

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОТКЛИКОВ МИНИМАЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ ОТРАЖЕНИЙ НА ИОНОГРАММАХ И ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЛАСТИ МЕЗОСФЕРЫ И НИЖНЕЙ ТЕРМОСФЕРЫ НА ЗИМНИЕ ВНЕЗАПНЫЕ СТРАТОСФЕРНЫЕ ПОТЕПЛЕНИЯ

### COMPARATIVE ANALYSIS OF RESPONSES OF MINIMUM FREQUENCY OF IONOGRAM REFLECTIONS AND MESOSPHERE-LOWER THERMOSPHERE TEMPERATURE TO WINTER SUDDEN STRATOSPHERIC WARMINGS

**К.Г. Ратовский** 

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, ratovsky@iszf.irk.ru*

**И.В. Медведева** 

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, ivmed@iszf.irk.ru  
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН,  
Москва, Россия*

**K.G. Ratovsky**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, ratovsky@iszf.irk.ru*

**I.V. Medvedeva**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, ivmed@iszf.irk.ru  
Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS,  
Moscow, Russia*

**Аннотация.** Статья посвящена сравнительному анализу откликов минимальной частоты отражений на ионограммах ( $f_{\min}$ ) и температуры области мезосферы и нижней термосферы (МНТ) на зимние внезапные стратосферные потепления (ВСП) 2008, 2009 и 2013 гг. Экспериментальной базой исследований являются измерения  $f_{\min}$  на цифровом ионозонде DPS-4 в Иркутске, спутниковые данные Aura/MLS о температуре атмосферы на различных высотах и данные о вращательной температуре молекулы гидроксидила, полученные с помощью спектрометрических измерений на расстоянии ~100 км от Иркутска. Сравнительный анализ поведения  $f_{\min}$  и температуры атмосферы на высотах МНТ выявил как случай высокой корреляции (ВСП 2008 г.), так и отсутствие корреляции (ВСП 2009 г.) наряду с промежуточным вариантом (ВСП 2013 г.). В статье обсуждаются причины различной корреляции анализируемых параметров.

**Ключевые слова:** минимальная частота отражений на ионограммах, температура, мезосфера — нижняя термосфера, МНТ, внезапное стратосферное потепление, корреляционный анализ.

**Abstract.** The paper is devoted to the comparative analysis of the responses of the minimum frequency of reflections on ionograms ( $f_{\min}$ ) and the mesosphere-low thermosphere (MLT) temperature to the sudden stratospheric warmings (SSWs) in 2008, 2009, and 2013. The experimental basis for the research is the  $f_{\min}$  measurements with the DPS-4 digital ionosonde in Irkutsk, the Aura/MLS satellite data on the atmospheric temperature at different altitudes, and the data on the rotational temperature of the hydroxyl molecule obtained from spectrometric measurements at ~100 km from Irkutsk. Comparative analysis of the behavior of  $f_{\min}$  and the MLT temperature has revealed both a case of high correlation (SSW 2008) and no correlation (SSW 2009), along with an intermediate variant during the SSW 2013. The paper discusses the reasons for the different correlations between the analyzed parameters.

**Keywords:** minimum frequency of ionogram reflections, temperature, mesosphere-low thermosphere, MLT, sudden stratospheric warming, correlation analysis.

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач физики околоземного космического пространства является изучение отклика верхней нейтральной атмосферы и ионосферы на экстремальные события в нижележащих атмосферных слоях. К наиболее значительным метеорологическим возмущениям, охватывающим большие пространственные и временные масштабы и приводящим к нарушениям термодинамического режима в большом диапазоне высот атмосферы, относятся зимние внезапные стратосферные потепления (ВСП). В настоящее время одной из основных гипотез возникновения стратосферных потеплений считают вол-

новую теорию, в которой преобладающим механизмом развития стратосферных потеплений являются волновые возмущения планетарного масштаба [Matsuno, 1971]. Механизм заключается в усилении планетарных волн, распространяющихся вверх из тропосферы, и взаимодействии их со средним ветровым потоком. Это взаимодействие приводит к ослаблению или реверсу западного зимнего стратосферного потока. События ВСП являются наиболее ярким примером взаимосвязи различных атмосферных слоев. Проявление эффектов ВСП может наблюдаться в большом диапазоне широт, от полюса до тропиков, и возмущениями охватывается большой высотный диапазон, от тропосферы до термосферы [Vargin,

Medvedeva, 2015; Yigit, Medvedev, 2015]. К настоящему времени установлено, что значительные события ВСП оказывают заметное влияние на верхнюю атмосферу. Еще Shefov [1973] обратил внимание на заметное охлаждение мезосферы – нижней термосферы (МНТ) в периоды ВСП и последующие колебания температуры. Yigit, Medvedev [2015] показали, что возмущения в нижней и средней атмосфере в периоды ВСП вызывают существенные аномалии в термосфере и ионосфере. Проявление влияния внезапных зимних стратосферных потеплений на МНТ было выявлено по данным измерений вращательной температуры ОН [Walterscheid et al., 2000; Shepherd et al., 2010; Perminov, Pertsev, 2013; Medvedeva, Ratovsky, 2018], по измерениям с помощью метеорных радаров и лидаров [Hoffmann et al., 2002, 2007] и спутниковым данным [Siskind et al., 2005; Manney et al., 2009]. В периоды ВСП наблюдается возрастание активности волн различного временного масштаба [Limrasuvan et al., 2012; Yigit, Medvedev, 2015]. Экспериментальные и теоретические исследования параметров ионосферной плазмы позволили обнаружить эффекты, вызванные ВСП, на ионосферных высотах F-слоя практически во всем диапазоне широт зимнего полушария [Pancheva, Mukhtarov, 2011; Klimenko et al., 2013; Goncharenko et al., 2013; Polyakova et al., 2014; Shpynev et al., 2015; Lukianova et al., 2015; Medvedeva, Ratovsky, 2018; Yasyukevich, 2018; Yasyukevich et al., 2022]. В ряде работ было показано, что проявления влияния ВСП на состояние верхней нейтральной атмосферы и ионосферы зависят от региона наблюдения. Так, наличие долготных различий проявления эффектов ВСП в области МНТ было показано в работе [Medvedeva et al., 2019] по данным наблюдений излучения ОН на ст. «Торы» и «Звенигород». Проведенные в этой работе расчеты по модели МСВА показали, что обнаруженные долготные различия проявления ВСП обуславливаются долготными различиями в поведении преимущественного вертикального ветра на высоте излучения ОН для анализируемого события. Shpynev et al. [2015] на основе данных радиозондирования на российских ионозондах в периоды ВСП в 2009 и 2013 гг. показали, что ионосферный отклик на ВСП зависит от расположения ионозонда относительно картины стратосферной циркуляции.

Несмотря на большое количество работ, посвященных ионосферному отклику на ВСП, в подавляющем большинстве из них приведены результаты исследования эффектов на высотах F-слоя ионосферы. Ранее мы проводили исследование проявлений эффектов ВСП различного типа в феврале–марте 2016 г., феврале 2017 г., феврале 2018 г. и январе 2019 г. на высотах мезопаузы и F2-области ионосферы по данным спектрометрических и радиофизических наблюдений в регионе Восточной Сибири. Были проанализированы данные о вращательной температуре молекулы гидроксила и об электронной концентрации в максимуме F2-слоя  $N_mF2$  при помощи разработанной ранее методики оценки атмосферной и ионосферной изменчивости, которая позволяет исследовать проявления волновой активности в широком диапазоне высот верхней атмосферы [Medvedeva, Ratovsky, 2015]. Было обнаруже-

но, что в период всех анализируемых событий наблюдалось усиление проявлений активности атмосферных волн на высотах МНТ и F2-области ионосферы, однако характер этих проявлений был различен [Medvedeva, Ratovsky, 2018, 2020].

