

Ионосферные эффекты внезапных стратосферных потеплений в Восточносибирском регионе России

А.С. Полякова, М.А. Черниговская, Н.П. Перевалова

Институт солнечно-земной физики СО РАН

Иркутск 664033, Россия

E-mail: annpol@iszf.irk.ru

В работе выполнено исследование ионосферных явлений в азиатском регионе России во время внезапных стратосферных потеплений (ВСП) зим 2008-2009 и 2012-2013 гг. Для выявления эффектов в ионосфере, возможно связанных с ВСП, проведен совместный анализ данных глобальных карт полного электронного содержания (ПЭС), данных измерений вертикальных профилей температуры, полученных с помощью зонда Microwave Limb Sounder (EOS Aura), а также данных метеоархива NCEP/NCAR Reanalysis. Выявлено, что в течение сильных ВСП в ионосфере средних широт регистрируется уменьшение суточной амплитуды ПЭС. Установлено, что во время максимальной фазы потепления наблюдается уменьшение значений полуденного максимума ПЭС и рост ночного/утреннего ПЭС относительно спокойных дней. Показано, что динамика отклонений ПЭС от фонового уровня во время ВСП может быть различной в зависимости от местоположения точки наблюдения: положительные отклонения ПЭС регистрируются в пунктах, расположенных внутри стратосферного циклона, отрицательные – внутри антициклона. Данные эффекты, вероятно, могут быть связаны с процессами вертикального переноса молекулярного газа из области стратосферного разогрева, приводящего к уменьшению/увеличению электронной концентрации в разных областях. После окончания основной стадии потепления в ионосфере наблюдается быстрый рост значений ПЭС, не связанный с геомагнитной активностью.

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

Введение

Внезапными стратосферными потеплениями (ВСП) называют сильные и внезапные 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 восточный – происходит разрушение и/или смещение зимнего циркумполярного вихря, и формируется стратосферный полярный антициклон. Возвращение стратосферы к нормальному режиму (т.н. стадия восстановления) происходит медленнее, чем развитие потепления (Хромов, Мамонтова, 1974). Общепринятым механизмом развития ВСП является механизм, впервые предложенный в работе Matsuno (1971). Согласно Matsuno развитие процесса ВСП происходит вследствие интенсификации и проникновения из тропосферы планетарных волн и их нелинейного взаимодействия с западным стратосферным потоком, результатом которого яв-

ляется диссипация волн, а также замедление и разрушение полярного вихря. В связи с этим, в стратосфере высвобождается большое количество кинетической энергии. Формирование стратосферного антициклона вызывает изменение направления вертикального переноса в стратосфере сверху вниз, а опускание воздушных масс приводит к адиабатическому нагреву воздуха. В мезосфере, напротив, наблюдается остывание воздуха над зоной потепления в стратосфере (Pancheva, Mukhtarov, 2011). Наблюдения показывают, что потепления начинаются на больших высотах, а затем спускаются в нижнюю стратосферу и тропосферу (Schoeberl, 1978).

Влияние ВСП на состояние ионосферной плазмы исследуется довольно давно. Так считается, что явление "зимней аномалии" поглощения радиоволн в D-области ионосферы тесно связаны с процессами переноса в периоды ВСП. В указанные периоды резко возрастает электронная концентрация в D-слое и, следовательно, поглощение (Казимировский, Кокоуров, 1979).

Отрицательные отклонения f_0F2 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 на основе измерений спутника COSMIC во время ВСП 2009 г., выявил увеличение максимальной частоты ($fmF2$) и высоты максимума ($hmF2$) F-слоя ионосферы, а также полного электронного содержания (ПЭС) в утренние и уменьшение указанных параметров в вечерние часы относительно значений, регистрируемых в спокойные дни (Yue et al., 2010). На высоких широтах, напротив, наблюдалось уменьшение $hmF2$ и увеличение $fmF2$ и ПЭС в течение всех суток. Указанные явления авторы связывают с изменениями вертикального дрейфа плазмы, индуцированными 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 также вызваны возмущениями в форме стационарных планетарных волн на нижней границе термосферы.

