

УДК 550.388, 551.510

## ВЛИЯНИЕ ЗИМНИХ ВНЕЗАПНЫХ СТРАТОСФЕРНЫХ ПОТЕПЛЕНИЙ НА ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ВЕРХНЕЙ НЕЙТРАЛЬНОЙ АТМОСФЕРЫ И ИОНОСФЕРЫ

© 2022 г. И. В. Медведева<sup>1\*</sup>, К. Г. Ратовский<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

\*E-mail: ivmed@iszf.irk.ru

Представлены результаты исследования изменчивости температуры атмосферы в области мезопаузы и максимума электронной концентрации  $NmF2$  в периоды действия зимних внезапных стратосферных потеплений (ВСП) в январе 2013, феврале–марте 2016 и феврале 2018 гг., относящихся к различным типам. Анализ проведен по экспериментальным данным, полученным на комплексе инструментов Института солнечно-земной физики СО РАН. Для исследования эффектов ВСП использована методика комплексного анализа атмосферной и ионосферной изменчивости, которая позволяет оценить проявление активности атмосферных волн в широком диапазоне высот верхней атмосферы. Выявлено, что во время действия всех анализируемых ВСП наблюдалось усиление атмосферной и ионосферной изменчивости. Обнаружены также существенные различия проявления волновой активности на высотах мезопаузы и ионосферной  $F2$ -области в периоды ВСП различного типа.

**Ключевые слова:** внезапное стратосферное потепление, атмосфера, ионосфера, волновая активность, атмосферо-ионосферное взаимодействие.

**Для цитирования:** Медведева И.В., Ратовский К.Г. Влияние зимних внезапных стратосферных потеплений на изменчивость параметров верхней нейтральной атмосферы и ионосферы // Динамические процессы в геосферах, 2022, т. 14, № 2. С. 75–85. [http://doi.org/10.26006/29490995\\_2022\\_14\\_2\\_75](http://doi.org/10.26006/29490995_2022_14_2_75)

### Введение

Динамические возмущения в нижних слоях атмосферы могут иметь существенное влияние на верхнюю нейтральную атмосферу и ионосферу. Одним из наиболее ярких процессов, во время которого проявляется взаимодействие различных слоев атмосферы, является зимнее внезапное стратосферное потепление (ВСП), когда происходит значительное и внезапное повышение температуры «взрывного характера» в зимней полярной стратосфере [Labitzke, 1977]. Эффекты, связанные с ВСП, могут наблюдаться в большом диапазоне широт, от полюса до тропиков, и возмущениями охватывается большой высотный диапазон – от тропосферы до термосферы [Варгин Медведева, 2015; Yasyukevich et al., 2022]. По определению Всемирной Метеорологической Организации ВСП можно классифицировать как значительное (*major*), когда в зимний период средний зональный ветер на широте  $60^\circ$  с.ш. и высотном уровне 10 гПа (~32 км) изменяет свое направление с западного на восточное, и зональный градиент температуры стратосферы на уровне 10 гПа между  $60^\circ$  и  $90^\circ$  с.ш. становится положительным [Labitzke, Naujokat, 2000]. Если резкий рост температуры (не менее  $25^\circ$  С в течение одной недели в стратосфере в любом регионе зимнего полушария) не сопровождается изменением направления зональной ( $60^\circ$  с.ш., 10 гПа) циркуляции, такое событие классифицируется как незначительное (*minor*) стратосферное потепление [Labitzke, 1977]. Финальное стратосферное потепление может развиваться в конце зимы (конец февраля – начало марта), в результате зимний полярный вихрь разрушается и уже больше не восстанавливается, т.е. происходит ранняя перестройка атмосферной циркуляции. Внезапные стратосферные потепления могут приводить к значительным нарушениям в состоянии термосферы и ионосферы [Yigit, Medvedev, 2015]. Во время ВСП происходит возрастание активности атмосферных

волн различного временного масштаба [Limpasuvan et al., 2012]. В работе представлены результаты исследования атмосферной и ионосферной изменчивости, вызванной активностью атмосферных волн на высотах мезопаузы (80–100 км) и ионосферной  $F2$ -области, в периоды действия зимних внезапных стратосферных потеплений (ВСП) различного типа в январе 2013, феврале–марте 2016 и феврале 2018 гг.

### Используемые данные и методика анализа

Исследование проведено на основе экспериментальных данных, получаемых на комплексе инструментов Института солнечно-земной физики СО РАН. Для анализа проявления эффектов ВСП на высотах мезопаузы использованы данные о вращательной температуре молекулы гидроксила (полоса  $\text{OH}(6-2)$ , 834.0 нм, ~87 км), получаемой из спектрометрических измерений в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (51.8°N, 103.1°E, Торы) с временным разрешением 10 минут. Вращательная температура молекулы гидроксила отображает температуру атмосферы на высотах мезопаузы. Для анализа ионосферных эффектов ВСП использованы данные о максимуме электронной концентрации  $NmF2$ , полученные при помощи вертикального зондирования и проанализированы на иркутском (52.3° N, 104.3° E) ионозонде DPS-4 с временным разрешением 15 минут. К анализу были привлечены также спутниковые данные измерений вертикальных профилей температуры атмосферы MLS Aura (<http://disc.gsfc.nasa.gov/Aura>) и данные реанализа MERRA-2 о температуре и динамике средней атмосферы северного полушария (<http://gmao.gsfc.nasa.gov/research/merra/>). Анализ вариаций геомагнитной активности проведен по данным  $Kp$  индекса, полученным через интерфейс GSFC/SPDF OMNIWeb на веб-сайте <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>.