В отличие от наших предыдущих работ, где исследовались эффекты ВСП на высотах F-слоя ионосферы, в настоящем исследовании выбрана характеристика, связанная с нижней ионосферой, — минимальная частота отражений  $f_{min}$ , т. е. наименьшая частота, при которой на ионограмме вертикального зондирования наблюдаются следы отражений от ионосферы. Согласно известной монографии [Дэвис, 1973], дифференциальное неотклоняющее поглощение коротких радиоволн в ионосфере пропорционально произведению электронной концентрации  $N_e$  на частоту столкновений  $\nu$  электронов с нейтральными частицами (для краткости, с нейтралами) и обратно пропорционально квадрату частоты радиосигнала  $f$ . Полное поглощение определяется высотным интегралом от произведения  $N_e \cdot \nu$ , при этом основной вклад в интеграл вносит D-слой (~70–90 км) либо нижняя часть E-слоя (~90–95 км). В силу того что поглощение обратно пропорционально  $f^2$ ,  $f_{min}$  задает критический уровень поглощения, при котором отношение сигнал/шум достаточно для наблюдения отражения от ионосферы (при  $f < f_{min}$  поглощение превышает критический уровень и отражения от ионосферы не наблюдаются). Таким образом,  $f_{min}$  возрастает/уменьшается с ростом/падением  $N_e$  и  $\nu$  в D-слое и нижней части E-слоя.

Существует ряд экспериментальных работ, посвященных исследованию влияния атмосферных возмущений на поглощение радиоволн различных диапазонов. В работе [Pancheva et al., 1991] были обнаружены как короткопериодные (5–7 дней), так и длиннопериодные (10.5–13.0 дней) флуктуации поглощения коротких радиоволн в нижней ионосфере в зимний период, при этом короткопериодные флуктуации связывались с усилением активности стационарных планетарных волн с зональным волновым числом 2 (СПВ2), а длиннопериодные флуктуации — с усилением активности стационарных планетарных волн с зональным волновым числом 1 (СПВ1). В работе [Schmitter, 2011] обнаружена корреляция амплитуд сигналов в ОНЧ- и НЧ-диапазонах и  $f_{min}$ , характеризующей поглощение в КВ-диапазоне, с активностью планетарных волн (в основном с периодом около 16 дней). В работе [Schneider et al., 2025] выявлено, что в трех из четырех исследованных событий ВСП наблюдается увеличение амплитуды ОНЧ-сигналов во время ВСП и уменьшение амплитуды ОНЧ-сигналов в периоды увеличения высоты стратосферной мезопаузы.

Механизмы влияния атмосферных возмущений на электронную концентрацию и частоту соударений электронов с нейтралами в D-слое были рассмотрены в ряде исследований [Kazimirovsky et al., 2003; Siskind et al., 2017; Schneider et al., 2025; Schmitter, 2011]. В работе [Kazimirovsky et al., 2003] отмечены следующие атмосферные факторы, увеличивающие электронную концентрацию в D-слое: а) повышение температуры мезопаузы, препятствующее образованию кластерных ионов; б) нисходя-

щее движение оксида азота NO; в) понижение давления вблизи мезопаузы, уменьшающее оптическую толщину для солнечного УФ-излучения и, следовательно, увеличивающее скорость ионизации. В работе [Siskind et al., 2017] на основе численного моделирования показано, что значительный вклад в поглощение коротких радиоволн на средних широтах вносит концентрация NO. Максимальным дифференциальным поглощением на частоте 5 МГц характеризуется нижняя часть E-слоя (около 95 км). В работе [Schneider et al., 2025] для объяснения изменения поглощения в периоды ВСП предлагается комбинированный механизм влияния атмосферных возмущений. Электронная концентрация в D-слое уменьшается за счет увеличения скорости рекомбинации из-за снижения температуры мезосферы и увеличения содержания водяного пара. Частота столкновений электронов с нейтралами уменьшается из-за снижения температуры мезосферы. Оба эффекта приводят к уменьшению поглощения ОНЧ-сигналов. В работе [Schmitter, 2011] с использованием моделирования и температурных данных спутника SABER показано, что периоды роста и падения давления в мезосфере совпадают с периодами повышенного и пониженного поглощения ОНЧ/НЧ-сигналов соответственно. Обнаруженное совпадение объясняется пропорциональностью частоты столкновений электронов с нейтралами давлению в мезосфере.

Исходя из вышеупомянутых механизмов, можно ожидать корреляцию вариаций  $f_{\min}$  и температуры мезосферы. Рост температуры приводит к росту как  $N_e$  [Kazimirovsky et al., 2003; Schneider et al., 2025] так и  $\nu$  [Schneider et al., 2025; Schmitter, 2011], что увеличивает поглощение и  $f_{\min}$ . Падение температуры приводит к противоположному эффекту. Вышеупомянутая корреляция может нарушаться из-за воздействия других факторов: изменения химического состава [Kazimirovsky et al., 2003; Siskind et al., 2017; Schneider et al., 2025] либо эффектов солнечных вспышек и геомагнитных возмущений. Дополнительные факторы, нарушающую корреляцию, будут обсуждаться ниже.

Целью настоящей работы является сравнительный анализ откликов  $f_{\min}$  и температуры области МНТ на ВСП 2008, 2009 и 2013 г. Метод сравнительного анализа и используемые данные детально описаны в разделе «Метод анализа данных».

## МЕТОД АНАЛИЗА ДАННЫХ

Исследование проведено на основе экспериментальных данных, полученных на комплексе инструментов Института солнечно-земной физики СО РАН (ИСЗФ СО РАН), и данных микроволнового радиометра MLS, установленного на спутнике Aura EOS [<http://disc.gsfc.nasa.gov/Aura>]. Данные ИСЗФ СО РАН включают в себя минимальную частоту отражений на ионограммах  $f_{\min}$ , полученную с помощью цифрового ионозонда вертикального зондирования DPS-4 в Иркутске (52.3° N, 104.3° E), и вращательную температуру молекулы гидроксила (полоса ОН(6-2), 834.0 нм, ~87 км), полученную из спектрометрических измерений в Геофизической обсерватории

ИСЗФ СО РАН (51.8° N, 103.1° E, с. Торы). Спутниковые данные представляют собой вертикальные профили температуры атмосферы, полученные при пролетах спутника над анализируемым регионом в дневное время. Для исследования были привлечены также данные реанализа MERRA-2 о температуре и динамике средней атмосферы Северного полушария [<http://gmao.gsfc.nasa.gov/research/merra/>].

Вращательная температура молекулы гидроксила отображает температуру атмосферы на высотах мезопаузы. Данные о вращательной температуре молекулы ОН анализировались только для ВСП 2013 г., поскольку во время более ранних анализируемых событий регулярных спектрометрических наблюдений эмиссии гидроксила не проводилось. Для анализа были рассчитаны остаточные вариации температуры ОН после удаления регулярного сезонного хода. Сезонные вариации определялись аппроксимацией по методу наименьших квадратов полученного ряда усредненных за ночь значений температуры функцией вида

$$T = \bar{T} + \sum_{n=1}^3 A_n \cos\left(\frac{2\pi n}{365.25}(t_d - \varphi_n)\right),$$

где  $\bar{T}$  — средняя температура;  $n$  — номер гармоники;  $A_n$  и  $\varphi_n$  — ее амплитуда и фаза;  $t_d$  — день года. Аппроксимация проводилась тремя первыми гармониками сезонных вариаций с периодами 12, 6 и 4 месяцев.

