

Влияние метеорологических возмущений в феврале – марте 2016 г. на состояние верхней нейтральной атмосферы и ионосферы над Восточной Сибирью

И. В. Медведева, К. Г. Ратовский

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, 664033, Россия
E-mail: ivmed@iszf.irk.ru*

Представлены результаты исследования состояния нейтральной верхней атмосферы и ионосферы в регионе Восточной Сибири в периоды действия минорного зимнего внезапного стратосферного потепления (ВСП) в начале февраля и финального стратосферного потепления в начале марта 2016 г. Используются данные проводимых в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (51,8° с. ш., 103,1° в. д., Тору) спектрометрических измерений параметров излучения молекулы гидроксидов OH(6-2), 834,0 нм, и Атмосферной системы молекулярного кислорода O₂(0-1), 864,5 нм, возникающего на высотах мезопаузы и нижней термосферы (МНТ), и данные вертикального зондирования о максимуме электронной концентрации NmF₂, полученные на иркутском ионозонде DPS-4 (52,3° с. ш., 104,3° в. д.). Для анализа привлекались спутниковые температурные данные MLS Aura и данные реанализа MERRA.

Анализ вариаций параметров эмиссий молекул гидроксидов и кислорода, а также максимума электронной концентрации NmF₂ в феврале 2016 г. выявил эффекты на высотах верхней атмосферы, вызванные действием стратосферных потеплений. В исследуемом регионе в области МНТ наблюдались рост интенсивностей эмиссий молекул гидроксидов и кислорода, понижение температуры атмосферы и усиление проявления волновой активности. На высотах F₂-области ионосферы обнаружены значительные положительные возмущения NmF₂ в послеполуночные часы и существенное усиление амплитуды приливной компоненты возмущения NmF₂. Выявленные эффекты могут быть вызваны интенсификацией волновой активности и усилением вертикального движения в атмосфере в результате действия стратосферных потеплений.

Ключевые слова: внезапное стратосферное потепление, атмосфера, ионосфера, эмиссия гидроксидов, МНТ, максимум электронной концентрации, атмосферно-ионосферное взаимодействие

Одобрена к печати: 31.07.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-283-294

Введение

Метеорологические процессы в нижних слоях атмосферы могут оказывать влияние не только на нейтральную верхнюю атмосферу, но и на её ионизованную часть. Основным механизмом переноса энергии между различными областями атмосферы являются волновые процессы. Атмосферные волны могут распространяться на значительные расстояния и переносить энергию с нижних атмосферных уровней на большие высоты, обеспечивая процесс взаимосвязи атмосферных слоёв.

Одним из наиболее значительных метеорологических возмущений, охватывающим большие пространственные и временные масштабы и влияющим на динамику нижней и средней атмосферы в зимнее время, являются внезапные стратосферные потепления (ВСП). К настоящему времени установлено, что значительные стратосферные потепления влияют также и на состояние верхней нейтральной атмосферы и ионосферы. Эффекты ВСП на высотах верхней мезосферы и нижней термосферы (МНТ) были выявлены по данным спектрометрических наблюдений излучения молекулы гидроксидов (Варгин, Медведева, 2015; Medvedeva et al., 2012; Shepherd et al., 2010; Walterscheid et al., 2000), данным измерений при помощи метеорных радаров и лидаров (Hoffmann et al., 2007), спутниковым температурным данным (Siskind et al., 2005; Tolstikov et al., 2014) и т.д. Авторы работы (Shepherd et al., 2010) по данным наблюдений на станции Eureka (80° с. ш., 86° з. д.) обнаружили значительные вариации

интенсивностей атмосферных эмиссий и вращательных температур молекул $\text{OH}(6-2)$ и $\text{O}_2(0,1)$ в период стратосферного потепления в январе 2009 г. в зависимости от фазы ВСП. П. Н. Варгин и И. В. Медведева (2015), используя данные спектрометрических наблюдений излучения $\text{OH}(6-2)$ и $\text{O}_2(0,1)$ на средних широтах (52° с. ш., 103° з. д.), обнаружили увеличение интенсивностей этих эмиссий в 2–2,5 раза относительно невозмущённых условий и уменьшение температуры в верхней мезосфере в период ВСП в январе 2013 г. Авторы исследования (Siskind et al., 2005) показали, что связанное с событиями ВСП охлаждение атмосферы на мезосферных высотах происходит в достаточно узком слое и не распространяется на всю область мезосферы.

С помощью радиофизических измерений параметров ионосферной плазмы были выявлены ионосферные эффекты стратосферных потеплений в большом диапазоне широт — от высоких до экваториальных (Chen et al., 2016; Goncharenko, Zhang, 2008; Medvedeva et al., 2015; Shpynev et al., 2015). В работах (Goncharenko, Zhang, 2008; Medvedeva et al., 2015) по данным радаров некогерентного рассеяния в периоды действия внезапных стратосферных потеплений в 2008 и 2013 гг. выявлено значительное уменьшение температуры ионов в F2-области ионосферы на средних широтах. Г. Чен (G. Chen) с коллегами (Chen et al., 2016), анализируя данные среднеширотной меридиональной цепочки ионозондов, обнаружили, что ВСП в январе 2013 г. вызвало увеличение максимума электронной концентрации F2-области ионосферы более чем на 80 %. Авторы работы (Shpynev et al., 2015), проведя анализ данных сети российских ионозондов, расположенных в высоких и средних широтах, в периоды действия ВСП в 2009 и 2013 гг., пришли к выводу, что ионосферный отклик на события ВСП зависит от расположения станции наблюдения относительно картины стратосферной циркуляции.

Несмотря на явный прогресс в области исследования стратосферных потеплений, механизм влияния данного явления на состояние нейтральной и ионизованной частей верхней атмосферы окончательно пока не ясен. В большинстве экспериментальных работ, посвящённых исследованию отклика МНТ и ионосферы на ВСП, анализируются события ВСП мажорного (major) типа (Labitzke, Naujokat, 2000), сопровождающиеся сменой направления среднезонального (60° с. ш., 10 гПа) зонального ветра с западного на восточное. Целью настоящей работы является комплексное экспериментальное исследование поведения параметров нейтральной верхней атмосферы и ионосферы в регионе Восточной Сибири в периоды действия минорного ВСП в начале февраля и финального стратосферного потепления в начале марта 2016 г.

Анализируемые данные

В настоящей работе были использованы данные наземных спектрометрических и радиофизических наблюдений на комплексе инструментов Института солнечно-земной физики СО РАН, спутниковые данные MLS Aura, а также данные реанализа MERRA.

