

**Возмущения минимальной частоты отражений на ионограммах и температуры верхней атмосферы во время зимних внезапных стратосферных потеплений по данным измерений в Восточной Сибири**

И.В. Медведева, К.Г. Ратовский

Институт солнечно-земной физики СО РАН  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126А, а/я 291  
E-mail: [ivmed@iszf.irk.ru](mailto:ivmed@iszf.irk.ru), [ratovsky@iszf.irk.ru](mailto:ratovsky@iszf.irk.ru)

*Представлены результаты исследования возмущений минимальной частоты отражений на ионограммах  $f_{min}$  и температуры атмосферы на высотах верхней мезосферы и нижней термосферы (МНТ) во время зимних внезапных стратосферных потеплений (ВСП) в 2008 и 2013 гг по данным измерений в Восточной Сибири. Для анализа использованы данные вертикального зондирования на иркутском ионозонде DPS-4 и данные спутниковых (Aura MLS) и наземных спектрометрических измерений температуры атмосферы. Выявлено, что вариации  $f_{min}$  во время анализируемых ВСП показывают высокую степень корреляции с температурой атмосферы на высоте 92 км.*

*Ключевые слова: внезапное стратосферное потепление; ионосфера; атмосфера; атмосферо-ионосферное взаимодействие*

**Disturbances in the minimum frequency of ionogram echoes and upper atmospheric temperature during winter sudden stratospheric warmings from the measurements in Eastern Siberia**

I.V. Medvedeva, K.G. Ratovsky

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS.*

*We present the results of studying of disturbances in the minimum frequency of ionogram echoes ( $f_{min}$ ) and the temperature of the atmosphere at the heights of the upper mesosphere and lower thermosphere (MLT) during the winter sudden stratospheric warmings (SSW) in 2008 and 2013 from the measurements in Eastern Siberia. The analysis is based on the vertical sounding data from the Irkutsk ionosonde DPS-4 and data from satellite (Aura MLS) and ground-based spectrometric measurements of the atmospheric temperature. It was revealed, that  $f_{min}$  variations during the analyzed SSWs show a high degree of correlation with atmospheric temperature at 92 km.*

*Keywords: sudden stratospheric warming; ionosphere; atmosphere; atmosphere-ionosphere coupling*

**Введение**

Исследование отклика верхней нейтральной атмосферы и ионосферы на экстремальные события в нижележащих атмосферных слоях является одной из важнейших задач физики околоземного космического пространства. Зимнее внезапное стратосферное потепление (ВСП) является наиболее значительным метеорологическим возмущением, охватывающим большие пространственные и временные масштабы и приводящим к нарушениям термодинамического режима в большом диапазоне высот атмосферы. Значительные события ВСП оказывают заметное влияние на верхнюю нейтральную атмосферу и ионосферу. В наших предыдущих исследованиях был проведен анализ эффектов ВСП на высотах области мезопаузы и в F2-области ионосферы [1, 2].

Целью настоящей работы являлся комплексный анализ эффектов ВСП в 2008 и 2013 гг. в нижней ионосфере и в области мезосферы-нижней термосферы (МНТ), который имеет практическое значение для оценки возрастания поглощения коротких радиоволн во время зимних внезапных стратосферных потеплений. Для анализа использованы данные о минимальной частоте отражений на ионограммах ( $f_{min}$ ), т.е. наименьшей частоте, при которой на ионограмме вертикального зондирования наблюдаются следы отражений от ионосферы. В работе проведен корреляционный анализ вариаций  $f_{min}$  и температуры области МНТ во время событий ВСП в 2008 и 2013 гг.