В работе исследуются межсуточные вариации среднедневных (9–15 LT) значений  $f_{\min}$ , а также возмущения  $\Delta f_{\min}$ , представляющие собой относительную разницу между наблюдаемыми значениями  $f_{\min \text{ obs}}$  и значениями скользящей 27-дневной медианы  $f_{\min \text{ med}}$ :

$$\Delta f_{\min} (\%) = 100 \% \left( f_{\min \text{ obs}} - f_{\min \text{ med}} \right) / f_{\min \text{ med}}$$

Рассчитанные возмущения  $\Delta f_{\min}$  сопоставляются с остаточными вариациями температуры ОН.

Для исследования связи  $f_{\min}$  с температурой атмосферы  $T$  проведен корреляционный анализ межсуточных вариаций  $f_{\min}$  и  $T$  на различных высотах.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОТКЛИКОВ МИНИМАЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ ОТРАЖЕНИЙ НА ИОНОГРАММАХ И ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЛАСТИ МЕЗОПАУЗЫ

Для исследования были выбраны ВСП в январе–феврале 2008 г., январе 2009 г. и январе 2013 г. На рис. 1. представлены вариации зональных характеристик стратосферы на высотном уровне 10 гПа (~32 км) по данным реанализа MERRA-2: средний зональный (60° N) ветер (верхние панели) и средняя зональная (60–90° N) температура (нижние панели) для анализируемых событий.

Анализ зональных характеристик средней атмосферы над Северным полушарием по данным реанализа MERRA-2 показал следующее. В январе–феврале 2008 г. в Северном полушарии произошло четыре ВСП, из которых последнее сопровождалось измене-

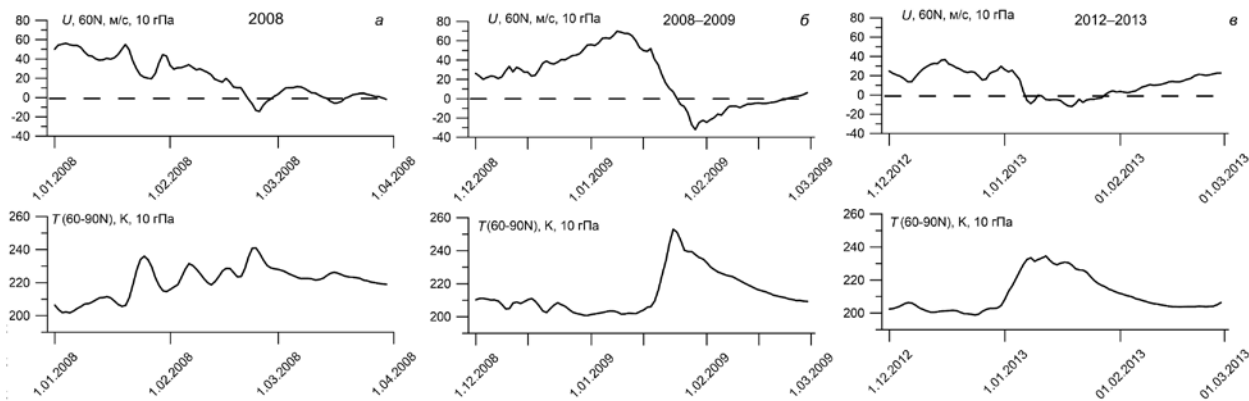


Рис. 1. Зональные характеристики стратосферы на высотном уровне 10 гПа (~32 км) по данным реанализа MERRA-2 для временных интервалов 01.01–01.04.2008 (а), 01.12.2008–01.03.2009 (б) и 01.12.2012–01.03.2013 (в): верхние панели — средний зональный (60° N) ветер; нижние панели — средняя зональная (60–90° N) температура

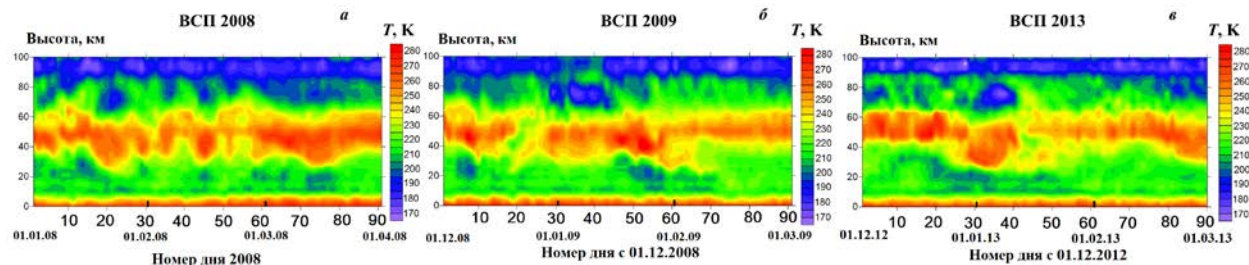


Рис. 2. Высотные профили температуры атмосферы по данным дневных пролетов спутника Aura/MLS в анализируемом регионе для временных интервалов 01.01–01.04.2008 (а), 01.12.2008–01.03.2009 (б) и 01.12.2012–01.03.2013 (в)

нием направления среднего зонального ветра на 60° N и высотном уровне 10 гПа с западного на восточное в период 22–28.02.2008 и может быть классифицировано как значительное (major) ВСП (см. рис. 1, а). Максимумы средней зональной температуры для ВСП 2008 г. наблюдались 25.01, 06.02, 17.02 и 24.02. Значительное ВСП в январе 2009 г. было самым сильным за всю историю наблюдений, с середины января наблюдался резкий рост средней зональной (60–90° N) температуры более чем на 50 K, максимальное значение 253 K наблюдалось 23.01. Изменение направления среднего зонального ветра произошло в период 25.01–22.02.2009 (см. рис. 1, б). Третье анализируемое ВСП в январе 2013 г. также относится к типу major. С конца декабря 2012 г. наблюдался рост средней зональной температуры на ~35 K, максимальное значение 235 K зарегистрировано 12.01. Изменение направления среднего зонального ветра произошло в период 06–28.01.2013 (см. рис. 1, в).

Для анализа температуры атмосферы над Иркутском были использованы данные Aura/MLS, зарегистрированные над рассматриваемым регионом в дневное время. На рис. 2 представлены высотные профили температуры атмосферы для временных интервалов 01.01–01.04.2008 (а), 01.12.2008–01.03.2009 (б), 01.12.2012–01.03.2013 (в). Анализ спутниковых данных показал, что во время всех рассматриваемых ВСП наблюдались значительные возмущения температуры средней атмосферы.

### ВНЕЗАПНОЕ СТРАТОСФЕРНОЕ ПОТЕПЛЕНИЕ 2008 г.

На рис. 3, а представлены межсуточные вариации среднедневных значений  $f_{\min}$  и значений скользящей 27-дневной медианы  $f_{\min \text{ med}}$  на интервале 01.01–31.03.2008 (01–91 дни 2008 г.). На панелях б, в, г рис. 3 показаны межсуточные вариации относительного возмущения  $\Delta f_{\min}$  [%], суточного индекса геомагнитной активности  $K_p$  и индекса солнечной активности  $F10.7$  на том же интервале. Суточный  $K_p$ -индекс представляет собой сумму восьми индексов  $K_p$  за данные сутки. На всем анализируемом интервале (01–91)  $F10.7$  меняется от 67 до 88 при среднем значении 71, а на интервале 10–83 — от 67 до 73 при среднем значении 69. Таким образом, на большей части анализируемого интервала поведение  $F10.7$  соответствует минимуму солнечной активности (низкие значения с незначительными вариациями) при некотором возрастании индекса в начале и конце интервала.