Для исследования проявления стратосферных потеплений на высотах МНТ были использованы данные спектрометрических измерений параметров эмиссий молекулы гидроксила $\text{OH}((6-2))$, 834,0 нм, ~ 87 км) и Атмосферной системы молекулярного кислорода $\text{O}_2((0-1))$, 864,5 нм, ~ 94 км). Измерения проводятся в ночное время суток на ИК-спектрометре, установленном в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН ($51,8^\circ$ с. ш., $103,1^\circ$ в. д., Торы). Полученные с временным разрешением 10 мин спектры позволяют определять спектральные характеристики (интенсивность, температура) эмиссий молекул OH и O_2 , возникающих на высотах МНТ. Вращательная температура молекулы OH , определяемая с точностью 1–2 К, соответствует температуре атмосферы на высоте излучения (область мезопаузы). Детальное описание методики измерений и получения данных представлено в работах (Перминов и др., 2007; Шефов и др., 2006).

Для исследования ионосферных эффектов стратосферных потеплений использовались данные вертикального зондирования, полученные на иркутском дигизонде DPS-4 ($52,3^\circ$ с. ш., $104,3^\circ$ в. д.) (Oinats et al., 2006; Reinisch et al., 1997). Временное разрешение дигизонда состав-

ляло 15 мин. Для анализа из получаемых дигизондом характеристик были выбраны значения максимума электронной концентрации ($NmF2$) и высоты максимума ($hmF2$).

Температура средней атмосферы над Восточной Сибирью анализировалась по данным вертикальных профилей температуры в стратосфере и мезосфере (версия v.3.3), полученным с помощью сканирующего сверхвысокочастотного (СВЧ) лимбового зонда MLS (Microwave Limb Sounder), установленного на спутнике Aura EOS. Использовались данные, соответствующие ночным пролётам спутника над исследуемым регионом. Согласно работе (Schwartz et al., 2008), точность определения температуры прибором MLS Aura составляет ~ 1 К в диапазоне высот от 316 до 3,16 гПа, снижаясь до ~ 3 К на 0,001 гПа.

Для анализа зональных характеристик стратосферы над Северным полушарием были привлечены ежедневные данные реанализа MERRA (http://acdb-ext.gsfc.nasa.gov/Data_services/met/ann_data.html). Оценка геомагнитной активности проводилась по данным индекса K_p Мирового центра данных (WDC Boulder, Colorado, ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/GEOMAGNETIC_DATA/INDICES/KP_AP).

Результаты и обсуждение

Температурный и динамический режимы средней атмосферы Северного полушария в феврале – марте 2016 г.

Для оценки возмущений температурного и динамического режимов стратосферы над Северным полушарием были проанализированы данные реанализа MERRA за период с 15 января по 15 апреля 2016 г. На *рис. 1* представлены зональные характеристики стратосферы на высотном уровне 10 гПа (~ 32 км): температура на полюсе (см. *рис. 1а*), среднезональная ($60\text{--}90^\circ$ с. ш.) температура (см. *рис. 1б*), среднезональный (60° с. ш.) зональный ветер (см. *рис. 1в*), среднезональный ($45\text{--}75^\circ$ с. ш.) меридиональный поток тепла (см. *рис. 1г*).

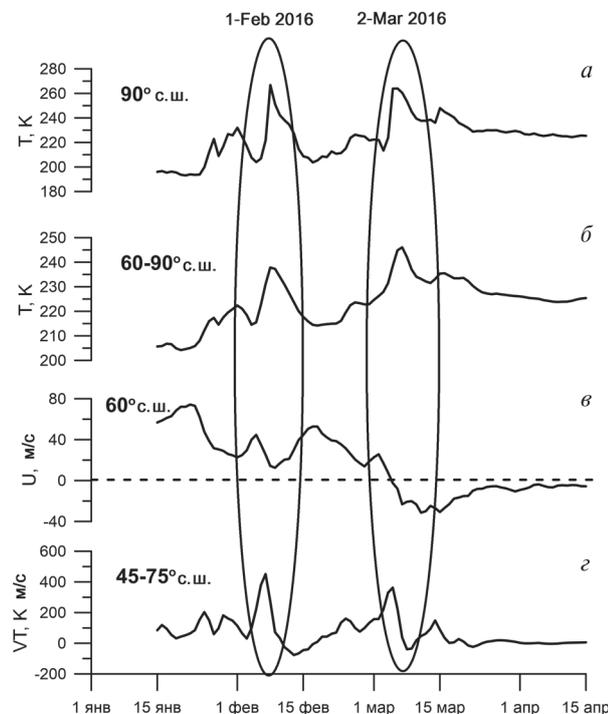


Рис. 1. Зональные характеристики стратосферы над Северным полушарием на уровне 10 гПа (~ 32 км) в период 15.01.2016–15.04.2016 по данным реанализа MERRA: *a* — температура на 90° с. ш.; *б* — среднезональная ($60\text{--}90^\circ$ с. ш.) температура; *в* — среднезональный (60° с. ш.) зональный ветер; *г* — среднезональный ($45\text{--}75^\circ$ с. ш.) меридиональный поток тепла. Эллипсами отмечены анализируемые события стратосферных потеплений в феврале (1-Feb 2016) и марте (2-Mar 2016) 2016 г.

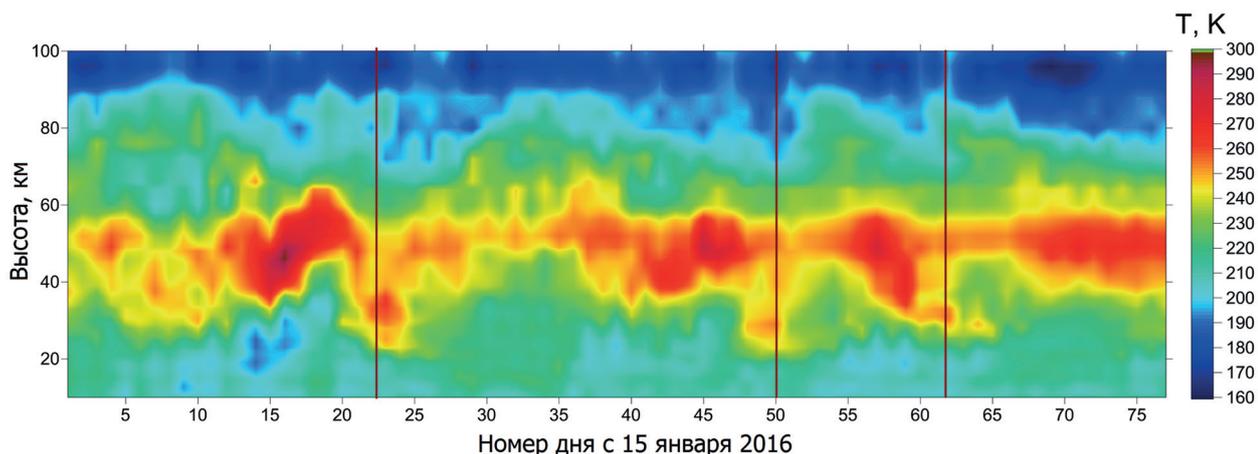


Рис. 2. Высотно-временное распределение температуры атмосферы по данным MLS AURA для Иркутска с 15.01.2016 до 31.03.2016. Вертикальные линии отмечают даты, когда наблюдалось наиболее значительное повышение температуры стратосферы на уровне 10 гПа для исследуемого региона: 1-Feb 2016 — 05.02.2016 (254 К.); 2-Mar 2016 — 04.03.2016 (250 К) и 16.03.2016 (255 К)