Для оценки проявления эффектов ВСП на высотах мезопаузы и ионосферной  $F2$ -области была использована методика комплексного анализа атмосферной и ионосферной изменчивости, подробно описанная в [Medvedeva, Ratovsky, 2015; Медведева, Ратовский, 2017]. Изменчивость температуры области мезопаузы является индикатором многих метеорологических и климатических процессов в нейтральной атмосфере. Известно, что межсуточные изменения температуры в мезосфере и нижней термосфере в основном обусловлены мигрирующими планетарными волнами. Основной вклад в ночную изменчивость температуры области мезопаузы вносят приливы и внутренние гравитационные волны (ВГВ). В качестве характеристики межсуточной атмосферной изменчивости использованы остаточные отклонения температуры мезопаузы после вычитания гармоник сезонных вариаций, которые вычислялись для каждого года путем аппроксимации 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. Анализ внутрисуточных температурных вариаций проводился по методу, описанному в работах [Offermann et al., 2009, Perminov et al., 2014; Medvedeva, Ratovsky, 2015]. Согласно этой методике, квадрат данного стандартного отклонения можно представить как сумму квадратов стандартных отклонений

$$\sigma_2 = \sigma_{id}^2 + \sigma_{gw}^2 + \sigma_n^2,$$

характеризующих активность в течение ночи приливов ( $\sigma_{id}^2$ ), внутренних гравитационных волн ( $\sigma_{gw}^2$ ), а также флуктуаций темнового тока приемника спектрометра ( $\sigma_n^2$ ), которые определяются при закрытой входной щели прибора. Величины  $\sigma_{gw}$  и  $\sigma_{id}$  последовательно вычислялись после выделения из ряда ночных температур методом наименьших квадратов гармоник, соответствующих 24-, 12- и 8-часовой компонентам суточного прилива. Такая процедура проводилась для каждой ночи наблюдений. Рассчитанные стандартные отклонения  $\sigma_{id}$  и  $\sigma_{gw}$  использовались в качестве параметров, характеризующих изменчивость температуры вследствие приливов и внутренних гравитационных волн.

В качестве характеристики ионосферной изменчивости использована изменчивость максимума электронной концентрации  $NmF2$ . Были проанализированы относительные возмущения  $NmF2$  ( $\Delta NmF2$ ), представляющие собой относительную разницу между наблюдаемыми значениями ( $NmF2OBS$ ) и значениями скользящей 27-дневной медианы ( $NmF2MED$ ):

$$\Delta NmF2 = (NmF2OBS - NmF2MED) / NmF2MED \cdot 100\%$$

В качестве параметра ионосферной изменчивости были выбраны среднеквадратичные значения  $\Delta NmF2$ :

$$\sigma NmF2 = \sqrt{\langle \Delta NmF2^2 \rangle}$$

Полученные значения  $\Delta NmF2$  анализировались в тех же временных периодах, что и температура области мезопаузы, для чего были выделены волновые возмущения с периодами  $T > 24$  ч,  $8 \text{ ч} \leq T \leq 24$  ч и  $T < 8$  ч. Межсуточные ( $T > 24$  ч) вариации  $NmF2$  могут быть вызваны геомагнитными возмущениями, влиянием планетарных волн, а также короткопериодными вариациями солнечной активности. Вариации с периодами  $8 \text{ ч} \leq T \leq 24$  ч соответствуют первым трем гармоникам термических приливов (24, 12 и 8 ч). Наиболее быстрые вариации ( $T < 8$  ч) относятся к крупномасштабным перемещающимся ионосферным возмущениям (ПИВ), причиной которых могут быть распространяющиеся из нижних слоев внутренние гравитационные волны (ВГВ).

Рассчитанные значения атмосферной и ионосферной изменчивости во время действия ВСП были сопоставлены со средними сезонными значениями для каждого месяца (табл. 1 и 2).

Таблица 1.

**Усредненные за период 2008–2015 гг. значения изменчивости температуры мезопаузы (К) вследствие активности атмосферных волн различных временных масштабов**

Месяц	Планетарные волны	Приливы	ВГВ
Декабрь	10.8	4.6	3.1
Январь	11	4.7	3.1
Февраль	8.6	4.5	2.6

Таблица 2.

**Усредненные за период 2008–2015 гг. значения изменчивости максимума электронной концентрации (%) вследствие активности атмосферных волн различных временных масштабов**

Месяц	Планетарные волны		Приливы		ВГВ	
	День	Ночь	День	Ночь	День	Ночь
Декабрь	14.1	20.1	12.5	15.4	11.6	11.2
Январь	14.0	17.8	12.7	16.5	11.1	11.2
Февраль	14.3	17.6	11.4	15.9	8.9	10.0

## Результаты и обсуждение

Для анализа были выбраны события зимних внезапных стратосферных потеплений, относящихся к различному типу. Анализ зональных характеристик средней атмосферы над северным полушарием по данным реанализа MERRA показал, что ВСП в январе 2013 и феврале 2018 гг. сопровождалось сменой

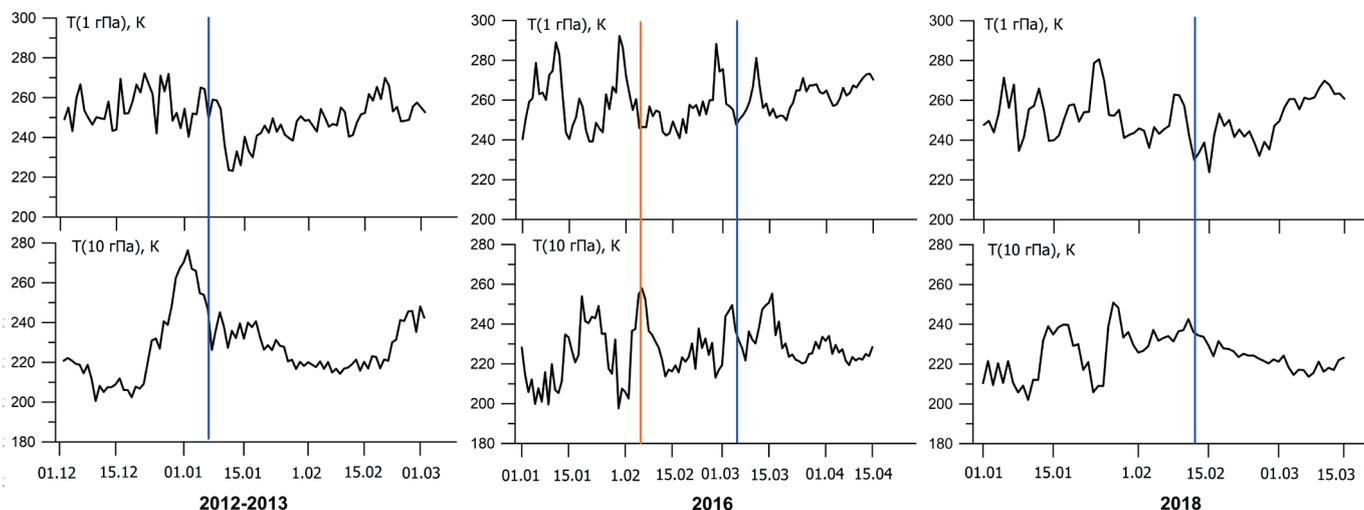
направления среднего зонального ветра на 60°с.ш. и высотном уровне 10 гПа с западного на восточное, и могут быть классифицированы как значительные (*major*) ВСП. В зимне-весенний период 2016 г. в северном полушарии произошло два события ВСП. Незначительное (*minor*) ВСП наблюдалось в начале февраля; во время этого события средний зональный ветер (60°с.ш., 10 гПа) значительно ослаб, но не изменил своего направления. В начале марта произошло второе, финальное, стратосферное потепление, в результате которого 5 марта зимний циркумполярный вихрь был разрушен без последующего восстановления, и произошла ранняя перестройка атмосферной циркуляции. В табл. 3 приведены характеристики анализируемых событий ВСП.