На всем анализируемом интервале (01–91) суточный  $K_p$ -индекс меняется от 2.7 до 34.3 при среднем значении 15.8. В 60 днях из 91 суточный  $K_p$ -индекс не превышает 20, что соответствует спокойным геомагнитным условиям, для 31 дня из 91  $K_p$  соответствует возмущенным условиям. Анализируемый интервал включает в себя три слабых геомагнитных бури: 29.02–01.03 (дни 60–61),  $K_p=5+$ ; 09.03 (день 69)  $K_p=6-$ ; 26–27.03 (дни 86–87),  $K_p=5o$ . На всем ана-

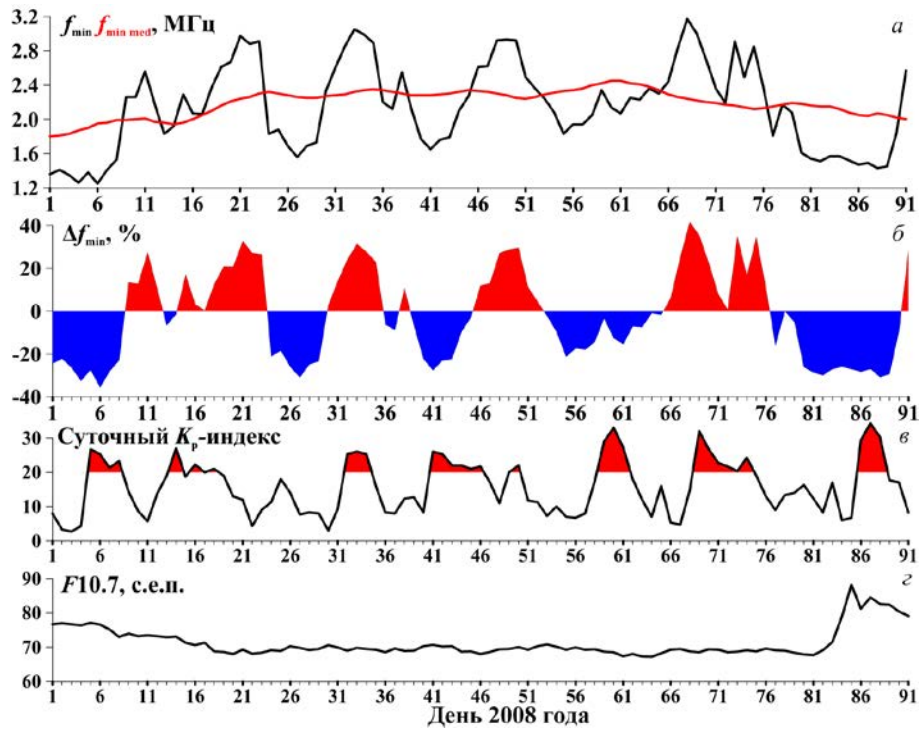


Рис. 3. Межсуточные вариации анализируемых параметров на интервале 01.01–31.03.2008 (01–91 дни 2008 г.): *a* —  $f_{\min}$  (черная кривая) и  $f_{\min \text{ med}}$  (красная кривая); *б* —  $\Delta f_{\min}$  (%); *в* — суточный  $K_p$ -индекс (красным показаны возмущенные условия); *г* — индекс  $F10.7$

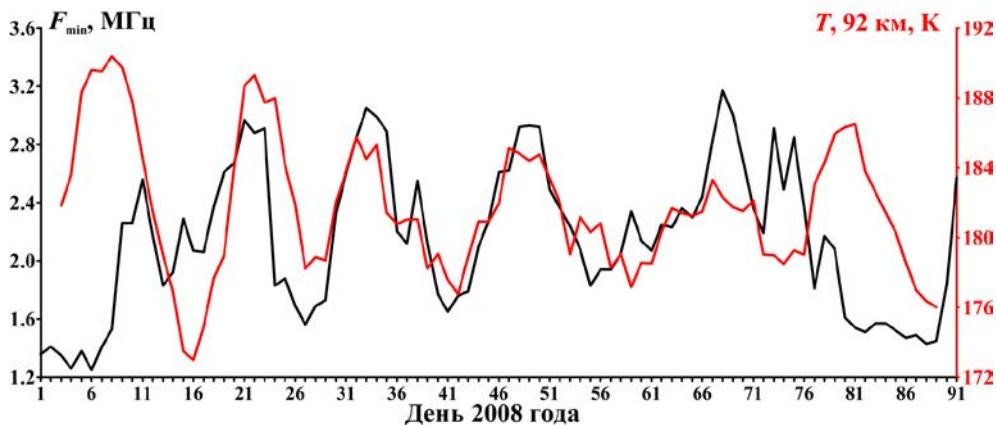


Рис. 4. Межсуточные вариации среднедневных значений  $f_{\min}$  (черная кривая) с наложенными вариациями температуры на высоте 92 км ( $T_{92}$ , красная кривая)

лизируемом интервале (01–91)  $f_{\min}$  меняется от 1.3 до 3.2 МГц при среднем значении 2.2 МГц и стандартном отклонении 0.5 МГц. Из рис. 3, б видно, что возмущения  $\Delta f_{\min}$  представляют собой квазипериодические колебания с периодами (~17–20 дней) и диапазоном колебаний примерно от –40 до +40 %. Согласно работе [Pancheva et al., 1991], такие длинно-периодические интенсивные флуктуации могут быть связаны с усилением активности СПВ1.

Для исследования связи  $f_{\min}$  с температурой атмосферы  $T$  был проведен корреляционный анализ межсуточных вариаций  $f_{\min}$  и  $T$ , полученной по данным Aura/MLS на различных высотных уровнях области МНТ. Анализ показал, что наилучшая корреляция (наибольшая и положительная) имеет место для температуры атмосферы на высоте 92 км ( $T_{92}$ ), что согласуется с результатами работы [Siskind et

al., 2017], где на основе численного моделирования было показано, что максимальное дифференциальное поглощение на частоте 5 МГц соответствует нижней части E-слоя (около 95 км). На рис. 4 показаны межсуточные вариации среднедневных значений  $f_{\min}$  с наложенными вариациями  $T_{92}$ .

Изначально для расчета корреляции был выбран интервал 25.01–24.02.2008 (дни 25–55), который соответствовал периоду между первым (25.01) и последним максимумом средней зональной температуры для ВСП 2008 г. Для этого интервала коэффициент корреляции  $R$  составил 0.80, при сдвиге на два дня интервала анализа (27.01–26.02, дни 27–57)  $R$  увеличивается до 0.89, а при расширении интервала (17.01–12.03, дни 17–72)  $R$  уменьшается до 0.62. Одним из факторов, объясняющих снижение корреляции при расширении интервала до 17.01–12.03 (дни

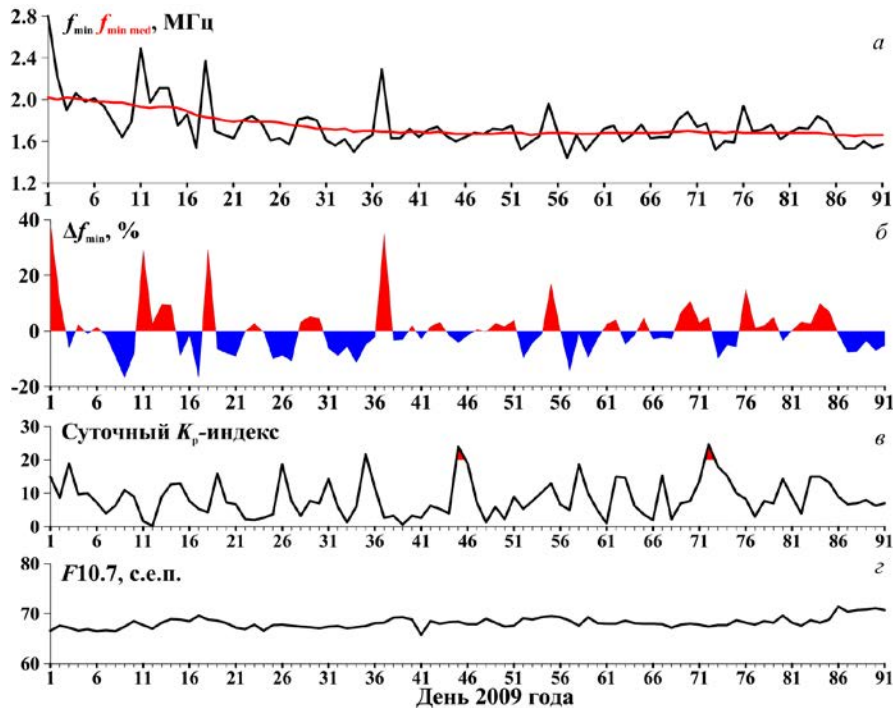


Рис. 5. Межсуточные вариации тех же параметров, что и на рис. 3, но для интервала 01.01–01.04.2009 (01–91 дни 2009 г.)