На рис. 1 видно, что с конца января 2016 г. наблюдались значительные возмущения зональных характеристик стратосферы (повышение температуры, ослабление зонального ветра, рост меридионального потока тепла). Так, температура стратосферы над полюсом увеличилась на ~ 70 К (см. рис. 1а), а среднезональная температура — более чем на 30 К (см. рис. 1б). Среднезональный (60° с. ш., 10 гПа) зональный ветер значительно ослаб (с ~ 74 м/с 22 января до ~ 12 м/с 9 февраля), но не изменил своё направление. Таким образом, в начале февраля 2016 г. произошло внезапное стратосферное потепление, которое, согласно определению Всемирной метеорологической организации (Labitzke, 1977), может быть классифицировано как минорное, после чего значения параметров стратосферы вернулись к невозмущённому уровню. Однако уже после 15 февраля 2016 г. началось развитие второго стратосферного потепления, которое также сопровождалось значительным ростом стратосферной температуры как на полюсе (на ~ 70 К, см. рис. 1а), так и в диапазоне широт 60 – 90° с. ш. (на ~ 30 К, рис. 1б) и увеличением меридионального потока тепла (см. рис. 1г). 5 марта 2016 г. зимний циркумполярный вихрь был разрушен и уже больше не восстанавливался (см. рис. 1в), т. е. произошла ранняя перестройка атмосферной циркуляции. Следовательно, стратосферное потепление в начале марта 2016 г. может быть классифицировано как финальное. Анализируемые стратосферные потепления отмечены на рис. 1 эллипсами. Минорное ВСП в начале февраля обозначено как событие «1-Feb 2016», финальное стратосферное потепление в начале марта — как событие «2-Mar 2016».

При помощи спутниковых данных вертикальных профилей температуры MLS AURA был проведён анализ температурного режима средней атмосферы над регионом Восточной Сибири за период с 15.01.2016 по 31.03.2016 (рис. 2). Выявлено, что в периоды анализируемых стратосферных потеплений в феврале и марте 2016 г. в исследуемом регионе наблюдались значительные возмущения температурного режима в большом диапазоне высот атмосферы (см. рис. 2). Наиболее значительное повышение температуры стратосферы на уровне 10 гПа произошло для события «1-Feb 2016» 05.02.2016 (254 К), для события «2-Mar 2016» 04.03.2016 (250 К) и 16.03.2016 (255 К).

Проявление эффектов стратосферных потеплений в феврале и марте 2016 г. на высотах мезосферы и нижней термосферы (МНТ)

На рис. 3 представлены вариации полученных по данным спектрометрических измерений усреднённых за каждую ночь наблюдения значений интенсивностей эмиссий молекул O_2 (см. рис. 3а) и OH (см. рис. 3б), максимумы излучения которых находятся на высо-

тах ~94 и ~87 км соответственно, а также значений вращательной температуры гидроксила (см. рис. 3в), соответствующей температуре атмосферы на высоте излучения. На этом же рисунке приведены значения температуры стратосферы на 1 гПа (~50 км, см. рис. 3г) и 10 гПа (~32 км, см. рис. 3д) по спутниковым данным MLS Aura. Анализируемый период: 27 января – 31 марта 2016 г. Вертикальная линия отмечает дату изменения направления среднезонального (60° с. ш., 10 гПа) зонального ветра с западного на восточное.