Таблица 3.

**Характеристики анализируемых внезапных стратосферных потеплений**

Год	Тип ВСП	Даты реверса зонального ветра (60°, 10 гПа)
2013	Значительное ( <i>major</i> )	6–27 января
2016	1. Незначительное ( <i>minor</i> ) в начале февраля 2. Финальное в начале марта	5 марта
2018	Значительное ( <i>major</i> )	12–28 февраля

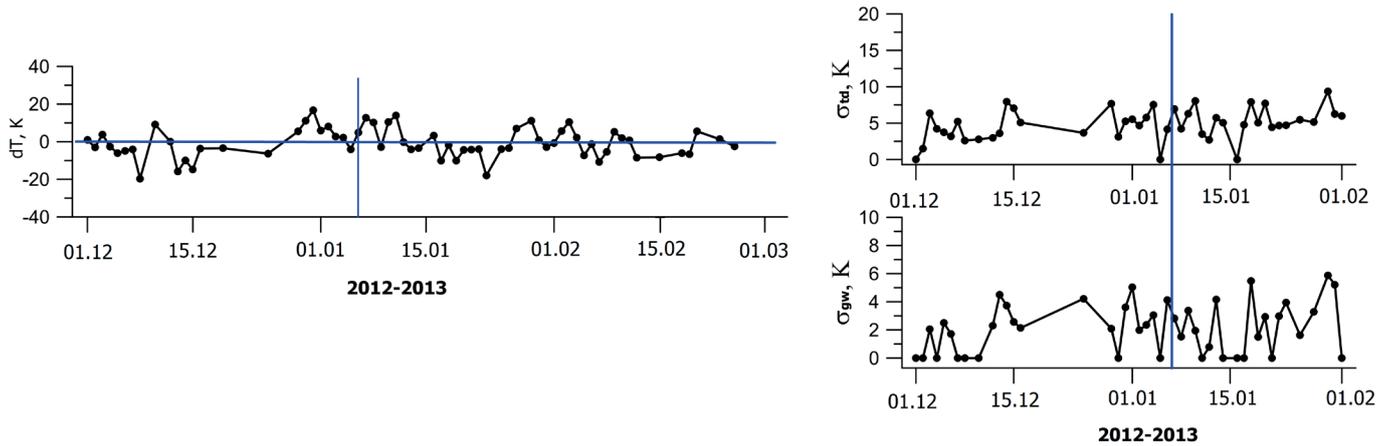
На рис. 1 представлены вариации температуры стратосферы по спутниковым данным MLS AURA над Иркутском на 10 гПа (~32 км) и 1 гПа (~50 км) в зимне-весенний период 2013, 2016 и 2018 гг. Анализ спутниковых данных показал, что во время всех анализируемых событий ВСП наблюдались значительные возмущения температуры средней атмосферы.