17–72), могут являться геомагнитных бури 29.02–01.03 (дни 60–61) и 09.03 (день 69). Высокий коэффициент корреляции между  $f_{\min}$  и  $T92$  показывает, что изменения температуры атмосферы являются доминирующим 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.

### ВНЕЗАПНОЕ СТРАТОСФЕРНОЕ ПОТЕПЛЕНИЕ 2009 г.

На рис. 5 представлены межсуточные вариации тех же параметров, что и на рис. 3, но для интервала 01.01–01.04.2009 (01–91 дни 2009 г.). На всем анализируемом интервале (01–91)  $F10.7$  меняется от 66 до 71 при среднем значении 68. Таким образом, на всем анализируемом интервале поведение  $F10.7$  соответствует минимуму солнечной активности (низкие значения с незначительными вариациями).

На всем интервале (01–91) суточный  $K_p$ -индекс меняется от 0.3 до 24.7 при среднем значении 8.5, что в ~1.9 раза меньше, чем в 2008 г. За исключением трех дней суточный  $K_p$ -индекс не превышает 20, что соответствует спокойным геомагнитным условиям. Анализируемый интервал не включает ни одной геомагнитной бури. Таким образом, в 2009 г. геомагнитная активность была существенно ниже, чем в 2008 г.

На всем интервале (01–91)  $f_{\min}$  меняется от 1.4 до 2.8 МГц при среднем значении 1.8 МГц и стандартном отклонении 0.22 МГц. На интервале 19–91  $f_{\min}$  меняется от 1.4 до 2.2 МГц при среднем значении 1.7 МГц и стандартном отклонении 0.12 МГц. Таким образом, в 2009 г.  $f_{\min}$  демонстрирует более низкие средние значения и стандартные отклонения по срав-

нению с 2008 г. В отличие от 2008 г., в возмущениях  $\Delta f_{\min}$  отсутствуют квазипериодические колебания, за исключением четырех дней диапазон колебаний не превышает  $\pm 17\%$ .

Возможной причиной отсутствия интенсивных квазипериодических возмущений  $\Delta f_{\min}$  могло быть отсутствие соответствующих возмущений температуры атмосферы на высоте 92 км. На рис. 6 показаны межсуточные вариации среднедневных значений  $f_{\min}$  с наложенными вариациями  $T92$  для 2009 г.

В отличие от 2008 г., в 2009 г. наблюдается резкое уменьшение  $T92$  на 25 К с 9-го по 19-й день. Далее вариации  $T92$  в 2009 г. носят квазипериодический характер. Первый цикл колебаний с амплитудой ~8 К и квазипериодом ~9 дней наблюдается с ~9-го по 28-й день. Следующий цикл колебаний с амплитудой ~15 К и квазипериодом ~24 дня наблюдается с ~28-го по 52-й день. Заключительные два цикла колебаний с амплитудой ~8 К и квазипериодом ~18 дней наблюдаются с ~52-го по 88-й день. В отличие от 2008 г., в 2009 г. в вариациях  $f_{\min}$  и  $T92$  наблюдается полное отсутствие корреляции, хотя амплитуды колебаний  $T92$  в обоих случаях сравнимы.

Сопоставление вариаций  $f_{\min}$  и температур на других высотах МНТ также не выявило какой-либо корреляции. Возможные причины столь различного поведения  $f_{\min}$  во время ВСП 2008 г. и ВСП 2009 г. обсуждаются в разделе «Обсуждение и интерпретация полученных результатов».

### ВНЕЗАПНОЕ СТРАТОСФЕРНОЕ ПОТЕПЛЕНИЕ 2013 г.

На рис. 7 представлены межсуточные вариации тех же параметров, что и на рис. 3, но для интервала 01.12.2012 – 01.03.2013 (–30 – 60 дни 2013 г.). На всем

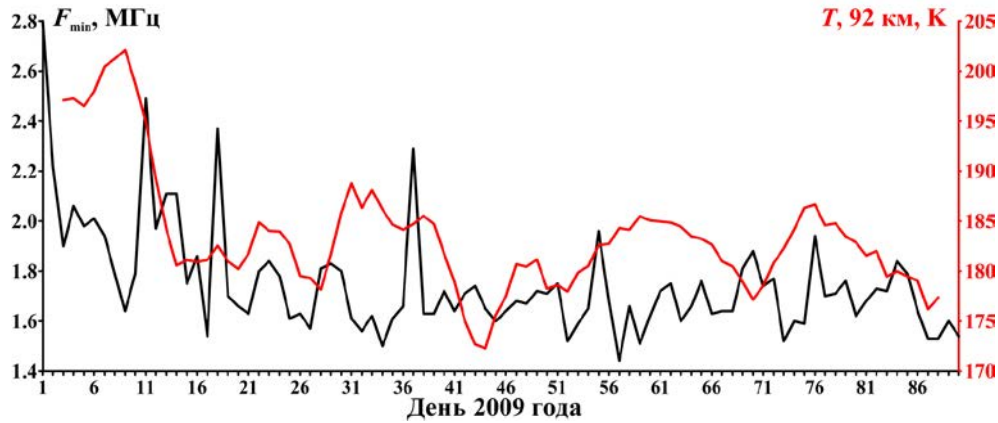


Рис. 6. Межсуточные вариации средневесенных значений  $f_{\min}$  (черная кривая) с наложенными вариациями  $T_{92}$  (красная кривая) для 2009 г.

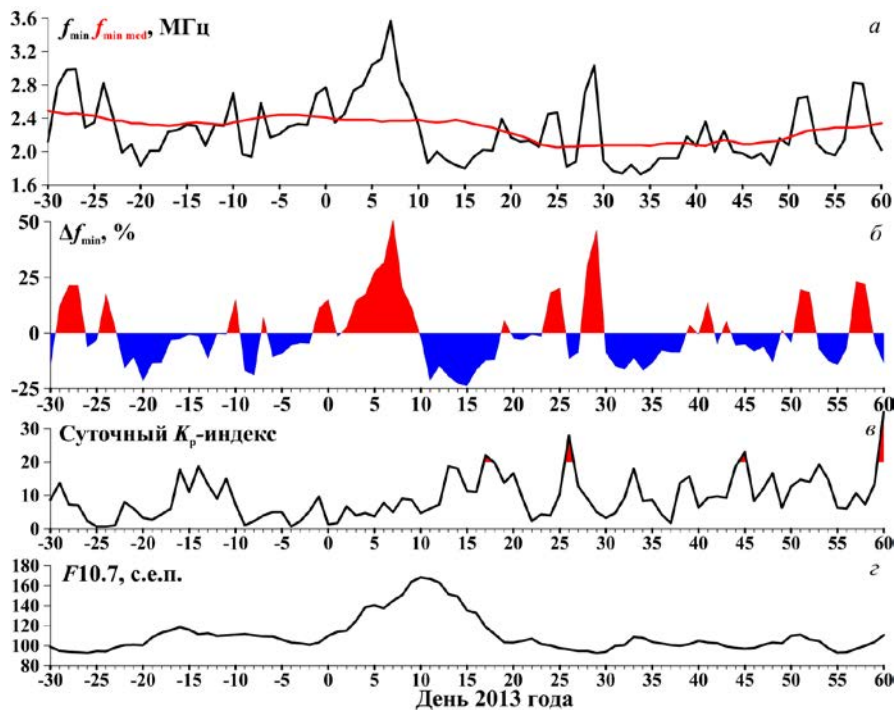


Рис. 7. Межсуточные вариации тех же параметров, что и на рис. 3, но для интервала 01.12.2012–01.03.2013 (–30–60 дни 2013 г.)