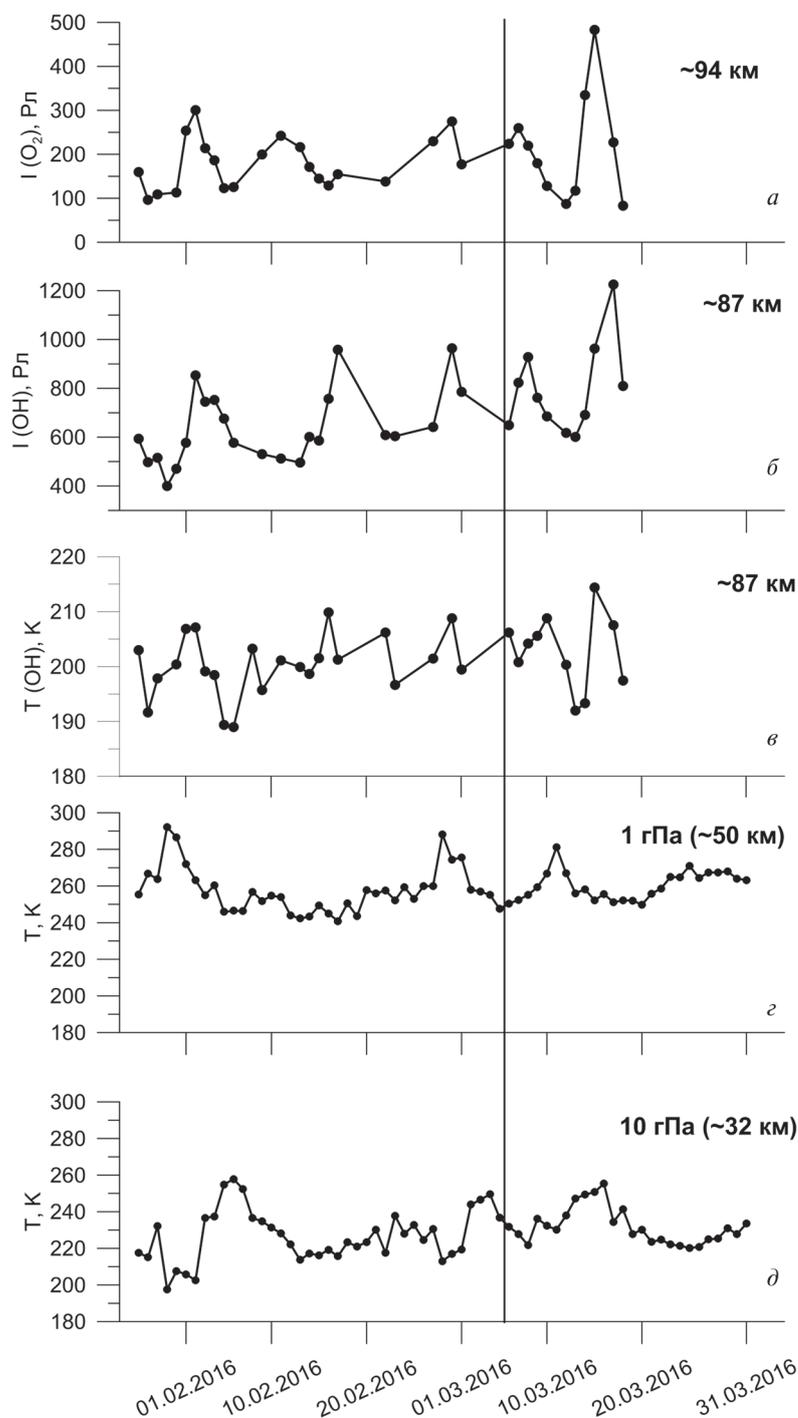


Рис. 3. Межсуточные вариации: а — интенсивности эмиссии O_2 (~94 км); б — интенсивности эмиссии OH (~87 км); в — вращательной температуры OH (~87 км); г — температуры стратосферы на 1 гПа (~50 км); д — температуры стратосферы на 10 гПа (~32 км); а–в — данные наземных спектрометрических измерений; г–д — данные спутниковых измерений MLS Aura. Вертикальная линия отмечает 5 марта 2016 г. — дату смены направления среднезонального (60° с. ш., 10 гПа) зонального ветра

Обнаружено, что в период минорного ВСП (1-Feb 2016) в начале февраля 2016 г. в регионе Восточной Сибири наблюдались следующие эффекты. Температура стратосферы на уровне 1 гПа (~50 км) повысилась на ~50 К в конце января (см. *рис. 3з*); температура на 10 гПа (~32 км) увеличилась на ~50 К и 5 февраля достигла значения 254 К (см. *рис. 3д*). Одновременно с максимальным ростом температуры стратосферы на 10 гПа произошло значительное охлаждение на высоте излучения эмиссии гидроксила (~87 км): 5 февраля вращательная температура ОН уменьшилась на ~20 К и достигла 188 К (см. *рис. 3в*). В конце января – начале февраля 2016 г. наблюдалось увеличение интенсивностей возникающих на высотах МНТ эмиссий O₂ (см. *рис. 3а*) и ОН (см. *рис. 3б*) до двух раз по сравнению с их значениями до начала ВСП.

Во время развития и действия финального стратосферного потепления (2-Mar 2016) наблюдались следующие эффекты. Изменения температуры в верхней (см. *рис. 3з*) и средней (см. *рис. 3д*) стратосфере произошли практически в противофазе. Вращательная температура ОН уменьшилась на ~20 К 16 марта (см. *рис. 3в*). После 15 февраля в период развития финального потепления на высотах МНТ наблюдались волнообразные возмущения интенсивностей эмиссий ОН (см. *рис. 3б*) и O₂ (см. *рис. 3а*) с периодами ~7–10 сут, а 15–17 марта произошло значительное (до ~250 %) увеличение их значений.

Причиной наблюдаемого увеличения интенсивностей эмиссий ОН и O₂ может быть вызванное ВСП усиление вертикального движения в атмосфере и изменение концентрации атмосферных компонентов, участвующих в фотохимических реакциях, ответственных за возникновение излучения ОН и O₂, на высоте эмиссионных слоёв.

При помощи методики, изложенной в работах (Медведева, Ратовский, 2017; Перминов и др., 2014; Medvedeva, Ratovsky, 2015; Perminov et al., 2014), было проведено исследование изменчивости температуры области мезопаузы, вызванной проявлением активности волн различных временных масштабов, и сопоставление со средними сезонными значениями. В качестве параметров изменчивости использованы стандартные отклонения в годовом и ночном ходе температуры, с помощью которых можно анализировать активность планетарных волн, приливов и внутренних гравитационных волн (ВГВ) в области МНТ.

На *рис. 4* показаны временные вариации изменчивости вращательной температуры ОН, вызванной активностью планетарных волн (см. *рис. 4а*), приливов (см. *рис. 4б*) и ВГВ (см. *рис. 4в*) для периода с 1 февраля по 31 марта 2016 г. Вертикальные линии отмечают дни максимального повышения температуры на 10 гПа (5 февраля (254 К), 4 марта (250 К) и 16 марта (255 К)). Ранее проведённый нами анализ (Медведева, Ратовский, 2017) показал, что средние значения температурной изменчивости за период 2008–2015 гг. составляют для февраля: 8,6 К вследствие воздействия планетарных волн, 4,5 К — приливов и 2,6 К — ВГВ;

для марта: 10,1 К — вследствие воздействия планетарных волн, 3,6 К — приливов и 2,3 К — ВГВ. Таким образом, в периоды минорного ВСП в феврале и финального потепления в марте 2016 г. наблюдалось значительное увеличение активности волновых процессов на высотах МНТ. В начале февраля 2016 г. наблюдалось усиление активности планетарных волн и приливов до ~200 %, ВГВ до ~500 %.

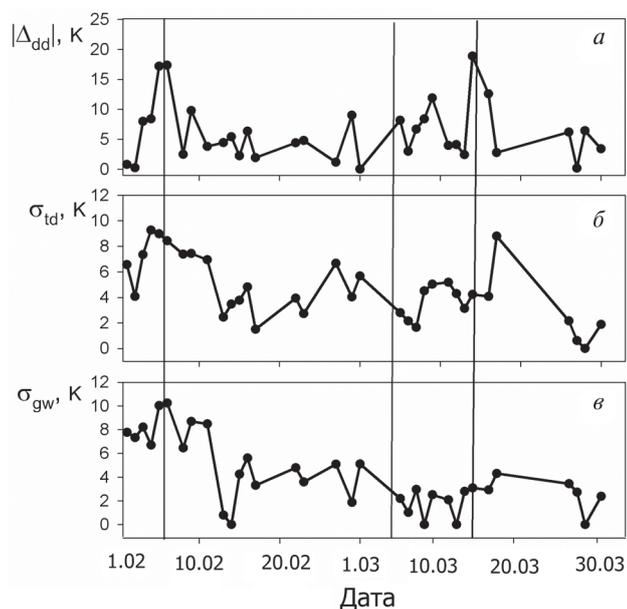


Рис. 4. Изменчивость вращательной температуры ОН вследствие воздействия планетарных волн (*а*), приливов (*б*) и ВГВ (*в*) для периода с 1 февраля по 31 марта 2016 г. Вертикальные линии отмечают даты максимального повышения температуры на 10 гПа (~32 км)

В конце февраля – начале марта наблюдалось усиление активности приливов и ВГВ до ~200 %, 15–17 марта — усиление активности приливов и планетарных волн до ~200 % (см. рис. 4).

Ионосферные эффекты стратосферных потеплений в феврале и марте 2016 г.

Для исследования ионосферных эффектов ВСП анализировались возмущения максимума электронной концентрации NmF2 и высоты максимума hmF2, представляющие собой разницы между наблюдаемыми и медианными значениями. В случае NmF2 использовались относительные возмущения:

$$\Delta NmF2 = 100 \% \cdot (NmF2 - NmF2_{med}) / NmF2_{med},$$

а в случае hmF2 — абсолютные возмущения:

$$\Delta hmF2 = hmF2 - hmF2_{med},$$

где NmF2 и hmF2 — наблюдаемые значения, а NmF2_{med} и hmF2_{med} — медианные значения.