### **Используемые данные и метод анализа**

В работе использованы экспериментальные данные, полученные на комплексе инструментов Института солнечно-земной физики СО РАН (ИСЗФ СО РАН) и спутниковые данные Aura MLS. Для анализа ионосферных эффектов ВСП были использованы данные о наименьшей частоте отражений на ионограмме ( $f_{min}$ ), полученные при помощи вертикального зондирования на иркутском ( $52.3^\circ \text{ N}$ ,  $104.3^\circ \text{ E}$ ) ионозонде DPS-4. Анализировались средние дневные значения  $f_{min}$ , а также возмущения  $\Delta f_{min}$ , представляющие собой относительную разницу между наблюдаемыми значениями и значениями скользящей 27-дневной медианы. Для анализа проявления эффектов ВСП на высотах МНТ использованы спутниковые данные измерений вертикальных профилей температуры атмосферы Aura MLS (<http://disc.gsfc.nasa.gov/Aura>) и данные о вращательной температуре молекулы гидроксила (полоса OH(6-2), 834.0 нм,  $\sim 87$  км), получаемой из спектрометрических измерений в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН ( $51.8^\circ \text{ N}$ ,  $103.1^\circ \text{ E}$ , Торы). Вращательная температура молекулы гидроксила отображает температуру атмосферы на высотах мезопаузы. Анализировались остаточные вариации температуры OH после удаления сезонного тренда, рассчитанного по методу наименьших квадратов. Данные о вращательной температуре молекулы OH анализировались только для ВСП 2013, поскольку во время более ВСП 2008 регулярных спектрометрических наблюдений эмиссии гидроксила не проводилось. К анализу были привлечены также данные реанализа MERRA-2 о температуре и динамике средней атмосферы северного полушария (<http://gmao.gsfc.nasa.gov/research/merra/>).

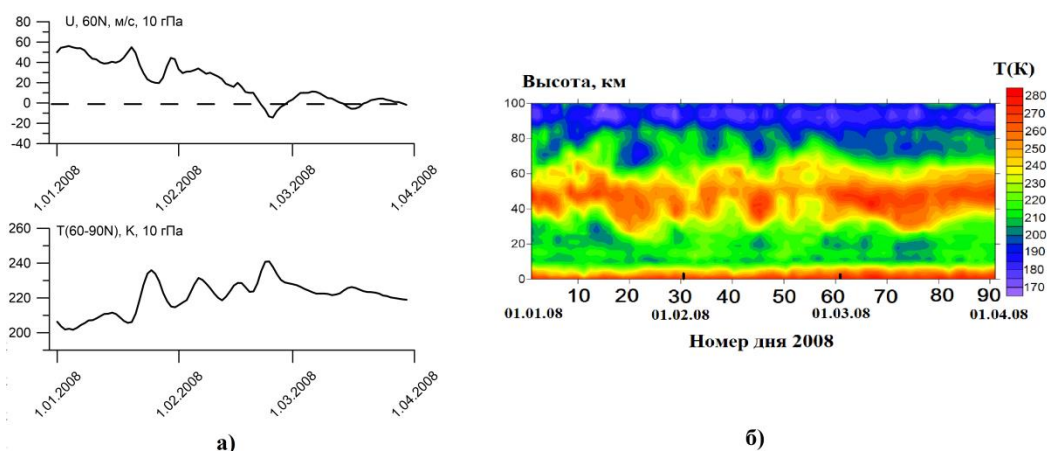
Для исследования связи  $f_{min}$  с температурой атмосферы (Т) был проведен корреляционный анализ межсуточных вариаций  $f_{min}$  и температуры на различных высотах области МНТ. Для исследования были выбраны события зимних внезапных стратосферных потеплений в январе-феврале 2008 и январе 2013 гг.

### **Результаты и обсуждение**

#### **Зимнее внезапное стратосферное потепление 2008**

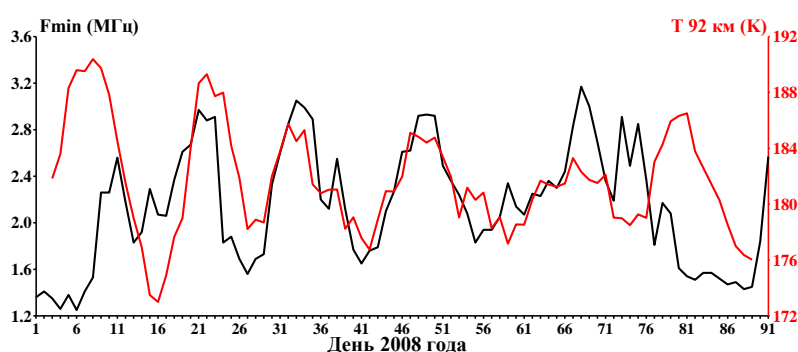
На рис. 1(а) представлены вариации зональных характеристик стратосферы на высотном уровне 10 гПа ( $\sim 32$  км) по данным реанализа MERRA-2: средний зональный ( $60^\circ$  с.ш.) ветер (верхняя панель) и средняя зональная ( $60\text{--}90^\circ$  с.ш.) температура (нижняя панель) для временного интервала 01.01.-01.04.2008 г. Анализ зональных характеристик средней атмосферы над северным полушарием показал, что в январе-феврале 2008 г. в северном полушарии произошло четыре события ВСП, из которых последнее сопровождалось изменением направления среднего зонального ветра на  $60^\circ$  с.ш. и высотном уровне 10 гПа с западного на восточное в период 22-28.02.2008 г., и может быть классифицировано как значительное (major) ВСП (рис.1(а)). Наибольшие значения средней зональной температуры для анализируемого временного интервала наблюдались 25.01, 06.02, 17.02 и 24.02. Для анализа температуры атмосферы над

