

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ИОНОСФЕРЫ В ПЕРИОДЫ ВНЕЗАПНЫХ СТРАТОСФЕРНЫХ ПОТЕПЛЕНИЙ В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ РОССИИ

А.С. Полякова, А.А. Мыльникова

### STUDY OF THE IONOSPHERIC DYNAMICS DURING SUDDEN STRATOSPHERIC WARMINGS IN ARCTIC REGION OF RUSSIA

A.S. Polyakova, A.A. Mylnikova

Проведено исследование динамики ионосферы в Арктическом регионе России в периоды внезапных стратосферных потеплений (ВСП) с использованием данных вертикального зондирования и данных полного электронного содержания (ПЭС), полученных по измерениям GPS/ГЛОНАСС. Для выявления возможной реакции ионосферы на события ВСП выполнен анализ отклонений ПЭС и электронной концентрации F2-слоя ионосферы от фонового уровня. Показано, что в спокойных геомагнитных условиях динамика высокоширотной ионосферы в периоды ВСП существенно отличается от регулярной. Выявлено, что потепления, произошедшие в середине зимы, в периоды их развития сопровождаются уменьшением значений электронной концентрации F2-слоя и ПЭС и ростом указанных параметров после максимума ВСП.

The behavior of the ionosphere in Russia's Arctic region during periods of strong sudden stratospheric warmings was investigated using vertical sounding data and data of the total electron content (TEC) from the international network of phase dual-frequency GPS/GLONASS receivers. For identifying a possible response of the high-latitude ionosphere to SSW events the analysis of the F2-layer electron density and TEC deviations from the background levels was done. The dynamics of the high-latitude ionosphere at the points located near the SSW zone during the periods of warmings was found to differ from the regular. It is also identified that SSW events, occurring in middle winter, during its development stage are usually accompanied by a decrease in the F2-layer electron density and TEC and by an increase in these parameters after the SSW peak.

#### Введение

Внезапными стратосферными потеплениями (ВСП) называют сильные непредсказуемые повышения температуры ( $\geq 50^\circ$ ) в зимней полярной и околополярной стратосфере, продолжающиеся в течение нескольких суток или недель и охватывающие большую часть полушария. Сильные (major) потепления характеризуются сменой знака меридионального градиента температуры над полушарием и направления зональной стратосферной циркуляции с западного на восточное. Происходит ослабление или разрушение циркумполярного вихря, определяющего в существенной степени динамику полярной и околополярной средней атмосферы в зимние месяцы. Развитие ВСП обуславливается интенсификацией и проникновением из тропосферы планетарных волн и их взаимодействием с западным стратосферным потоком. Результатом такого взаимодействия является диссипация волн с выделением большого количества волновой энергии, что приводит к увеличению температуры стратосферы [Matsuno, 1971]. В свою очередь, усиление волновой активности и существенные изменения атмосферной циркуляции в периоды ВСП могут оказывать влияние на состояние ионосферной плазмы. Различные ионосферные эффекты ВСП выявлены и проанализированы в экваториальной [Goncharenko et al., 2010; Pancheva, Mukhtarov, 2011; Sumod et al., 2012] и среднеширотной [Polyakova et al., 2014] областях. Целью данной работы являлось изучение вариаций ионосферы в арктическом регионе России во время стратосферных потеплений, произошедших в период с 2006 по 2013 гг.

#### 1. Внезапные стратосферные потепления в 2006–2013 гг.

В период с 2006 по 2013 гг. в Северном полушарии произошло шесть стратосферных потеплений

типа major. Максимумы данных событий (день реверса ветра на уровне 10 гПа) регистрировались: в 2005/2006 гг. – 21 января, 2006/2007 – 24 февраля, 2007/2008 – 22 февраля, 2008/2009 – 24 января, 2009/2010 – 9 февраля и в 2012/2013 гг. – 6 января. Все события ВСП, за исключением потепления 2008/2009 гг., характеризовались смещением стратосферного циклона к более низким широтам и формированием полярного антициклона. Центр (область наибольшего повышения температуры в стратосфере) указанных потеплений располагался в азиатском регионе России. В течение ВСП 2008/2009 гг. произошло разделение циркумполярного вихря на две чередующиеся пары циклонов и антициклонов. Центр этого потепления располагался над северной частью атлантического океана. ВСП типа minor регистрировались практически каждую зиму. Максимумом ВСП типа minor считался день, в который в регионе Норильска наблюдалась наибольшая температура стратосферы на уровне 10 гПа (~30 км).