Для анализа предполагаемых ионосферных эффектов февральского ВСП были выбраны первые девять дней февраля 2016 г. На рис. 5а показаны вариации NmF2 и NmF2_{med} (верхняя панель), $\Delta NmF2$ (средняя панель), а также индекса геомагнитной активности Kp (нижняя панель) на интервале 1–9 февраля 2016 г. (начало дня соответствует местной полночи). Положительные возмущения, наблюдаемые 3 и 8 февраля, по всей видимости, связаны с геомагнитной активностью (геомагнитно возмущёнными условиями 3 февраля (Kp = 5⁻) и слабой бурей (Kp = 5) 8 февраля). На интервале 5–7 февраля геомагнитные условия были спокойными либо слабовозмущёнными. 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 в послеполуночное время. Это значение (77 %) в ~2,8 раза выше, чем $\sigma NmF2$ — среднеквадратичное значение $\Delta NmF2$, полученное усреднением по 2008–2015 гг. для февральского ночного периода (Медведева, Ратовский, 2017).

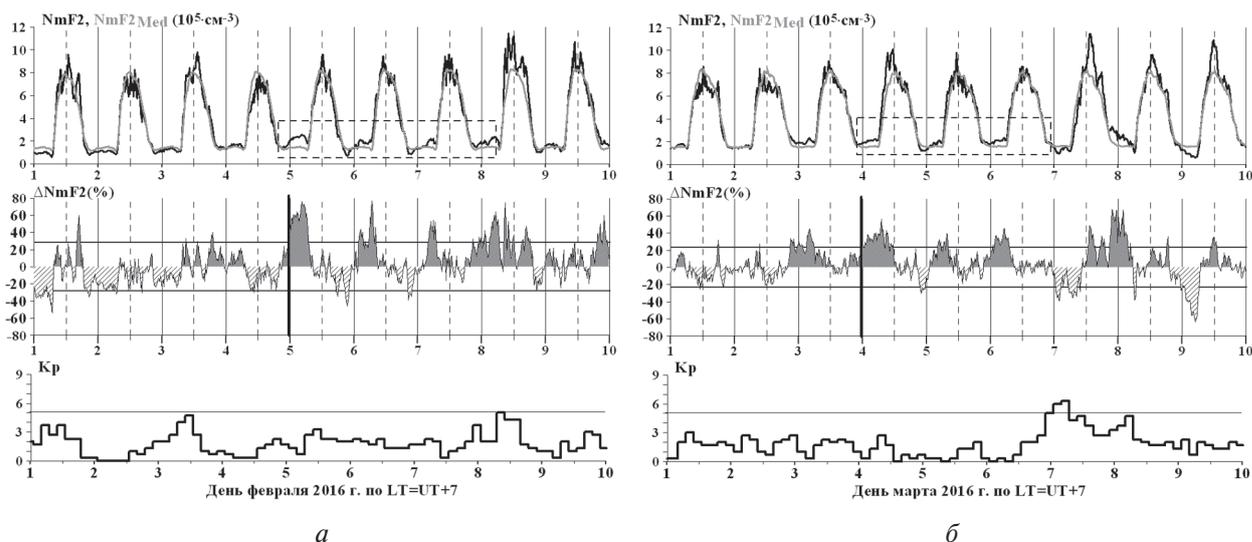


Рис. 5. Вариации NmF2, NmF2_{med}, $\Delta NmF2$ и индекса Kp на интервале 1–9 февраля (а) и 1–9 марта (б) 2016 г. Начало дня соответствует местной полночи. Толстые вертикальные линии отмечают дни, когда температура на уровне 10 гПа над Иркутском достигала своего максимального значения. Толстые горизонтальные линии показывают среднеквадратичные значения $\Delta NmF2$, полученные усреднением по 2008–2015 гг. для февральского (а) и мартовского (б) ночного периода

Вариации $\Delta NmF2$, наблюдаемые 5–7 февраля, имеют схожий характер для всех трёх суток с положительной фазой в послеполуночные и ранние утренние часы и отрицательной фазой в оставшейся части суток. С 5 по 7 февраля максимальное положительное значение $\Delta NmF2$ последовательно уменьшается с 77 до 53 %, а начало положительной фазы сдвигается на более позднее время от предполуночных часов 5 февраля до послеполуночных часов 7 февраля. Тот факт, что сильное положительное возмущение NmF2 начинает наблюдаться в слабозвозмущённых геомагнитных условиях в день, когда температура на уровне 10 гПа над Иркутском достигает своего максимального значения, даёт основания предполагать, что описанные возмущения NmF2 являются откликом на ВСП.

В нашем предыдущем исследовании (Medvedeva et al., 2015) было обнаружено, что ионосферный отклик на мажорное ВСП 2013 г. в основном был вызван изменениями в меридиональном ветре и составе нейтральной атмосферы. Анализ возмущений высоты максимума hmF2 показал, что сильные возмущения $\Delta NmF2$, наблюдаемые 5–7 февраля 2016 г., не сопровождались сильными возмущениями $\Delta hmF2$. Отсутствие значительных изменений $\Delta hmF2$ позволяет сделать вывод о том, что возмущения $\Delta NmF2$ не связаны с существенными изменениями меридионального ветра.

С учётом того, что вариации $\Delta NmF2$ носят квазипериодический характер, представляет интерес анализ возмущений NmF2 в диапазонах различных периодов. Используя метод, описанный в работе (Medvedeva, Ratovsky, 2015), мы рассчитали вариации $\Delta NmF2$ в длиннопериодном (периоды $T > 24$ ч), среднепериодном ($8 \leq T \leq 24$ ч) и короткопериодном ($T < 8$ ч) диапазонах. Длиннопериодный диапазон связан с межсуточными изменениями, среднепериодный диапазон соответствует приливному вариациям, а короткопериодный диапазон главным образом обусловлен проявлением ВГВ. На *рис. 6а* показаны результаты расчётов. Как видно на *рис. 6а*, сильные возмущения NmF2, наблюдаемые 5–7 февраля, в основном проявляются в приливном диапазоне. В эти дни приливная компонента характеризуется максимальными значениями ($\sim 35\text{...}40\%$) в $\sim 04\text{--}07$ LT и минимальными ($\sim -20\text{...}+25\%$) в $\sim 19\text{--}21$ LT. Положительная фаза начинается в 22:15 LT 4 февраля, 00:15 LT 6 февраля и 01:30 LT 7 февраля, т. е. время начала положительной фазы сдвигается на $\sim 1,5\text{--}2$ ч ото дня ко дню. Максимальное положительное значение в приливном диапазоне $\Delta NmF2$ (44 %) в $\sim 2,5$ раза выше, чем $\sigma NmF2$ — среднеквадратичное значение $\Delta NmF2$ в приливном диапазоне, полученное усреднением по 2008–2014 гг. для февральского ночного периода (Medvedeva, Ratovsky, 2015).

