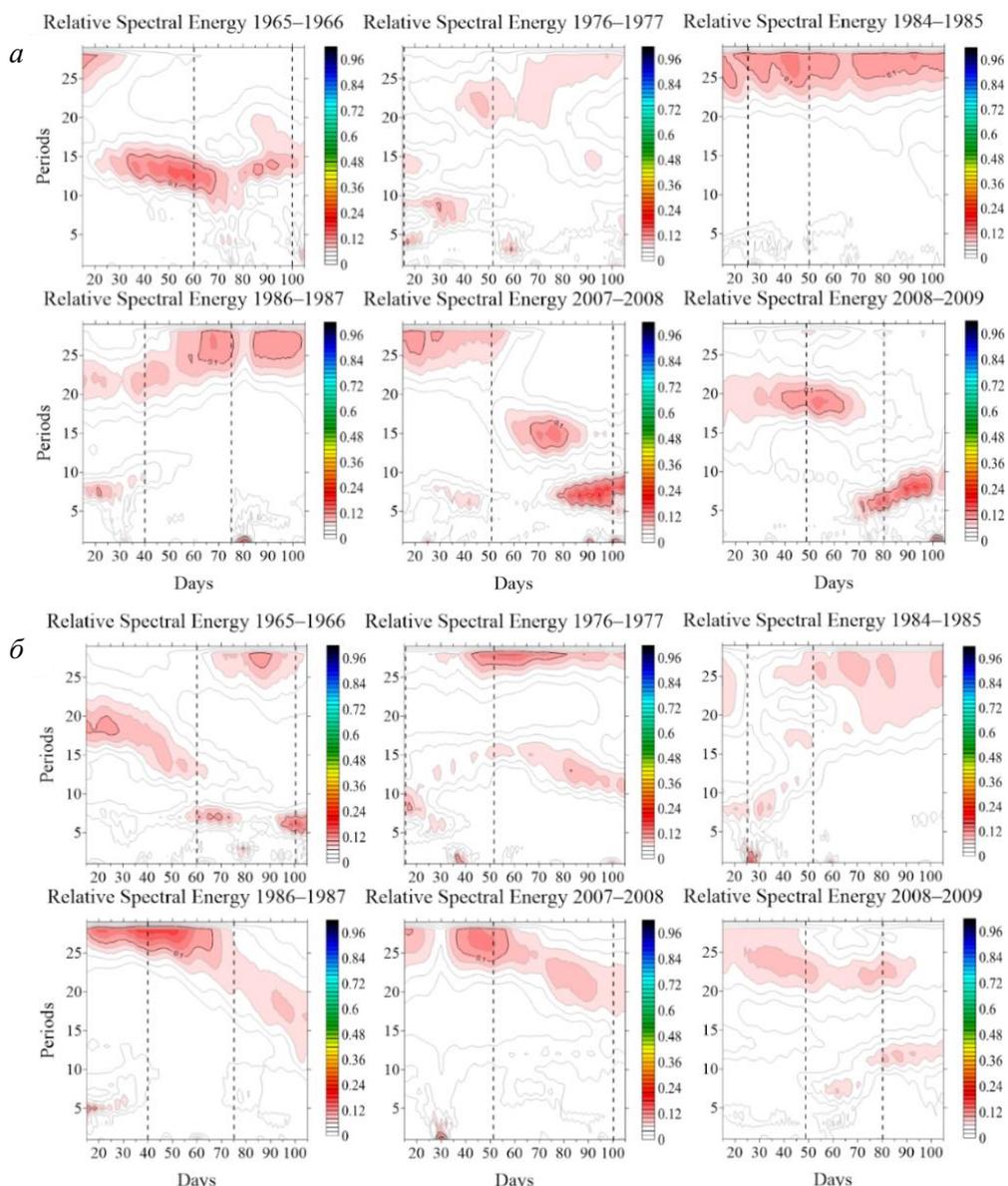


Рис. 2. Относительная спектральная энергия осцилляций  $f_0F_2$  для станции: *a* — Калининград, *б* — Иркутск. Пунктирными линиями выделены периоды потепления

зима 1977/1977 гг. В эту зиму амплитуда колебаний с периодами 25–29 дней не меняется, однако ее уровень достаточно низкий. Амплитуда 12–15 дневных колебаний близка к нулю только зимой 1987/1987 гг., а в остальные года колебания с такими периодами отчетливо выделяются. Как видно, по полученным результатам не удается точно выявить начало и конец сильных ВСП, можно лишь определить сам факт сильного потепления.

В качестве дополнительного анализа нами было рассмотрено поведение усредненной по периоду относительной спектральной энергии  $\varepsilon_\alpha = E_\alpha / (\sum_\alpha E_\alpha)$  осцилляций  $f_0F_2$ . Здесь:  $E_\alpha$  — вычисленная по методу скользящего среднего спектральная энергия за период  $\alpha$ . Изолинии относительной спектральной энергии для ст. Калининград представлены на рис. 2.