Большое количество эффектов ВСП в экваториальной ионосфере выявлено в работе (Sumond et al., 2012). Среди основных особенностей в поведении ионосферы в период ВСП зимы 2007/2008 гг. авторами отмечены: уменьшение значений f_0F2 в утренние и вечерние часы и увеличение в полуденные; смещение суточного максимума ПЭС в сторону более ранних часов местного времени; необычное уменьшение интенсивности дневного свечения атмосферы в длине волны 630 нм. В (Goncharenko et al., 2010 a, b) зарегистрированы крупномасштабные колебания ПЭС в экваториальной ионосфере с периодами полусуточной планетарной волны, наблюдающиеся в течение нескольких дней после потепле-

ния. Кроме того, Pedatella and Forbes (2010) на основе анализа данных GPS выявили значительное усиление интенсивности полусуточных приливов в экваториальных широтах ионосферы во время ВСП. Предполагается, что эффекты ВСП в экваториальной ионосфере могут являться проявлением взаимодействия планетарных волн, распространяющихся из низлежащих атмосферных слоев, с термосферными приливами (Pedatella, Forbes, 2010); а также быть вызваны изменениями электрических полей в экваториальной электроосфере (Chau et al., 2010).

Результаты исследования динамики ионосферы в период мощного ВСП 2009 г. на сети сибирских ионозондов представлены в работе (Шпынев и др., 2013). Авторами показано, что интенсивность и знак эффектов ВСП зависит от местоположения пункта наблюдения относительно зоны стратосферной циркуляции, при этом 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 возможных эффектов ВСП в полном электронном содержании в среднеширотной ионосфере, в зонах располагающихся непосредственно над очагами потеплений в стратосфере.

Данные и методика анализа

Для выявления ионосферных эффектов, связанных с событиями ВСП, нами проведен совместный анализ данных спутниковых измерений ионосферных и атмосферных параметров в азиатском регионе России в период мощных 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 внезапных стратосферных потеплений, 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), Якутск (62°N, 129,7°E) и Звенигород (55,4°N, 36,5°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>).

Исследование вариаций ПЭС проводилось в спокойной геомагнитной обстановке. Контроль геомагнитной активности осуществлялся на основе анализа поведения индексов Dst и Kp. Данные о поведении индексов геомагнитной активности взяты на сайтах: http://www.ngdc.noaa.gov/stp/GEOMAG/kp_ap.html и <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>.

Выявление ионосферных эффектов, связанных с событиями ВСП, проводилось на основе данных глобальных карт Ionex. Методика построения карт описана в Manucci et al. (1998). В картах Ionex содержатся данные абсолютного вертикального полного электронного содержания в диапазоне от -180° до 180° по долготе и от $-87,5^\circ$ до $87,5^\circ$ по широте. Каждый файл Ionex содержит данные ПЭС за одни сутки с временным разрешением 2 часа. Пространственное разрешение карт задается шагом по долготе (5°) и шагом по широте ($2,5^\circ$). Карты ПЭС в формате Ionex доступны на сайте: <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex/>.

Для анализа состояния ионосферы во время ВСП были построены непрерывные ряды ПЭС (I), а также ряды отклонений ПЭС (dI) от фоновых значений в периоды потеплений в точках, находящихся в различных областях стратосферной циркуляции. При построении рядов ПЭС из карт Ionex брались данные, которые находились в узле карты, наиболее близком к исследуемой точке. Фоновые значения ПЭС для каждого месяца рассчитывались как среднее в данный момент суток ПЭС по всем геомагнитно спокойным дням. Также были рассчитаны ряды амплитуды суточных вариаций ПЭС (A). Амплитуду суточных вариаций мы рассчитывали как разницу между суточным максимумом и суточным минимумом ПЭС.