анализируемом интервале (–30–60)  $F_{10.7}$  меняется от 93 до 168 при среднем значении 110. В отличие от 2008 и 2009 гг., в 2013 г. поведение  $F_{10.7}$  соответствует умеренной солнечной активности при существенном изменении на анализируемом интервале (max/min  $\sim 1.8$ ). Влияние существенного изменения  $F_{10.7}$  на корреляцию между изменениями  $T$  и  $f_{\min}$  анализируется в разделе «Обсуждение и интерпретация полученных результатов».

На всем интервале (–30–60) суточный  $K_p$ -индекс меняется от 0.7 до 35 при среднем значении 9.3. За исключением четырех дней суточный  $K_p$ -индекс не превышает 20, что соответствует спокойным геомагнитным условиям. Анализируемый интервал включает в себя одну слабую геомагнитную бурю: 01.03 (день 60). Таким образом, в 2013 г. геомагнитная активность была существенно ниже, чем в 2008 г., и несколько выше, чем в 2009 г.

На всем интервале (–30–60)  $f_{\min}$  меняется от 1.7 до 3.6 МГц при среднем значении 2.3 МГц и стандартном отклонении 0.4 МГц. Средняя  $f_{\min}$  и стандартное отклонение  $f_{\min}$  близки к значениям 2008 г. На интервале 01–39 (01.01–08.02) в возмущениях  $\Delta f_{\min}$  наблюдаются интенсивные флуктуации с диапазоном колебаний приблизительно от –4 до +51%. В отличие от 2008 г., колебания несимметричны (положительная амплитуда в  $\sim 2$  раза превышает отрицательную) и повторяемость колебаний выражена гораздо слабее.

Как и для 2008 г., был проведен корреляционный анализ межсуточных вариаций  $f_{\min}$  и  $T$  на различных высотах области МНТ. Аналогично ВСП 2008 г. наилучшая корреляция (наибольшая и положительная) была выявлена для  $T_{92}$ . На рис. 8 показаны межсуточные вариации средневесенных значений  $f_{\min}$  с наложенными вариациями  $T_{92}$  для 2013 г.

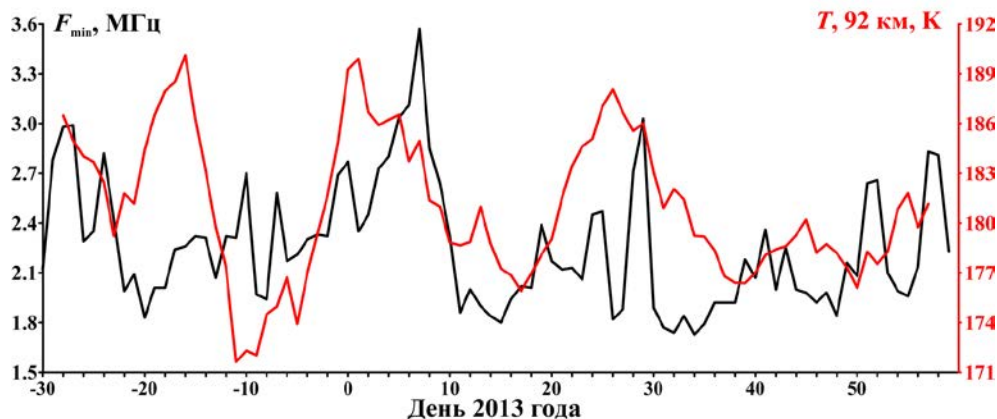


Рис. 8. Межсуточные вариации среднедневных значений  $f_{\min}$  (черная кривая) с наложенными вариациями  $T_{92}$  (красная кривая) для 2013 г.

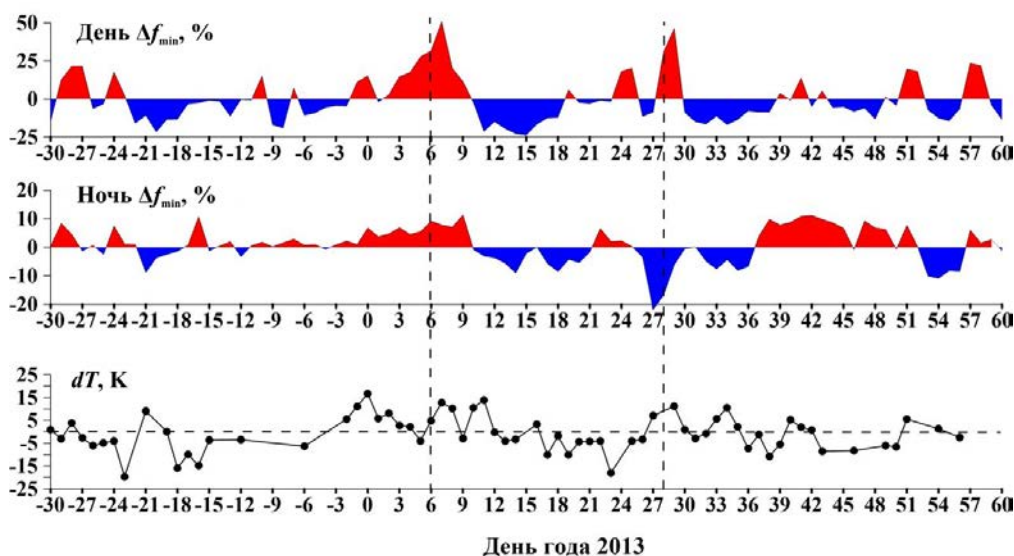


Рис. 9. Вариации возмущений дневных (верхняя панель) и ночных (средняя панель) значений  $\Delta f_{\min}$  и остаточные отклонения температуры мезопаузы  $dT$  (нижняя панель) после исключения сезонных вариаций на временном интервале 01.12.2012–01.03.2013. Вертикальные линии отмечают даты смены направления зонального ( $60^\circ$  N, 10 гПа) ветра

Изначально для расчета корреляции был выбран интервал 06–28.01.2013 (дни 06–28), который соответствовал периоду реверса среднего зонального ветра для ВСП 2013 г. Для этого интервала коэффициент корреляции  $R$  оказался невысоким и составил 0.34, однако при сдвиге интервала анализа на три дня назад (03–25.01, дни 03–25)  $R$  увеличился до 0.66. 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. 9 представлены вариации возмущений  $\Delta f_{\min}$  и остаточные вариации температуры области мезопаузы, полученные по данным измерений эмиссии ОН, для временного интервала 01.12.2012–01.03.2013. Межсуточные вариации температуры обусловлены в основном влиянием планетарных волн. Обнаружено, что в период наиболее значительных возмущений температуры средней атмосферы и реверса среднего зонального ветра во время ВСП 2013 г. (см. рис. 1, в) наблюдалось усиление изменчивости  $\Delta f_{\min}$  и  $\Delta T$  (см. рис. 9), что может быть вы-

звано интенсификацией активности планетарных волн в верхней атмосфере во время ВСП.