На графиках видно, что общим для всех зим является слабое проявление энергии гармоник с периодами 25–29 дней, исключением из общего ряда является зима 1984/1985 гг. Также видно увеличение

амплитуды энергии колебаний с периодами около 15 дней и 4–10 дней. Некоторые из них имеют убывающий или возрастающий «тренд».

В Иркутске поведение относительной спектральной энергии больше подвержено «трендам» нежели в Калининграде. Амплитуда энергии колебаний с периодами 25–29 дней также уменьшается и перераспределяется по другим более коротким периодам. Можно предположить, что данное поведение спектральной энергии характерно для зим с ВСП. Так, например, для зимы 1975/1976 гг. в которую солнечная активность также была низкой, но стратосферное потепление не фиксировалось, большая часть спектральной энергии стабильно приходилась на колебания с периодами 22–29 дней (рис. 3).

## ВЫВОДЫ

Вейвлет-анализ показал, что во временных вариациях  $f_0F_2$  преобладают колебания с периодами близкими к периоду вращения Солнца (25–29 дней),

Relative Spectral Energy 1975–1976

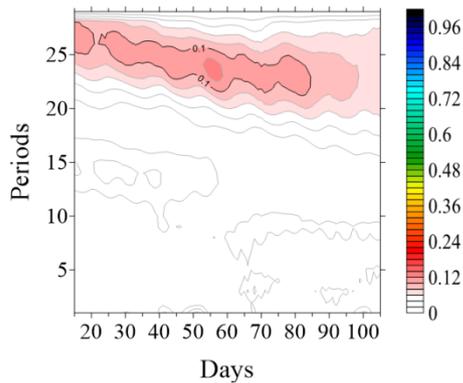


Рис. 3. Относительная спектральная энергия осцилляций  $f_oF2$  для станции Калининград для зимы 1975/1976 гг., в которую ВСП не происходило

половине этого периода (12–15 дней) и периодами, которые часто связывают с планетарными волнами (4–10 дней).

Квадраты вейвлет-коэффициентов колебаний с периодами 25–29 дней колебаний ослабевают либо перед, либо непосредственно во время сильного потепления. В это время происходит перераспределение спектральной энергии по другим гармоникам. У коэффициентов вейвлет-разложения соответствующих периодам 12–15 дней и 4–10 дней общих закономерностей в поведении не наблюдается. Дополнительную информацию об особенностях поведения  $f_oF2$  дает анализ относительной спектральной энергии колебаний, которая рассчитывалась для усредненных за период значений методом скользящего среднего. Кроме отмечавшегося ранее ослабления энергии колебаний с периодами 25–29 дней, видно как перераспределяется энергия осцилляций по периодам, в частности заметно увеличение спектральной энергии колебаний с периодами около 15 и 4–10 дней. Для ст. Иркутск поведение вариаций критической частоты  $f_oF2$  имеет схожий характер.

Вейвлет-анализ, выполненный для зим, в которых сильные ВСП не были зафиксированы, показал, что амплитуды колебаний  $f_oF2$  с периодами 25–29 дней, напротив, очень стабильны и меняются незначительно. Другой особенностью является небольшие величины вейвлет-коэффициентов для колебаний с периодами 4–10 дней, особенно в первую половину зимы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Ratovsky, K.G. Meteorological effects of ionospheric disturbances over Irkutsk according to vertical radio sounding data // *J. Atmos. Terr. Phys.* 2015. V. 136. P. 235–243. DOI: [10.1016/j.jastp.2015.07.006](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.07.006).
- Farge M. Wavelet transforms and their applications to turbulence // *Annual Review of Fluid Mechanics.* 1992. V. 24, N 1. P. 395–458.
- Goncharenko L., Zhang S.-R. Ionospheric signatures of sudden stratospheric warming: Ion temperature at middle latitude // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. L21103. DOI: [10.1029/2008GL035684](https://doi.org/10.1029/2008GL035684).
- Kalnay E., et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // *Bulletin of the American meteorological Society.* 1996. V. 77, N 3. P. 437–472.
- Mikhailov A., Vanina L., Danilov A. Relation between the Parameters of the Ionospheric F2 Region and the Stratosphere // *Geomagnetism and Aeronomy.* 1998. V. 38. P. 121–125.
- Palmeiro F.M., et al. Comparing sudden stratospheric warming definitions in reanalysis data // *Journal of Climate.* 2015. V. 28, N 17. P. 6823–6840.
- Pancheva D., Mukhtarov P. Stratospheric warmings: The atmosphere–ionosphere coupling paradigm // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2011. V. 73. P. 1697–1702.
- Shpynev B.G., Kurkin V., Ratovsky K., et al. High-midlatitude ionosphere response to major stratospheric warming // *Earth, Planets and Space.* 2015. DOI: [10.1186/s40623-015-0187-1](https://doi.org/10.1186/s40623-015-0187-1).