Ионосферные эффекты во время ВСП января 2009 года

Стратосферное потепление зимы 2008–2009 гг. относилось к классу сильных потеплений и явилось самым мощным потеплением за всю историю наблюдений событий ВСП (Labitzke, Kunze, 2009; Harada et al., 2010; Goncharenko et al., 2010a; Yue et al., 2010; Pancheva, Mukhtarov, 2011). В течение данного ВСП зимний полярный вихрь разделился на две пары циркуляций циклонического и антициклонического типа (Шпынев и др., 2013). Максимальное развитие ВСП наблюдалось 18–25 января 2009 г., при этом пик температуры в Восточносибирском регионе регистрировался 22 января. Температура стратосферы во время ВСП повышалась на $70\text{--}80^\circ$ по сравнению с невозмущенными днями. Потепление 2008/2009 гг. протекало в фазе минимума солнечной активности, что делало благоприятными условия для выявления 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. 1*. Треугольниками на карте нанесены точки, для которых проводился расчет вариаций ПЭС. Видно, что во время максимальной стадии потепления, Иркутск и Новосибирск располагались внутри стратосферного циклона, Якутск находился на границе областей циклона и антициклона – в области наибольшего нагрева, а Паратунка в зоне стратосферного антициклона. Геомагнитная обстановка в исследуемый период была спокойной.

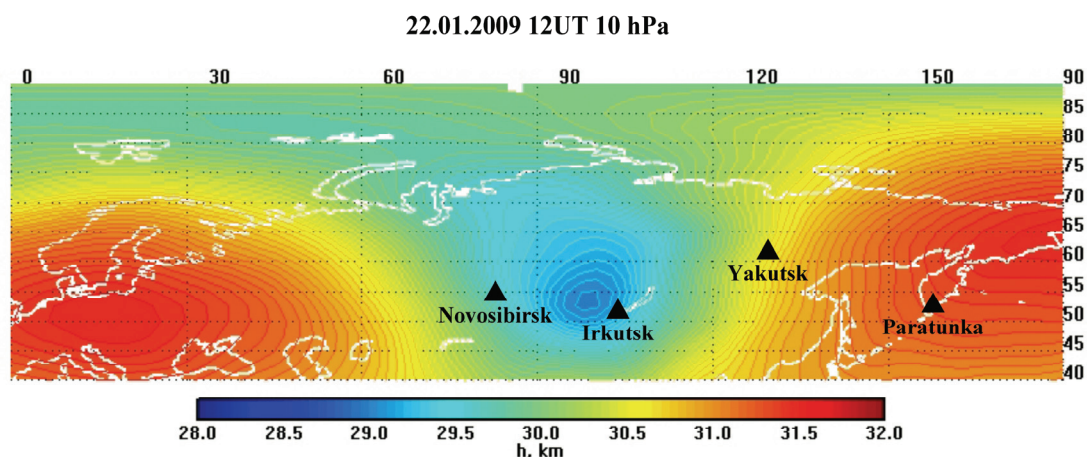


Рис. 1. Высота геопотенциальной поверхности на уровне 10 гПа в течение основной стадии ВСП 2009 г. Треугольниками показаны точки, в которых производилось исследование ионосферных параметров