Выбранные для исследования годы характеризовались относительно низкой солнечной и геомагнитной активностью, и в периоды максимального развития рассматриваемых потеплений геомагнитных возмущений не регистрировалось.

#### 2. Динамика $N_m F_2$ в Норильске

Для исследования поведения полярной ионосферы в периоды ВСП использовались данные вертикального зондирования, полученные на дигизонде в Норильске (88.3° E, 69.3° N). Из исходных данных максимальной электронной концентрации F2-слоя ( $N_m F_2$ ) рассчитывались ряды отклонений от фонового уровня  $dN_m F_{2i}(t) = N_m F_{2i}(t) - \langle N_m F_2 \rangle_i(t)$ . Фоновые величины  $\langle N_m F_2 \rangle(t)$  вычислялись путем усреднения значений  $N_m F_2$  за 15 геомагнитно спокойных дней до и 15 после каждого текущего дня:

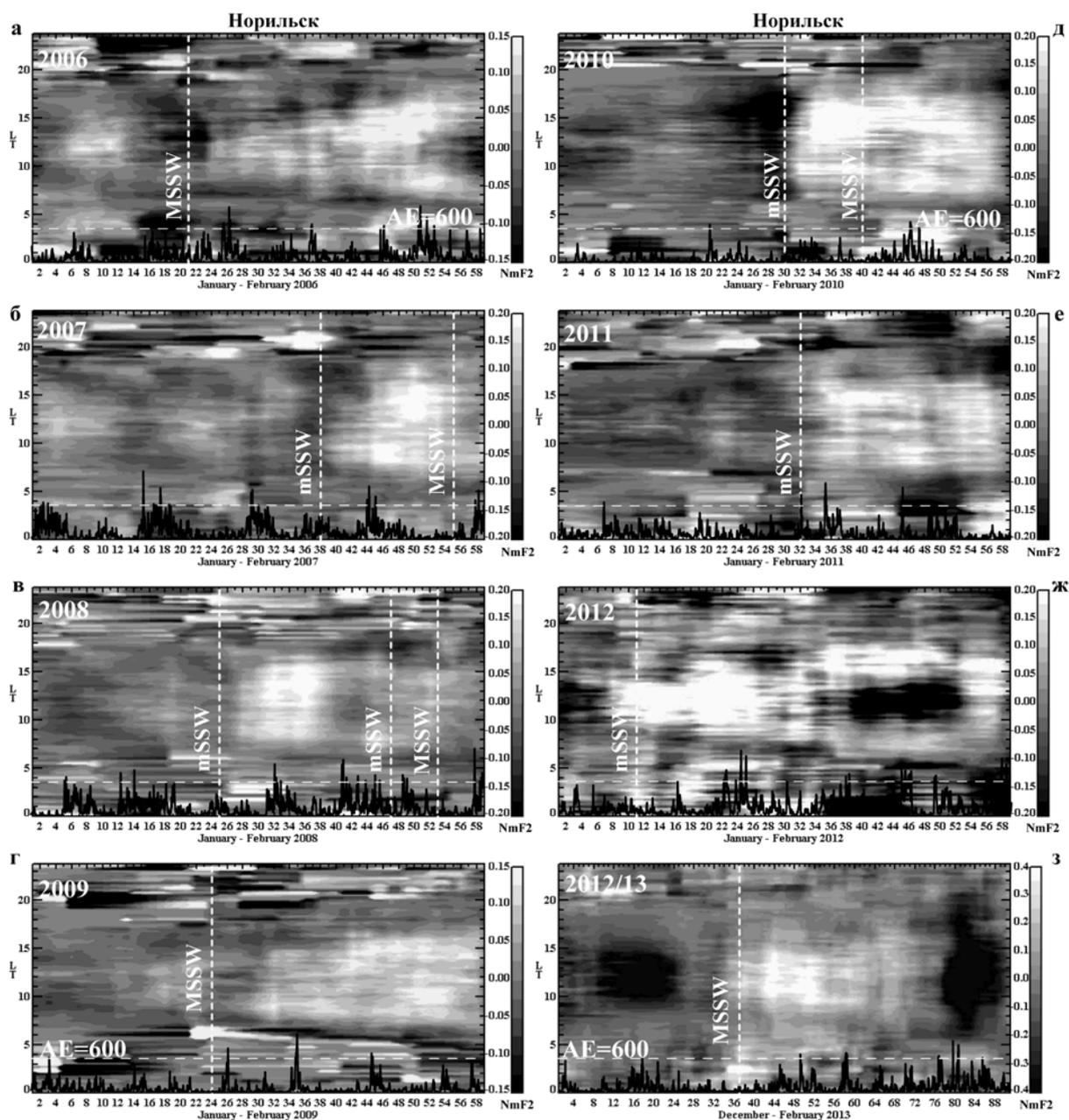


Рис. 1. Динамика отклонений  $N_m F2$  от фонового уровня, пунктирами показаны максимумы ВСП типа major (MSSW) и minor (mSSW). Черной кривой на каждой панели нанесены вариации индекса AE.

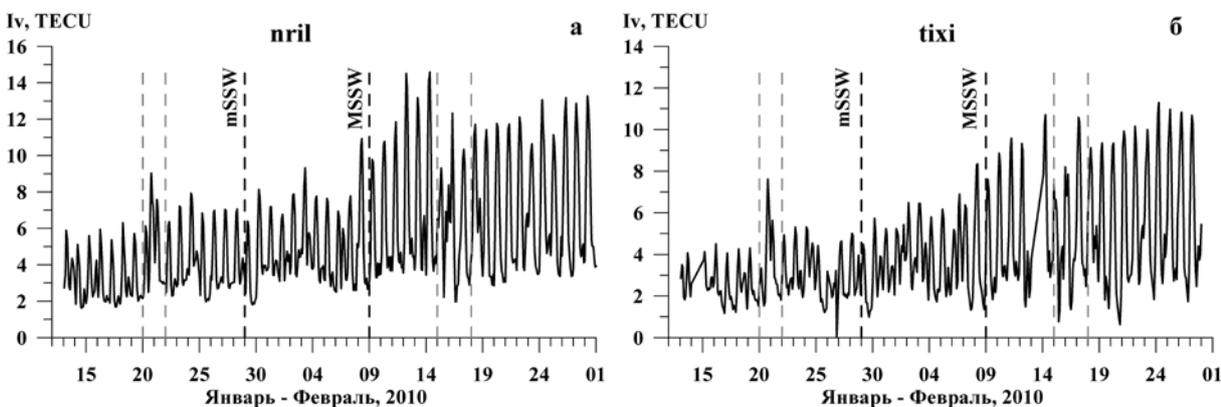


Рис. 2. Распределения ПЭС на станциях nril (а) и tixi (б) в январе–феврале 2010 г., черными пунктирами показаны максимумы ВСП типа major (MSSW) и minor (mSSW), серыми пунктирами выделены дни слабых геомагнитных возмущений ( $K_p \leq 4$ ).