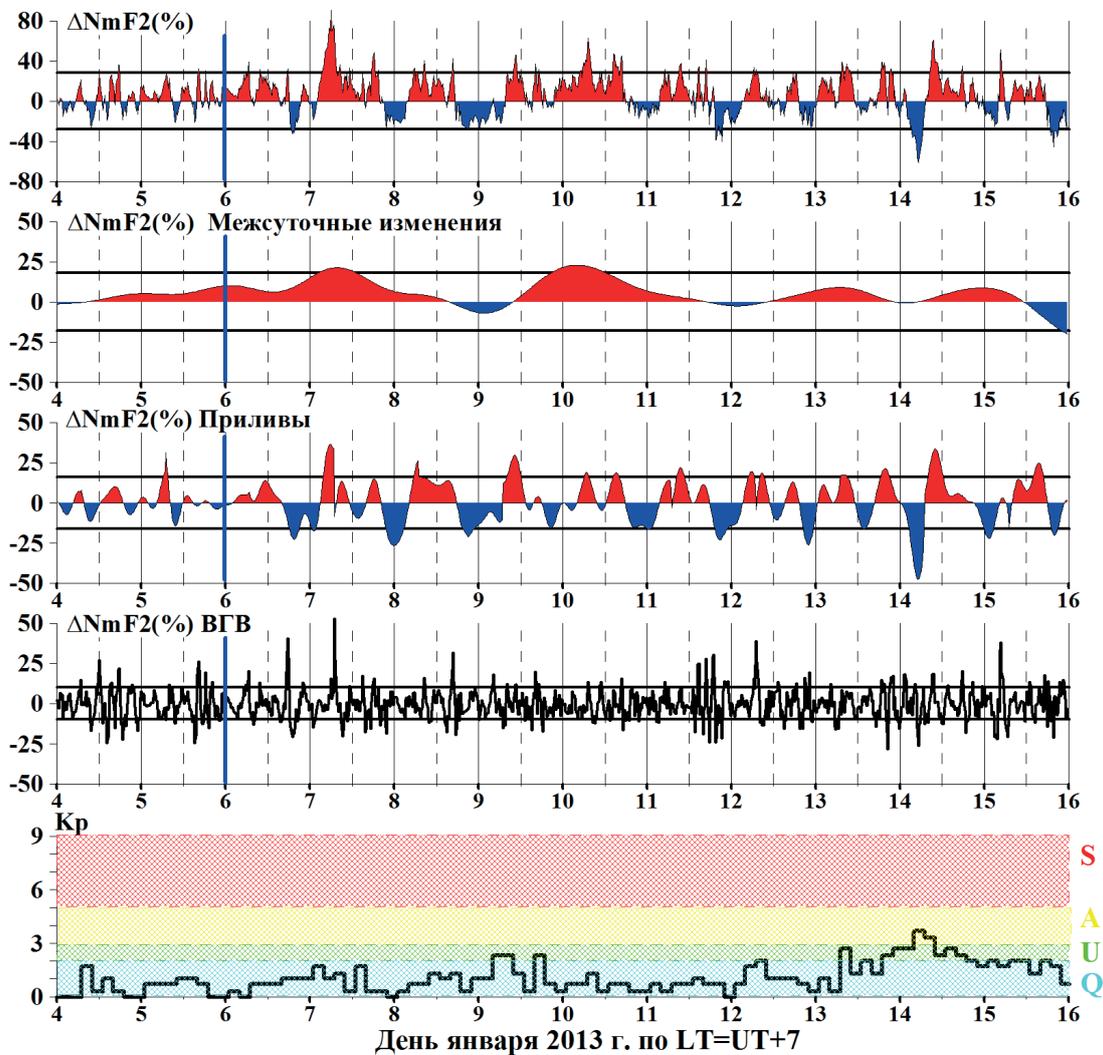
**Рис. 1.** Вариации температуры стратосферы над Иркутском на высотных уровнях 10 гПа (~32 км, нижняя панель) и 1 гПа (~50 км, верхняя панель) по спутниковым данным MLS AURA для анализируемых событий ВСП. Вертикальные синие линии отмечают дату смены направления среднего зонального ветра на 60°с.ш., 10 гПа с западного на восточное, оранжевые – дату максимального повышения температуры на 10 гПа (5 февраля) для незначительного ВСП в 2016 г.

*Значительное (major) ВСП в январе 2013 г.*

На рис. 2 представлены вариации остаточных отклонений температуры мезопаузы после вычитания гармоник сезонных вариаций (левая панель), а также изменчивость температуры мезопаузы вследствие воздействия приливов и ВГВ (правая панель). Анализ поведения температуры области мезопаузы и сопоставление ее изменчивости со средними сезонными значениями показал, что наиболее выраженный



**Рис. 2.** Слева: остаточные отклонения температуры мезопаузы ( $dT$ ) после исключения сезонных вариаций, анализируемый временной интервал 1.12.2012–1.03.2013 гг. Справа: изменчивость температуры мезопаузы вследствие воздействия приливов (верхняя панель) и ВГВ (нижняя панель). Анализируемый временной интервал 1.12.12–01.02.2013 гг. Вертикальная линия отмечает дату смены направления зонального ( $60^\circ\text{с.ш.}$ , 10 гПа) ветра



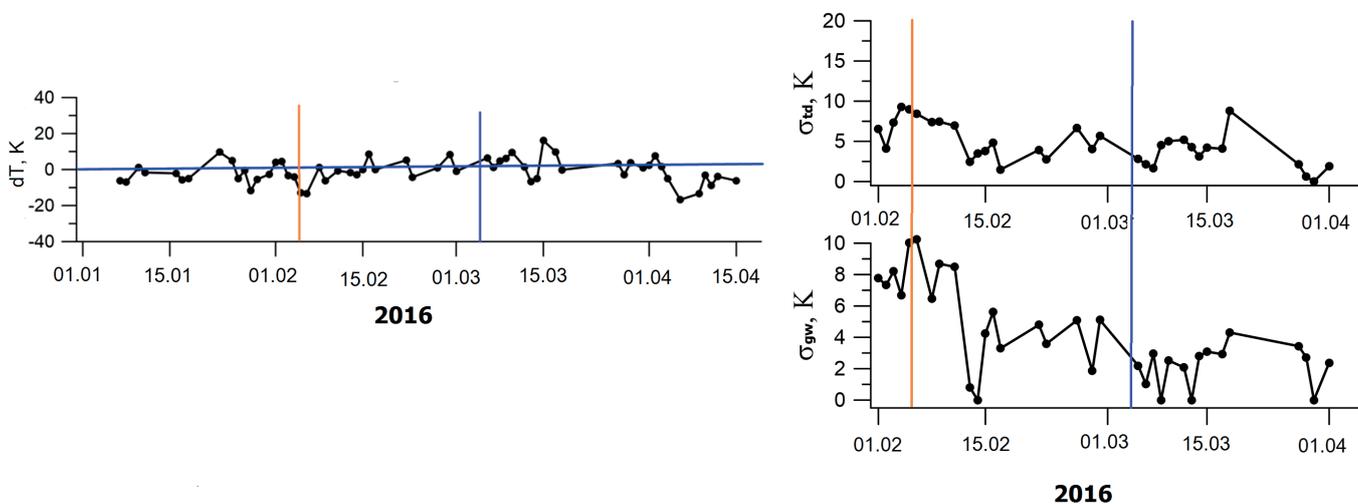
**Рис. 3.** Вариации  $\Delta NmF2$  в диапазонах различных периодов на интервале 04–16 января 2013 г. Сверху вниз: полная ионосферная возмущенность и ее межсуточная, приливная и ВГВ компоненты. Нижний график – вариации геомагнитной активности. Вертикальная линия отмечает день реверса зонального ветра (6.01). Горизонтальные линии – средние сезонные значения ионосферной изменчивости

эффект ВСП в январе 2013 наблюдался в поведении межсуточной температурной изменчивости, которая может быть обусловлена влиянием планетарных волн, и увеличением ее значений до 2 раз (рис. 2, левая панель). В диапазоне приливов возмущения не обнаружены. В диапазоне ВГВ в максимуме ВСП наблюдалось усиление температурной изменчивости до ~1.5 раз.