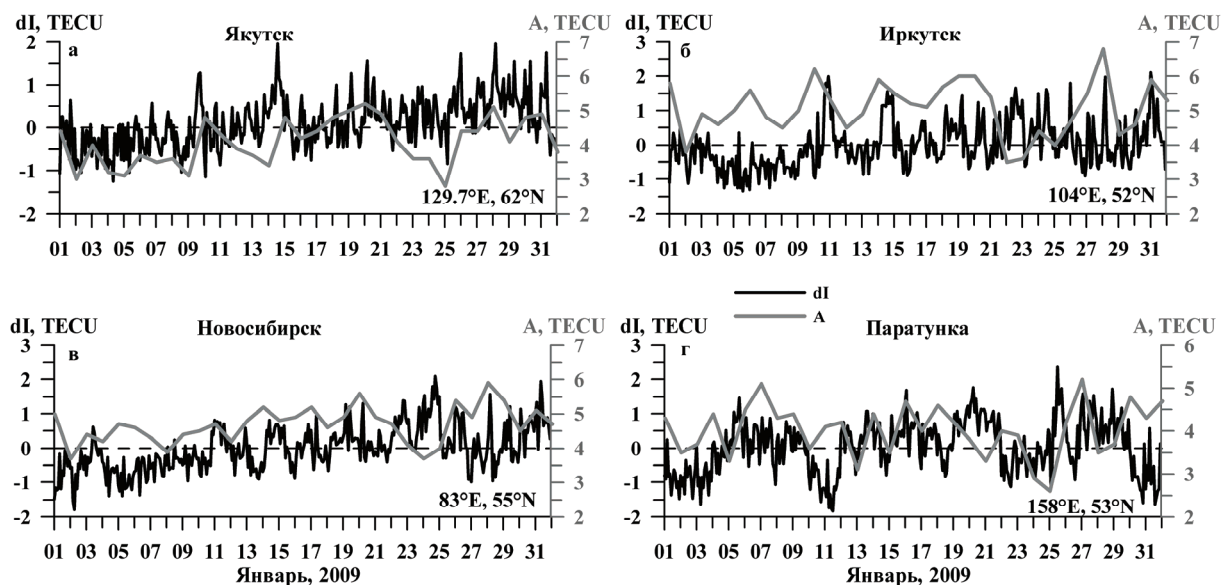


Рис. 2. Отклонения ПЭС от среднемесячных значений (dI) и поведение амплитуды суточных вариаций ПЭС (A) во время ВСП 2009 г.

Полученные отклонения ПЭС от фонового уровня в январе 2009 г. в исследуемых пунктах, а также распределения амплитуды суточных вариаций ПЭС показаны на *рис. 2*. Видно, что во всех пунктах в период максимального развития ВСП наблюдается уменьшение амплитуды суточных вариаций ПЭС. Так, например, в Якутске значения амплитуды суточных вариаций 23–25 января не превышает 3 TECU, в Паратунке – 2,5 TECU, в

Иркутске значение суточной амплитуды уменьшается примерно с 6 до 3,5 TECU. Притом, что характерное значение амплитуды суточных вариаций ПЭС в спокойных гелио- гео- магнитных условиях на средних широтах составляет 7–9 TECU (Perevalova et al., 2010). После окончания основной стадии потепления (с 26 января) во всех точках наблюдается рост амплитуды вариаций до невозмущенного уровня.

Отклонения ПЭС (dI), в отличие от амплитуды суточных вариаций, демонстрируют различную динамику в разных пунктах. Так, в Иркутске и Новосибирске – в точках, находящихся внутри стратосферного циклона, - во время максимального развития ВСП регистрируются положительные отклонения ПЭС от фоновых значений. При этом максимальные отклонения (до +2 TECU) наблюдаются с 23 по 25 января. В Паратунке, находящейся в области антициклона, наоборот, с 21 по 25 января регистрируются отрицательные отклонения ПЭС, а в течение стадии восстановления – резкий рост ПЭС. 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.

Выявленные нами особенности в распределении ПЭС находятся в соответствии с результатами, полученными в работе (Шпынев и др., 2013). В работе регистрировалось увеличение максимальных критических частот F2-слоя ионосферы в пунктах, находящихся внутри стратосферного циклона, и уменьшение в области смены типа циркуляции. Авторы связывают наблюдаемые эффекты с вертикальным переносом молекулярного газа из зоны стратосферного разогрева в термосферу, приводящим к уменьшению электронной концентрации. В области циклонической циркуляции, напротив, наблюдается сток молекулярного газа вниз и, как следствие, рост электронной концентрации.

Вариации ПЭС в период ВСП зимы 2012-2013 гг.

Стратосферное потепление 2012-2013 гг. также относилось к классу сильных потеплений. Фаза ВСП, связанная с перестройкой циркуляции в стратосфере, приходилась на 27 декабря – 10 января, при этом для анализируемых пунктов наибольшая температура регистрировалась 30 декабря в районе г. Иркутска на высоте 10 гПа. Температура стратосферы в очаге ВСП превышала температуру в невозмущенные дни более чем на 40°. Распределение высоты геопотенциальной поверхности на уровне 10 гПа 1 января 2013 г. по данным NCEP/NCAR Reanalysis представлено на *рис. 3*. Область повышения стратосферной температуры, соответствующая переходу от одного типа циркуляции стратосферы к другому, располагалась в пределах 40–60°N над азиатским регионом России. В зоне наи-

большого разогрева стратосферы (очага) находились города Иркутск и Новосибирск. Паратунка располагалась в зоне стратосферного антициклона. Геомагнитная обстановка в период потепления была спокойной. Слабые геомагнитные возмущения (индекс $kr=3-4$, индекс $Dst=-50$ нТл) наблюдались 17–18 января и 25–27 января.