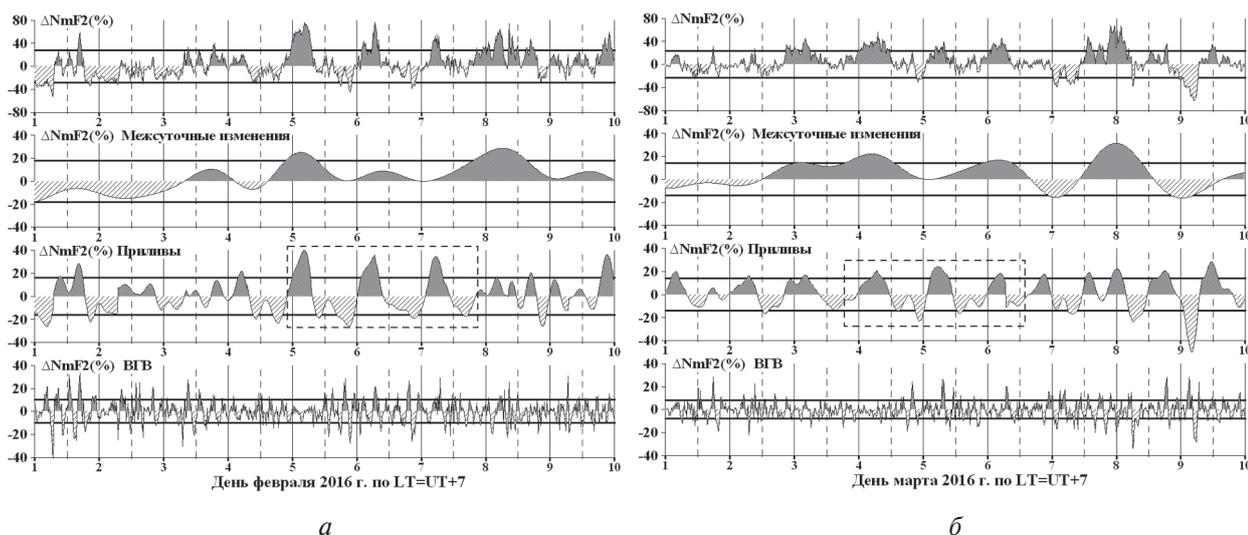


Рис. 6. Вариации $\Delta NmF2$ в диапазонах различных периодов на интервале 01–09 февраля 2016 г. (*a*) и 01–09 марта (*б*) 2016 г. Начало дня соответствует местной полуночи. Толстые вертикальные линии отмечают дни, когда температура на уровне 10 гПа над Иркутском достигала своего максимального значения. Толстые горизонтальные линии показывают среднеквадратичные значения $\Delta NmF2$, полученные усреднением по 2008–2015 гг. для февральского (*a*) и мартовского (*б*) ночного периода

Отметим, что усиление приливных компонент во время ВСП рассматривалось в качестве ионосферного отклика на ВСП в недавних работах (Chen et al., 2016; Pedatella, Maute, 2015).

Для анализа предполагаемых ионосферных эффектов мартовского ВСП были выбраны первые девять дней марта 2016 г. На *рис. 5б* показаны вариации NmF2, NmF2med, Δ NmF2 и индекса Kp на интервале 1–9 марта 2016 г., а на *рис. 6б* — возмущения NmF2 в диапазонах различных периодов на том же интервале. Как и в случае ионосферного отклика на февральское ВСП, в первые три дня после максимума стратосферной температуры на уровне 10 гПа над Иркутском (4–6 марта) в вариациях Δ NmF2 наблюдаются положительные возмущения в послеполуночные утренние часы. Как и в случае февральского ВСП, эти возмущения хорошо выражены в приливной компоненте, наблюдаются в спокойных либо слабовозмущённых геомагнитных условиях и не сопровождаются сильными возмущениями Δ hmF2. Основное отличие ионосферных эффектов мартовского ВСП от февральского заключается в том, что амплитуда возмущений NmF2 была заметно меньше: максимальное положительное значение Δ NmF2 составляло 44 % (в $\sim 1,9$ раза выше, чем σ NmF2), а максимальное положительное значение приливной компоненты — 24 % (в $\sim 1,7$ раза выше, чем σ NmF2).

Заключение

Комплексный анализ параметров нейтральной атмосферы и ионосферы над Восточной Сибирью во время минорного ВСП в феврале и финального стратосферного потепления в марте 2016 г. выявил значительные возмущения температурного и динамического режимов в большом диапазоне атмосферных высот.

В области МНТ в периоды анализируемых событий обнаружено значительное увеличение интенсивностей эмиссий OH и O₂ и уменьшение температуры на высоте излучающего слоя гидроксила по сравнению с невозмущёнными условиями. Анализ изменчивости вращательной температуры OH выявил существенное усиление проявления активности планетарных волн, приливов и ВГВ в области мезопаузы.

Анализ ионосферных характеристик обнаружил значительные положительные возмущения NmF2 в первые три дня после максимума стратосферной температуры на высотном уровне 10 гПа (~ 32 км). Эти возмущения в основном проявлялись в приливной компоненте с максимумами в послеполуночные и ранние утренние часы и минимумами в предполуночные и вечерние часы.

Обнаруженные эффекты могут быть вызваны интенсификацией активности атмосферных волн и усилением вертикального движения в атмосфере в периоды ВСП. Полученные результаты подтверждают интенсивное взаимодействие между нижней атмосферой, областью МНТ и ионосферой.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-05-00192-а. В работе были использованы экспериментальные данные ЦКП «Ангара» (<http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>), полученные в рамках проекта II.16.1.2 Программы ФНИ государственных академий на 2013–2020 гг.

Литература

1. Варгин П. Н., Медведева И. В. Исследование температурного и динамического режимов внетропической 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.
2. Медведева И. В., Ратовский К. Г. Сравнительный анализ атмосферной и ионосферной изменчивости по измерениям температуры области мезопаузы и максимума электронной концентрации NmF2 // Геомагнетизм и аэрномия. 2017. Т. 57. № 2. С. 236–248. DOI: 10.7868/S0016794017020109.
3. Перминов В. И., Шефов Н. Н., Семенов А. И. О вращательной температуре гидроксильной эмиссии // Геомагнетизм и Аэрномия. 2007. Т. 47. № 6. С. 798–805.

