

**ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СРЕДНЕЙ И ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ
ВО ВРЕМЯ ВНЕЗАПНОГО СТРАТОСФЕРНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ В ЯНВАРЕ 2013 г.****CHANGES IN THE MIDDLE AND UPPER ATMOSPHERE PARAMETERS
DURING THE JANUARY 2013 SUDDEN STRATOSPHERIC WARMING****А.С. Ясюкевич***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, annpol@iszf.irk.ru***М.В. Клименко***Калининградский филиал Института земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова
РАН, Калининград, Россия, maksim.klimenko@mail.ru
Балтийский федеральный университет им. И. Канта,
Калининград, Россия, maksim.klimenko@mail.ru***Ю.Ю. Куликов***Институт прикладной физики РАН,
Нижний Новгород, Россия, yuyukul@appl.sci-nnov.ru***В.В. Клименко***Калининградский филиал Института земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова
РАН, Калининград, Россия, vvk_48@mail.ru***Ф.С. Бессараб***Калининградский филиал Института земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова
РАН, Калининград, Россия, bessarabf@gmail.com
Балтийский федеральный университет им. И. Канта,
Калининград, Россия, bessarabf@gmail.com***Ю.Н. Кореньков***Калининградский филиал Института земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова
РАН, Калининград, Россия, office@wdizmiran.ru***В.Н. Маричев***Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН,
Томск, Россия, marichev@iao.ru***К.Г. Ратовский***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, ratovsky@iszf.irk.ru***С.А. Колесник***Томский государственный университет,
Томск, Россия, serkol@mail.tsu.ru***A.S. Yasyukevich***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, annpol@iszf.irk.ru***M.V. Klimenko***Kaliningrad Branch of N.V. Pushkov Institute of Terrestrial
Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS,
Kaliningrad, Russia, maksim.klimenko@mail.ru
Immanuel Kant Baltic Federal University,
Kaliningrad, Russia, maksim.klimenko@mail.ru***Yu.Yu. Kulikov***Institute of Applied Physics RAS,
Nizhny Novgorod, Russia, yuyukul@appl.sci-nnov.ru***V.V. Klimenko***Kaliningrad Branch of N.V. Pushkov Institute of Terrestrial
Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS,
Kaliningrad, Russia, vvk_48@mail.ru***F.S. Bessarab***Kaliningrad Branch of N.V. Pushkov Institute of Terrestrial
Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS,
Kaliningrad, Russia, bessarabf@gmail.com
Immanuel Kant Baltic Federal University,
Kaliningrad, Russia, bessarabf@gmail.com***Yu.N. Korenkov***Kaliningrad Branch of N.V. Pushkov Institute of Terrestrial
Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS,
Kaliningrad, Russia, office@wdizmiran.ru***V.N. Marichev***V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS,
Tomsk, Russia, marichev@iao.ru***K.G. Ratovsky***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, ratovsky@iszf.irk.ru***S.A. Kolesnik***Tomsk State University,
Tomsk, Russia, serkol@mail.tsu.ru*

Аннотация. Представлены результаты комплексных наблюдений различных параметров средней и верхней атмосферы над территорией Сибири в декабре 2012 – январе 2013 г., в период сильного внезапного стратосферного потепления (ВСП). Нами проанализированы вариации концентрации озона по данным микроволновых измерений, температуры на высотах стратосферы и нижней мезосферы по лидарным и спутниковым измерениям, критической частоты F2-слоя ионосферы (f_oF2), полного электронного содержания (ПЭС), отношения концентраций атомарного кислорода к молекулярному азоту (O/N_2) в термосфере. Для интерпретации возмущений в верхней атмосфере было выполнено сравнение экспериментальных измерений с результатами модельных расчетов, полученных с использованием Глобальной самосогласованной модели термо-

Abstract. We present the results of complex observations of various parameters of the middle and upper atmosphere over Siberia in December 2012 – January 2013, during a major sudden stratospheric warming (SSW) event. We analyze variations in ozone concentration from microwave measurements, in stratosphere and lower mesosphere temperatures from lidar and satellite measurements, in the F2-layer critical frequency (f_oF2), in the total electron content (TEC), as well as in the ratio of concentrations of atomic oxygen to molecular nitrogen (O/N_2) in the thermosphere. To interpret the observed disturbances in the upper atmosphere, the experimental measurements are compared with the results of model calculations obtained with the Global Self-consistent Model of Thermosphere—Ionosphere—Protonosphere (GSM TIP). The response of the upper atmosphere to the SSW event is shown to be a decrease

сферы, ионосферы, протоносферы (ГСМ ТИП). Показано, что к отклику верхней атмосферы на ВСП можно отнести понижение f_oF2 и ПЭС в период развития потепления и продолжительное увеличение O/N_2 , f_oF2 и ПЭС после максимума ВСП. Впервые отмечена связь увеличения стратосферного озона, термосферного O/N_2 и ионосферной электронной концентрации на средних широтах в течение довольно длительного периода времени (до 20 дней) после максимума ВСП.

Ключевые слова: внезапное стратосферное потепление, озон, стратосфера, ионосфера, электронная концентрация, полное электронное содержание, атмосфера-ионосферные связи.

in f_oF2 and TEC during the evolution of the warming event and a prolonged increase in O/N_2 , f_oF2 , and TEC after the SSW maximum. For the first time, we observe the relation between the increase in stratospheric ozone, thermospheric O/N_2 , and ionospheric electron density for a fairly long time (up to 20 days) after the SSW maximum at midlatitudes.

Keywords: sudden stratospheric warming, ozone, stratosphere, ionosphere, electron density, total electron content, atmosphere-ionosphere coupling.

ВВЕДЕНИЕ

Период декабрь 2012 – январь 2013 г. представляет особый интерес для исследования физики солнечно-земных и атмосферно-ионосферных связей, поскольку характеризуется практически одновременным существенным увеличением солнечной активности и внезапным стратосферным потеплением (ВСП). ВСП называют явление взрывного повышения температуры стратосферы высоких широт в зимние месяцы. В спокойном состоянии зимняя полярная стратосфера характеризуется наличием устойчивого крупномасштабного циклонического (циркумполярного) вихря с центром около полюса. Движение воздушных масс в вихре происходит с высокой скоростью (до 100 м/с) в направлении с запада на восток, формируя так называемое струйное течение, а температура воздуха в стратосфере при этом имеет низкие значения (200 К и ниже). Согласно классическому сценарию, развитие ВСП связывают с интенсификацией орографических стационарных планетарных волн (СПВ) в тропосфере [Matsuno, 1971]. В зимние месяцы СПВ могут проникать в более высокие атмосферные слои, взаимодействуя с западным стратосферным потоком. Результатом такого взаимодействия является ослабление или разрушение циркумполярного вихря в высокоширотной стратосфере, возможно также смещение вихря от полюса [Charlton, Polvani, 2007]. Распространяющиеся вверх СПВ переносят тепло в направлении полюса, что приводит к повышению температуры высокоширотной (полярной) стратосферы [Matsuno, 1971]. В результате этого во время событий ВСП температура стратосферы может повышаться более чем на 50 К в течение нескольких дней или даже недель относительно спокойного состояния. В последние годы было показано, что усиление нелинейного взаимодействия СПВ со средним потоком, приводящее к возрастанию интенсивности нерегулярных колебаний — так называемых стратосферных вассилляций — также может являться одной из причин образования ВСП [Погорельцев и др., 2014]. Потепления, во время которых, помимо увеличения полярной температуры, регистрируется изменение направления среднезональной циркуляции и температур-

ного градиента над полушарием, относят к сильным ВСП, а день, когда на уровне 10 гПа и широте 60° происходит смена направления зональной циркуляции, называют максимумом ВСП [Schoeberl, 1978]. Возвращение стратосферы к нормальному режиму (стадия восстановления) начинается после максимума ВСП и обычно происходит медленнее, чем развитие самого ВСП.

В зимней стратосфере — нижней мезосфере во время событий ВСП происходит кардинальная трансформация структуры полярного вихря [Labitzke, 1972; Schoeberl, 1978], что оказывает значительное влияние на распределение метеопараметров как в тропосфере, так и в приземном атмосферном слое и, следовательно, на погоду [Sun, Robinson, 2009]. В работах [Shpynev et al., 2015a; Ясюкевич и др., 2017] показано, что трансформация структуры полярного вихря во время ВСП сопровождается также усилением среднemasштабных волновых возмущений в средней атмосфере.

Установлено, что во время событий ВСП происходят существенные изменения концентрации стратосферного озона на разных высотах [Куликов и др., 2002; Scheiben et al., 2012; Manney et al., 2015]. Несмотря на то, что концентрация этого газа в атмосфере незначительна, озоновый слой имеет определяющее значение для сохранения жизни на Земле, а вариации его плотности оказывают заметное влияние на климат [Baldwin et al., 2007]. Изменение температуры в стратосфере во время ВСП оказывает влияние на коэффициенты образования и разрушения озона. На концентрацию озона влияют также процессы, связанные с разрушением полярного вихря [Тао et al., 2015], образованием полярных стратосферных облаков [Смышляев и др., 2016] и активацией химических потерь стратосферного озона [Manney et al., 2015]. Nocke et al. [2015] провели композитный анализ общего содержания озона (ОСО) на высотах 5–60 км и на широте 80° в период 20 ВСП и показали, что после максимумов ВСП наблюдается значительное превышение ОСО над климатическими значениями (до 90 единиц Добсона, еД). Напротив, отрицательная аномалия в содержании полярного озона ~ -20 еД присутствует в период до 90 дней перед ВСП. Похожие вариации озона на уровне 10 гПа над Москвой были зарегистрированы

с помощью микроволновых измерений в период зимнего ВСП 2012/2013 гг. [Соломонов и др., 2017].

ВСП оказывают влияние на состояние более высоких слоев атмосферы: мезосферы, термосферы и ионосферы. В мезосфере над зоной потепления в стратосфере происходит уменьшение температуры [Labitzke, 1981]. Так, во время сильного зимнего ВСП 2008/2009 гг. на ст. Соданкюля Lukianova et al. [2015] наблюдали выраженное похолодание мезосферы, сопоставимое по амплитуде с изменением температуры в стратосфере (~50 K). Medvedeva et al. [2015] также зарегистрировали изменение температуры мезосферы/нижней термосферы (МНТ) во время события ВСП 2012/2013 гг. и увеличение интенсивности эмиссии ОН (~87 км) и О₂ (~94 км) в 2–2.5 раза по сравнению с невозмущенными условиями. Трех-четырёхкратный рост интенсивности эмиссии кислорода в мезосфере во время ВСП был зарегистрирован и в работах [Shepherd et al., 2010; Shepherd, Shepherd, 2011].

В термосфере на высотах более 140 км изменения интенсивности эмиссии атомарного кислорода имеют другой характер: во время максимальной фазы ВСП 1993 г. наблюдалось значительное уменьшение эмиссии кислорода, а во время фазы восстановления интенсивность эмиссии превышала значения, регистрируемые до потепления [Shepherd, Shepherd, 2011]. Во время четырех ВСП 2010–2013 гг. Laskar, Pallamraju [2014] зарегистрировали систематическое увеличение дневной эмиссии кислорода в низких широтах, сопровождаемое одновременным увеличением температуры полярной термосферы и усилением направленного к экватору переноса. Исходя из результатов наблюдений, авторы предположили, что во время ВСП на высотах МНТ образуется вторичная ячейка меридиональной циркуляции, способствующая выносу кислорода из высокоширотной термосферы и его транспортировке в область экваториальной термосферы. Увеличение температуры термосферы средних широт во время ВСП было зарегистрировано также с помощью данных радара Millstone Hill [Goncharenko, Zhang, 2008].

Соответствующие изменения температуры мезосферы и нижней термосферы во время ВСП, а также уменьшение максимальной плотности и скорости эмиссии атомарного кислорода в высоких широтах были получены в модельных расчетах [Liu, Roble, 2002]. Таким образом, экспериментальные и модельные результаты демонстрируют глобальные изменения в динамике и составе нейтральной атмосферы на всех высотах от стратосферы до термосферы во время ВСП.

Усиление волновой активности и существенные изменения атмосферной циркуляции в периоды ВСП также оказывают влияние на состояние ионосферной плазмы, причем реакция ионосферы на события ВСП оказывается разной на разных широтах. Реакция экваториальной ионосферы на ВСП имеет полусуточную структуру, заключающуюся в значительном увеличении электронной плотности относительно спокойных дней в предполуденные часы с последующим ее падением после полудня [Chau et al., 2010, 2012; Goncharenko et al., 2010a, b; Yue et al., 2010]. Этот эффект связан, прежде всего, с вари-

ациями экваториального вертикального электромагнитного дрейфа плазмы [Chau et al., 2009; Goncharenko et al., 2010a; Klimenko et al., 2015], обусловленного изменениями нейтральной атмосферной циркуляции (преимущественно зонального ветра), возникающими вследствие модификации атмосферных приливов [Chau et al., 2010; Fuller-Rowell et al., 2010; Pedatella et al., 2014].

В среднеширотной и полярной ионосфере во время максимумов ВСП наблюдался преимущественно отрицательный отклик в электронной концентрации [Pancheva, Mukhtarov, 2011; Bessarab et al., 2012; Polyakova et al., 2014; Yasyukevich, 2018]. В период фазы восстановления (до 20 дней), напротив, регистрировалось существенное превышение электронной концентрации в ионосфере над среднемесячными значениями [Polyakova et al., 2014; Yasyukevich, 2018]. Причиной отрицательных/положительных возмущений электронной концентрации в периоды развития ВСП и на фазе восстановления, вероятно, являются связанные с ВСП изменения отношения O/N₂ в термосфере [Korenkov et al., 2012; Klimenko et al., 2013; Shpynev et al., 2015b; Yasyukevich, 2018].

В настоящей работе мы представляем результаты комплексных наблюдений различных параметров средней и верхней атмосферы над территорией Восточной Сибири в январе 2013 г., в период сильного ВСП, являющегося одним из самых продолжительных событий такого рода за всю историю наблюдений [Goncharenko et al., 2013]. Для интерпретации вариаций параметров верхней атмосферы мы использовали результаты расчетов численной модели.

ДАнные И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Основой исследования изменений в стратосфере послужил комплексный эксперимент (лидарные и микроволновые озонметрические наблюдения), проводившийся в январе 2013 г. в Томске [Маричев и др., 2014; Matvienko et al., 2016].

Метод микроволновой наземной радиометрии основан на измерениях вращательных спектров излучения малых газовых составляющих (в нашем случае озона) в диапазонах миллиметровых и субмиллиметровых волн. Точность наблюдений микроволновыми методами слабо зависит от погодных условий и наличия в атмосфере аэрозолей, что является преимуществом по сравнению с наблюдениями в оптическом и инфракрасном диапазонах длин волн. Кроме того, микроволновые наблюдения озона могут выполняться круглосуточно. В последние годы удалось сделать существенный шаг вперед по пути создания мобильных микроволновых спектрометров нового поколения [Kulikov et al., 2007]. Использование мобильных озонметров позволило в сложных экспедиционных условиях выполнить ряд задач, решение которых было бы затруднительным при использовании стандартной микроволновой техники. Информация о содержании О₃ находится в измеряемом спектре интегрального радиоизлучения атмосферы в окрестности линии вращательного спектра этого газа. С помощью инверсии спектров можно

получить данные о вертикальном распределении озона (ВРО) в атмосфере. При решении задачи оценки вертикального профиля озона использовались модельные зависимости давления и температуры от высоты. Погрешность определения ВРО по его спектрам не превышает 20 %. Использование реального температурного распределения при оценке профиля озона позволит уменьшить погрешность определения ВРО до 10 % в интервале высот 20–40 км.

Прибор состоит из гетеродинного неохлаждаемого приемника, настроенного на фиксированную частоту 110 836.04 МГц, соответствующую вращательному переходу молекулы озона $\nu_{0,6}-\nu_{1,5}$, и многоканального анализатора спектра. На входе приемника находится модуль, включающий в себя антенну (скалярный рупор) и коммутатор для калибровки уровня принимаемого теплового излучения атмосферы. Ширина диаграммы направленности рупорной антенны по уровню 3 дБ составляет 5.4° . Шумовая температура приемника — 2500 К, режим приема в одной полосе обеспечивается заградительным фильтром с прямыми потерями 0.5 дБ и подавлением зеркального канала более 20 дБ. Анализатор спектра состоит из 31 фильтра с полосой пропускания от 1 до 10 МГц и полной полосой анализа 240 МГц. Параметры прибора позволяют измерять спектр линии излучения озона с точностью $\sim 2\%$. Измерения спектров теплового излучения атмосферы выполняются методом калибровки по двум «чернотельным» эталонам, которые находятся при температуре кипения жидкого азота и при температуре окружающего воздуха.

Лидарные наземные исследования термического состояния стратосферы и мезосферы над Томском были начаты в Институте оптики атмосферы СО РАН в 1994 г. [Матвиенко и др., 2009]. Лидарные измерения вертикального распределения температуры по молекулярному (или рэлеевскому) рассеянию света основаны на однозначной связи между коэффициентом обратного молекулярного рассеяния и плотностью атмосферы на определенной высоте. В состав лидарного комплекса входят передатчик Nd:YAG — лазер с коллиматором, с длиной волны излучения 532 нм, энергией в импульсе до 200 мДж, частотой посылок импульсов 10 Гц, расходимостью луча на выходе 0.1 мрад; приемно-регистрирующая система — телескоп Ньютона с диаметром главного зеркала 1 м и фокусным расстоянием 2 м. Зондирование проводится в ночное время суток. Прием обратного рассеяния осуществляется в режиме счета фотонов. Фотоприемник соединен с компьютером, который осуществляет управление измерениями, а также сбор, накопление и обработку данных. Достижимое при этом вертикальное разрешение для температурного профиля составляет 192 м, а необходимое время накопления для получения информации о температуре с высоты 60 км — около 2 ч. Такое время определяется относительной погрешностью 10 % на максимальной высоте. Относительная погрешность измерений зависит от числа

фотонов, принятых с заданной высоты, которое определяется длительностью стога, количеством лазерных выстрелов, плотностью аэрозоля и воздуха, а также фоновыми засветками. При этом на высотах 30–40 км относительная погрешность составляет 2 %, т. е. не превышает ~ 2.5 К на высоте 40 км.

Изменения параметров стратосферы и нижней мезосферы (температура, ветер) оценивались также на основе данных метеорологического архива ERA Interim Reanalysis [<http://www.esrl.noaa.gov>; Dee et al., 2011]. Эти данные представляют собой глобальные поля основных параметров нейтральной атмосферы (температура, ветер, геопотенциал и т. п.) на стандартных уровнях до 1 гПа (46–48 км). Данные об активности планетарных волн в рассматриваемый период были получены из архива MERRA Reanalysis [<https://gmao.gsfc.nasa.gov/reana-lysis/MERRA>].

Данные комплексного эксперимента были дополнены результатами наблюдений ионосферных параметров за этот период. В работе рассмотрены вариации критической частоты F2-слоя ионосферы (f_oF2) по измерениям ионозондов в Томске (85° E, 56° N) и Иркутске (104° E, 52° N). Кроме того, выполнен анализ поведения полного электронного содержания (ПЭС) на основе данных фазовых двухчастотных приемников GPS/ГЛОНАСС сети IGS [Dow et al., 2009], расположенных в исследуемых пунктах. Ряды вертикального ПЭС I_v получались из исходных данных наклонного ПЭС по методу, описанному в [Yasyukevich et al., 2015]. Временное разрешение данных f_oF2 и вертикального ПЭС составляло 15 мин. Для каждого дня были рассчитаны средние значения f_oF2 и ПЭС за интервал времени 10–16 LT.

Анализ изменения отношения O/N_2 в термосфере проводился на основе измерений спутникового прибора GUVI (Global Ultra-Violet Imager), установленного на спутнике TIMED (Thermosphere, Ionosphere, Mesosphere Energetics and Dynamics) [Strickland et al., 2004]. Расчет отношения интегральных содержаний O/N_2 основывается на измерении интенсивности дневного свечения атомарного кислорода (O) на длине волны 135.6 нм и азота (N_2 , Lyman — Birge — Hop) в дальнем ультрафиолете. В результате данные GUVI представляют собой отношение интегральных концентраций O/N_2 в дневное время, рассчитываемое от высоты, на которой интеграл концентрации N_2 достигает 10^{17} см $^{-2}$ (около 140 км) [Christensen et al., 2003].

Для интерпретации возмущений в верхней атмосфере было выполнено сравнение экспериментальных измерений с модельными расчетами, полученными с использованием Глобальной самосогласованной модели термосферы, ионосферы, протоносферы ГСМ ТИП [Namgaladze et al., 1988; Korenkov et al., 1998]. Модель основана на численном интегрировании системы квазигидродинамических уравнений непрерывности, движения и теплового баланса для нейтральных и заряженных частиц тепловой околоземной плазмы совместно с уравнением для потенциала электрического поля в интервале высот от 80 км до геоцентрического расстояния 15 земных

радиусов с учетом несовпадения географической и геомагнитной осей. ГСМ ТИП рассчитывает для заданных входных данных глобальные распределения температуры T_b , концентраций O_2 , N_2 , O и вектора среднemasсовой скорости нейтральной составляющей верхней атмосферы Земли, концентраций, температуры и скоростей атомарных (O^+ , H^+) и молекулярных ионов и электронов, а также двумерное распределение потенциала электрического поля ионосферного и магнитосферного происхождения. Магнитное поле Земли аппроксимируется центральным диполем. В модели используется пространственная сетка в геомагнитной системе координат с шагом 5° по широте, 5° по долготе и переменным шагом по вертикали, растущим с высотой.

На основе ГСМ ТИП было проведено два расчета параметров ионосферы для периода с 22 декабря 2012 по 25 января 2013 г.:

1) без учета изменений солнечной активности день ото дня (результаты расчетов отражают только климатологические сезонные вариации);

2) с учетом изменений солнечной активности.

В обоих вариантах влияние ВСП никак не учитывается, а ионосферные эффекты, не отображаемые моделью, мы связываем с ВСП. Отметим, что данный подход не лишен некоторых недостатков. Например, не принимаются во внимание возможные изменения в нижней атмосфере за счет роста солнечной активности. Однако мы полагаем, что данные эффекты существенно слабее по сравнению с воздействием ВСП, обусловленным значительными вариациями температуры и усилением волновой активности. Для более корректной интерпретации ионосферных возмущений в рассматриваемый период необходимо воспользоваться моделью, описывающей поведение параметров нижней и верхней атмосферы, — такой как, например, модель EAGLE [Клименко и др., 2018]. В дальнейшем планируется провести такое исследование.

ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СТРАТОСФЕРЫ И НИЖНЕЙ МЕЗОСФЕРЫ В ПЕРИОД ВСП

Стратосферное потепление в декабре 2012 – январе 2013 г. относится к классу сильных потеплений. На рис. 1 представлены распределения среднезональных значений температуры (а) и зонального ветра (б) на широте $60^\circ N$ в средней (10 гПа, черные кривые) и верхней стратосфере/нижней мезосфере (1 гПа, серые кривые) по данным ERA Interim Reanalysis в сравнении с усредненными за 10 лет значениями (штриховые линии). На рис. 1, в показаны вариации амплитуд СПВ с зональным волновым числом 1 (серая кривая) и 2 (черная кривая) для геопотенциальной высоты на широте $60^\circ N$ и уровне 10 гПа по данным MERRA Reanalysis.

Как было отмечено выше, развитие ВСП обусловлено интенсификацией планетарных волн. Видно, что рост амплитуды планетарной волны с зональным числом 1 (СПВ1) начался 14 декабря 2012 г., а 22 декабря для СПВ1 отмечался максимум ампли-

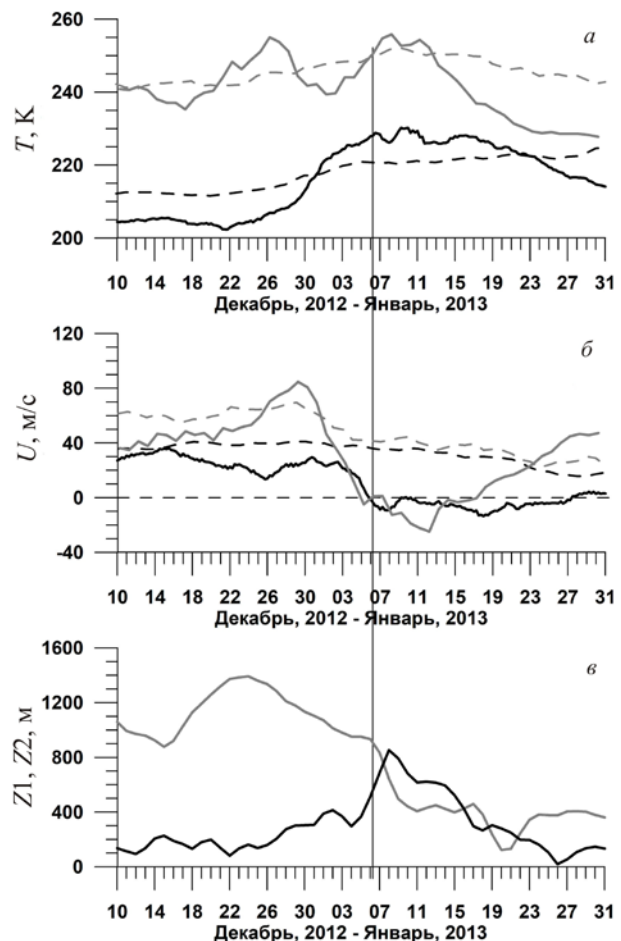


Рис. 1. Изменения среднезональных значений: а — температуры; б — зонального ветра на широте $60^\circ N$ в средней (10 гПа, черные кривые) и верхней стратосфере/нижней мезосфере (1 гПа, серые кривые) в сравнении с усредненными за 10 лет значениями (штриховые кривые); в — вариации амплитуд СПВ 1 (серая кривая) и 2 (черная кривая) для геопотенциальной высоты на широте $60^\circ N$ и уровне 10 гПа

туды. После этого наблюдалось возрастание СПВ с зональным числом 2 (СПВ2), которое продолжалось до 8 января. Увеличение интенсивности СПВ1 проявляется в смещении полярного вихря относительно полюса, тогда как усиление СПВ2 сопровождается расщеплением полярного вихря.

Среднезональная температура средней стратосферы (10 гПа, ~ 30 км) на широте $60^\circ N$ начала увеличиваться 21 декабря 2012 г. (рис. 1, а). Уменьшение скорости западного среднезонального ветра в стратосфере регистрировалось позже — в конце декабря (рис. 1, б). Изменение направления ветра с западного на восточное на уровне 10 гПа было зафиксировано 6 января — этот день считается максимумом ВСП. Восстановление циркуляции стратосферы к нормальному режиму продолжалось в течение всего месяца, причем направление среднезонального ветра снова сменилось на западное только в конце января (рис. 1, б).

На рис. 2 в полярной системе координат представлены пространственные распределения температуры стратосферы на уровне 10 гПа в отдельные дни рассматриваемого периода. Жирными кривыми нанесены изолинии геопотенциальной высоты,

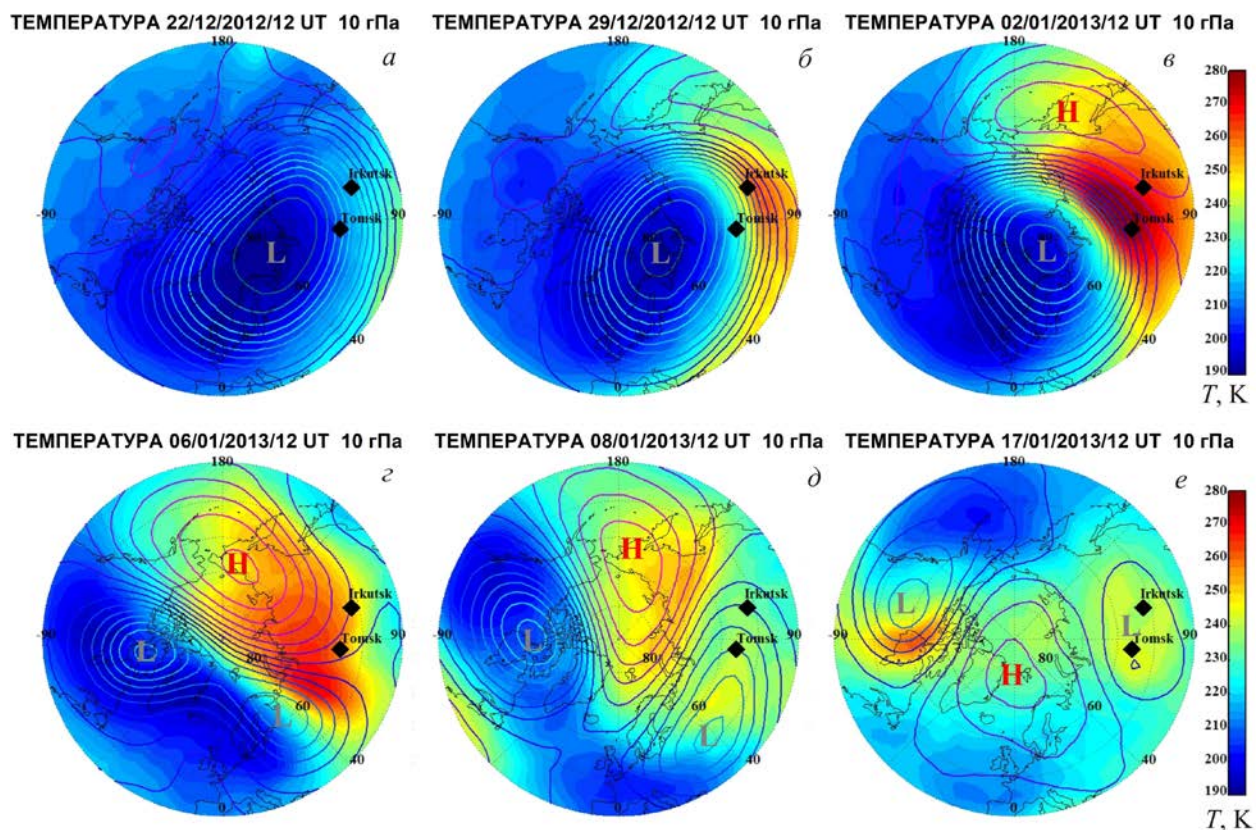


Рис. 2. Карты температуры стратосферы (10 гПа) в 12 UT в отдельные дни с 22 декабря 2012 по 17 января 2013 г. Жирными кривыми показаны изолинии геопотенциальной высоты. Ромбами отмечены местоположения Иркутска и Томска

символами отмечены пункты, в которых проводился эксперимент (Томск, Иркутск). Видно, что в период развития и максимума ВСП область наибольшего увеличения температуры стратосферы располагается в азиатской части России, а температура вблизи исследуемых пунктов возрастает более чем на 50 К (рис. 2, в, з). Отчетливо наблюдается образование стратосферного антициклона (H) и его продвижение от средних широт к полюсу. После 6 января происходит расщепление полярного циклона на две ячейки низкого давления (L), сместившихся к средним широтам в Азиатском и Северо-Американском регионах. Температура стратосферы остается повышенной в течение всего января, однако во второй половине месяца область наибольших температур оказывается в Североатлантическом регионе (рис. 2, е).

На рис. 3 показаны поля горизонтального ветра на уровне 10 гПа по данным ERA Interim Reanalysis. Цветная шкала используется для демонстрации значений модуля скорости ветра, а стрелками показано его направление. Видны существенные изменения стратосферной циркуляции за рассматриваемый период. В стратосфере 22 декабря наблюдается хорошо развитое интенсивное струйное течение, связываемое с полярным циклоном, а циркуляция имеет в основном зональное (геострофическое) направление. При этом центр вих-

ря заметно смещен от полюса. По мере развития ВСП с конца декабря до начала января происходит дальнейшее смещение струйного течения от полюса с последующей трансформацией и расщеплением его 6 января в день максимума ВСП (рис. 3, з). С конца декабря наблюдается также образование ячейки с антициклонической циркуляцией (рис. 3, б), не характерной для зимней полярной стратосферы в спокойные периоды. Антициклоническая ячейка наблюдается до конца января, при этом модуль скорости ветра по всей полярной стратосфере имеет низкие значения по сравнению с характерными для зимы. Отметим, что Томск и Иркутск в конце декабря — начале января находились в области полярного вихря (рис. 3, а–в), а с середины января — в ячейке циклонической циркуляции, образованной в результате расщепления вихря (рис. 3, д, е).

Существенные изменения стратосферной циркуляции оказывают значительное влияние на распределения компонент нейтральной атмосферы (в частности, озона), поскольку способствуют перемешиванию воздушных масс из разных широт. Кроме того, в работе [Shpynev et al., 2015a] показано, что подобные трансформации струйных течений приводят к возбуждению на высотах стратомезосферы волновых возмущений, имеющих периоды внутренних гравитационных волн.

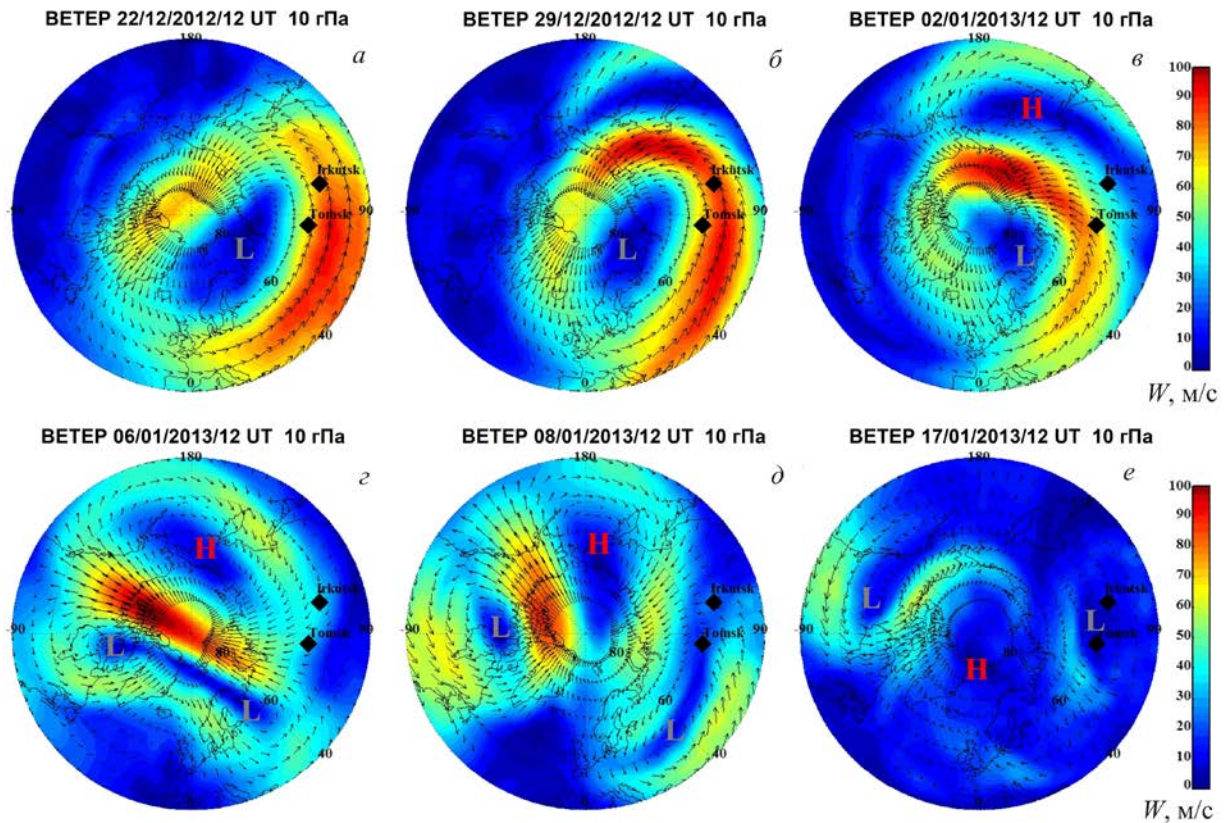


Рис. 3. Поля горизонтального ветра в стратосфере на уровне 10 гПа. Цветная шкала используется для демонстрации значений модуля скорости ветра, стрелками показано направление ветра

ВАРИАЦИИ ОЗОНА

На рис. 4 представлены результаты микроволновых измерений концентрации озона в Томске на высотах 25 и 40 км по сравнению с поведением объемной концентрации озона по данным ERA Interim Reanalysis. Показаны также вариации температуры стратосферы на этих высотах, полученные из лидарных измерений и по данным микроволнового зонда MLS Aura [<https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets>]. Видно хорошее соответствие динамики параметров, полученных в ходе проводимого наземного эксперимента, и независимых данных. Наибольшее расхождение для температуры стратосферы наблюдается на высоте 40 км, однако на этой же высоте регистрируется и рост погрешности лидарных измерений. Отметим существенное увеличение температуры нижней стратосферы, начавшееся 20 декабря (рис. 4, в). Пик температуры над Томском был зарегистрирован 5 января, а общий рост температуры составил около 60 К. В более высоких слоях стратосферы увеличение температуры началось раньше, а в конце декабря сменилось резким похолоданием на ~40 К (рис. 4, з) с минимумом температуры 11 января. Это соответствует типичному поведению температуры стратосферы/нижней мезосферы в периоды ВСП.

В рассматриваемый период времени были зарегистрированы также значительные вариации концентрации озона. На высоте 25 км с середины декабря наблюдалось существенное уменьшение концентрации озона, достигавшее 50 %. Особенностью наблюдаемого периода являлось также отсутствие корреляции

между температурой атмосферы и концентрацией озона, что свидетельствует о преобладающем влиянии динамических процессов на озон на данных высотах. Авторы работы [Manney et al., 2015] показали, что в период данного события ВСП комбинация динамических и метеорологических условий привела к беспрецедентной интенсификации процессов химических потерь озона в средней стратосфере в областях, расположенных внутри циклонических ячеек. Наблюдаемое уменьшение озона в нижней стратосфере (рис. 4, а) может быть связано также с притоком в исследуемый регион воздушных масс, обедненных озоном, из низких широт Атлантики (рис. 3, з, д) [Маричев и др., 2014]. Рост концентрации озона начался после 14 января, т. е. через неделю после максимума ВСП, и был связан, вероятно, с ослаблением циклонической ячейки над регионом Сибири и ростом геопотенциала (рис. 3, 4, е) [Соломонов и др., 2017].

Отметим, что 8–18 января данные озонметрических наблюдений и реанализа Era Interim на высоте 25 км существенно различаются (рис. 4, а). Указанное расхождение объясняется, вероятно, тем, что величины концентрации озона, выдаваемые в архиве, являются результатом постобработки доступных измерений с использованием разного рода моделей ассимиляции и интерполяции, которые не лишены отдельных недостатков [Dee et al., 2011]. С другой стороны, погрешность измерений с используемой нами аппаратурой не превышает 20 %. В связи с этим мы полагаем, что более достоверными в данном случае являются величины концентрации озона, полученные нами в эксперименте.

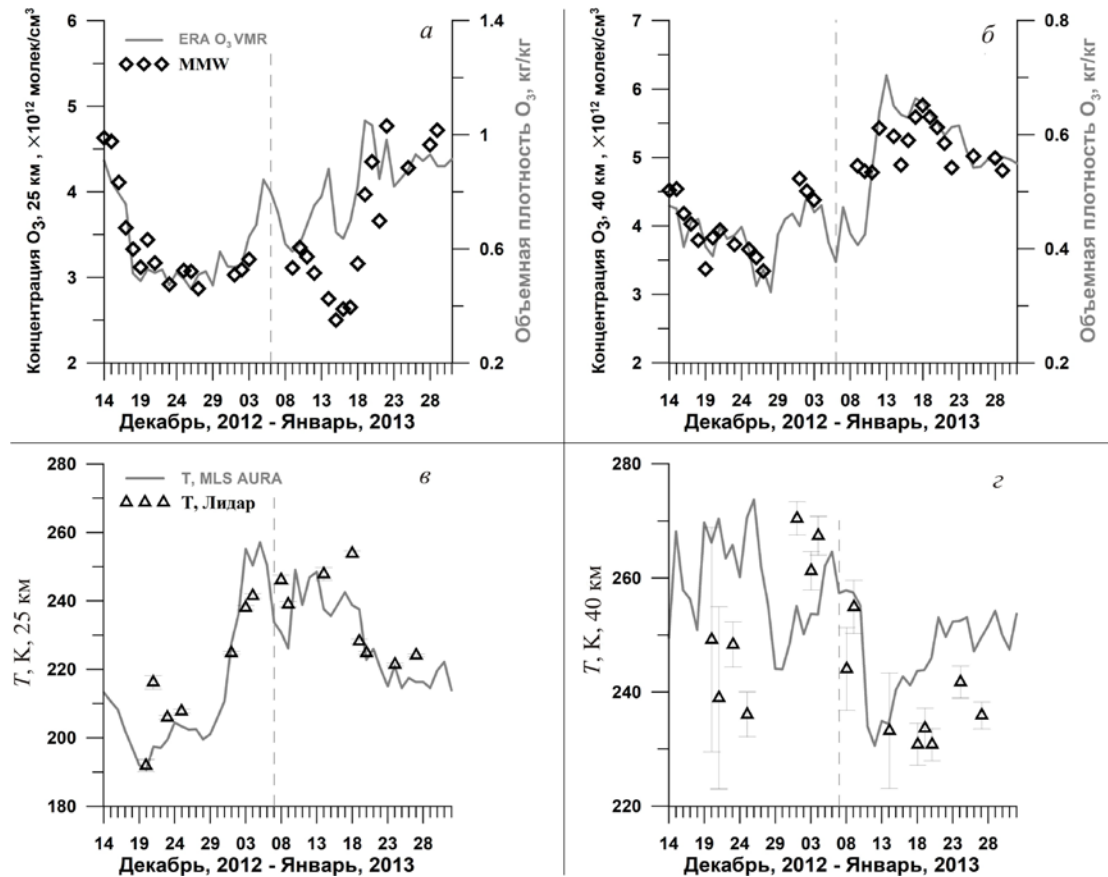


Рис. 4. Изменения концентрации озона в Томске на высотах 25 (а) и 40 км (б) по данным микроволновых наблюдений (ромбы) в сравнении с поведением объемной концентрации озона по данным ERA Interim Reanalysis (серые кривые). Вариации температуры стратосферы на высотах 25 (в) и 40 км (г) по данным лидарных измерений показаны треугольниками, а по данным микроволнового зонда MLS Aura — серыми кривыми

В более высоких слоях стратосферы концентрация озона определяется преимущественно фотохимическими процессами [Маричев и др., 2014], а вариации концентрации озона находятся в противофазе с изменениями температуры (рис. 4, б, г). Видно, что с конца декабря до середины января в период ВСП концентрация озона на высоте 40 км возрастает примерно в два раза.

ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОСФЕРЫ И ИОНОСФЕРЫ

На рис. 5 показаны дневные вариации по экспериментальным данным и результаты модельных расчетов f_oF_2 , ПЭС и отношения O/N_2 . Показаны также изменения интенсивности потока солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см ($F_{10.7}$) и геомагнитного индекса K_p . Результаты модельных расчетов приведены с учетом и без учета изменений солнечной активности. Напомним, что дни максимумов ВСП (6 января) и солнечной активности (11 января) не совпадают (отмечены вертикальными штриховыми линиями).

Солнечная активность вносит существенный вклад в изменение ионосферных параметров — для всех трех величин регистрируется отчетливый отклик на повышение солнечной активности с начала

января. Следует отметить некоторую задержку в модельных расчетах максимумов f_oF_2 , ПЭС и O/N_2 относительно максимума солнечной активности. В отличие от электронной концентрации (запаздывание 1–2 дня после пика $F_{10.7}$) для O/N_2 эффект запаздывания относительно изменений $F_{10.7}$ составляет 4 дня после пика $F_{10.7}$. По данным наблюдений говорить о задержке вариаций этих параметров относительно изменения солнечной активности затруднительно из-за появления их значительной вариативности день ото дня после максимума ВСП.

Наблюдаются также вариации ионосферных параметров, не связанные с гелиофизической обстановкой. С 14 декабря до конца месяца в спокойных гелиофизических условиях отмечается уменьшение дневных значений электронной концентрации ионосферы и ПЭС. Уменьшение значений $F_{10.7}$ составило в этот период менее 10 %, для f_oF_2 — около 15 %, а среднесуточные значения ПЭС уменьшились более чем на 40 %. Такое сильное уменьшение ПЭС не может быть полностью объяснено слабыми вариациями уровня солнечной активности.

В рассматриваемый промежуток времени зарегистрировано также три периода повышенной геомагнитной активности ($K_p \geq 3$): 16–18 декабря, 20–21 января и 25–27 января. Вариации f_oF_2 и ПЭС в указанные дни (заметное падение 17 декабря, 20 и

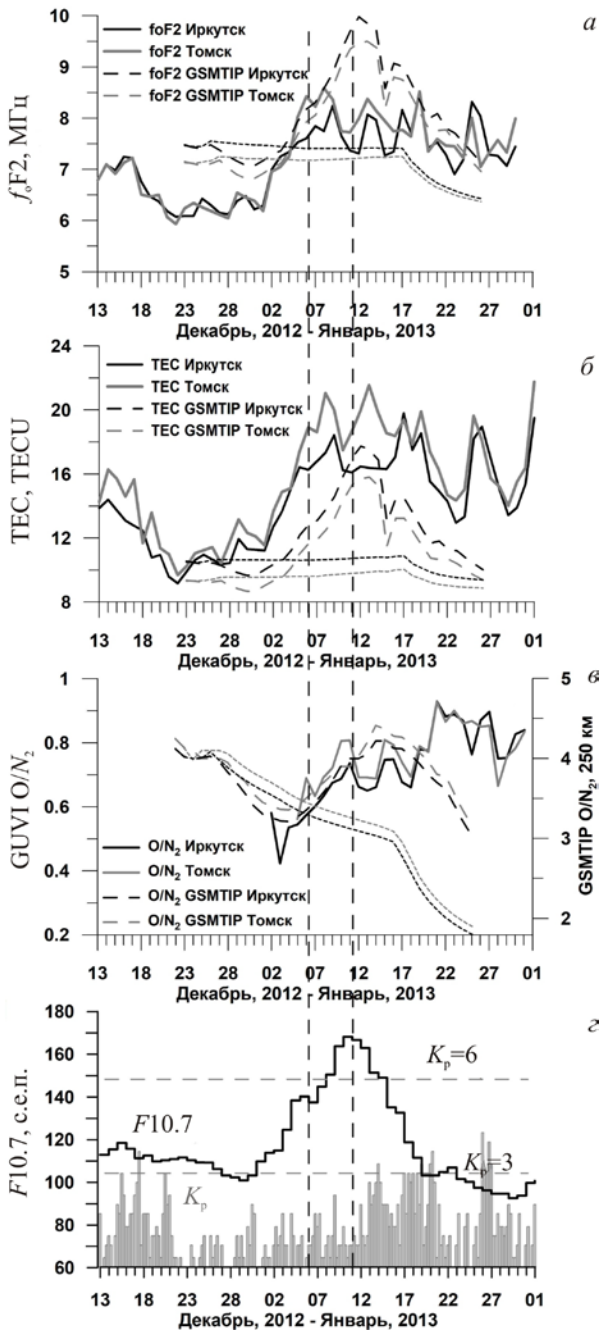


Рис. 5. Вариации дневных значений: а — f_oF_2 ; б — ПЭС; в — отношения O/N_2 (экспериментальные данные показаны жирными кривыми, модельные расчеты с учетом изменений солнечной активности — штриховыми линиями, без учета — пунктирными линиями); г — изменения индексов $F_{10.7}$ и K_p

25 января), по всей вероятности, связаны с усилением геомагнитной активности. Однако эти геомагнитные возмущения не были достаточно сильными, чтобы вызвать продолжительные и интенсивные вариации ионосферных параметров, обсуждаемые выше.

Отметим также, что если, согласно модельным расчетам, максимумы f_oF_2 и ПЭС должны регистрироваться 12–13 января, т. е. вблизи пика солнечной активности, то в экспериментальных данных такое поведение не наблюдается. Как в Томске, так и в Иркутске f_oF_2 и ПЭС достигают своих максимальных значений 7–8 января. Высокие значения сохра-

няются до конца января, не следуя за уменьшением уровня солнечной активности. При этом величины ПЭС и f_oF_2 до и после максимума ВСП отличаются более чем в два раза. Подобные изменения электронной концентрации в максимуме F2-слоя во время событий ВСП, произошедших с 2006 по 2013 г., наблюдались в Норильске [Yasyukevich, 2018].

Далее мы проанализировали вариации отношения O/N_2 по данным спутниковых измерений и модельным расчетам. Изменения O/N_2 оказывают существенное влияние на электронную концентрацию в максимуме F2-слоя ионосферы. Следует отметить, что модельные результаты были получены для высоты 250 км, в то время как спутниковые данные O/N_2 представляют отношения содержаний O и N_2 , полученных интегрированием по высоте их концентраций. Поэтому экспериментальные и модельные отношения O/N_2 различаются. Однако мы предполагаем, что их динамика качественно должна быть одинакова. Видно, что для O/N_2 наблюдаются изменения, схожие с теми, что были зарегистрированы для электронной концентрации. С начала до середины января происходит монотонный рост отношения O/N_2 , обусловленный изменением солнечной активности. Значения O/N_2 , согласно данным наблюдений, сохраняются повышенными до конца января, что не связано с изменением солнечной активности. Этот вывод следует из несоответствия временных изменений данных наблюдений и результатов модельных расчетов. Отметим также, что, как для электронной концентрации и ПЭС, для O/N_2 регистрируется отчетливый отклик на слабое геомагнитное возмущение 26 января ($K_p \leq 4+$), проявляющийся в заметном уменьшении O/N_2 .

Таким образом, к ионосферным эффектам ВСП над Томском и Иркутском можно отнести:

- 1) понижение f_oF_2 и ПЭС в период развития потепления;
- 2) продолжительное, в течение около 20 дней после максимума ВСП, увеличение O/N_2 , f_oF_2 и ПЭС на фазе восстановления стратосферной циркуляции.

Указанные изменения электронной концентрации связаны с вариациями нейтрального состава, в частности, с вариациями отношения O/N_2 . Имеющиеся экспериментальные данные о поведении O/N_2 за рассматриваемый период подтверждают это предположение. К сожалению, мы не имели возможности провести оценку поведения O/N_2 в декабре, поскольку в это время отсутствовали спутниковые измерения на исследуемых широтах. Похожие вариации концентрации атомарного кислорода на высоте термосферы во время ВСП были представлены в работе [Shepherd, Shepherd, 2011], на основании чего авторы работы сделали вывод о том, что наблюдаемые эффекты обусловлены вертикальными адиабатическими движениями в атмосфере, связанными с ВСП.

Увеличение температуры термосферы во время ВСП также может оказывать влияние на электронную концентрацию в ионосфере. Результаты модельных расчетов [Klimenko et al., 2013] показали, что рост температуры на высотах нижней термо-

сферы в течение максимальной фазы ВСП приводит к уменьшению отношения O/N_2 , что вызывает уменьшение электронной концентрации в максимуме F2-слоя, подобно процессам, происходящим во время геомагнитных бурь. После прохождения максимума потепления может наблюдаться аналог эффекта последствия геомагнитных бурь [Klimenko et al., 2017, 2018], когда в ионосфере средних широт происходит увеличение отношения O/N_2 , а также возможен приток плазмы из возмущенной экваториальной ионосферы, где регистрируется существенный рост электронной концентрации после максимума ВСП [Goncharenko et al., 2013]. О положительных возмущениях O/N_2 после стратосферных потеплений ранее сообщалось на примере четырех ВСП [Yasyukevich, 2018]. В нашей статье более детально рассмотрен наиболее сложный из представленных четырех случаев, для которого доказано, что положительные возмущения O/N_2 после 13 января не связаны с изменением солнечной активности, а являются проявлением изменений параметров нижней атмосферы вследствие ВСП.

И напоследок хотелось бы указать на возможную связь изменений стратосферного озона, термосферного O/N_2 , f_oF_2 и ПЭС. Значения всех этих параметров над Томском повышаются в течение продолжительного времени после максимума ВСП. О схожей ситуации в низкоширотной стратосфере и ионосфере говорилось в работе [Goncharenko et al., 2012] для случая сильного ВСП 2009 г. При этом важно отметить: мы не утверждаем, что стратосферный озон через некую цепочку процессов влияет на термосферный состав (что также возможно), а лишь указываем на их схожее поведение на средних широтах в период ВСП 2013 г. Существование связи стратосферного озона, термосферного состава и ионосферной электронной концентрации требует проведения статистических исследований с использованием различных массивов экспериментальных данных и интерпретации на основе существующих и разрабатываемых численных самосогласованных моделей нижней, средней и верхней атмосферы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе представлены результаты наблюдений различных параметров средней и верхней атмосферы над территорией Сибири в декабре 2012 – январе 2013 г., в период сильного ВСП. Продемонстрированы существенные изменения в различных атмосферных слоях. Результаты моделирования позволили отделить отклик верхней атмосферы на ВСП от отклика на значительные изменения солнечной активности в рассматриваемый период. К отклику верхней атмосферы на ВСП можно отнести снижение f_oF_2 и ПЭС в период развития потепления и продолжительное увеличение O/N_2 , f_oF_2 и ПЭС после максимума ВСП. Нами впервые отмечена связь увеличений стратосферного озона, термосферного O/N_2 и ионосферной электронной концентрации на средних широтах в течение довольно длительного периода времени (до 20 дней) после максимума ВСП.

Мы отмечаем, что использованный в данной работе подход не лишен некоторых недостатков, поскольку в модели ГСМ ТИП не учитываются возможные изменения в нижней атмосфере за счет роста солнечной активности. Для более корректной интерпретации ионосферных возмущений в рассматриваемый период необходимо воспользоваться моделью, описывающей поведение параметров нижней и верхней атмосферы. В дальнейшем планируется провести такое исследование.

Авторы выражают благодарность International GNSS Service за доступ к данным ГНСС, использованным в настоящем исследовании; European Centre for Medium-Range Weather Forecasts и Atmospheric Chemistry and Dynamics Laboratory/Goddard Space Flight Center за данные метеорологических архивов реанализа; Aerospace Corporation и Johns Hopkins University за спутниковые данные GUVI/TIMED; сервису NASA GES DISC за данные спутника Aura; а также сервису OMNIWeb Plus NASA/Goddard Space Flight Center за данные геомагнитных индексов. Данные Иркутского ионозонда получены с использованием оборудования ЦКП «Ангара» ИСЗФ СО РАН [<http://ckp-angara.iszf.irk.ru>].

Работа выполнена в рамках грантов РФФИ № 16-35-60018 (Ясюкевич А.С. — обработка и анализ спутниковых данных, данных реанализа и GPS/ГЛОНАСС), № 18-05-00594 (Клименко М.В., Ратовский К.Г. — обработка, анализ и интерпретация данных Иркутского ионозонда) и гранта РНФ № 17-17-01060 (Клименко В.В., Бессараб Ф.С., Кореньков Ю.Н. — модельные расчеты и их анализ). В работе использовались методики обработки данных, разработанные в рамках базового финансирования программы ФНИ П-16.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Клименко М.В., Бессараб Ф.С., Суходолов Т.В. и др. Ионосферные эффекты внезапного стратосферного потепления 2009 г. Результаты расчетов, полученные с использованием первой версии модели EAGLE // Химическая физика. 2018. Т. 37, № 7. С. 70–80. DOI: [10.1134/S0207401X18070105](https://doi.org/10.1134/S0207401X18070105).
- Куликов Ю.Ю., Красильников А.А., Рыскин В.Г. Результаты микроволновых исследований структуры озонового слоя полярных широт во время зимних аномальных потеплений стратосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38, № 2. С. 182–191.
- Маричев В.Н., Матвиенко Г.Г., Лисенко А.А. и др. Микроволновые и оптические наблюдения озона и температуры средней атмосферы во время стратосферного потепления в Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 01. С. 46–52.
- Матвиенко Г.Г., Банах В.А., Бобровников С.М. и др. Развитие технологий лазерного зондирования атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22, № 10. С. 915–930.
- Погорельцев А.И., Савенкова Е.Н., Перцев Н.Н. Внезапные стратосферные потепления: роль нормальных атмосферных мод // Геомагнетизм и аэронаука. 2014. Т. 54, № 3. С. 387–403. DOI: [10.7868/S0016794014020163](https://doi.org/10.7868/S0016794014020163).
- Смышляев С.П., Погорельцев А.И., Галин В.Я., Дробашевская Е.А. Влияние волновой активности на газовый состав стратосферы полярных районов // Геомагнетизм и аэронаука. 2016. Т. 56, № 1. С. 102–116. DOI: [10.7868/S0016794015060152](https://doi.org/10.7868/S0016794015060152).

- Соломонов С.В., Кропоткина Е.П., Розанов С.Б. и др. Влияние сильных внезапных стратосферных потеплений на озон в средней стратосфере по наблюдениям на миллиметровых волнах // Геомагнетизм и аэронавигация. 2017. Т. 57, № 3. С. 392–400. DOI: [10.7868/s0016794017020146](https://doi.org/10.7868/s0016794017020146).
- Ясюкевич А.С., Черниговская М.А., Мыльникова А.А. и др. Исследование сезонных вариаций ионосферной возмущенности по данным GPS/ГЛОНАСС над регионами Восточной Сибири и Дальнего Востока // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 4. С. 226–239. DOI: [10.21046/2070-7401-2017-14-4-249-262](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-4-249-262).
- Baldwin M.P., Dameris M., Shepherd T.G. How will the stratosphere affect climate change? // Science. 2007. V. 316. P. 1576–1577. DOI: [10.1126/science.1144303](https://doi.org/10.1126/science.1144303).
- Bessarab F.S., Korenkov Yu.N., Klimenko M.V., et al. Modeling the effect of sudden stratospheric warming within the thermosphere–ionosphere system // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2012. V. 90–91. P. 77–85. DOI: [10.1016/j.jastp.2012.09.005](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.09.005).
- Charlton A.J., Polvani L.M. A new look at stratospheric sudden warmings. Part I: climatology and modeling benchmarks // J. Climate. 2007. V. 20. P. 449–469. DOI: [10.1175/JCLI3996.1](https://doi.org/10.1175/JCLI3996.1).
- Chau J.L., Fejer B.G., Goncharenko L.P. Quiet variability of equatorial E×B drifts during a sudden stratospheric warming event // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. L05101. DOI: [10.1029/2008GL036785](https://doi.org/10.1029/2008GL036785).
- Chau J.L., Aponte N.A., Cabassa E., et al. Quiet time ionospheric variability over Arecibo during sudden stratospheric warming events // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. A00G06. DOI: [10.1029/2010JA015378](https://doi.org/10.1029/2010JA015378).
- Chau J.L., Goncharenko L.P., Fejer B.G., Liu H.L. Equatorial and low latitude ionospheric effects during sudden stratospheric warming events // Space Sci. Rev. 2012. V. 168. P. 385–417. DOI: [10.1007/s11214-011-9797-5](https://doi.org/10.1007/s11214-011-9797-5).
- Christensen A.B., Paxton L.J., Avery S., et al. Initial observations with the Global Ultraviolet Imager (GUVI) in the NASA TIMED satellite mission // J. Geophys. Res. 2003. V. 108 (A12). 1451. DOI: [10.1029/2003JA009918](https://doi.org/10.1029/2003JA009918).
- Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2011. V. 137. P. 553–597. DOI: [10.1002/qj.828](https://doi.org/10.1002/qj.828).
- Dow J.M., Neilan R.E., Rizos C. The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems // J. Geod. 2009. V. 83. P. 191–198. DOI: [10.1007/s00190-008-0300-3](https://doi.org/10.1007/s00190-008-0300-3).
- Fuller-Rowell T., Wu F., Akmaev R., et al. A whole atmosphere model simulation of the impact of a sudden stratospheric warming on thermosphere dynamics and electrodynamics // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. A00G08. DOI: [10.1029/2010JA015524](https://doi.org/10.1029/2010JA015524).
- Goncharenko L., Zhang S.-R. Ionospheric signatures of sudden stratospheric warming: Ion temperature at middle latitude // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35. L21103. DOI: [10.1029/2008GL035684](https://doi.org/10.1029/2008GL035684).
- Goncharenko L.P., Chau J.L., Liu H.L., Coster A.J. Unexpected connections between the stratosphere and ionosphere // Geophys. Res. Lett. 2010a. V. 37. L10101. DOI: [10.1029/2010GL043125](https://doi.org/10.1029/2010GL043125).
- Goncharenko L.P., Coster A.J., Chau J.L., Valladares C.E. Impact of sudden stratospheric warmings on equatorial ionization anomaly // J. Geophys. Res. 2010b. V. 115 (A10). DOI: [10.1029/2010JA015400](https://doi.org/10.1029/2010JA015400).
- Goncharenko L.P., Coster A.J., Plumb R.A., Domeisen D.I.V. The potential role of stratospheric ozone in the stratosphere–ionosphere coupling during stratospheric warmings // Geophys. Res. Lett. 2012. V. 39. L08101. DOI: [10.1029/2012GL051261](https://doi.org/10.1029/2012GL051261).
- Goncharenko L.P., 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. V. 40. P. 1–5. DOI: [10.1002/grl.50980](https://doi.org/10.1002/grl.50980).
- Hocke K., Lainer M., Schanz A. Composite analysis of a major sudden stratospheric warming // AnGeo Comm. 2015. V. 33. P. 783–788. DOI: [10.5194/angeocom-33-783-2015](https://doi.org/10.5194/angeocom-33-783-2015).
- 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 Research. 2013. V. 51, N 1. P. 54–63. DOI: [10.1134/S001095251301005X](https://doi.org/10.1134/S001095251301005X).
- Klimenko M.V., Klimenko V.V., Bessarab F.S., et al. Study of the thermospheric and ionospheric response to the 2009 sudden stratospheric warming using TIME-GCM and GSM TIP models: First results // J. Geophys. Res. Space Phys. 2015. V. 120. DOI: [10.1002/2014JA020861](https://doi.org/10.1002/2014JA020861).
- Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E., et al. Similarity and differences in morphology and mechanisms of the f_oF_2 and TEC disturbances during the geomagnetic storms on 26–30 September 2011 // Ann. Geophys. 2017. V. 35. P. 923–938. DOI: [10.5194/angeo-35-923-2017](https://doi.org/10.5194/angeo-35-923-2017).
- Klimenko M.V., Klimenko V.V., Despirak I.V., et al. Disturbances of the thermosphere–ionosphere–plasmasphere system and auroral electrojet at 30° E longitude during the St. Patrick's Day geomagnetic storm on 17–23 March 2015 // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2018. DOI: [10.1016/j.jastp.2017.12.017](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.12.017).
- Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Forster M., et al. Calculated and observed ionospheric parameters for Magion-2 passage above EISCAT on July 31 1990 // J. Geophys. Res. 1998. V. 103 (A7). P. 14697–14710. DOI: [10.1029/98JA00210](https://doi.org/10.1029/98JA00210).
- Korenkov Y.N., Klimenko V.V., Klimenko M.V., et al. The global thermospheric and ionospheric response to the 2008 minor sudden stratospheric warming event // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. A10309. DOI: [10.1029/2012JA018018](https://doi.org/10.1029/2012JA018018).
- Kulikov Y.Y., Krasilnikov A.A., Ryskin V.G., et al. Ground-based microwave instrument for stratospheric ozone measurements: New design and some results of observations // 30th Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena” Proceedings. 2007. P. 218–221.
- Labitzke K. Temperature changes in the mesosphere and stratosphere connected with circulation changes in winter // J. of Atmospheric Sci. 1972. V. 29. P. 756–766. DOI: [10.1175/1520-0469\(1972\)029<0756:TCITMA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1972)029<0756:TCITMA>2.0.CO;2).
- Labitzke K. Stratospheric–mesospheric midwinter disturbances: a summary of observed characteristics // J. Geophys. Res. 1981. V. 86 (C10). P. 9665–9678. DOI: [10.1029/JC086iC10p09665](https://doi.org/10.1029/JC086iC10p09665).
- Laskar F.I., Pallamraju D. Does sudden stratospheric warming induce meridional circulation in the mesosphere thermosphere system? // J. Geophys. Res. Space Phys. 2014. V. 119. P. 10,133–10,143. DOI: [10.1002/2014JA020086](https://doi.org/10.1002/2014JA020086).
- Liu H.-L., Roble R.G. A study of a self-generated stratospheric sudden warming and its mesospheric–lower thermospheric impacts using the coupled TIME-GCM/CCM3 // J. Geophys. Res. 2002. V. 107 (D23). 4695. DOI: [10.1029/2001JD001533](https://doi.org/10.1029/2001JD001533).
- 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. V. 120. DOI: [10.1002/2015JA021269](https://doi.org/10.1002/2015JA021269).
- Manney G.L., Lawrence Z.D., Santee M.L., et al. Polar processing in a split vortex: Arctic ozone loss in early winter 2012/2013 // Atmos. Chem. Phys. 2015. V. 15. P. 5381–5403. DOI: [10.5194/acp-15-5381-2015](https://doi.org/10.5194/acp-15-5381-2015).
- Matsuno T. A dynamical model of the Stratospheric Sudden Warming // J. Atm. Sci. 1971. V. 28. P. 1479–1494.
- Matvienko G.G., Kulikov Y.Y., Marichev V.N., et al. Study of the influence of the stratospheric warming in January 2013 on the vertical structure of ozone and temperature in the middle atmosphere over Tomsk using microwave and lidar

A.C. Ясюкевич, М.В. Клименко, Ю.Ю. Куликов,
В.В. Клименко, Ф.С. Бессараб, Ю.Н. Кореньков,
В.Н. Маричев, К.Г. Ратовский, С.А. Колесник

A.S. Yasyukevich, M.V. Klimenko, Yu.Yu. Kulikov,
V.V. Klimenko, F.S. Bessarab, Yu.N. Korenkov,
V.N. Marichev, K.G. Ratovsky, S.A. Kolesnik

diagnostics // ILRC 27 EPJ Web of Conferences. 2016. V. 119. 24002. DOI: [10.1051/epjconf/2016119224002](https://doi.org/10.1051/epjconf/2016119224002).

Medvedeva I., Medvedev A., Ratovsky K., et al. 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. V. 56. P. 1877–1885. DOI: [10.1016/j.asr.2015.06.008](https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.06.008).

Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., et al. Global model of the thermosphere-ionosphere-protonosphere system // *Pure and Applied Geophys.* 1988. V. 127, N 2/3. P. 219–254. DOI: [10.1007/BF00879812](https://doi.org/10.1007/BF00879812).

Pancheva D., Mukhtarov P. Stratospheric warmings: The atmosphere — ionosphere coupling paradigm // *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* 2011. V. 73. P. 1697–1702. DOI: [10.1016/j.jastp.2011.03.006](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.03.006).

Pedatella N.M., Liu H.-L., Sassi F., et al. Ionosphere variability during the 2009 SSW: Influence of the lunar semidiurnal tide and mechanisms producing electron density variability // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2014. V. 119. P. 3828–3843. DOI: [10.1002/2014JA019849](https://doi.org/10.1002/2014JA019849).

Polyakova A.S., Chernigovskaya M.A., Perevalova N.P. Ionospheric effects of sudden stratospheric warmings in eastern Siberia region // *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* 2014. V. 120. P. 15–23. DOI: [10.1016/j.jastp.2014.08.011](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2014.08.011).

Schoeberl M.R. Stratospheric warmings: observations and theory // *Rev. Geophys. Space Phys.* 1978. V. 16 (4). P. 521–538.

Scheiben D., Straub C., Hocke K., et al. Observations of middle atmospheric H₂O and O₃ during the 2010 major sudden stratospheric warming by a network of microwave radiometers // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12. P. 7753–7765. DOI: [10.5194/acp-12-7753-2012](https://doi.org/10.5194/acp-12-7753-2012).

Shepherd M.G., Shepherd G.G. Stratospheric warming effects on thermospheric O(1S) dayglow dynamics // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. A11327. DOI: [10.1029/2011JA016762](https://doi.org/10.1029/2011JA016762).

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. V. 115. A07318. DOI: [10.1029/2009JA015172](https://doi.org/10.1029/2009JA015172).

Shpynev B.G., Churilov S.M., Chernigovskaya M.A. Generation of waves by jet-stream instabilities in winter polar stratosphere/mesosphere // *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* 2015a. V. 136. Part B. P. 201–215. DOI: [10.1016/j.jastp.2015.07.005](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.07.005).

Shpynev B.G., Kurkin V.I., Ratovsky K.G., et al. High-midlatitude ionosphere response to major stratospheric warming // *Earth Planets and Space.* 2015b. V. 67:18. DOI: [10.1186/s40623-015-0187-1](https://doi.org/10.1186/s40623-015-0187-1).

Strickland D.J., Meier R.R., Walterscheid R.L., et al. Quiet-time seasonal behavior of the thermosphere seen in the far ultraviolet dayglow // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. A01302. DOI: [10.1029/2003JA010220](https://doi.org/10.1029/2003JA010220).

Sun L., Robinson W.A. Downward influence of stratospheric final warming events in an idealized model // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. L03819. DOI: [10.1029/2008GL036624](https://doi.org/10.1029/2008GL036624).

Tao M., Konopka P., Ploeger F., et al. Impact of the 2009 major sudden stratospheric warming on the composition of the stratosphere // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15. P. 8695–8715. DOI: [10.5194/acp-15-8695-2015](https://doi.org/10.5194/acp-15-8695-2015).

Yasyukevich A.S. Variations in ionospheric peak electron density during sudden stratospheric warmings in the Arctic region // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2018. V. 123. DOI: [10.1002/2017JA024739](https://doi.org/10.1002/2017JA024739).

Yasyukevich Yu.V., Mylnikova A.A., Polyakova A.S. Estimating the total electron content absolute value from the GPS/GLONASS data // *Res. Phys.* 2015. V. 5. P. 32–33. DOI: [10.1016/j.rinp.2014.12.006](https://doi.org/10.1016/j.rinp.2014.12.006).

Yue X., Schreiner W.S., Lei J., et al. Global ionospheric response observed by COSMIC satellites during the January 2009 stratospheric sudden warming event // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. A00G09. DOI: [10.1029/2010JA015466](https://doi.org/10.1029/2010JA015466).

URL: <http://www.esrl.noaa.gov> (дата обращения 2 июля 2018 г.).

URL: <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA> (дата обращения 2 июля 2018 г.).

URL: <https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets> (дата обращения 2 июля 2018 г.).

URL: <http://ckp-angara.iszf.irk.ru> (дата обращения 2 июля 2018 г.).

REFERENCES

Baldwin M.P., Dameris M., Shepherd T.G. How will the stratosphere affect climate change? *Science*. 2007, vol. 316, pp. 1576–1577. DOI: [10.1126/science.1144303](https://doi.org/10.1126/science.1144303).

Bessarab F.S., Korenkov Yu.N., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Karpov I.V., Ratovsky K.G., Chernigovskaya M.A. Modeling the effect of sudden stratospheric warming within the thermosphere–ionosphere system. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2012, vol. 90–91, pp. 77–85. DOI: [10.1016/j.jastp.2012.09.005](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.09.005).

Charlton A.J., Polvani L.M. A new look at stratospheric sudden warmings. Part I: climatology and modeling benchmarks. *J. Climate*. 2007, vol. 20, pp. 449–469. DOI: [10.1175/JCLI3996.1](https://doi.org/10.1175/JCLI3996.1).

Chau J.L., Fejer B.G., Goncharenko L.P. Quiet variability of equatorial E×B drifts during a sudden stratospheric warming event. *Geophys. Res. Lett.* 2009, vol. 36, L05101. DOI: [10.1029/2008GL036785](https://doi.org/10.1029/2008GL036785).

Chau J.L., Aponte N.A., Cabassa E., Sulzer M.P., Goncharenko L.P., Gonzalez S.A. Quiet time ionospheric variability over Arecibo during sudden stratospheric warming events. *J. Geophys. Res.* 2010, vol. 115, A00G06. DOI: [10.1029/2010JA015378](https://doi.org/10.1029/2010JA015378).

Chau J.L., Goncharenko L.P., Fejer B.G., Liu H.L. Equatorial and low latitude ionospheric effects during sudden stratospheric warming events. *Space Sci. Rev.* 2012, vol. 168, pp. 385–417. DOI: [10.1007/s11214-011-9797-5](https://doi.org/10.1007/s11214-011-9797-5).

Christensen A.B., Paxton L.J., Avery S., Craven J., Crowley G., Humm D.C., et al. Initial observations with the Global Ultraviolet Imager (GUVI) in the NASA TIMED satellite mission. *J. Geophys. Res.* 2003, vol. 108, iss. A12, CitelID 1451. DOI: [10.1029/2003JA009918](https://doi.org/10.1029/2003JA009918).

Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2011, vol. 137, pp. 553–597. DOI: [10.1002/qj.828](https://doi.org/10.1002/qj.828).

Dow J.M., Neilan R.E., Rizos C. The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems. *J. of Geodesy*. 2009, vol. 83, pp. 191–198. DOI: [10.1007/s00190-008-0300-3](https://doi.org/10.1007/s00190-008-0300-3).

Fuller-Rowell T., Wu F., Akmaev R., Fang T.-W., Araujo-Pradere E. A whole atmosphere model simulation of the impact of a sudden stratospheric warming on thermosphere dynamics and electrodynamics. *J. Geophys. Res.* 2010, vol. 115, A00G08. DOI: [10.1029/2010JA015524](https://doi.org/10.1029/2010JA015524).

Hocke K., Lainer M., Schanz A. Composite analysis of a major sudden stratospheric warming. *AnGeo Comm.* 2015, vol. 33, pp. 783–788. DOI: [10.5194/angeocom-33-783-2015](https://doi.org/10.5194/angeocom-33-783-2015).

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](https://doi.org/10.1029/2008GL035684).

Goncharenko L.P., Chau J.L., Liu H.L., Coster A.J. Unexpected connections between the stratosphere and ionosphere. *Geophys. Res. Lett.* 2010a, vol. 37, L10101. DOI: [10.1029/2010GL043125](https://doi.org/10.1029/2010GL043125).

Goncharenko L.P., Coster A.J., Chau J.L., Valladares C.E. Impact of sudden stratospheric warmings on equatorial ionization anomaly. *J. Geophys. Res.* 2010b, vol. 115 (A10), DOI: [10.1029/2010JA015400](https://doi.org/10.1029/2010JA015400).

Goncharenko L.P., Chau J.L., Condor P., Coster A., Benkevitch L. 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).

Goncharenko L.P., Coster A.J., Plumb R.A., Domeisen D.I.V. The potential role of stratospheric ozone in the stratosphere-ionosphere coupling during stratospheric warmings. *Geophys. Res. Lett.* 2012, vol. 39, L08101. DOI: [10.1029/2012GL051261](https://doi.org/10.1029/2012GL051261).

Klimenko M.V., Klimenko V.V., Koren'kov Y.N., Bessarab F.S., Karpov I.V., Ratovsky K.G., Chernigovskaya M.A. Modeling of response of the thermosphere-ionosphere system to sudden stratospheric warmings of years 2008 and 2009. *Cosmic Res.* 2013, vol. 51, no. 1, pp. 54–63. DOI: [10.1134/S001095251301005X](https://doi.org/10.1134/S001095251301005X).

Klimenko M.V., Klimenko V.V., Bessarab F.S., Koren'kov Y.N., Liu H., Goncharenko L.P., Tolstikov M.V. Study of the thermospheric and ionospheric response to the 2009 sudden stratospheric warming using TIME-GCM and GSM TIP models: First results. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015, vol. 120. DOI: [10.1002/2014JA020861](https://doi.org/10.1002/2014JA020861).

Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E., Ratovsky K.G., Korenkova N.A., Yasyukevich Yu.V., Mylnikova A.A., Chemiak Iu.V. Similarity and differences in morphology and mechanisms of the foF2 and TEC disturbances during the geomagnetic storms on 26–30 September 2011. *Ann. Geophys.* 2017, vol. 35, pp. 923–938. DOI: [10.5194/angeo-35-923-2017](https://doi.org/10.5194/angeo-35-923-2017).

Klimenko M.V., Bessarab F.S., Sukhodolov T.V., Klimenko V.V., Koren'kov Yu.N., Zakharenkova I.E., Chirik N.V., Vasil'ev P.A., Kulyamin D.V., Shmidt Kh., Funke B., Rozanov E.V. Ionospheric Effects of the Sudden Stratospheric Warming in 2009: Results of Simulation with the First Version of the EAGLE Model. *Russian Journal of Physical Chemistry B.* 2018, vol. 12, no. 4, pp. 760–770. DOI: [10.1134/S1990793118040103](https://doi.org/10.1134/S1990793118040103).

Klimenko M.V., Klimenko V.V., Despirak I.V., Zakharenkova I.E., Kozelov B.V., Cherniakov S.M., Andreeva E.S., Tereshchenko E.D., Vesnin A.M., Korenkova N.A., Gomonov A.D., Vasiliev E.B., Ratovsky K.G. Disturbances of the thermosphere-ionosphere-plasmasphere system and auroral electrojet at 30° E longitude during the St. Patrick's Day geomagnetic storm on 17–23 March 2015. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018b. DOI: [10.1016/j.jastp.2017.12.017](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.12.017).

Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Forster, M. Bessarab, F.S. Surotkin V.A. Calculated and observed ionospheric parameters for Magion-2 passage above EISCAT on July 31 1990. *J. Geophys. Res.* 1998, vol. 103(A7), pp. 14697–14710. DOI: [10.1029/98JA00210](https://doi.org/10.1029/98JA00210).