Таким образом, проведенный корреляционный анализ межсуточных вариаций  $f_{\min}$  и  $T$  на высоте 92 км выявил три различных случая: высокая корреляция для ВСП 2008 г., отсутствие корреляции для ВСП 2009 г. и умеренная корреляция для ВСП 2013 г.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В интерпретации полученных результатов основной проблемой является объяснение отсутствия корреляции межсуточных вариаций  $f_{\min}$  и  $T_{92}$  для ВСП 2009 г. Во введении отмечалось, что корреляция может нарушаться из-за воздействия других факторов, в частности солнечных вспышек и геомагнитных возмущений. Однако период ВСП 2009 г. характеризуется наиболее низкой солнечной и геомагнитной активностью по сравнению с периодами других ВСП, и поэтому отсутствие корреляции не связано с вышеперечисленными факторами. Во введении отмеча-

лось, что полное поглощение определяется высотным интегралом от произведения  $N_e \cdot v$ , и нарушение корреляции может быть связано с антикорреляцией температурных вариаций на различных высотах. Для проверки этой версии были рассчитаны коэффициенты корреляции между температурными вариациями на высотах 92, 88, 84 и 80 км для всех анализируемых ВСП. Расчеты показали, что коэффициенты корреляции всегда положительны на соседних высотах (т. е. при разнице 4 км) и изменяются в диапазоне от 0.35 до 0.92. Наиболее высокий коэффициент корреляции между  $T_{92}$  и  $T_{88}$  был выявлен для ВСП 2009 г. (0.92), несколько меньший для ВСП 2008 г. (0.73) и наименьший для ВСП 2013 г. (0.53). Таким образом, отсутствие корреляции межсуточных вариаций  $f_{\min}$  и  $T$  на высоте 92 км для ВСП 2009 г. не связано с антикорреляцией температурных вариаций на различных высотах.

В работе [Siskind et al., 2017] выявлено существенное увеличение концентрации NO и поглощения коротких радиоволн в январе 2008 г. по сравнению с январем 2009 г. на высотах от 80 до 90 км. Это различие авторы объяснили более высокой геомагнитной активностью в 2008 г. и, как следствие, более интенсивным образованием NO в высоких широтах и его переносом в среднеширотную мезосферу. Отметим, что увеличение поглощения (увеличение  $f_{\min}$ ) в 2008 г. по сравнению с 2009 г. наблюдается и в наших исследованиях (см. рис. 3 и 5). Таким образом, в 2009 г. вариации  $f_{\min}$  происходят на фоне более низкого поглощения по сравнению с 2008 г., очевидно, что и диапазон вариаций  $f_{\min}$  на фоне более низкого поглощения будет меньше. Как упоминалось выше,  $f_{\min}$  задает критический уровень поглощения, при котором отношение сигнал/шум является достаточным для наблюдения отражения от ионосферы. Таким образом, вариации  $f_{\min}$  определяются вариациями не только поглощения, но и уровня шума. При достаточно больших вариациях поглощения вклад шума в вариации  $f_{\min}$  незначителен. С уменьшением диапазона вариаций поглощения вклад шума в вариации  $f_{\min}$  возрастает, что может привести к значительному снижению корреляции между изменениями  $T$  и  $f_{\min}$ , в силу того что последние в основном обусловлены изменениями шума. В итоге отсутствие корреляции межсуточных вариаций  $f_{\min}$  и  $T$  на 92 км для ВСП 2009 г. может быть связано с низким фоновым поглощением в рассматриваемый период.

Для ВСП 2013 г. корреляция межсуточных вариаций  $f_{\min}$  и  $T_{92}$  ниже, чем для ВСП 2008 г. Это понижение может быть связано с рассмотренными факторами — существенными изменениями солнечной активности во время ВСП 2013 г. и более низкой корреляцией температурных вариаций на различных высотах в 2013 г. по сравнению с 2008 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ откликов минимальной частоты отражений на ионограммах  $f_{\min}$  и температуры области МНТ во время зимних внезапных стратосферных потеплений в 2008, 2009 и 2013 гг. Обнаружены интенсивные квазипериодические вариации  $f_{\min}$ , достигающие 40 % в 2008 г. и 50 % в 2013 г.

Основным результатом проведенных исследований является обнаружение высокой корреляции межсуточных вариаций минимальной частоты отражений на ионограммах и температуры атмосферы на высоте 92 км для ВСП 2008 г. ( $R=0.89$  для 31-дневного интервала, приблизительно соответствующего периоду между первым и последним максимумом средней зональной температуры на 10 гПа). Физическое объяснение высокой корреляции заключается в том, что рост температуры приводит к росту как электронной концентрации [Kazimirovsky et al., 2003; Schneider et al., 2025], так и частоты столкновений электронов с нейтралами [Schneider et al., 2025; Schmitter, 2011], что увеличивает поглощение и  $f_{\min}$ . Падение температуры приводит к противоположному эффекту.

Другим важным результатом является то, что именно для высоты 92 км корреляция  $f_{\min}$  и температуры является наибольшей. Этот результат согласуется с выводами [Siskind et al., 2017], где на основе численного моделирования было показано, что максимальное дифференциальное поглощение на частоте 5 МГц соответствует нижней части E-слоя (около 95 км).

В то же время корреляционный анализ межсуточных вариаций  $f_{\min}$  и  $T_{92}$ , проведенный для других ВСП, выявил три различных случая: высокая корреляция для ВСП 2008 г., отсутствие корреляции для ВСП 2009 г. и умеренная корреляция для ВСП 2013 г. При интерпретации полученных результатов основной проблемой являлось объяснение отсутствия корреляции для ВСП 2009 г. Предложена следующая версия: отсутствие корреляции для ВСП 2009 г. может быть связано с низким фоновым поглощением в рассматриваемый период. В этом случае вариации  $f_{\min}$  в значительной степени могут быть обусловлены изменениями уровня шума, а не поглощения. Для ВСП 2013 г. корреляция межсуточных вариаций  $f_{\min}$  и  $T_{92}$  была ниже, чем для ВСП 2008 г. Это понижение может быть связано с существенными изменениями солнечной активности во время ВСП 2013 г. и более низкой корреляцией температурных вариаций на различных высотах в 2013 г. по сравнению с 2008 г.

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

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 25-17-00187 [<https://rscf.ru/project/25-17-00187/>]. Работы по проведению наблюдений и первичной обработке данных выполнены при поддержке Минобрнауки России. Результаты частично получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» (ИСЗФ СО РАН) [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>] и УНУ «Оптические инструменты» ИСЗФ СО РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дэвис К. *Радиоволны в ионосфере*. М.: Мир, 1973, 502 с.  
 Goncharenko L., Chau J. L., Condor P., et al. Ionospheric effects of sudden stratospheric warming during moderate-to-high solar activity: Case study of January 2013, *Geophys. Res. Lett.* 2013, vol. 40, pp. 1–5. DOI: [10.1002/grl.50980](https://doi.org/10.1002/grl.50980).  
 Hoffmann P., Singer W., Keuer D. Variability of the mesospheric wind field at middle and Arctic latitudes in winter