Иркутском были использованы спутниковые данные Aura MLS для дневных пролетов спутника над анализируемым регионом. Анализ спутниковых данных показал, что во время ВСП в январе-феврале 2008 г. наблюдались значительные возмущения температуры средней атмосферы (Рис.1(б)).



**Рис. 1. а) зональные характеристики стратосферы на высотном уровне 10 гПа (~32 км) по данным реанализа MERRA-2: средний зональный (60° с.ш.) ветер (верхняя панель); средняя зональная (60–90° с.ш.) температура (нижняя панель); б) высотные профили температуры атмосферы по данным Aura MLS для дневных пролетов спутника в анализируемом регионе. Анализируемый временной интервал 01.01.-01.04.2008 г.**

Корреляционный анализ межсуточных вариаций минимальной частоты отражений  $f_{min}$  и температуры атмосферы  $T$ , полученной по данным Aura MLS на различных высотных уровнях области МНТ, показал следующее. Наилучшая корреляция (наибольшая и положительная) получена для  $T$  на 92 км ( $T_{92}$ ). Этот результат согласуется с результатами работы [Siskind et al., 2017], где на основе численного моделирования было показано, что максимальное дифференциальное поглощение на частоте 5 МГц находится в нижней части Е-слоя (около 95 км). На рис. 2 представлены межсуточные вариации среднедневных значений  $f_{min}$  (черный) и  $T_{92}$  (красный).

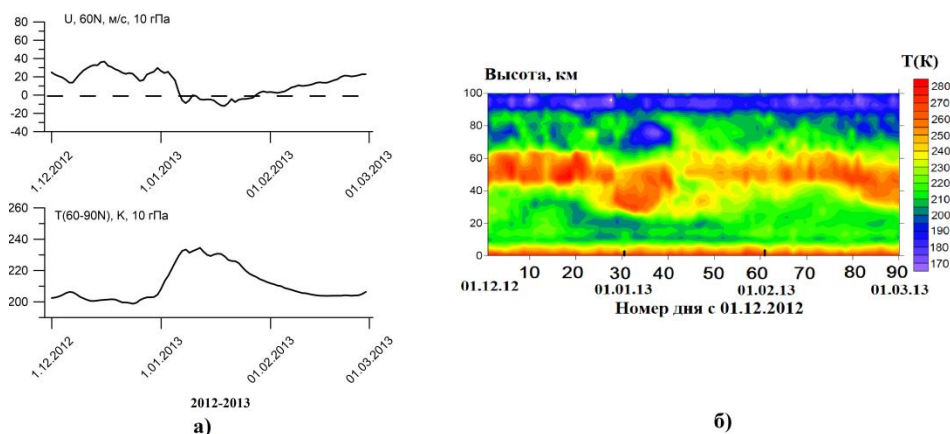


**Рис. 2. Межсуточные вариации среднедневных значений  $f_{min}$  (черным) и вариации температуры атмосферы на 92 км ( $T_{92}$ , красным) для 01.01-01.04.2008 г.**

Максимальный коэффициент корреляции  $R=0.89$  получен для интервала 27.01-26.02.26 (дни 27-57). При расширении интервала (17.01-12.03, дни 17-72)  $R$  уменьшается до 0.62. Таким образом, высокая корреляция между  $f_{min}$  и  $T_{92}$  во время ВСП 2008 может свидетельствовать о том, что изменения температуры атмосферы являются основным фактором, воздействующим на изменения  $f_{min}$ . Коэффициент