На рис. 3 представлены вариации полной ионосферной изменчивости (верхний график) и в диапазонах различных периодов: межсуточной, с периодами приливов и ВГВ (сверху вниз). На этом же рисунке показаны вариации геомагнитной активности. Анализируемый временной интервал 4–16 января 2013 г. Анализ вариаций  $\Delta N_m F_2$  в диапазонах различных периодов показал, что после реверса зонального ветра, при спокойной геомагнитной обстановке, начиная с 7 января, наблюдались мощные положительные возмущения (до ~2 раз), которые были наиболее ярко выражены в поведении межсуточной ионосферной возмущенности и в приливном диапазоне.

*Незначительное (minor) ВСП в феврале и финальное в марте 2016 г.*

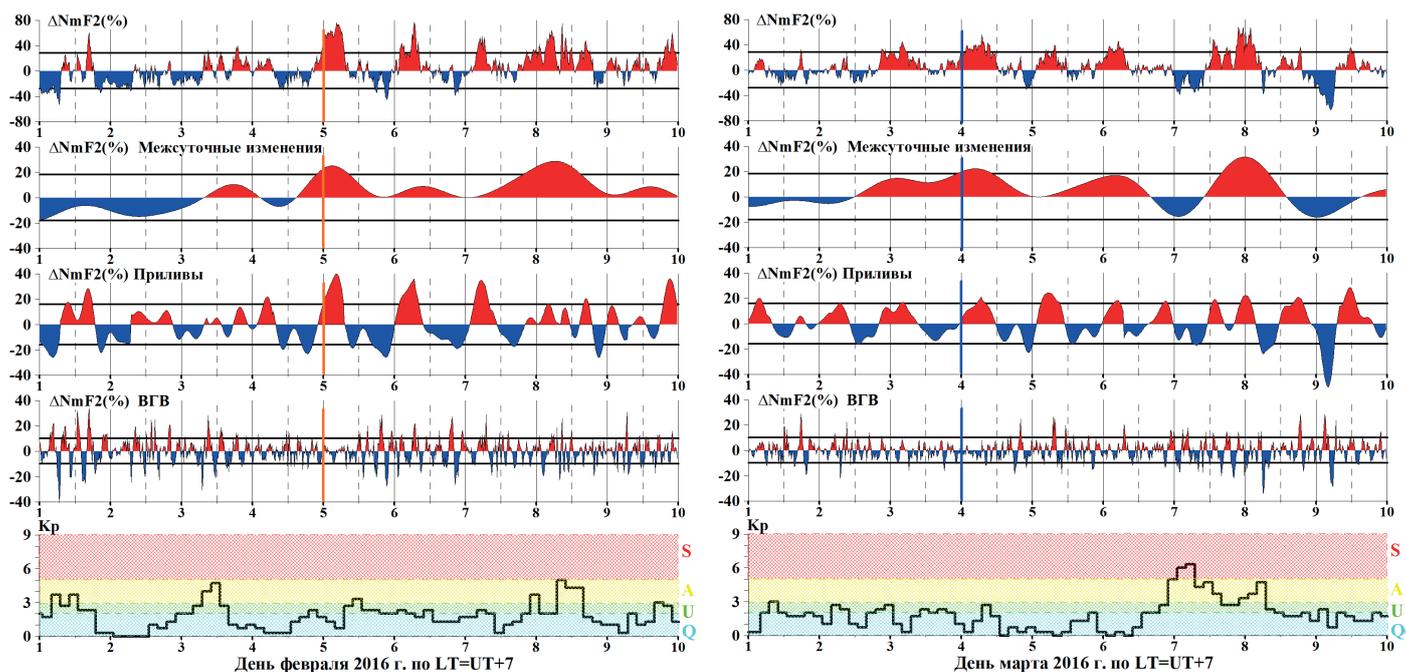
На рис. 4 показаны вариации остаточных отклонений температуры мезопаузы после вычитания гармоник сезонных вариаций (левая панель), а также изменчивость температуры мезопаузы вследствие воздействия приливов и ВГВ (правая панель) для зимне-весеннего периода 2016 года. Вертикальные линии отмечают: оранжевая – дату максимального повышения температуры на 10 гПа для ВСП в феврале, синяя – дату смены направления зонального ( $60^\circ$ с.ш., 10 гПа) ветра. Сопоставление со средними сезонными значениями изменчивости температуры мезопаузы показало, что в периоды ВСП в феврале и марте 2016 г. наблюдалось значительное увеличение активности волновых процессов на высотах мезопаузы. Основные эффекты проявились в поведении короткопериодной атмосферной изменчивости. Так, в начале февраля 2016 г. наблюдалось усиление активности планетарных волн и приливов до ~2 раз, ВГВ до ~5 раз. В конце февраля-начале марта наблюдалось усиление активности приливов и ВГВ до ~2 раз (рис. 4).



**Рис. 4.** Слева: остаточные вариации температуры мезопаузы ( $dT$ ) после исключения сезонных вариаций, 1.01–15.04.2016 г. Справа: изменчивость температуры мезопаузы вследствие воздействия приливов (верхняя панель) и ВГВ (нижняя панель), 1.02.12–01.04.2016 г. Вертикальные линии: оранжевая – дата максимального повышения температуры на 10 гПа для ВСП в феврале, синяя – дата смены направления зонального ( $60^\circ$ с.ш., 10 гПа) ветра

На рис. 5 представлены вариации полной ионосферной изменчивости (верхний график) и в диапазонах различных периодов: межсуточной, с периодами приливов и ВГВ (сверху вниз). На этом же рисунке показаны вариации геомагнитной активности. Представлены графики для временных интервалов 1–10 февраля (левая панель) и 1–10 марта (правая панель) 2016 г.