4. *Перминов В. И., Семенов А. И., Медведева И. В., Перцев Н. Н.* Изменчивость температуры в области мезопаузы по наблюдениям гидроксильного излучения на средних широтах // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2014. Т. 54. №: 2. С. 246–256. DOI: 10.7868/S0016794014020151.
5. *Шефов Н. Н., Семенов А. И., Хомич В. Ю.* Излучение верхней атмосферы — индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС, 2006. 741 с.
6. *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. Geophysical Research: Space Physics*. 2016. V. 121. P. 790–803. DOI: 10.1002/2015JA021980.
7. *Goncharenko L., Zhang S.-R.* Ionospheric signatures of sudden stratospheric warming: Ion temperature at middle latitude // *Geophysical Research Lett.* 2008. V. 35. L21103. DOI: 10.1029/2008GL035684.
8. *Hoffman P., Singer W., Keuer D., Hocking W. K., Kunze M., Murayama Y.* Latitudinal and longitudinal variability of mesospheric winds and temperatures during stratospheric warming events // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2007. V. 69. P. 2355–2366. DOI: 10.1016/j.jastp.2007.06.010.
9. *Labitzke K.* Interannual variability of the winter stratosphere in the Northern hemisphere // *Monthly Weather Review*. 1977. V. 105. P. 762–770.
10. *Labitzke K., Naujokat B.* The lower Arctic stratosphere in winter since 1952 // *SPARC Newsletter*. 2000. V. 15. P. 11–14.
11. *Medvedeva I., Ratovsky K.* Studying atmospheric and ionospheric variabilities from long-term spectrometric and radio sounding measurements // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2015. V. 120. Iss. 6. P. 5151–5159. DOI: 10.1002/2015JA021289.
12. *Medvedeva I. V., Semenov A. I., Chernigovskaya M. A., Perminov V. I.* Studying Manifestations of 2008–2011 Sudden Stratospheric Warmings in East-Siberia and European Russia // *Geophysica*. 2012. V. 48. No. 1–2. P. 91–103.
13. *Medvedeva I., Medvedev A., Ratovsky K., Shcherbakov A., Tolstikov M.* Comprehensive study of disturbances of the neutral atmosphere and ionosphere parameters over Eastern Siberia during the 2013 January major sudden stratospheric warming // *Advances in Space Research*. 2015. V. 56. No. 9. P. 1877–1885. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2015.06.008>.
14. *Oinats A. V., Kotovich G. V., Ratovsky K. G.* Comparison of the main ionospheric characteristics measured by the Digisonde at Irkutsk in 2003 with IRI 2001 model data // *Advances in Space Research*. 2006. V. 37. No. 5. P. 1018–1022. DOI: 10.1016/j.asr.2005.12.011.
15. *Pedatella N. M., Maute A.* Impact of the semidiurnal lunar tide on the midlatitude thermospheric wind and ionosphere during sudden stratosphere warmings // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2015. V. 120. No. 10. P. 10740–10753. DOI: 10.1002/2015JA021986.
16. *Perminov V. I., Semenov A. I., Medvedeva I. V., Zhelezov Yu. A.* Variability of mesopause temperature from the hydroxyl airglow observations over midlatitudinal sites, Zvenigorod and Tory, Russia // *Advances in Space Research*. 2014. V. 54. P. 2511–2517. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2014.01.027>.
17. *Reinisch B. W., Haines D. M., Bibl K., Galkin I., Huang X., Kitrosser D. F., Sales G. S., Scaliet J. L.* Ionospheric sounding in support of over-the-horizon radar // *Radio Science*. 1977. V. 32. No. 4. P. 1681–1694. DOI: 10.1029/97RS00841.
18. *Schwartz M. J., Lambert A., Manney G. L., Read W. G., Livesey N. J., Froidevaux L., Ao C. O., Bernath P. F., Boone C. D., Cofield R. E., Daffer W. H., Drouin B. J., Fetzer E. J., Fuller R. A., Jarnot R. F., Jiang J. H., Jiang Y. B., Knosp B. W., Krüger K., Li J.-L. F., Mlynarczyk M. G., Pawson S. J., Russell III M., Santee M. L., Snyder W. V., Stek P. C., Thurstans R. P., Tompkins A. M., Wagner P. A., Walker K. A., Waters J. W., Wu D. L.* Validation of the Aura Microwave Limb Sounder temperature and geopotential height measurements // *J. Geophysical Research*. 2008. V. 113(D15). D15S11. DOI: 10.1029/2007JD008783.
19. *Shepherd M. G., Cho Y.-M., Shepherd G. G., Ward W., Drummond J. R.* Mesospheric temperature and atomic oxygen response during the January 2009 major stratospheric warming // *J. Geophysical Research*. 2010. V. 115. A07318. DOI: 10.1029/2009JA015172.
20. *Shpynev B., Kurkin V., Ratovsky K., Chernigovskaya M., Belinskaya A., Grigorieva S., Stepanov A., Bychkov V., Pancheva D., Mukhtarov P.* High-midlatitude ionosphere response to major stratospheric warming // *Earth, Planets and Space*. 2015. V. 67. No. 18. DOI: 10.1186/s40623-015-0187-1.
21. *Siskind D. E., Coy L., Espy P.* Observations of stratospheric warmings and mesospheric coolings by the TIMED SABER instrument // *Geophysical Research Lett.* 2005. V. 32. L09804. DOI: 10.1029/2005GL022399.
22. *Tolstikov M. V., Medvedev A. V., Ratovsky K. G., Medvedeva I. V.* Studies of dynamic characteristics of atmospheric planetary waves during stratospheric warmings 2006–2013 // *IEEE Xplore, from: General Assembly and Scientific Symposium URSI*. 2014. URL: <http://dx.doi.org/10.1109/URSIGASS.2014.6929752>.

23. Walterscheid R. L., Sivjee G. G., Roble R. G. Mesospheric and lower thermospheric manifestations of a stratospheric warming event over Eureka, Canada (80N) // *Geophysical Research Lett.* 2000. V. 27. No. 18. P. 2897–2900. DOI: 10.1029/2000GL003768.

Influence of meteorological disturbances in February-March 2016 on the state of the upper neutral atmosphere and ionosphere over Eastern Siberia

I. V. Medvedeva, K. G. Ratovsky

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk 664033, Russia
E-mail: ivmed@iszf.irk.ru

The results of studying the state of the neutral upper atmosphere and the ionosphere over the Eastern Siberia in February-March 2016 are presented. In that time interval, over the Northern Hemisphere two sudden stratospheric warming (SSW) events were observed: minor SSW in early February and final stratospheric warming in early March, 2016. The data from spectrometric measurements of OH(6-2), 834.0 nm, and O₂(0-1), 864.5 nm, emissions from the Geophysical Observatory at the Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS (51.8° N, 103.1° E, Tory) were used. The vertical sounding data on the peak electron density (NmF2), and on the peak height (hmF2) were also analyzed. These data were obtained with the DPS-4 Irkutsk ionosonde (52.3° N, 104.3° E). For the analysis, we also used the MLS Aura satellite data of vertical temperature profiles and the MERRA reanalysis data.