$$\langle N_m F2 \rangle_i(t) = \frac{1}{30} \sum_{j=i-15}^{i+15} N_m F2(t).$$

Суточно-временная динамика полученных отклонений в зимние периоды 2006–2013 гг. показана на рис. 1. На каждой панели по вертикали отложено местное время, по горизонтали – дни с января по февраль каждого года (с декабря по февраль для зимы 2012/2013 гг., рис. 1, з). Видно, что на протяжении фазы развития потеплений (10–15 дней до максимума ВСП) регистрируются отрицательные отклонения  $N_m F2$  в дневные часы, т. е. значения электронной концентрации в F2-слое были пониженными относительно фона в этот период. Для большинства событий в вечерние и утренние часы отклонения  $N_m F2$ , напротив, положительные. После максимумов ВСП (как типа major, так и minor) в околополуденные часы на протяжении 10–15 дней регистрируются значительные положительные отклонения  $N_m F2$ , что говорит о существенном превышении максимальной электронной концентрации относительно фоновых значений. Подобное поведение  $dN_m F2$  наблюдается для всех рассмотренных событий ВСП, за исключением потепления зимы 2008/2009 гг. После максимума этого ВСП значения  $dN_m F2$  в дневные часы были отрицательными, а интенсивность отклонений была заметно ниже в сравнении с величинами, регистрируемыми в периоды других ВСП (рис. 1, з). Это может быть связано с отличиями данного события, описанными в разделе 1.