Анализ ионосферной возмущенности во время ВСП в феврале 2016 г. показал следующее. Положительные возмущения, наблюдаемые 3 и 8 февраля, по всей видимости, связаны с



**Рис. 5.** Вариации  $\Delta NmF2$  в диапазонах различных периодов на интервалах 01–10 февраля (слева) и 1–10 марта (справа) 2016. Сверху вниз: полная ионосферная возмущенность и ее межсуточная, приливная и ВГВ компоненты. Нижний график – вариации геомагнитной активности. Вертикальные линии: оранжевая – дата максимального повышения температуры на 10 гПа для ВСП в феврале, синяя – дата смены направления зонального ( $60^\circ$ с.ш., 10 гПа) ветра. Горизонтальные линии – средние сезонные значения ионосферной изменчивости

геомагнитной активностью (геомагнитно возмущенными условиями 3 февраля ( $Kp = 5$ ) и слабой бурей ( $Kp = 5$ ) 8 февраля). На интервале 5–7 февраля геомагнитные условия были спокойными либо слабовозмущенными, и, таким образом, можно предположить, что в эти дни возмущения  $\Delta NmF2$  не связаны с геомагнитной активностью и могут рассматриваться как ионосферный отклик на ВСП. Положительное возмущение  $NmF2$  достигает своего максимального значения 5 февраля, когда температура стратосферы на 10 гПа над Иркутском достигла своего максимального значения, в послеполуночное время (рис. 5). Анализ ионосферной изменчивости в различных диапазонах периодов выявил, что сильные возмущения  $NmF2$ , наблюдаемые 5–7 февраля, в основном проявляются в приливном диапазоне. Максимальное положительное значение в приливном диапазоне  $\Delta NmF2$  в  $\sim 2,5$  раза выше, чем полученное усреднением для февральского ночного периода (табл. 2). Отметим, что усиление приливных компонент во время ВСП рассматривалось в качестве ионосферного отклика на ВСП в недавних работах [Chen et al., 2016; Pedatella et al., 2015].

Для финального стратосферного потепления в марте 2016 г. анализ показал, что вблизи даты смены направления среднего зонального ветра (4–6 марта) в вариациях  $\Delta NmF2$  наблюдаются положительные возмущения в послеполуночные утренние часы (рис. 5, правая панель). Как и в случае февральского ВСП, эти возмущения хорошо выражены в приливной компоненте и наблюдаются в спокойных либо слабовозмущенных геомагнитных условиях. Основное отличие ионосферных эффектов заключается в том, что в отличие от февральского ВСП, амплитуда возмущений  $NmF2$  была заметно меньше.

#### *Значительное (major) ВСП в феврале 2018 г.*

На рис. 6 представлены вариации остаточных отклонений температуры мезопаузы после вычитания гармоник сезонных вариаций (левая панель), а также изменчивость температуры мезопаузы вследствие воздействия приливов и ВГВ (правая панель). Обнаружено, что на высотах мезопаузы наиболее значительный эффект ВСП в феврале 2018 г. заключался в увеличении межсуточной атмосферной

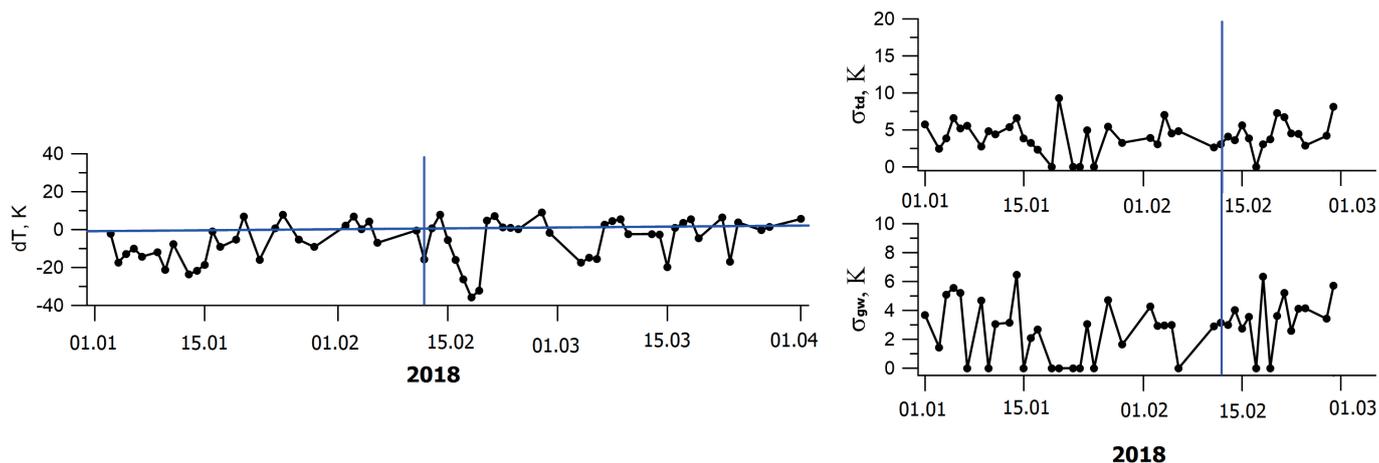


Рис. 6. Слева: остаточные вариации температуры мезопаузы ( $dT$ ) после исключения сезонных вариаций, 1.01–01.04.2018 г. Справа: изменчивость температуры мезопаузы вследствие воздействия приливов (верхняя панель) и ВГВ (нижняя панель), 1.01.12–01.03.2018 г. Вертикальная линия отмечает дату смены направления зонального ( $60^{\circ}$ с.ш., 10 гПа) ветра