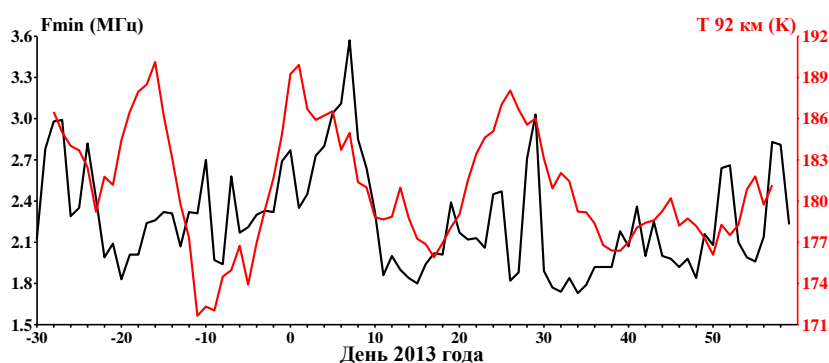
детерминации  $R^2 = 0.79$  означает ~80% вклад температуры в изменения  $f_{min}$ , а, следовательно, и поглощения коротких радиоволн.

### Зимнее внезапное стратосферное потепление 2013



**Рис. 3. а) зональные характеристики стратосферы на высотном уровне 10 гПа (~32 км) по данным реанализа MERRA-2: средний зональный (60° с.ш.) ветер (верхняя панель); средняя зональная (60–90° с.ш.) температура (нижняя панель); б) высотные профили температуры атмосферы по данным Aura MLS для дневных пролетов спутника в анализируемом регионе. Анализируемый временной интервал 01.12.2012-01.03.2013 г.**

Зимнее внезапное стратосферное потепление в январе 2013 г. относится к типу значительных (major) ВСП. На рис. 3(а) показаны вариации зональных характеристик стратосферы на высотном уровне 10 гПа (~32 км) по данным реанализа MERRA-2: средний зональный (60° с.ш.) ветер (верхняя панель) и средняя зональная (60–90° с.ш.) температура (нижняя панель) для временного интервала 01.12.2012-01.03.2013 г. С конца декабря 2012 г. наблюдался рост средней зональной температуры на ~35 К, максимальное значение 235 К зарегистрировано 12.01. Изменение направления среднего зонального ветра произошло в период 06-28.01.2013 г. (рис.3(а)). На рис. 3(б) показаны возмущения температуры атмосферы над Иркутском по спутниковым данным Aura MLS.

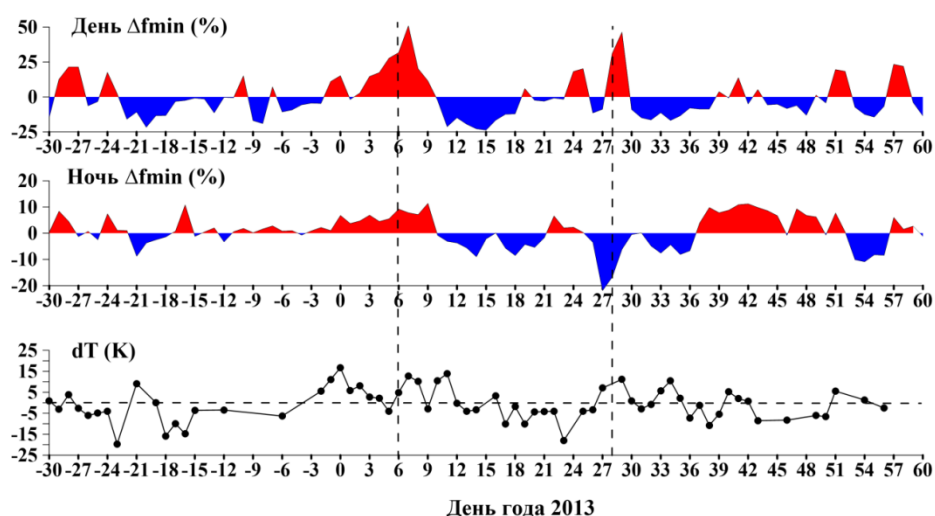


**Рис. 4. Межсуточные вариации среднедневных значений  $f_{min}$  (черным) и вариации температуры атмосферы на 92 км ( $T_{92}$ , красным) для 01.12.2012-01.03.2013 г.**

Корреляционный анализ межсуточных вариаций  $f_{min}$  и  $T$  на различных высотах области МНТ для ВСП 2013 был реализован так же, как и для ВСП 2008. Аналогично событию 2008 г., наилучшая корреляция (наибольшая и положительная) была выявлена

для Т на 92 км (Т92). На рис. 4 показаны межсуточные вариации среднедневных значений  $f_{min}$  и вариации Т92 для ВСП 2013 г. Наибольший коэффициент корреляции  $R=0.66$  получен для интервала 03-25.01, дни 03-25. Коэффициент детерминации  $R^2 = 0.44$  может быть интерпретирован как 44% вклад температуры в изменения  $f_{min}$ , а, следовательно, и поглощения коротких радиоволн.