We found that both analyzed SSWs significantly affected the mesosphere-low thermosphere (MLT) and the ionospheric F2-region. At the MLT heights a significant increase in the OH and O₂ emission intensities, a decrease in the atmosphere temperature, and an increase in wave activity were observed. In the F2-region we revealed significant (up to ~80 %) NmF2 positive disturbances in the postmidnight hours, which were not associated with geomagnetic activity variations. The observed effects can be caused by the amplification of the wave activity and the enhancement of vertical motion in the atmosphere during the SSWs.

Keywords: sudden stratospheric warming, atmosphere, ionosphere, hydroxyl airglow, MLT, peak electron density, atmosphere-ionosphere coupling

Accepted: 31.07.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-283-294

References

1. 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, No. 1, pp. 12–29, DOI: 10.1134/S0001433814060176.
2. Medvedeva I.V., Ratovsky K. G., Comparative Analysis of Atmospheric and Ionospheric Variability by Measurements of Temperature in the Mesopause Region and Peak Electron Density NmF2, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2017, Vol. 57, No. 2, pp. 217–228.
3. Perminov V.I., Semenov A.I., Shefov N.N., On rotational temperature of the hydroxyl emission, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2007, Vol. 47, No. 6, pp. 756–763.
4. Perminov V., Semenov A.I., Medvedeva I.V., Pertsev N.N., Temperature Variations in the Mesopause Region According to the Hydroxyl-Emission Observations at Midlatitudes, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2014, Vol. 54, No. 2, pp. 230–240, DOI: 10.1134/S0016793214020157.
5. Khomich V. Yu., Semenov A. I., Shefov N. N., *Airglow as an Indicator of Upper Atmospheric Structure and Dynamics*, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008, 749 p.
6. 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, Vol. 121, pp. 790–803, DOI: 10.1002/2015JA021980.

7. Goncharenko L., Zhang S.-R., Ionospheric signatures of sudden stratospheric warming: Ion temperature at middle latitude, *Geophys. Res. Lett.*, 2008, Vol. 35, L21103. DOI: 10.1029/2008GL035684.
8. Hoffman P., Singer W., Keuer D., Hocking W. K., Kunze M., Murayama Y., Latitudinal and longitudinal variability of mesospheric winds and temperatures during stratospheric warming events, *J. Atmos. Solar-Terrest. Phys.*, 2007, Vol. 69, pp. 2355–2366, DOI: 10.1016/j.jastp.2007.06.010.
9. Labitzke K., Interannual variability of the winter stratosphere in the Northern hemisphere, *Monthly Weather Review*, 1977, Vol. 105, pp. 762–770.
10. Labitzke K., Naujokat B., The lower Arctic stratosphere in winter since 1952, *SPARC Newsletter*, 2000, Vol. 15, pp. 11–14.
11. Medvedeva I., Ratovsky K., Studying atmospheric and ionospheric variabilities from long-term spectrometric and radio sounding measurements, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 2015, Vol. 120, Issue 6, pp. 5151–5159, DOI: 10.1002/2015JA021289.
12. Medvedeva I. V., Semenov A. I., Chernigovskaya M. A., Perminov V. I., Studying Manifestations of 2008–2011 Sudden Stratospheric Warmings in East-Siberia and European Russia, *Geophysica*, 2012, Vol. 48, No. 1–2, pp. 91–103.
13. Medvedeva I., Medvedev A., Ratovsky K., Shcherbakov A., Tolstikov M., Comprehensive study of disturbances of the neutral atmosphere and ionosphere parameters over Eastern Siberia during the 2013 January major sudden stratospheric warming, *Adv. Space Res.*, 2015, Vol. 56, No. 9. pp. 1877–1885, URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2015.06.008>.
14. Oinats A. V., Kotovich G. V., Ratovsky K. G., Comparison of the main ionospheric characteristics measured by the Digisonde at Irkutsk in 2003 with IRI 2001 model data, *Adv. Space Res.*, 2006, Vol. 37, No. 5, pp. 1018–1022, DOI: 10.1016/j.asr.2005.12.011.
15. 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, Vol. 120, No. 10, pp. 10740–10753, DOI: 10.1002/2015JA021986.
16. Perminov V. I., Semenov A. I., Medvedeva I. V., Zhelezov Yu. A., Variability of mesopause temperature from the hydroxyl airglow observations over midlatitudinal sites, Zvenigorod and Tory, Russia, *Adv. Space Res.*, 2014, Vol. 54, pp. 2511–2517, URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2014.01.027>.
17. Reinisch B. W., Haines D. M., Bibl K., Galkin I., Huang X., Kitrosser D. F., Sales G. S., Scaliet J. L., Ionospheric sounding in support of over-the-horizon radar, *Radio Sci.*, 1977, Vol. 32, No. 4, pp. 1681–1694, DOI: 10.1029/97RS00841.
18. Schwartz M. J., Lambert A., Manney G. L., Read W. G., Livesey N. J., Froidevaux L., Ao C. O., Bernath P. F., Boone C. D., Cofield R. E., Daffer W. H., Drouin B. J., Fetzer E. J., Fuller R. A., Jarnot R. F., Jiang J. H., Jiang Y. B., Knosp B. W., Krüger K., Li J.-L. F., Mlynchak M. G., Pawson S. J., Russell III M., Santee M. L., Snyder W. V., Stek P. C., Thurstans R. P., Tompkins A. M., Wagner P. A., Walker K. A., Waters J. W., Wu D. L., Validation of the Aura Microwave Limb Sounder temperature and geopotential height measurements, *J. Geophys. Res.*, 2008, Vol. 113(D15), D15S11, DOI: 10.1029/2007JD008783.
19. Shepherd M. G., Cho Y.-M., Shepherd G. G., Ward W., Drummond J. R., Mesospheric temperature and atomic oxygen response during the January 2009 major stratospheric warming, *J. Geophys. Res.*, 2010, Vol. 115, A07318, DOI: 10.1029/2009JA015172.
20. Shpynev B., Kurkin V., Ratovsky K., Chernigovskaya M., Belinskaya A., Grigorieva S., Stepanov A., Bychkov V., Pancheva D., Mukhtarov P., High-midlatitude ionosphere response to major stratospheric warming, *Earth, Planets and Space*, 2015, Vol. 67. No. 18, DOI: 10.1186/s40623-015-0187-1.
21. 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.
22. Tolstikov M. V., Medvedev A. V., Ratovsky K. G., Medvedeva I. V., Studies of dynamic characteristics of atmospheric planetary waves during stratospheric warmings 2006–2013, *IEEE Xplore, from: General Assembly and Scientific Symposium URSI*, 2014, URL: <http://dx.doi.org/10.1109/URSIGASS.2014.6929752>.
23. Walterscheid R. L., Sivjee G. G., Roble R. G., Mesospheric and lower thermospheric manifestations of a stratospheric warming event over Eureka, Canada (80N), *Geophys. Res. Lett.*, 2000, Vol. 27, No. 18, pp. 2897–2900, DOI: 10.1029/2000GL003768.