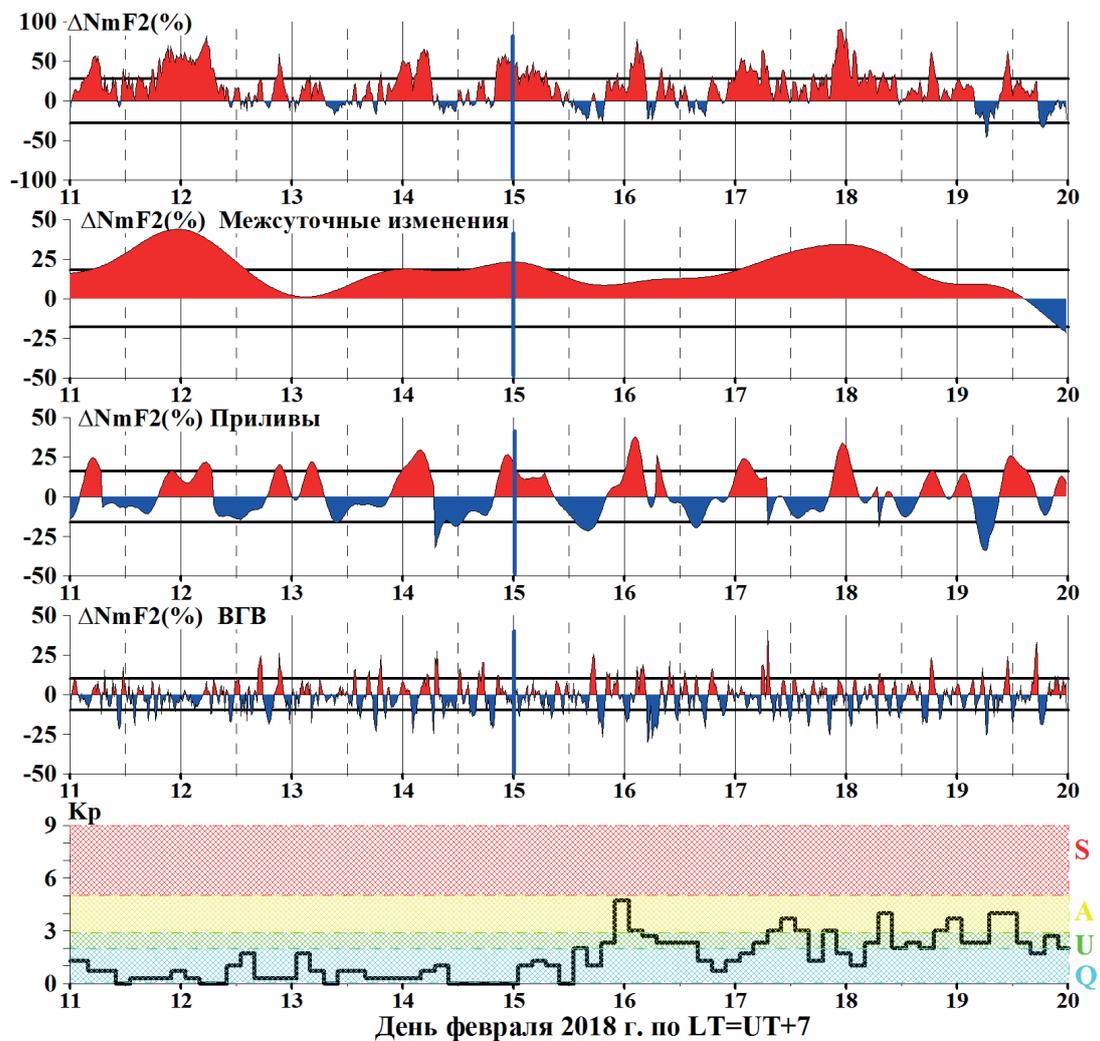


Рис. 7. Вариации  $\Delta NmF2$  в диапазонах различных периодов на интервале 11–20 февраля 2018 г. Сверху вниз: полная ионосферная возмущенность и ее межсуточная, приливная и ВГВ компоненты. Нижний график – вариации геомагнитной активности. Вертикальная линия отмечает день реверса зонального ветра. Горизонтальные линии – средние сезонные значения ионосферной изменчивости

изменчивости, до  $\sim 5$  раз по сравнению со средними сезонными значениями. После реверса зонального ветра в вариациях остаточных отклонений температуры мезопаузы наблюдались квазипериодические осцилляции с периодом  $\sim 7$ – $10$  дней (рис. 6, левая панель). В диапазоне приливов возмущения не обнаружены. В диапазоне ВГВ – в максимуме ВСП наблюдалось усиление температурной изменчивости до  $\sim 1.5$ – $2$  раз (рис. 6, правая панель).

На рис. 7 показаны вариации полной ионосферной изменчивости (верхний график) и в диапазонах различных периодов: межсуточной, с периодами приливов и ВГВ (сверху вниз) для февраля 2018 г. Анализ ионосферных возмущений на 10–дневном интервале 11–19.02.2018 не выявил явных короткопериодных ионосферных эффектов ВСП. Значения межсуточной ионосферной изменчивости превышали средние сезонные значения до 2 раз.

Таким образом, во время действия всех анализируемых ВСП наблюдалось усиление атмосферной и ионосферной изменчивости, вызванной активностью атмосферных волн на высотах мезопаузы (80–100 км) и ионосферной  $F2$ -области. Обнаружены также существенные различия проявления волновой активности в верхней атмосфере в периоды ВСП различного типа. Так, незначительное (*minor*) в феврале и финальное ВСП в марте 2016 г. привели к интенсификации внутрисуточной атмосферной и ионосферной изменчивости с периодами приливов и внутренних гравитационных волн. Во время значительных (*major*) ВСП в январе 2013 и феврале 2018 гг. наблюдалось усиление межсуточной атмосферной и ионосферной изменчивости, которая может быть вызвана интенсификацией активности планетарных волн в верхней атмосфере. Возможной причиной выявленных различий эффектов ВСП в верхней атмосфере может быть динамика нижележащих слоев атмосферы.