- and its relation to stratospheric circulation disturbances. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2002, vol. 64, pp. 1229–1240. DOI: [10.1016/S1364-6826\(02\)00071-8](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00071-8).
- Hoffmann P., Singer W., Keuer D., et al. Latitudinal and longitudinal variability of mesospheric winds and temperatures during stratospheric warming events. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2007, vol. 69, pp. 2355–2366. DOI: [10.1016/j.jastp.2007.06.010](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2007.06.010).
- Kazimirovsky E., Herraiz M., De La Morena B.A. Effects on the ionosphere due to phenomena occurring below it. *Surv. Geophys.* 2003, vol. 24, pp. 139–184. DOI: [10.1023/A:1023206426746](https://doi.org/10.1023/A:1023206426746).
- Klimenko M.V., Klimenko V.V., Koren'kov Y.N., et al. Modeling of response of the thermosphere-ionosphere system to sudden stratospheric warmings of years 2008 and 2009. *Cosmic Res.* 2013, vol. 51, iss. 1, pp. 54–63. DOI: [10.1134/S001095251301005X](https://doi.org/10.1134/S001095251301005X).
- Limpasuvan V., Richter J.H., Orsolini Y.J., et al. The roles of planetary and gravity waves during a major stratospheric sudden warming as characterized in WACCM. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2012, vol. 78–79, pp. 84–98. DOI: [10.1016/j.jastp.2011.03.004](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.03.004).
- Lukianova R., Kozlovsky A., Shalimov S., et al. Thermal and dynamical perturbations in the winter polar mesosphere-lower thermosphere region associated with sudden stratospheric warmings under conditions of low solar activity. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2015, vol. 120, pp. 5226–5240. DOI: [10.1002/2015JA021269](https://doi.org/10.1002/2015JA021269).
- Manney G.L., Schwartz M.J., Krueger K., et al. Aura Microwave Limb Sounder observations of dynamics and transport during the record-breaking 2009 Arctic stratospheric major warming. *Geophys. Res. Lett.* 2009, vol. 36, L12815. DOI: [10.1029/2009GL038586](https://doi.org/10.1029/2009GL038586).
- Matsuno T. A dynamical model of the stratospheric sudden warming. *J. Atmos. Sci.* 1971, vol. 28, pp. 1479–1494. DOI: [10.1175/1520-0469\(1971\)028<1479:ADMOTS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1971)028<1479:ADMOTS>2.0.CO;2).
- Medvedeva I., Ratovsky K. Studying atmospheric and ionospheric variabilities from long-term spectrometric and radio sounding measurements. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015, vol. 120, iss. 6, pp. 5151–5159. DOI: [10.1002/2015JA021289](https://doi.org/10.1002/2015JA021289).
- Medvedeva I., Ratovsky K. Effects of the 2016 February minor sudden stratospheric warming on the MLT and ionosphere over Eastern Siberia. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018, vol. 180, pp. 116–125. DOI: [10.1016/j.jastp.2017.09.007](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.09.007).
- 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, iss. 6, pp. 159–166. DOI: [10.21046/2070-7401-2020-17-6-159-166](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-6-159-166).
- Medvedeva I.V., Semenov A.I., Pogoreltsev A.I., Tatarnikov A.V. Influence of sudden stratospheric warming on the mesosphere/lower thermosphere from the hydroxyl emission observations and numerical simulations. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2019, vol. 187, pp. 22–32. DOI: [10.1016/j.jastp.2019.02.005](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.02.005).
- Pancheva D., Mukhtarov P. Stratospheric warmings: The atmosphere-ionosphere coupling paradigm. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2011, vol. 73, iss. 3, pp. 1697–1702. DOI: [10.1016/j.jastp.2011.03.006](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.03.006).
- Pancheva D., Lastovicka J., de La Morena B.A. Quasi-periodic fluctuations in ionospheric absorption in relation to planetary activity in the stratosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1991, vol. 53, pp. 1151–1155. DOI: [10.1016/0021-9169\(91\)90065-F](https://doi.org/10.1016/0021-9169(91)90065-F).
- Perminov V.I., Pertsev N.N. The behavior of emissions and temperature of the mesopause during stratospheric warmings according to observations at midlatitudes. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2013, vol. 53, iss. 6, pp. 780–784. DOI: [10.1134/S0016793213060108](https://doi.org/10.1134/S0016793213060108).
- Polyakova A.S., Chernigovskaya M.A., Perevalova N.P. Ionospheric effects of sudden stratospheric warmings in Eastern Siberia region. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2014, vol. 120, pp. 15–23. DOI: [10.1016/j.jastp.2014.08.011](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2014.08.011).
- Schmitter E.D. Remote sensing planetary waves in the mid-latitude mesosphere using low frequency transmitter signals. *Ann. Geophys.* 2011, vol. 29, iss. 7, pp. 1287–1293. DOI: [10.5194/angeo-29-1287-2011](https://doi.org/10.5194/angeo-29-1287-2011).
- Schneider H., Wendt V., Banyás D., et al. Impact of sudden stratospheric warming and elevated stratopause events on the very low frequency radio signal. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2025, vol. 130, e2024JA033320. DOI: [10.1029/2024JA033320](https://doi.org/10.1029/2024JA033320).
- Shefov N.N. Relations between the hydroxyl emission of the upper atmosphere and the stratospheric warmings. *Gerlands Beitr. Geophysik.* 1973, vol. 82, iss. 2, pp. 111–114.
- Shepherd M.G., Cho Y.M., Shepherd G.G., et al. Mesospheric temperature and atomic oxygen response during the January 2009 major stratospheric warming. *J. Geophys. Res.* 2010, vol. 115, A07318. DOI: [10.1029/2009JA015172](https://doi.org/10.1029/2009JA015172).
- Shpynev B., Kurkin V., Ratovsky K., et al. High-midlatitude ionosphere response to major stratospheric warming. *Earth, Planets and Space.* 2015, vol. 67, 18. DOI: [10.1186/s40623-015-0187-1](https://doi.org/10.1186/s40623-015-0187-1).
- Siskind D.E., Coy L., Espy P. Observations of stratospheric warmings and mesospheric coolings by the TIMED SABER instrument. *Geophys. Res. Lett.* 2005, vol. 32, L09804. DOI: [10.1029/2005GL022399](https://doi.org/10.1029/2005GL022399).
- Siskind D.E., Zawdie K., Sassi F., et al. Global modeling of the low and mid latitude ionospheric D and lower E regions and implications for HF radio wave absorption. *Space Weather.* 2017, vol. 15, pp. 115–130. DOI: [10.1002/2016SW001546](https://doi.org/10.1002/2016SW001546).
- Vargin P.N., Medvedeva I.V. Temperature and dynamical regimes of the Northern Hemisphere extratropical atmosphere during sudden stratospheric warming in winter 2012–2013. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics.* 2015, vol. 51, iss. 1, pp. 12–29. DOI: [10.1134/S0001433814060176](https://doi.org/10.1134/S0001433814060176).
- Walterscheid R.L., Sivjee G.G., Roble R.G. Mesospheric and lower thermospheric manifestations of a stratospheric warming event over Eureka, Canada (80 N). *Geophys. Res. Lett.* 2000, vol. 27, iss. 18, pp. 2897–2900. DOI: [10.1029/2000GL003768](https://doi.org/10.1029/2000GL003768).
- Yasyukevich A.S. Variations in ionospheric peak electron density during sudden stratospheric warmings in the Arctic region. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2018, vol. 123, pp. 3027–3038. DOI: [10.1002/2017JA024739](https://doi.org/10.1002/2017JA024739).
- Yasyukevich A.S., Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., et al. Features of winter stratosphere small-scale disturbance during sudden stratospheric warmings. *Remote Sens.* 2022, vol. 14, 2798. DOI: [10.3390/rs14122798](https://doi.org/10.3390/rs14122798).
- Yigit E., Medvedev A.S. Internal wave coupling processes in Earth's atmosphere. *Adv. Space Res.* 2015, vol. 55, iss. 4, pp. 983–1003. DOI: [10.1016/j.asr.2014.11.020](https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.11.020).
- URL: <http://disc.gsfc.nasa.gov/Aura> (дата обращения 15 июля 2025 г.).
- URL: <http://gmao.gsfc.nasa.gov/research/merra/> (дата обращения 15 июля 2025 г.).
- URL: <https://rscf.ru/project/25-17-00187/> (дата обращения 15 июля 2025 г.).
- URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/> (дата обращения 15 июля 2025 г.).

Как цитировать эту статью:

Ратовский К.Г., Медведева И.В. Сравнительный анализ откликов минимальной частоты отражений на ионограммах и температуры области мезосферы и нижней термосферы на зимние внезапные стратосферные потепления. *Солнечно-земная физика.* 2026, т. 12, № 1, с. 45–54. <https://doi.org/10.12737/szf-121202606>.