Следует отметить, что подобных вариаций состояния ионосферы во время ВСП типа major, произошедших в конце зимы, не наблюдается (2007, 2008 гг., рис. 1 б, в). Это может быть связано с тем, что в конце зимы освещение полярной ионосферы существенно увеличивается и электронная концентрация ионосферы значительно возрастает относительно уровня, характерного в малоосвещенный зимний период. Поэтому состояние ионосферы начинает в большей степени контролироваться вариациями солнечной радиации, и слабые эффекты, связанные с нейтральной атмосферой, не проявляются.

### 3. Полное электронное содержание

Анализ вариаций полного электронного содержания (ПЭС) проводился на основе данных фазовых двухчастотных приемников GPS/ГЛОНАСС сети IGS [Dow et al., 2009], расположенных в исследуемом регионе. Из исходных данных рассчитывались ряды вертикального ПЭС по методике, описанной в [Yasyukevich et al., 2015]. Пример полученных распределений на высокоширотных станциях nril (88.36° E, 69.36° N) и tixi (128.86° E, 71.63° N) в январе–феврале 2010 г. показан на рис. 2. В течение фазы развития потепления наблюдается небольшое снижение суточного максимума ПЭС, а также увеличение ночных величин ПЭС. После максимума ВСП в течение 5–6 дней отмечается существенный рост ПЭС: дневные значения  $I_v$  практически в два раза превышают величины ПЭС, регистрируемые до максимума потепления. В периоды других сильных ВСП, за исключением событий, происходивших в конце зимы, поведение ПЭС было аналогичным.

Таким образом, динамика ПЭС и  $N_m F2$  в периоды ВСП в целом оказывается схожей.

### 4. Заключение

Анализ поведения высокоширотной ионосферы в зимние месяцы 2006–2013 гг. показал, что, несмотря на спокойную геомагнитную обстановку, в периоды внезапных стратосферных потеплений наблюдаются существенные изменения состояния ионосферы. Во время фазы развития потеплений отмечается уменьшение дневных значений  $N_m F2$  и ПЭС, ночные значения, напротив, увеличиваются. После максимума ВСП регистрируется существенный рост указанных параметров. Для событий ВСП, произошедших в конце зимы, реакции ионосферы на стратосферные потепления выявить не удастся.

Ионосферные эффекты ВСП могут быть связаны с изменениями вертикального переноса молекулярного газа в нижнюю термосферу из стратосферы, возникающими в области развития ВСП, а также состава нейтральной атмосферы, которые отражаются на электронной концентрации. На ионосферную динамику также может оказывать влияние усиление интенсивности стационарных планетарных волн, сопровождающее события ВСП.

Авторы благодарят Ратовского К.Г. за предоставленные данные вертикального зондирования станции Норильск, а также сотрудникам Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC) за данные GPS. Работа выполнена в рамках гранта № НШ-2942.2014.5 Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ и при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований грант № 15-05-05227\_а.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Dow J.M., Neilan R. E., Rizos C. The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems // *J. Geodesy*. 2009. V. 83, n 3–4. P. 191–198. DOI: 10.1007/s00190-008-0300-3.
- Goncharenko L.P., Chau J.L., Liu H.L., Coster A.J. Unexpected connections between the stratosphere and ionosphere // *Geophys. Res. Lett.* 2010. V. 37. L10101.
- Matsuno T. A dynamical model of the Stratospheric Sudden Warming // *J. Atm. Sci.* 1971. V. 28. P. 1479–1494.
- Pancheva D., Mukhtarov P. Stratospheric warmings: The atmosphere–ionosphere coupling paradigm // *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* 2011. V. 73. P. 1697–1702.
- Polyakova A.S., Chernigovskaya M.A., Perevalova N.P. Ionospheric Effects of Sudden Stratospheric Warmings in Eastern Siberia Region // *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* 2014. V. 120. P. 15–23. DOI: 10.1016/j.jastp.2014.08.011.
- Sumod S.G., Pant T.K., Jose Lijo, Hossain M.M., Kumar K.K. Signatures of Sudden Stratospheric Warming on the Equatorial Ionosphere-Thermosphere System // *Planet. Space Sci.* 2012. V. 63–64. P. 49–55.
- Yu.V. Yasyukevich, A.A. Mylnikova, A.S. Polyakova. Estimating the total electron content absolute value from the GPS/GLONASS data // *Res. in Phys.* 2015. V. 5. P. 32–33. DOI: 10.1016/j.rinp.2014.12.006.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия