
ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКЛИКА ИОНОСФЕРЫ НА ВНЕЗАПНЫЕ СТРАТОСФЕРНЫЕ ПОТЕПЛЕНИЯ В АЗИАТСКОМ РЕГИОНЕ РОССИИ***IONOSPHERIC REACTION ON SUDDEN STRATOSPHERIC WARMING EVENTS IN RUSSIA'S ASIA REGION***

А.С. Полякова*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, annpol@iszf.irk.ru***М.А. Черниговская***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, cher@iszf.irk.ru***Н.П. Перевалова***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, pereval@iszf.irk.ru***A.S. Polyakova***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, annpol@iszf.irk.ru***M.A. Chernigovskaya***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, cher@iszf.irk.ru***N.P. Perevalova***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, pereval@iszf.irk.ru*

Аннотация. Выполнено исследование отклика ионосферы на внезапные стратосферные потепления (ВСП) в Азиатском регионе России. Рассмотрено два события ВСП, наблюдавшихся зимой 2008–2009 и 2012–2013 гг. в условиях глубокого солнечного минимума и умеренного солнечного максимума соответственно. Для выявления эффектов в ионосфере, связанных с ВСП, проведен совместный анализ данных глобальных карт полного электронного содержания (ПЭС), данных измерений вертикальных профилей температуры, полученных с помощью зонда MLS (Microwave Limb Sounder, EOS Aura), а также данных метеоархивов NCEP/NCAR и UKMO Reanalysis. Впервые показано, что в течение сильных ВСП в ионосфере средних широт регистрируется уменьшение суточной амплитуды ПЭС до двух раз относительно спокойных дней. Наблюдается также рост интенсивности отклонений ПЭС от фонового уровня. Установлено, что в максимальной фазе потеплений наблюдается уменьшение значений полуденного максимума и рост ночных/утренних величин ПЭС относительно спокойных дней. Показано, что в различных геофизических условиях динамика ПЭС в периоды ВСП аналогична.

Ключевые слова: ионосферные возмущения, GPS-измерения ПЭС, внезапное стратосферное потепление.

Abstract. The response of the ionosphere to sudden stratospheric warmings (SSWs) in the Asian region of Russia is studied. Two SSW events observed in 2008–2009 and 2012–2013 winter periods of extreme solar minimum and moderate solar maximum are considered. To detect the ionospheric effects caused by SSWs, we carried out a joint analysis of global ionospheric maps (GIM) of the total electron content (TEC), MLS (Microwave Limb Sounder, EOS Aura) measurements of temperature vertical profiles, as well as NCEP/NCAR and UKMO Reanalysis data. For the first time, it was found that during strong SSWs, in the mid-latitude ionosphere the amplitude of diurnal TEC variation decreases nearly half compared to quiet days. At the same time, the intensity of TEC deviations from the background level increases. It was also found that at SSW peak the midday TEC maximum decreases, and night/morning TEC values increase compared to quiet days. It was shown that during SSWs, TEC dynamics was identical for different geophysical conditions.

Key words: ionospheric disturbances, GPS measurements of TEC, sudden stratospheric warming.

ВВЕДЕНИЕ

Внезапными стратосферными потеплениями (ВСП) называют сильные непредсказуемые повышения температуры в полярной и субполярной стратосфере зимой, иногда на 50° и более, продолжающиеся в течение нескольких суток или недель. По классификации стратосферные потепления подразделяют на незначительные, или слабые, типа «minor» (наблюдаются каждую зиму) и значительные, или сильные, типа «major» [Labitzke, 1981].

Сильные потепления наблюдаются реже, как правило, захватывают стратосферу и мезосферу и носят глобальный характер. При этом меняется знак меридионального градиента температуры над полушарием, а также происходит смена направления зональной стратосферной циркуляции на высоте 10 гПа с западного на восточное — происходит разрушение и/или смещение зимнего циркумполярного вихря, и формируется стратосферный полярный антициклон [Charlton, Polvani, 2007]. Возвращение стратосферы

*Впервые статья опубликована на английском языке в «Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics». 2014. V. 120. P. 15–23. DOI: 10.1016/j.jastp.2014.08.011. На русском языке публикуется впервые в сокращенном варианте по лицензии издательства.

к нормальному режиму (так называемая стадия восстановления) происходит медленнее, чем развитие потепления. Общепринятым в развитии ВСП является механизм, впервые предложенный в работе [Matsuno, 1971], согласно которому развитие ВСП происходит вследствие интенсификации и проникновения из тропосферы в стратосферу планетарных волн (ПВ) и их нелинейного взаимодействия с западным стратосферным потоком. Результатом такого взаимодействия является диссипация волн, а также замедление и разрушение полярного вихря, после чего в стратосфере высвобождается большое количество кинетической энергии. Развитие стратосферного антициклона приводит к формированию нисходящего вертикального переноса в стратосфере, а опускание воздушных масс — к адиабатическому нагреву воздуха. Наблюдения показывают, что ВСП начинаются на больших высотах, а затем спускаются в нижнюю стратосферу и тропосферу [Schoeberl, 1978]. В мезосфере, напротив, наблюдается остывание воздуха над зоной потепления в стратосфере [Labitzke, 1972].

Влияние ВСП на состояние ионосферной плазмы исследуется довольно давно. Так, считается, что явление «зимней аномалии» поглощения радиоволн в D-области ионосферы тесно связано с процессами переноса в периоды ВСП. В указанные периоды в D-слое резко возрастает электронная концентрация и, следовательно, поглощение [Kazimirovsky, 2002].

Отрицательные отклонения f_oF_2 порядка 0.7–0.8 МГц, а также высоты главного максимума ионизации в ионосфере экваториальных и средних широт в период ВСП 2007/2008 и 2008/2009 гг. зарегистрированы в работе [Pancheva, Mukhtarov, 2011]. Анализ профилей электронной плотности, полученных по измерениям спутника COSMIC во время ВСП 2009 г., выявил увеличение максимальной частоты f_mF_2 и высоты максимума h_mF_2 F-слоя ионосферы, а также полного электронного содержания (ПЭС) в утренние часы и уменьшение указанных параметров в вечерние часы относительно значений, регистрируемых в спокойные дни [Yue et al., 2010]. На высоких широтах, напротив, наблюдалось уменьшение h_mF_2 и увеличение f_mF_2 и ПЭС в течение всех суток. Указанные явления авторы связывают с изменением вертикального дрейфа плазмы, индуцированным возмущенной системой ветров нижней термосферы. Моделирование, выполненное в работе [Bessarab et al., 2012], показало, что отклонения электронной плотности в F2-области ионосферы во время ВСП могут быть вызваны также возмущениями в форме стационарных ПВ на нижней границе термосферы.

Большое количество эффектов ВСП в экваториальной ионосфере выявлено в работе [Sumod et al., 2012]. Среди основных особенностей в поведении ионосферы в период ВСП зимой 2007/2008 гг. авторами отмечены уменьшение значений f_oF_2 в утренние и вечерние часы и увеличение в послеполуденные, смещение суточного максимума ПЭС в сторону более ранних часов местного времени, необычное уменьшение интенсивности дневного свечения атмосферы в длине волны 630 нм. В работах [Goncha-

renko et al., 2010a, b] зарегистрированы крупномасштабные колебания ПЭС с полусуточным периодом, наблюдавшиеся в экваториальной ионосфере в течение нескольких дней после потепления. Авторы работы [Pedatella, Forbes, 2010] на основе анализа данных GPS выявили значительное усиление интенсивности полусуточных приливов в экваториальных широтах ионосферы во время ВСП. Эффекты ВСП в низкоширотной ионосфере связаны с изменениями электрических полей в экваториальной электростроуе [Chau et al., 2009, 2010, 2012; Fejer et al., 2010]. Они также являются проявлением взаимодействия распространяющихся из низлежащих атмосферных слоев ПВ с термосферными приливами [Pedatella, Forbes, 2010].

Результаты исследования динамики ионосферы во время мощного ВСП 2009 г. на сети сибирских ионзондов представлены в работе [Шпынев и др., 2013]. Авторами показано, что интенсивность и знак ионосферного отклика на ВСП зависит от местоположения пункта наблюдения относительно зон с различными типами стратосферной циркуляции. Максимальные вариации параметров F2-слоя наблюдаются вблизи тех границ между циклоном и антициклоном, где циркуляция направлена к северу. Так, наибольшее повышение высоты максимума слоя было зафиксировано над Якутском и составило около 50 км, в то время как в пунктах, находящихся внутри циклонической циркуляции (Новосибирск, Иркутск), напротив, регистрировалось опускание высоты F2.

В данной работе нами проведено исследование возможного отклика ПЭС на события ВСП в среднеширотной ионосфере в областях, располагающихся непосредственно над очагами потеплений в стратосфере (под очагом ВСП здесь и далее понимается область наибольшего повышения температуры).

ДАННЫЕ И МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Для выявления ионосферных вариаций, связанных с событиями ВСП, проведен совместный анализ данных спутниковых измерений ионосферных и атмосферных параметров в Азиатском регионе России в периоды сильных стратосферных потеплений, наблюдавшихся зимой 2008–2009 и 2012–2013 гг. Для анализа температурного режима средней атмосферы использовались данные измерений вертикальных профилей температуры, полученные с помощью зонда MLS (Microwave Limb Sounder), установленного на борту космического аппарата EOS Aura. Очаги возмущения температуры, связанные с событиями зимних ВСП, выявлялись по картам высотного-временного распределения температуры для регионов городов Иркутск (52° N, 104° E), Новосибирск (55° N, 83° E), Паратунка (53° N, 158° E) и Якутск (62° N, 130° E), а также на основе анализа карт метеопараметров (температуры, высоты геопотенциальной поверхности) на уровне 10 гПа (карты строились по данным NCEP/NCAR Reanalysis, [http://www.esrl.noaa.gov/psd]).

Динамика параметров стратосферы (среднезональные температура и скорость зонального ветра

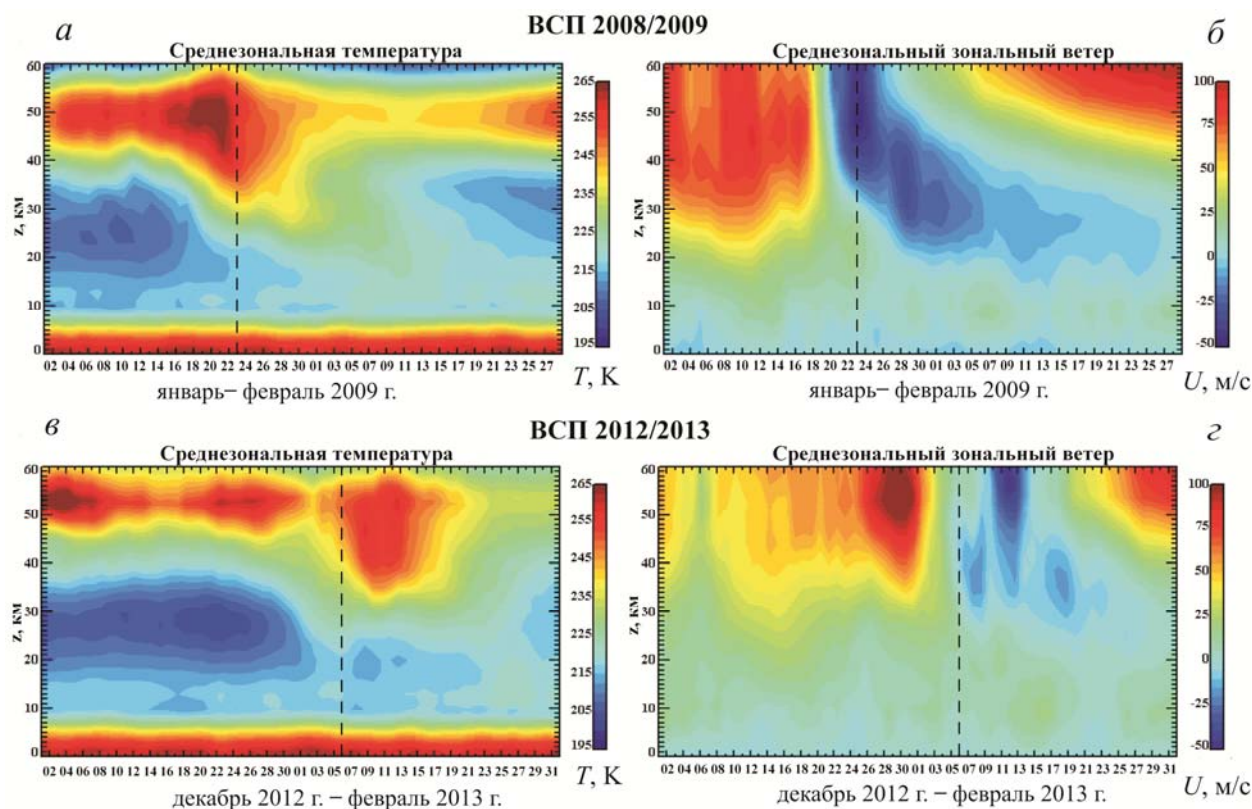


Рис. 1. Распределения среднезональных температуры и зонального ветра (UKMO Reanalysis) на широте 60° N в периоды ВСП 2008–2009 (а, б) и 2012–2013 гг. (в, г). Максимумы ВСП обозначены на каждой панели вертикальной штриховой линией

в исследуемые периоды оценивалась на основе ассимиляционных стратосферных данных UK Met Office (UKMO) Reanalysis [<http://badc.nerc.ac.uk/browse/badc/ukmo-assim/>]. Они доступны до уровня 0.01 гПа (~ 75 км), что дает возможность проследить изменение параметров стратосферы вдоль всей ее толщи. Высотные распределения зонально усредненных температуры и скорости зонального ветра на широте 60° N по данным UKMO Reanalysis для обоих рассматриваемых событий показаны на рис. 1.

Исследование вариаций ПЭС проводилось в спокойной геомагнитной обстановке. Контроль геомагнитной активности осуществлялся на основе анализа поведения индексов D_{st} и K_p . Геомагнитные условия считались спокойными, когда значения K_p не превышали 4, а D_{st} не опускался ниже -50 нТл. Данные о поведении индексов геомагнитной активности взяты на сайтах [http://www.ngdc.noaa.gov/stp/GEOMAG/kp_ap.html, <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>].

Выявление ионосферного отклика на события ВСП проводилось на основе глобальных карт GIM Ionex. Методика построения карт описана в работе [Manucci et al., 1998]. В GIM содержатся данные абсолютного вертикального ПЭС в диапазоне от -180° до 180° по долготе и от -87.5° до 87.5° по широте. Пространственное разрешение карт составляет 5° по долготе и 2.5° по широте. Каждый файл Ionex содержит данные ПЭС за одни сутки с временным разрешением 2 ч. В данной работе мы использовали карты, рассчитываемые в лаборатории JPL (Jet Propulsion Laboratory of California Institute of Technology,

[<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex/>]). Чтобы избежать ошибок, связанных с применяемой при построении карт GIM интерполяцией, для исследования были взяты те точки, в которых проводятся прямые GPS-измерения ПЭС.

Для анализа состояния ионосферы во время ВСП были построены непрерывные ряды ПЭС I_v , а также ряды отклонений ПЭС dI_v от фоновых значений в точках, соответствующих различным типам стратосферной циркуляции. Фоновые значения ПЭС для каждого месяца рассчитывались как среднее в данный момент суток ПЭС по всем геомагнитно-спокойным дням. Были рассчитаны также ряды амплитуд A суточных вариаций ПЭС как разница между суточными максимумом и минимумом ПЭС.

ИОНОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ ВО ВРЕМЯ ВСП 2009 г.

Стратосферное потепление зимой 2008–2009 гг. относилось к классу сильных и явилось самым мощным за всю историю наблюдения данных событий [Labitzke, Kunze, 2009; Harada et al., 2010; Goncharenko et al., 2010a; Yue et al., 2010; Pancheva, Mukhtarov, 2011]. Быстрое увеличение стратосферной температуры на уровне 10 гПа (около 30 км) началось 17 января (рис. 1, а), пик температуры наблюдался в Восточно-Сибирском регионе 22 января. Температура стратосферы в эти дни повышалась на 70 – 80°C по сравнению с невозмущенными днями. Максимум ВСП (момент реверса ветра на высоте

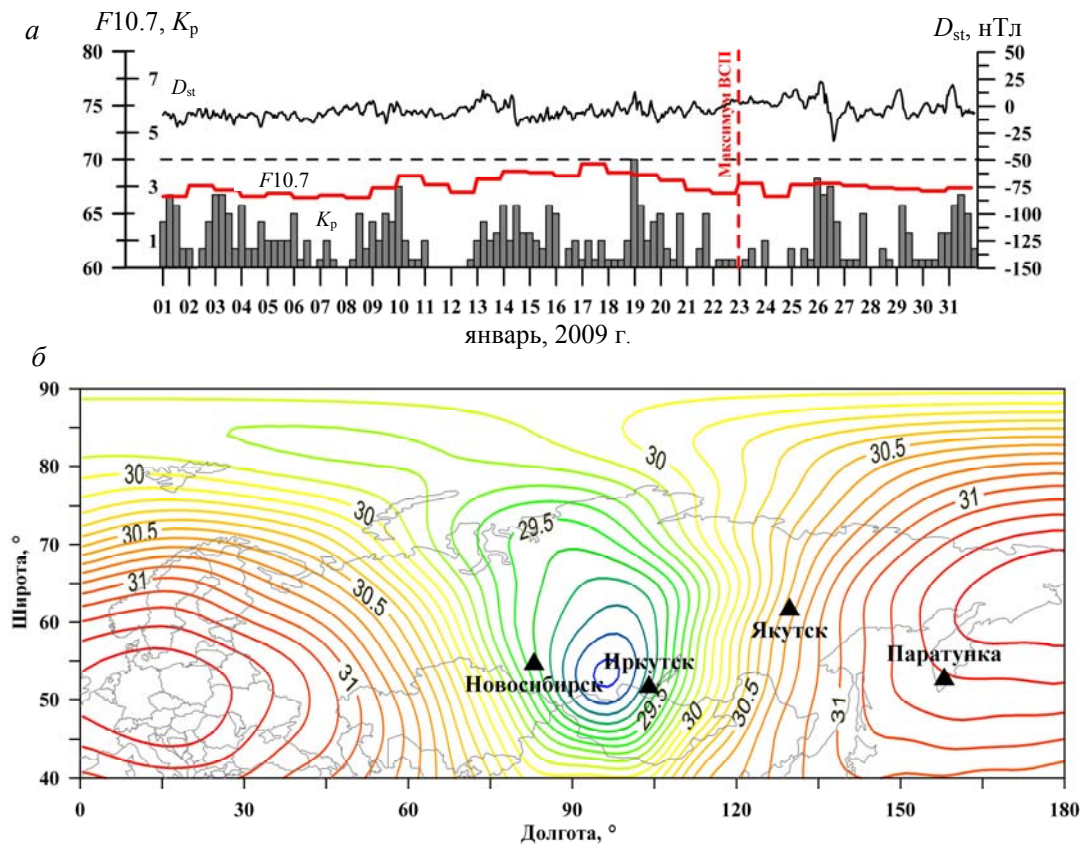


Рис. 2. Распределения геомагнитных индексов D_{st} и K_p , а также величины потока радиационного излучения Солнца $F_{10.7}$ в январе 2009 г. (а); высота геопотенциальной поверхности на уровне 10 гПа во время максимума ВСП 2009 г. (б). Треугольниками показаны точки, в которых проводилось исследование ионосферных параметров

10 гПа) был зарегистрирован 23–24 января (рис. 1, б). После 28 января температура стратосферы начала уменьшаться. Потепление 2008/2009 гг. протекало в фазе минимума солнечной активности (рис. 2, а), что благоприятствовало выявлению связей между различными атмосферными слоями в течение данного события ВСП.

Распределение высоты геопотенциальной поверхности по данным NCEP/NCAR Reanalysis на уровне 10 гПа в период максимума ВСП в исследуемом регионе показано на рис. 2, б. Во время потепления зимний полярный вихрь разделился на две пары циркуляций циклонического и антициклонического типов. Видно, что во время максимальной стадии ВСП Иркутск и Новосибирск располагались внутри стратосферного циклона, Якутск находился на границе областей циклона и антициклона в области наибольшего потепления в стратосфере, а Паратунка — в зоне стратосферного антициклона.

На рис. 3 заливкой показано высотное распределение температуры атмосферы в январе–феврале 2009 г. по данным микроволнового зонда MLS Aura в сравнении с поведением ПЭС (I_v) над Иркутском. Развитие события ВСП на такой карте характеризуется ростом температуры и опусканием области повышенных температур. Видно, что основная фаза ВСП 2009 г. приходилась на период 20–27 января. При этом в ионосфере наблюдалось уменьшение величины суточного максимума ПЭС на ~1 TECU и существенное увеличение ночных значений ПЭС на

1.5–2 TECU. Величина суточного максимума ПЭС составляла 23 января около 7.5 TECU, а суточного минимума — около 5.5 TECU. В спокойные дни эти значения составляли 8.5–9 и 3–4 TECU соответственно. После окончания основной фазы ВСП (4–8 февраля) суточный максимум возрастал до 10 TECU.

Отклонения ПЭС от фонового уровня в январе 2009 г. в исследуемых пунктах, а также распределения амплитуды суточных вариаций ПЭС показаны на рис. 4. Видно, что во всех пунктах в период максимального развития ВСП наблюдается уменьшение амплитуды суточных вариаций ПЭС. Например, в Якутске значения амплитуды суточных вариаций 23–25 января не превышают 3 TECU, в Паратунке —

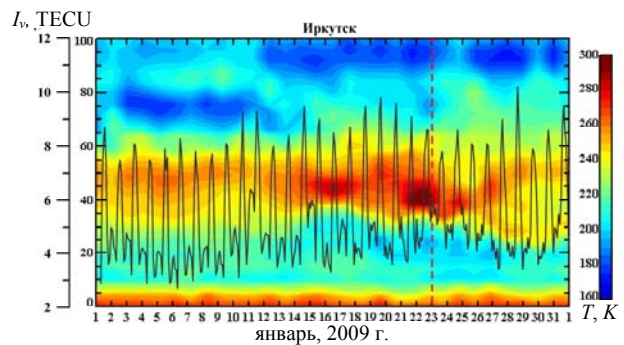


Рис. 3. Распределение ПЭС над Иркутском в январе 2009 г. в сравнении с поведением температуры нижней атмосферы по данным MLS Aura (заливка). Максимум ВСП отмечен вертикальной штриховой линией

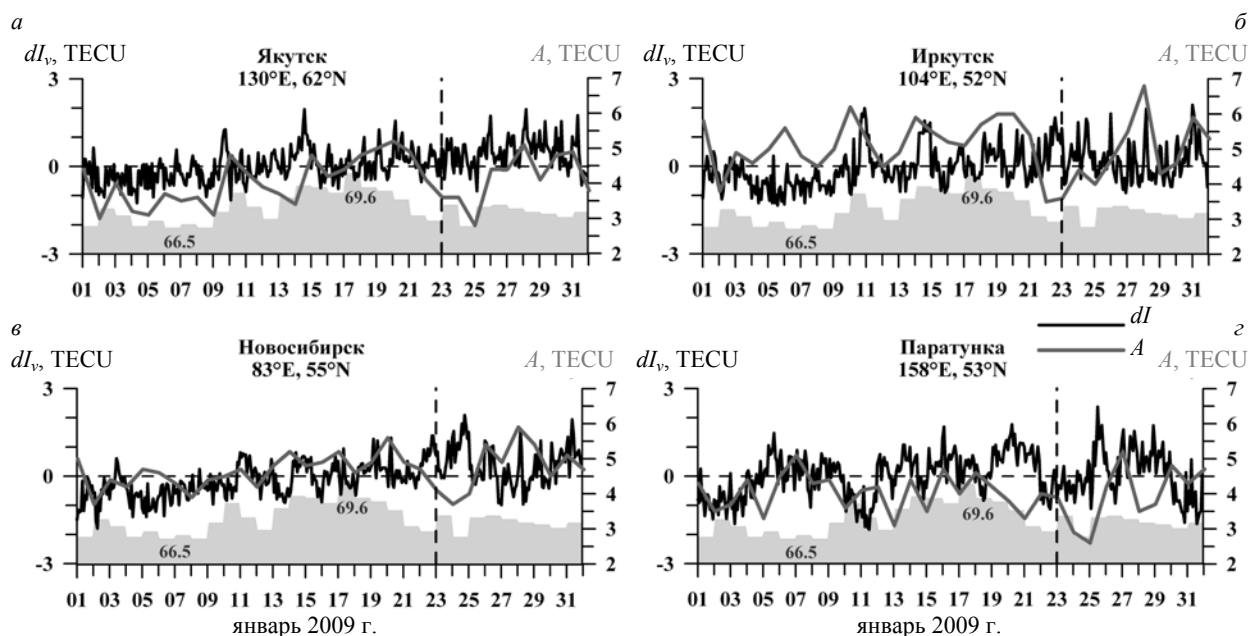


Рис. 4. Отклонения ПЭС dI_v от среднемесячных значений и поведение амплитуды A суточных вариаций ПЭС во время ВСП 2009 г. Уровень потока солнечного радиоизлучения $F10.7$ отображен серой заливкой. Максимум ВСП показан вертикальной штриховой линией

2.5 TECU, в Иркутске значение суточной амплитуды уменьшается с 6 до 3.5 TECU. Таким образом, амплитуда суточных вариаций ПЭС в период максимума ВСП 2008/2009 г. оказывается в 1.7–2 раза меньше характерных для спокойных условий значений. После 26 января во всех точках наблюдается рост амплитуды вариаций до невозмущенного уровня.

Отклонения ПЭС dI_v от фоновых значений, в отличие от амплитуды суточных вариаций, демонстрируют различную динамику в разных пунктах. В Иркутске и Новосибирске — точках, находящихся внутри стратосферного циклона, — во время максимального развития ВСП регистрируются положительные отклонения ПЭС. При этом максимальные значения dI_v (до +2 TECU) наблюдаются с 23 по 25 января (рис. 4). Сравнивая рис. 3 и рис. 4, б, можно заключить, что положительные отклонения ПЭС над Иркутском в период ВСП 2009 г. обусловлены ростом ночных значений ПЭС.

В Паратунке, находящейся в области антициклона, с 21 по 25 января регистрируются отрицательные отклонения ПЭС, а после максимума ВСП — положительные. Над зоной максимального разогрева стратосферы в Якутске наблюдается переходная картина. Только 25 января можно выделить явные отрицательные отклонения ПЭС, однако с 26 января, как и в Паратунке, регистрируется резкий рост значений ПЭС. Таким образом, после максимума ВСП (после 25 января) во всех пунктах отклонения ПЭС положительные.

Выявленные нами особенности в распределении ПЭС находятся в соответствии с результатами, полученными в работе [Шпынев и др., 2013]. Регистрировалось увеличение максимальных критических частот F2-слоя ионосферы в пунктах, находящихся внутри стратосферного циклона, и уменьшение в области смены типа циркуляции. Нами пока-

зано, что подобное поведение во время ВСП наблюдается не только для электронной концентрации, но и для ПЭС. Авторы работы [Шпынев и др., 2013] связывают наблюдаемое уменьшение электронной концентрации с вертикальным переносом молекулярного газа из зоны стратосферного разогрева в термосферу. В области циклонической циркуляции, напротив, наблюдается сток молекулярного газа вниз и, как следствие, рост электронной концентрации.

ВАРИАЦИИ ПЭС В ПЕРИОД ВСП 2012–2013 гг.

Стратосферное потепление 2012–2013 гг. также относилось к классу сильных. Фаза ВСП, связанная с перестройкой циркуляции в стратосфере, приходилась на 27 декабря — 10 января, при этом для анализируемых пунктов наибольшая температура на высоте 10 гПа регистрировалась 30 декабря в районе Иркутска. Температура стратосферы в очаге ВСП превышала температуру в невозмущенные дни более чем на 40 °C (рис. 1, в). Реверс ветра на высоте 10 гПа произошел 6 января (рис. 1, г) — ВСП в этот день достигло своего максимума.

Следует отметить также, что в начале декабря 2012 г. наблюдалось слабое потепление. Температура стратосферы на высоте около 50 км 3–10 декабря увеличилась более чем на 25 °C по сравнению с предыдущими днями, а скорость среднесезонального ветра уменьшилась более чем вдвое (рис. 1, в, г). Область наибольшего увеличения стратосферной температуры располагалась над регионом Восточной Сибири (вблизи Якутска).

Геомагнитная обстановка в период потепления была спокойной. Слабые геомагнитные возмущения ($K_p=4$, $D_{st}=-50$ нТл) наблюдались после основной фазы ВСП 17–18 января и 25–27 января (рис. 5, а). В период развития потепления были зарегистрированы

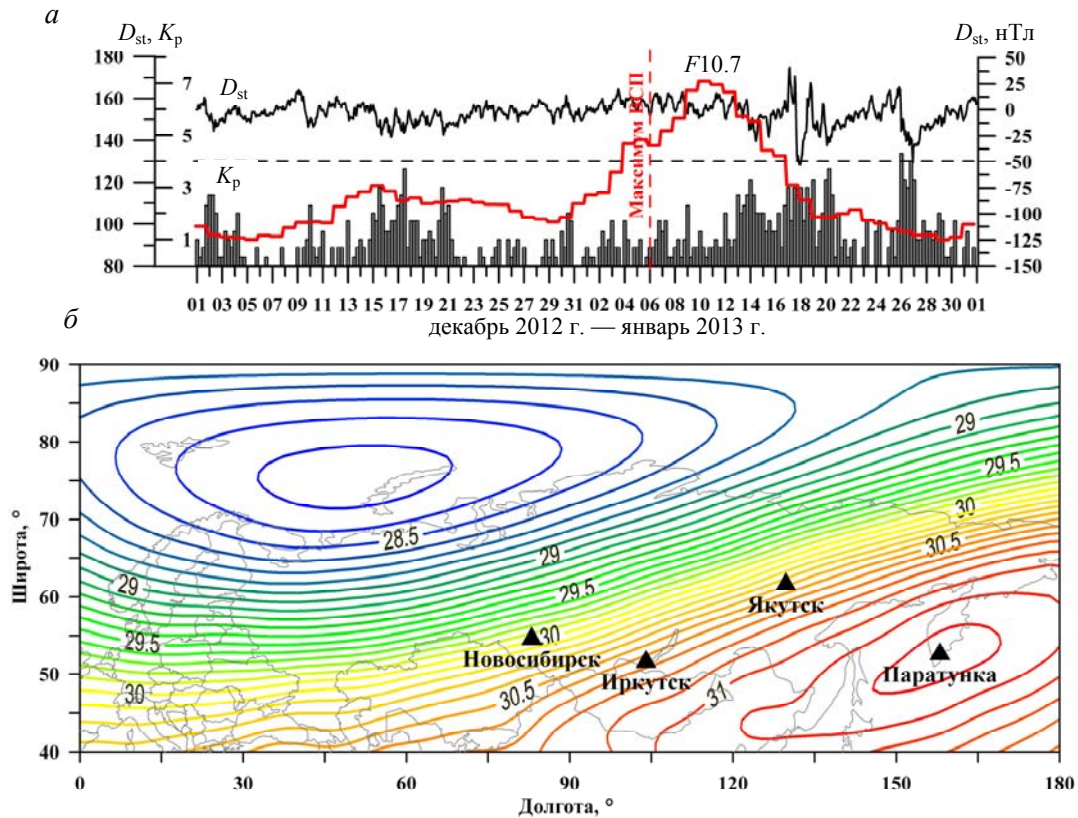


Рис. 5. Распределения геомагнитных индексов D_{st} и K_p , а также величины потока радиоизлучения Солнца $F10.7$ в декабре 2012 — январе 2013 г. (а); высота геопотенциальной поверхности на уровне 10 гПа во время максимума ВСП 2012–2013 гг. (б). Треугольниками показаны точки, в которых проводилось исследование ПЭС

существенные вариации солнечного радиоизлучения: значение индекса $F10.7$ увеличилось более чем на 50 % с 31 декабря по 10 января. Это усложнило идентификацию возможной ионосферной реакции на ВСП и потребовало более тщательного анализа результатов.

Распределение высоты геопотенциальной поверхности на уровне 10 гПа 1 января 2013 г. по данным NCEP/NCAR Reanalysis представлено на рис. 5, б. Область повышенной стратосферной температуры располагалась в пределах 40–60° N над Азиатским регионом России. В зоне очага ВСП находились Иркутск и Новосибирск. Паратунка располагалась в зоне стратосферного антициклона.

На рис. 6 для Иркутска представлены распределения ПЭС в сравнении с поведением стратосферной температуры по данным MLS Aura (заливка). Видно, что с 28 декабря по 4 января в период фазы активного развития ВСП происходит уменьшение значений ПЭС, его максимальные значения не превышают в эти дни 15–18 TECU. С 5 января, напротив, регистрируется быстрый рост ПЭС, продолжающийся до 15 января. Максимальные величины ПЭС в эти дни достигают 25 TECU.

Распределения отклонений ПЭС dI_p от фонового уровня, а также амплитуды A суточных вариаций ПЭС в исследуемых пунктах показаны на рис. 7. Как и во время ВСП 2008–2009 гг., в течение данного потепления регистрировалось уменьшение A относительно соседних дней (с 20 декабря по 5 января). При этом наименьшая амплитуда наблюдалась

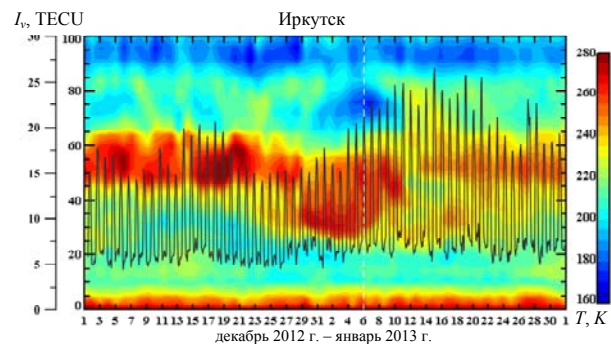


Рис. 6. Распределение ПЭС над Иркутском в декабре 2012 — январе 2013 г. в сравнении с поведением температуры нижней атмосферы по данным MLS Aura (заливка). Максимум ВСП отмечен вертикальной штриховой линией

в Новосибирске: значение A в этом пункте 29 декабря составляло менее 8 TECU (характерная величина A для региона при данном уровне солнечной активности составляет 14–15 TECU [Perevalova et al., 2010]), т. е., как и для ВСП 2008–2009 гг., наблюдается уменьшение A практически в два раза.

Схожее поведение амплитуды суточных вариаций ПЭС наблюдалось 3–10 декабря: значения A уменьшились во всех рассматриваемых пунктах. После 10 декабря регистрировался быстрый рост амплитуды суточных вариаций ПЭС (рис. 7). Однако продолжительность и интенсивность этих изменений была меньше, чем во время максимального развития ВСП типа «тајог». Как отмечено выше, в этот период в стратосфере наблюдалось слабое потепление, очаг которого располагался в исследуемом

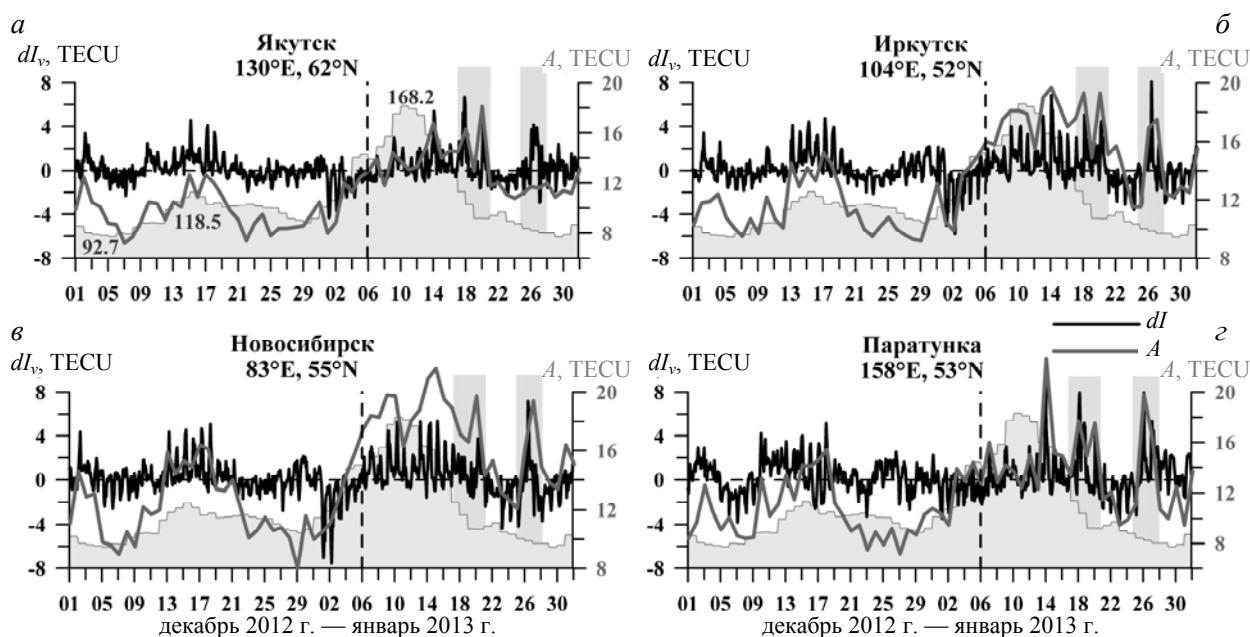


Рис. 7. Отклонения ПЭС dI_v от среднемесячных значений и поведение амплитуды A суточных вариаций ПЭС во время ВСП 2012–2013 гг. Заливка отображает уровень потока солнечного радиоизлучения $F10.7$. Штриховые линии показывают день максимума ВСП. Серыми прямоугольниками отмечены дни слабых геомагнитных возмущений

регионе. В работе [Korenkov et al., 2012] на примере события ВСП типа «mini» 2008 г. показано, что процессы, возникающие в периоды слабых потеплений, могут также оказывать влияние на состояние ионосферы. Авторы полагают, что основным фактором, влияющим на электронную концентрацию на средних широтах во время ВСП, является изменение соотношения $[O]/[N_2]$, вызванное разогревом воздушных масс в верхней нейтральной атмосфере.

Отклонения ПЭС от фонового уровня во всех рассматриваемых пунктах демонстрируют схожую динамику. В период максимальной фазы потепления с 24 декабря по 6 января регистрировались значительные отрицательные отклонения ПЭС. Наибольшее уменьшение ПЭС наблюдалось в Новосибирске (до -8 TECU) и Иркутске (до -6 TECU). Наименьшие отклонения ПЭС были зарегистрированы в Паратунке (рис. 7, г) — пункте, находящемся в зоне стратосферного антициклона. Величина dI_v в этой точке в период ВСП примерно в два раза ниже, чем в пунктах, расположенных в очаге потепления. После 6 января, напротив, регистрировался значительный рост ПЭС, 10–14 января величина отклонений ПЭС от фонового уровня в Новосибирске и Паратунке достигала $+8$ TECU. Регистрировалось также резкое увеличение амплитуды суточных вариаций ПЭС.

Естественно предположить, что наблюдаемое в начале января 2013 г. увеличение ПЭС, амплитуды суточных вариаций ПЭС, а также интенсивности отклонений ПЭС от фонового уровня связано с возрастанием потока радиоизлучения Солнца $F10.7$ в этот период. Подробный анализ этого вопроса приведен далее. Показано, что наблюдаемые эффекты не могут быть полностью объяснены изменением уровня $F10.7$.

Следует также отметить, что 17–18 января и 25–27 января во всех исследуемых пунктах регистрировалось увеличение ПЭС, связанное с геомагнитными возмущениями (указанные периоды обозначены серыми прямоугольниками на рис. 7).

СУТОЧНАЯ ДИНАМИКА ПЭС ВО ВРЕМЯ ВСП 2012–2013 гг.

С целью выявления возможных изменений в суточном ходе ПЭС выполнен анализ суточной динамики отклонений ПЭС dI_v во время ВСП 2012–2013 гг. (рис. 8). По вертикальной шкале на каждой панели отложено местное время, по горизонтальной — дни с декабря 2012 по январь 2013 г.

Видно, что наибольшие изменения в суточном ходе ПЭС в период потепления регистрировались в дневные часы местного времени: с 6 до 16 LT (панели а–в). Во время основной стадии ВСП максимальные отрицательные отклонения ПЭС регистрировались около 12 LT в Иркутске и Новосибирске и составляли более -5 TECU (панели б, в). В Якутске понижение ПЭС было менее выражено (панель а), а в Паратунке, которая в период потепления находилась дальше от очага ВСП, отрицательные отклонения ПЭС незначительны (панель г). В ночные/утренние часы наблюдался небольшой рост ПЭС относительно фоновых значений. После максимума ВСП дневные отклонения ПЭС, напротив, положительны во всех пунктах.

Таким образом, можно заключить, что наблюдаемое в период ВСП понижение суточной амплитуды ПЭС происходит вследствие значительного уменьшения полуденного максимума ПЭС и небольшого увеличения электронной концентрации в ночные часы местного времени.

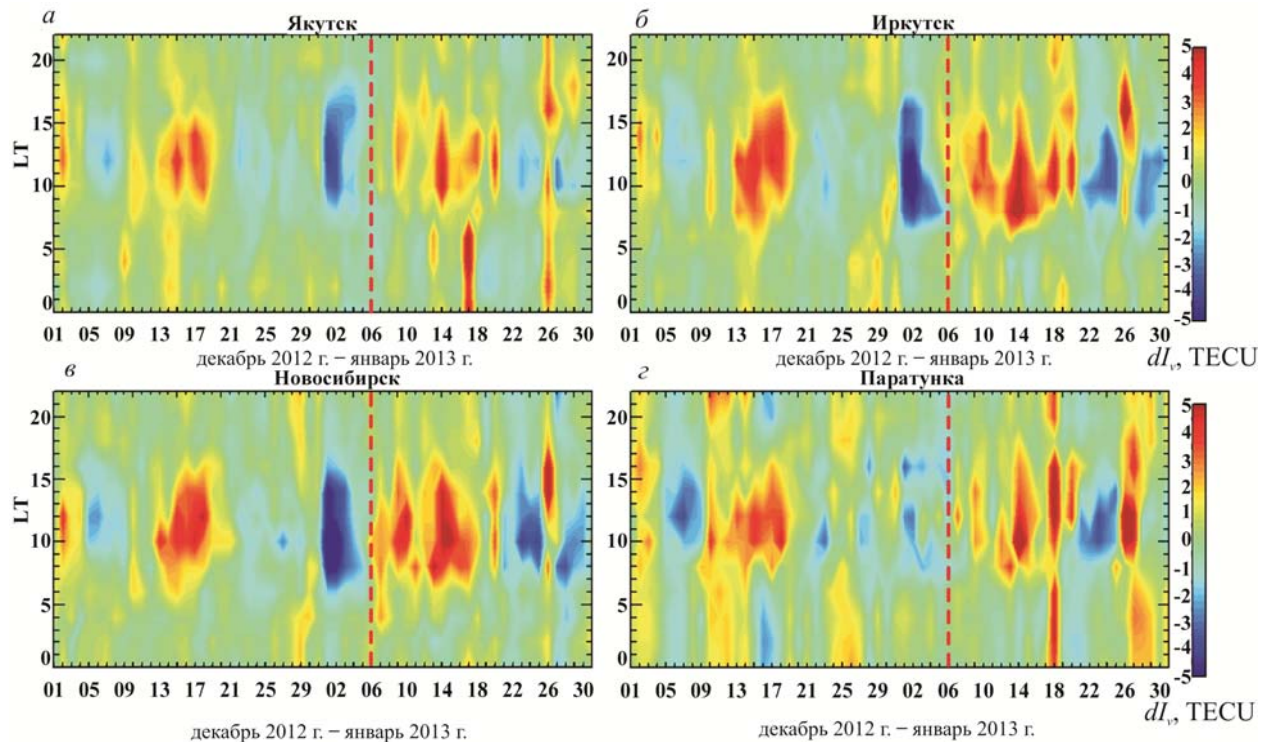


Рис. 8. Суточная динамика отклонений ПЭС dl_p в декабре 2012 — январе 2013 гг. На каждой панели вертикальной штриховой линией показан максимум ВСП

ОБСУЖДЕНИЕ

Существует большое количество явлений, оказывающих влияние на состояние ионосферы и приводящих к изменению электронной концентрации и ПЭС. Основными факторами являются, в первую очередь, геомагнитные возмущения и изменения уровня солнечной активности, вариации электрических полей, а также состава и ветрового режима нейтральной атмосферы и др. Поэтому при изучении связей между процессами, протекающими в нижней атмосфере, и состоянием ионосферной плазмы требуется тщательный анализ всех возможных причин наблюдаемых ионосферных возмущений.

Геомагнитные условия в течение обоих рассмотренных нами событий ВСП были достаточно спокойными. Как упомянуто выше, слабые геомагнитные возмущения регистрировались только 17–18 и 25–27 января 2013 г. Поэтому наблюдаемые в период ВСП вариации ПЭС и амплитуды суточных вариаций ПЭС не могут быть связаны с изменениями геомагнитных условий.

Гелиофизическая обстановка в период ВСП 2008–2009 гг. также была спокойной: данное событие происходило на фазе глубокого минимума солнечной активности, значения потока радиоизлучения Солнца $F_{10.7}$ не превышали 70, а изменения $F_{10.7}$ составляли не более 5 % (рис. 2, а). Таким образом, вариации ПЭС и амплитуды суточных вариаций ПЭС в январе 2009 г. не могут быть связаны с изменением уровня солнечной активности.

Во время события ВСП 2012–2013 гг. гелиофизические условия были менее благоприятными. Наблюдались два периода возрастания $F_{10.7}$: 5–15 декабря значения $F_{10.7}$ возросли с 92.7 до 118.5 (приблизи-

тельно на 20 %), а с 29 декабря по 11 января регистрировался значительный рост уровня солнечной активности, $F_{10.7}$ увеличился со 110 до 168.2 (более чем на 50 %, рис. 5, а). Как показано в работе [Perevalova et al., 2010], изменение потока радиоизлучения Солнца на 25 % приводит к изменению амплитуды суточных вариаций ПЭС на средних и высоких широтах на 40 %. В то же время 5–15 декабря 2013 г. амплитуда суточных вариаций ПЭС возросла на 60 %, а в первой половине января 2013 г. рост амплитуды в Иркутске и Новосибирске превысил 100 % (рис. 7). Таким образом, наблюдаемый рост амплитуды был выше, чем следовало ожидать согласно результатам, полученным в работе [Perevalova et al., 2010]. Кроме того, значения ПЭС и амплитуды суточных вариаций ПЭС продолжали возрастать в течение пяти дней и после 11 января (рис. 6, 7), при этом уровень $F_{10.7}$ начал быстро снижаться. Запоздывание между изменениями $F_{10.7}$ и вариациями ионосферы составляет около двух дней.

Следует отметить также, что отклик ионосферы на изменения уровня солнечной активности имеет глобальный характер, т. е. изменения ПЭС, связанные с ростом $F_{10.7}$, должны быть похожими во всех рассмотренных пунктах, что не соответствует полученным нами результатам. Распределения амплитуды суточных вариаций и интенсивности отклонений ПЭС от фонового уровня похожи для Иркутска и Новосибирска и заметно отличаются от распределений для Паратунки (рис. 7), что свидетельствует о том, что наблюдаемые явления более локальны и должны быть связаны с другими источниками. Значительное уменьшение амплитуды суточных вариаций ПЭС после 21 декабря также не может быть обусловлено

вариациями уровня $F10.7$ ($F10.7$ уменьшился в этот период менее чем на 10 %). Следовательно, наблюдаемые зимой 2012–2013 гг. возмущения ПЭС и амплитуды суточных вариаций ПЭС не могут полностью объясняться изменениями гелиофизических условий и требуют другой интерпретации.

В работе [Goncharenko et al., 2013] показано, что наблюдавшееся в январе 2013 г. увеличение ПЭС в экваториальных широтах связано с вариациями вертикального электрического дрейфа в периоды сильных ВСП. Однако данный механизм не работает в ионосфере средних широт [Kogenkov et al., 2012]. Подобное влияние на состояние среднеширотной ионосферы могут оказывать изменения вертикального переноса нейтрального газа, возникающие вблизи очага ВСП. В пользу данного предположения свидетельствует также то, что характер распределения ПЭС, отклонений ПЭС и амплитуды суточных вариаций ПЭС оказывается похожим для обоих рассматриваемых ВСП, несмотря на существенное различие гелиофизических условий в периоды развития данных событий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования отклика ионосферы на сильные внезапные стратосферные потепления, наблюдавшиеся зимой 2008–2009 и 2012–2013 гг. (в условиях глубокого солнечного минимума и умеренного солнечного максимума соответственно) в Азиатском регионе России, показали, что состояние среднеширотной ионосферы заметно изменяется в периоды ВСП. Впервые выявлено, что во время основной стадии ВСП в ионосфере средних широт наблюдается уменьшение амплитуды суточных вариаций ПЭС до двух раз относительно спокойных дней. После максимума ВСП происходит существенный рост амплитуды, не связанный с изменениями гелиогеомагнитных условий.

Возрастает также интенсивность отклонений ПЭС от фонового уровня, однако динамика отклонений различается и зависит от местоположения точки наблюдения. Отрицательные отклонения ПЭС регистрируются в пунктах, расположенных на границе стратосферного циклона и антициклона в области максимального нагрева стратосферы, а также внутри антициклона. В пунктах, располагающихся внутри циклона, напротив, наблюдается рост значений ПЭС относительно величин, регистрируемых в спокойные дни. Указанные эффекты могут быть связаны с процессами вертикального переноса молекулярного газа из области стратосферного разогрева в термосферу, приводящего к уменьшению/увеличению электронной концентрации. После максимума ВСП в ионосфере наблюдается быстрый рост значений ПЭС.

Анализ суточной динамики ПЭС показал, что наибольшие отклонения ПЭС от фонового уровня во время ВСП регистрируются в окологлобальные часы местного времени: в суточном ходе отмечается существенное уменьшение дневных значений ПЭС. Ночные/утренние величины ПЭС, напротив, увеличиваются относительно спокойных дней.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Jet Propulsion Laboratory of California Institute of

Technology за данные глобальных карт GIM, а также сотрудникам NOAA/OAR/ESRL PSD и UK Met Office service за данные метеорологических архивов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 15-05-05227_а) и гранта Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ № НШ-2942. 2014.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Шпынев Б.Г., Панчева Д., Мухтаров П. и др. Отклик ионосферы над регионом Восточной Сибири во время внезапного стратосферного потепления 2009 г. по данным наземного и спутникового радиозондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10, № 1. С. 153–163.

Bessab 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

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

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

Chau J.L., Aponte N.A., Cabassa E., et al. Quiet time ionospheric variability over Arecibo during sudden stratospheric warming events // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2010. V. 115, iss. A9. A00G06. DOI: 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.

Fejer B.G., Olson M.E., Chau J.L., et al. Lunar-dependent equatorial ionospheric electrodynamic effects during sudden stratospheric warmings // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. A00G03. DOI: 10.1029/2010JA015273.

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.

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, iss. A10. A00G07. DOI: 10.1029/2010JA015400.

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.