На рис. 5 показаны вариации возмущений дневных (верхняя панель) и ночных (средняя панель)  $\Delta f_{min}$  и остаточные вариации температуры области мезопаузы (нижняя панель), полученные по данным измерений эмиссии ОН, для временного интервала 1.12.2012-1.03.2013. Межсуточные вариации температуры обусловлены в основном влиянием планетарных волн. Анализ показал, что в период наиболее значительных возмущений температуры и динамики средней атмосферы и реверса среднего зонального ветра во время ВСП 2013 (рис. 3(а)), наблюдалось усиление изменчивости  $\Delta f_{min}$  и  $\Delta T$  (рис. 5), что может быть вызвано интенсификацией активности планетарных волн в верхней атмосфере во время ВСП.



**Рис. 5. Вариации возмущений дневных (верхняя панель) и ночных (средняя панель) значений  $\Delta f_{min}$  и остаточные отклонения температуры мезопаузы  $dT$  (нижняя панель) после исключения сезонных вариаций, анализируемый временной интервал 1.12.2012-1.03.2013. Вертикальные линии отмечают даты смены направления зонального ( $60^\circ$ с.ш., 10 гПа) ветра**

### Заключение

Проведено исследование возмущений минимальной частоты отражений на ионограммах и температуры верхней атмосферы во время зимних внезапных стратосферных потеплений в январе-феврале 2008 и январе 2013 гг. Данные  $f_{min}$  получены при помощи вертикального зондирования на иркутском ( $52.3^\circ$  N,  $104.3^\circ$  E) ионозонде DPS-4. Для анализа проявления эффектов ВСП на высотах МНТ использованы спутниковые данные измерений вертикальных профилей температуры атмосферы Aura MLS и данные о вращательной температуре молекулы гидроксила (полоса ОН(6-2), 834.0 нм,  $\sim 87$  км), получаемой из спектрометрических измерений в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН ( $51.8^\circ$ N,  $103.1^\circ$ E, Торы).

Обнаружены высокая степень корреляции  $f_{min}$  с температурой атмосферы на высоте 92 км во время анализируемых ВСП. Для ВСП 2008 коэффициент корреляции  $R = 0.89$  для 31-дневного интервала, приблизительно соответствующего периоду между первым и последним максимумом средней зональной температуры на 10 гПа. Для ВСП 2013, наибольший коэффициент корреляции  $R=0.66$  получен для интервала 03-25.01,

что приблизительно соответствует интервалу смены направления среднего зонального ветра на 10 гПа.

Для ВСП в январе 2013 г. были проанализированы вариации возмущений  $\Delta f_{min}$  и остаточных отклонений температуры области мезопаузы  $\Delta T$ . Обнаружено, что в период наиболее значительных возмущений температуры и динамики средней атмосферы и реверса среднего зонального ветра во время ВСП 2013 наблюдалось усиление изменчивости  $\Delta f_{min}$  и  $\Delta T$ , что может быть вызвано интенсификацией активности планетарных волн в верхней атмосфере во время ВСП.

Полученные результаты важны для оценки возрастания поглощения коротких радиоволн во время зимних внезапных стратосферных потеплений.

*Исследование выполнено за счет гранта РНФ № 25-17-00187 (<https://rscf.ru/project/25-17-00187/>). Результаты получены частично с использованием данных оборудования Центра коллективного пользования "Ангара" (ИСЗФ СО РАН) (<http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>) и УНУ «Оптические инструменты».*

## **Литература**

1. Medvedeva I., Ratovsky K. Effects of the 2016 February minor sudden stratospheric warming on the MLT and ionosphere over Eastern Siberia // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2018. V. 180. P. 116-125. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2017.09.007>.
2. Medvedeva I., Ratovsky K. Manifestation of wave activity in the upper atmosphere during winter sudden stratospheric warmings // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2020. Vol. 17. No. 6. P. 159–166. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-6-159-166.
3. Siskind D.E., Zawdie K., Sassi F., Drob D., Friedrich M. Global modeling of the low and mid latitude ionospheric D and lower E regions and implications for HF radio wave absorption // Space Weather. 2017. V. 15. P. 115–130. DOI: 10.1002/2016SW001546.