### Заключение

Проведено исследование изменчивости температуры атмосферы в области мезопаузы и максимума электронной концентрации  $NmF2$  в периоды действия ВСП, относящихся к различным типам. Использованы данные о температуре мезопаузы, полученные по спектрометрическим наблюдениям эмиссии молекулы гидроксидла (полоса ОН(6–2) 834.0 нм, высота максимума излучения  $\sim 87$  км) в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН и данные вертикального зондирования о максимуме электронной концентрации ( $NmF2$ ), полученные на иркутском ионозонде DPS-4. Исследованы и сопоставлены вариации в различных временных периодах: межсуточные вариации ( $T > 24$  ч.), приливные вариации ( $8 \text{ ч.} \leq T \leq 24 \text{ ч.}$ ), а также вариации с периодами внутренних гравитационных волн ( $T < 8 \text{ ч.}$ ).

Выявлено, что во время действия всех анализируемых ВСП наблюдалось усиление атмосферной и ионосферной изменчивости, вызванной активностью атмосферных волн в верхней атмосфере. Обнаружены также существенные различия проявления волновой активности на высотах мезопаузы и ионосферной  $F2$ -области в периоды ВСП различного типа. Так, незначительное (*minor*) ВСП в феврале 2016 г. привело к интенсификации внутрисуточной атмосферной и ионосферной изменчивости с периодами приливов и внутренних гравитационных волн. Во время значительных (*major*) ВСП в январе 2013 и феврале 2018 гг. наблюдалось усиление межсуточной атмосферной и ионосферной изменчивости, которая может быть вызвана интенсификацией активности планетарных волн в верхней атмосфере.

Обнаруженные эффекты могут быть вызваны интенсификацией активности атмосферных волн и усилением вертикального движения в атмосфере в периоды ВСП. Выявленные отличия проявления эффектов проанализированных событий ВСП в области мезопаузы и в ионосферной  $F2$ -области могут быть следствием различий динамики нижележащей атмосферы.

### Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00212. В работе были использованы экспериментальные данные оборудования Центра

коллективного пользования «Ангара» <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>, алгоритмы и методы анализа, разработанные при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

### Список литературы

Варгин П.Н., Медведева И.В. Исследование температурного и динамического режимов ветротропической атмосферы Северного полушария в период внезапного стратосферного потепления зимой 2012–2013 гг. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51, № 1. С. 20–38. DOI: 10.7868/S0002351514060170.

Медведева И.В., Ратовский К.Г. Сравнительный анализ атмосферной и ионосферной изменчивости по измерениям температуры области мезопаузы и максимума электронной концентрации NmF2 // Геомагнетизм и аэронавигация. 2017. Т. 57. № 2. С. 236–248. DOI: 10.7868/S0016794017020109.

Chen G., Wu C., Zhang S., Ning B., Huang X., Zhong D., Qi H., Wang J., Huang L. Midlatitude ionospheric responses to the 2013 SSW under high solar activity // J. Geophys. Res. Space Physics. 2016. V. 121. P. 790–803. DOI:10.1002/2015JA021980.

Labitzke K. Interannual variability of the winter stratosphere in the Northern hemisphere // Monthly Weather Review. 1977. V. 105. P. 762–770.

Labitzke K., Naujokat B. The lower Arctic stratosphere in winter since 1952 // SPARC Newsletter. 2000. V. 15. P. 11–14.

Limpasuvan V., Richter J.H., Orsolini Y.J., Stordal F., Kvissel O.-K. The roles of planetary and gravity waves during a major stratospheric sudden warming as characterized in WACCM // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2012. V. 78–79. P. 84–98.

Medvedeva I., Ratovsky K. Studying atmospheric and ionospheric variabilities from long-term spectrometric and radio sounding measurements // J. Geophys. Res. Space Physics. 2015. V. 120. Issue 6. P. 5151–5159, doi:10.1002/2015JA021289.

Offermann D., Gusev O., Donner M., Forbes J.M., Hagan M., Mlynczak M.G., Oberheide J., Preusse P., Schmidt H., Russell III J.M. Relative intensities of middle atmosphere waves // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. D06110, doi: 10.1029/2008JD010662.

Pedatella N.M., Maute A. Impact of the semidiurnal lunar tide on the midlatitude thermospheric wind and ionosphere during sudden stratosphere warmings // J. Geophys. Res. Space Physics. 2015. V. 120. No. 10. P. 740–753, doi:10.1002/2015JA021986.

Perminov V.I., Semenov A.I., Medvedeva I.V., Zheleznov Yu.A. Variability of mesopause temperature from the hydroxyl airglow observations over midlatitudinal sites, Zvenigorod and Tory, Russia // Adv. Space Res. 2014. V. 54. P. 2511–2517. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2014.01.027>.

Yasyukevich, A.S.; Chernigovskaya, M.A.; Shpynev, B.G.; Khabituev, D.S.; Yasyukevich, Y.V. Features of Winter Stratosphere Small-Scale Disturbance during Sudden Stratospheric Warmings // Remote Sens. 2022, 14, 2798. <https://doi.org/10.3390/rs14122798>.

Yigit E., Medvedev A.S. Internal wave coupling processes in Earth's atmosphere // Adv. Space Res. 2015. V. 55. P. 983–1003.

## **IMPACT OF WINTER SUDDEN STRATOSPHERIC WARMINGS ON THE VARIABILITY OF PARAMETERS OF THE UPPER NEUTRAL ATMOSPHERE AND IONOSPHERE**

**I. Medvedeva<sup>1\*</sup> and K. Ratovsky<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia*

*\*E-mail: ivmed@iszf.irk.ru*

We present the results of studying the atmospheric temperature variability in the mesopause region and the NmF2 peak electron density during the winter sudden stratospheric warmings (SSWs) of different types in January 2013, February–March 2016, and February 2018. The analysis is based on the experimental data obtained from the complex of instruments of the Institute of Solar-Terrestrial Physics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences. To study the SSW effects, we used the method of complex analysis of atmospheric and ionospheric variability, which makes it possible to evaluate the manifestation of atmospheric wave activity in a wide range of altitudes of the upper atmosphere. It was found, that during the all analyzed SSWs, an increase in atmospheric and ionospheric variability was observed. Significant differences in the manifestation of wave activity at the heights of the mesopause and the ionospheric F2 region during SSWs of various types were also found.

**Keywords:** sudden stratospheric warming, atmosphere, ionosphere, wave activity, atmospheric-ionospheric coupling.