Harada Y., Goto A., Hasegawa H., Fujikawa N. A major stratospheric sudden warming event in January 2009 // J. Atmos. Sci. 2010. V. 67. P. 2056–2069. DOI: 10.1175/2009JAS3320.1

Kazimirovsky E.S. Coupling from below as a source of ionospheric variability: A review // Ann. Geophys. 2002. V. 45(1). P. 1–29. DOI: 10.4401/ag-3482.

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.

Labitzke K. Temperature changes in the mesosphere and stratosphere connected with circulation changes in winter // J. Atmos. Sci. 1972. V. 29. P. 756–766. DOI: 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, N. C10. P. 9665–9678. DOI: 10.1029/JC086iC10p09665.

Labitzke K., Kunze M. On the remarkable Arctic winter 2008/2009 // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. D00I02. DOI: 10.1029/2009JD012273.

Mannucci A.J., Wilson B.D., Yuan D.N., et al. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements // *Radio Sci.* 1998. V. 33, N. 3. P. 565–582. DOI: 10.1029/97RS02707.

Matsuno T. A dynamical model of the stratospheric sudden warming // *J. Atmos. Sci.* 1971. V. 28. P. 1479–1494. DOI: 10.1175/1520-0469(1971)028<1479:ADMOTS>2.0.CO;2.

Mukashvea S., Zhumabayev B., Nurgaliyeva K., Toyshiev N. Variations of the total electron content of the ionosphere over Kazakhstan region depending on solar activity // *Geophys. Res. Abstr.* 2014. V. 16. EGU2014-4318.

Pancheva D., Mukhtarov P. Stratospheric warmings: The atmosphere–ionosphere coupling paradigm // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2011. V. 73. P. 1697–1702. DOI: 10.1016/j.jastp.2011.03.006.

Pedatella N.M., Forbes J.M. Evidence for stratosphere sudden warming–ionosphere coupling due to vertically propagating tides // *Geophys. Res. Lett.* 2010. V. 37. L11104. DOI: 10.1029/2010GL043560.

Perevalova N.P., Polyakova A.S., Zalizovski A.V. Diurnal variations of the total electron content under quiet helio-geomagnetic conditions // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2010. V. 72. P. 997–1007. DOI: 10.1016/j.jastp.2010.05.014.

Schoeberl M.R. Stratospheric warmings: Observations and theory // *Rev. Geophys. Space Phys.* 1978. V. 16, N. 4. P. 251–538. DOI: 10.1029/RG016i004p00521.

Sumod S.G., Pant T.K., Jose L., et al. Signatures of sudden stratospheric warming on the equatorial ionosphere–thermosphere system // *Planet. Space Sci.* 2012. V. 63–64. P. 49–55. DOI: 10.1016/j.pss.2011.08.005.

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.

URL: <http://www.esrl.noaa.gov/psd> (accessed February 1, 2015).

URL: <http://badc.nerc.ac.uk/browse/badc/ukmo-assim/> (accessed February 1, 2015).

URL: http://www.ngdc.noaa.gov/stp/GEOMAG/kp_ap.html (accessed February 1, 2015).

URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/> (accessed February 1, 2015).

URL: <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex/> (accessed February 1, 2015).

REFERENCES

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. and Solar-Terr. Phys.* 2012, vol. 90–91, pp. 77–85. DOI: 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.

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.

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.: Space Phys.* 2010, vol. 115, iss. A9, A00G06. DOI: 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.

Fejer B.G., Olson M.E., Chau J.L., Stolle C., Lühr H., Goncharenko L.P., Yumoto K., Nagatsuma T. Lunar-dependent equatorial ionospheric electrodynamic effects during sudden stratospheric warmings. *J. Geophys. Res.* 2010, vol. 115, A00G03. DOI: 10.1029/2010JA015273.

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.

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, iss. A10, A00G07. DOI: 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.

Harada Y., Goto A., Hasegawa H., Fujikawa N. A major stratospheric sudden warming event in January 2009. *J. Atmos. Sci.* 2010, vol. 67, pp. 2056–2069. DOI: 10.1175/2009JAS3320.1.

Kazimirovsky E.S. Coupling from below as a source of ionospheric variability: A review. *Ann. Geophys.* 2002, vol. 45(1), pp. 1–29. DOI: 10.4401/ag-3482.

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.

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.

Labitzke K. Stratospheric–mesospheric midwinter disturbances: A summary of observed characteristics. *J. Geophys. Res.* 1981, vol. 86, no. C10, pp. 9665–9678. DOI: 10.1029/JC086iC10p09665.

Labitzke K., Kunze M. On the remarkable Arctic winter 2008/2009. *J. Geophys. Res.* 2009, vol. 114, D00I02. DOI: 10.1029/2009JD012273.

Mannucci A.J., Wilson B.D., Yuan D.N., Ho C.H., Lindqwister U.J., Runge T.F. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements. *Radio Sci.* 1998, vol. 33, no. 3, pp. 565–582. DOI: 10.1029/97RS02707.

Matsuno T. A dynamical model of the stratospheric sudden warming. *J. Atmos. Sci.* 1971, vol. 28, pp. 1479–1494. DOI: 10.1175/1520-0469(1971)028<1479:ADMOTS>2.0.CO;2.

Mukashvea S., Zhumabayev B., Nurgaliyeva K., Toyshiev N. Variations of the total electron content of the ionosphere over Kazakhstan region depending on solar activity. *Geophys. Res. Abstr.* 2014, vol. 16, EGU2014-4318.

Pancheva D., Mukhtarov P. Stratospheric warmings: The atmosphere–ionosphere coupling paradigm. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 2011, vol. 73, pp. 1697–1702. DOI: 10.1016/j.jastp.2011.03.006.

Pedatella N.M., Forbes J.M. Evidence for stratosphere sudden warming–ionosphere coupling due to vertically propagating tides. *Geophys. Res. Lett.* 2010, vol. 37, L11104. DOI: 10.1029/2010GL043560.

Perevalova N.P., Polyakova A.S., Zalizovski A.V. Diurnal variations of the total electron content under quiet helio-geomagnetic conditions. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2010, vol. 72, pp. 997–1007. DOI: 10.1016/j.jastp.2010.05.014.

Schoeberl M.R. Stratospheric warmings: observations and theory. *Rev. Geophys. Space Phys.* 1978, vol. 16, no. 4, pp. 251–538. DOI: 10.1029/RG016i004p00521.

Shpynev B.G., Pancheva D., Muchtarov P., Kurkin V.I., Ratovsky K.G., Chernigovskaya M.A., Belinskaya A.Yu., Stepanov A.E. Ionosphere response over Eastern Siberia during the 2009 Sudden Stratospheric Warming derived from data of ground based and satellite radio sounding. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern Issues of Remote Sensing of the Earth from Space]. 2013, vol. 10, no. 1, pp. 15–163 (in Russian).

Sumod S.G., Pant T.K., Jose L., Hossain M.M., Kumar K.K. Signatures of sudden stratospheric warming on the equatorial ionosphere-thermosphere system. *Planet. Space Sci.* 2012, vol. 63–64, pp. 49–55. DOI: 10.1016/j.pss.2011.08.005.

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.

URL: <http://www.esrl.noaa.gov/psd> (accessed February 1, 2015).

URL: <http://badc.nerc.ac.uk/browse/badc/ukmo-assim/> (accessed February 1, 2015).

URL: http://www.ngdc.noaa.gov/stp/GEOMAG/kp_ap.html (accessed February 1, 2015).

URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/> (accessed February 1, 2015).

URL: <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex/> (accessed February 1, 2015).