Korenkov Y.N., Klimenko V.V., Klimenko M.V., Bessarab F.S., Korenkova N.A., Ratovsky K.G., Chernigovskaya M.A., Shcherbakov A.A., Sahai Y., Fagundes P.R., de Jesus R., de Abreu A.J., Condor P. The global thermospheric and ionospheric response to the 2008 minor sudden stratospheric warming event. *J. Geophys. Res.* 2012, vol. 117, A10309. DOI: [10.1029/2012JA018018](https://doi.org/10.1029/2012JA018018).

Kulikov Y.Y., Krasilnikov A.A., Ryskin V.G., Shanin V.N., Shchitov A.M. Ground-based microwave instrument for stratospheric ozone measurements: New design and some results of observations. *Proc. 30th Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena"*. 2007, pp. 218–221.

Kulikov Yu.Yu., Krasil'nikov A.A., Ryskin V.G. Microwave Studies of the Structure of the Polar-Latitude Ozone Layer during Winter Anomalous Warming Events in the Stratosphere. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics.* 2002, vol. 38, no. 2, pp. 158–166.

Labitzke K. Temperature changes in the mesosphere and stratosphere connected with circulation changes in winter. *J. Atmos. Sci.* 1972, vol. 29, pp. 756–766. DOI: [10.1175/1520-0469\(1972\)029<0756:TCITMA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1972)029<0756:TCITMA>2.0.CO;2).

Labitzke K. Stratospheric-mesospheric midwinter disturbances: a summary of observed characteristics. *J. Geophys. Res.* 1981, vol. 86 (C10), pp. 9665–9678. DOI: [10.1029/JC086iC10p09665](https://doi.org/10.1029/JC086iC10p09665).

Laskar F.I., Pallamraju D. Does sudden stratospheric warming induce meridional circulation in the mesosphere-thermosphere system? *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014, vol. 119, pp. 10,133–10,143. DOI: [10.1002/2014JA020086](https://doi.org/10.1002/2014JA020086).

Liu H.-L., Roble R.G. A study of a self-generated stratospheric sudden warming and its mesospheric-lower thermospheric impacts using the coupled TIME-GCM/CCM3. *J. Geophys. Res.* 2002, vol. 107 (D23), 4695. DOI: [10.1029/2001JD001533](https://doi.org/10.1029/2001JD001533).

Lukianova R., Kozlovsky A., Shalimov S., Ulich T., Lester M. 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. DOI: [10.1002/2015JA021269](https://doi.org/10.1002/2015JA021269).

Manney G.L., Lawrence Z.D., Santee M.L., Livesey N.J., Lambert A., Pitts M.C. Polar processing in a split vortex: Arctic ozone loss in early winter 2012/2013. *Atmos. Chem. Phys.* 2015, vol. 15, pp. 5381–5403. DOI: [10.5194/acp-15-5381-2015](https://doi.org/10.5194/acp-15-5381-2015).

Marichev V.N., Matvienko G.G., Lisenko A.A., Bochkovsky D.A., Kulikov Yu.Yu., Krasilnikov A.A., Ryskin V.G., Demkin V.M. Microwave and optical observations of ozone and temperature of the middle atmosphere during stratospheric warming in the Western Siberia. *Optika atmosfery i okeana [Atmospheric and Oceanic Optics]*. 2014, vol. 27, no. 01, pp. 46–52. (In Russian).

Matsuno T. A dynamical model of the stratospheric sudden warming. *J. Atm. Sci.* 1971, vol. 28, pp. 1479–1494.

Matvienko G.G., Banakh V.A., Bobrovnikov S.M., Burlakov V.D., Veretennikov V.V., Kaul B.V., Krekov G.M., Marichev V.N. Development of technologies of the atmosphere laser sounding. *Optika atmosfery i okeana [Atmospheric and Oceanic Optics]*. 2009, vol. 22, no. 10, pp. 915–930. (In Russian).

Matvienko G.G., Kulikov Y.Y., Marichev V.N., Bochkovsky D.A., Krasilnikov A.A., Ryskin V.G. Study of the influence of the stratospheric warming in January 2013 on the vertical structure of ozone and temperature in the middle atmosphere over Tomsk using microwave and lidar diagnostics. *ILRC 27 EPJ Web of Conferences.* 2016, vol. 119, 24002. DOI: [10.1051/epjconf/2016119224002](https://doi.org/10.1051/epjconf/2016119224002).

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, pp. 1877–1885. DOI: [10.1016/j.asr.2015.06.008](https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.06.008).

Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Karpov I.V., Bessarab F.S., Surotkin V.A., Glushchenko T.A., Naumova N.M. Global model of the thermosphere-ionosphere-protonosphere system. *Pure and Applied Geophys.* 1988, vol. 127, no. 2/3, pp. 219–254. DOI: [10.1007/BF00879812](https://doi.org/10.1007/BF00879812).

Pancheva D., Mukhtarov P. Stratospheric warmings: The atmosphere — ionosphere coupling paradigm. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2011, vol. 73, pp. 1697–1702. DOI: [10.1016/j.jastp.2011.03.006](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.03.006).

Pedatella N.M., Liu H.-L., Sassi F., Lei J., Chau J.L., Zhang X. Ionosphere variability during the 2009 SSW: Influence of the lunar semidiurnal tide and mechanisms producing electron density variability. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014, vol. 119, pp. 3828–3843. DOI: [10.1002/2014JA019849](https://doi.org/10.1002/2014JA019849).

Pogoreltsev A.I., Savenkova E.N., Pertsev N.N. Sudden stratospheric warmings: the role of normal atmospheric modes. *Geomagnetizm i aeronomiya [Geomagnetism and Aeronomy]*. 2014, vol. 54, no. 3, pp. 387–403. (In Russian). DOI: [10.7868/S0016794014020163](https://doi.org/10.7868/S0016794014020163).

А.С. Ясюкевич, М.В. Клименко, Ю.Ю. Куликов,
В.В. Клименко, Ф.С. Бессараб, Ю.Н. Кореньков,
В.Н. Маричев, К.Г. Ратовский, С.А. Колесник

A.S. Yasyukevich, M.V. Klimenko, Yu.Yu. Kulikov,
V.V. Klimenko, F.S. Bessarab, Yu.N. Korenkov,
V.N. Marichev, K.G. Ratovsky, S.A. Kolesnik

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).

Schoeberl M.R. Stratospheric warmings: observations and theory. *Rev. Geophys.: Space Phys.* 1978, vol. 16 (4), pp. 521–538.

Scheiben D., Straub C., Hocke K., Forkman P., Kampfer N. Observations of middle atmospheric H₂O and O₃ during the 2010 major sudden stratospheric warming by a network of microwave radiometers. *Atmos. Chem. Phys.* 2012, vol. 12, pp. 7753–7765. DOI: [10.5194/acp-12-7753-2012](https://doi.org/10.5194/acp-12-7753-2012).

Shepherd M.G., Shepherd G.G. Stratospheric warming effects on thermospheric O(1S) dayglow dynamics. *J. Geophys. Res.* 2011, vol. 116, A11327. DOI: [10.1029/2011JA016762](https://doi.org/10.1029/2011JA016762).

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](https://doi.org/10.1029/2009JA015172).

Shpynev B.G., Churilov S.M., Chernigovskaya M.A. Generation of waves by jet-stream instabilities in winter polar stratosphere/mesosphere. *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* 2015a, vol. 136, Part B, pp. 201–215. DOI: [10.1016/j.jastp.2015.07.005](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.07.005).

Shpynev B.G., Kurkin V.I., Ratovsky K.G., Chernigovskaya M.A., Belinskaya A.Yu., Grigorieva S.A., Stepanov A.E., Bychkov V.V., Pancheva D., Mukhtarov P. High-midlatitude ionosphere response to major stratospheric warming. *Earth, Planets and Space.* 2015b, vol. 67:18. DOI: [10.1186/s40623-015-0187-1](https://doi.org/10.1186/s40623-015-0187-1).

Smyshlyaev S.P., Pogoreltsev A.I., Drobashevskaya E.A., Galin V.Y. Influence of wave activity on the composition of the polar stratosphere. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2016, vol. 56, no. 1, pp. 95–109. DOI: [10.1134/S0016793215060146](https://doi.org/10.1134/S0016793215060146).

Solomonov S.V., Kropotkina E.P., Rozanov S.B., Ignat'ev A.N., Lukin A.N. Influence of strong sudden stratospheric warmings on ozone in the middle stratosphere according to millimeter wave observations. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2017, vol. 57, no. 3, pp. 361–368, DOI: [10.1134/S0016793217020141](https://doi.org/10.1134/S0016793217020141).

Strickland D.J., Meier R.R., Walterscheid R.L., Craven J.D., Christensen A.B., Paxton L.J., Morrison D., Crowley G. Quiet-time seasonal behavior of the thermosphere seen in the far ultraviolet dayglow. *J. Geophys. Res.* 2004, vol. 109, A01302. DOI: [10.1029/2003JA010220](https://doi.org/10.1029/2003JA010220).

Sun L., Robinson W.A. Downward influence of stratospheric final warming events in an idealized model. *Geophys. Res. Lett.* 2009, vol. 36, L03819. DOI: [10.1029/2008GL036624](https://doi.org/10.1029/2008GL036624).

Tao M., Konopka P., Ploeger F., Grooß J.-U., Müller R., Volk C.M., Walker K.A., Riese M. Impact of the 2009 major sudden stratospheric warming on the composition of the stratosphere. *Atmos. Chem. Phys.* 2015, vol. 15, pp. 8695–8715. DOI: [10.5194/acp-15-8695-2015](https://doi.org/10.5194/acp-15-8695-2015).

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. DOI: [10.1002/2017JA024739](https://doi.org/10.1002/2017JA024739).

Yasyukevich Yu.V., Mylnikova A.A., Polyakova A.S. Estimating the total electron content absolute value from the GPS/GLONASS data. *Res. Phys.* 2015, vol. 5, pp. 32–33. DOI: [10.1016/j.rinp.2014.12.006](https://doi.org/10.1016/j.rinp.2014.12.006).

Yasyukevich A.S., Chernigovskaya M.A., Mylnikova A.A., Shpynev B.G., Khabituiev D.S. Studying the seasonal pattern of ionospheric variability over Eastern Siberia and Far East region from GPS/GLONASS data. *Sovremennye problem distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space]. 2017, vol. 14, no. 3, pp. 226–239. (In Russian). DOI: [10.21046/2070-7401-2017-14-4-249-262](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-4-249-262).

Yue X., Schreiner W.S., Lei J., Rocken C., Hunt D.C., Kuo Y.-H., Wan W. Global ionospheric response observed by COSMIC satellites during the January 2009 stratospheric sudden warming event. *J. Geophys. Res.* 2010, vol. 115, A00G09. DOI: [10.1029/2010JA015466](https://doi.org/10.1029/2010JA015466).

URL: <http://www.esrl.noaa.gov> (accessed July 2, 2018).

URL: <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA> (accessed July 2, 2018).

URL: <https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets> (accessed July 2, 2018).

URL: <http://ckp-angara.iszf.irk.ru> (accessed July 2, 2018).

Ясюкевич А.С., Клименко М.В., Куликов Ю.Ю., Клименко В.В., Бессараб Ф.С., Кореньков Ю.Н., Маричев В.Н., Ратовский К.Г., Колесник С.А. Изменения параметров средней и верхней атмосферы во время внезапного стратосферного потепления в январе 2013 г. *Солнечно-земная физика.* 2018. Т. 4, № 4. С. 62–75. DOI: [10.12737/szf-44201807](https://doi.org/10.12737/szf-44201807).