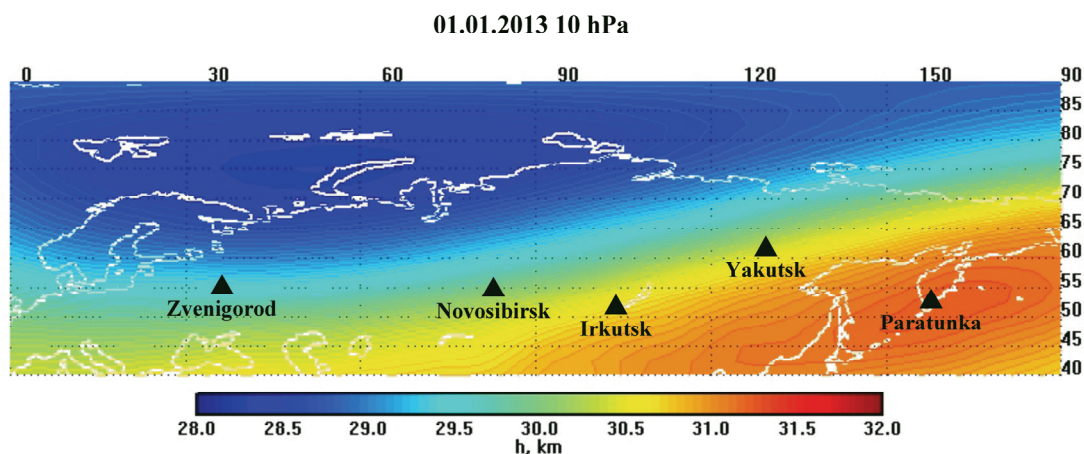


Рис. 3. Высота геопотенциальной поверхности на уровне 10 гПа во время максимума ВСП 2012–2013 гг. Треугольниками показаны точки, в которых выполнено исследование поведения ПЭС

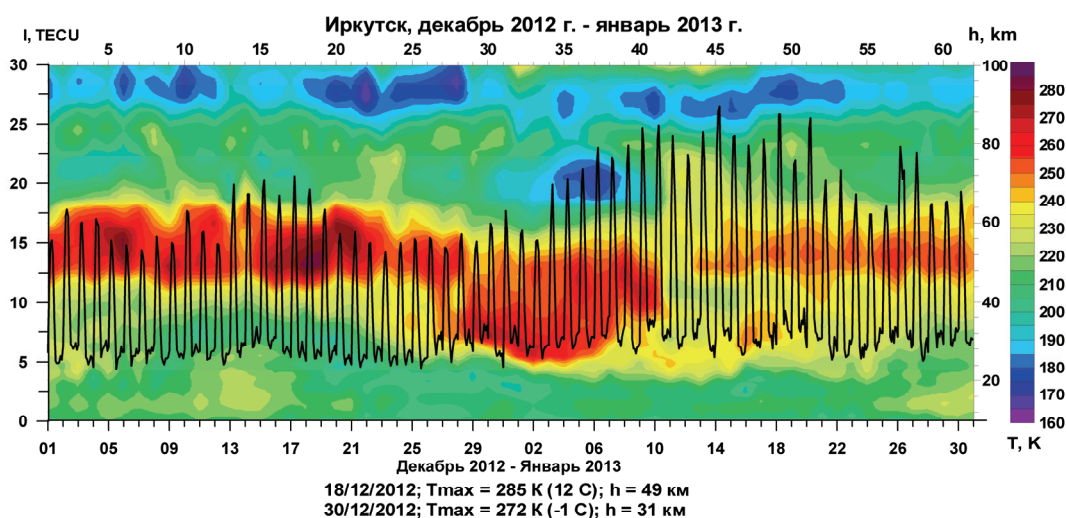


Рис. 4. Распределение ПЭС над Иркутском в декабре 2012–январе 2013 гг. в сравнении с поведением температуры атмосферы по данным MLS Aura (заливка)

На рис. 4 представлены распределения ПЭС в сравнении с поведением стратосферной температуры по данным MLS Aura (заливка) для Иркутска. Видно, что над Иркутском с 12 по 20 декабря, наблюдается незначительное увеличение значений ПЭС относительно соседних дней в период, когда в стратосфере регистрируется повышение температуры до -1° на высоте около 50 км. С 28 декабря по 4 января, во время наивысшего развития ВСП, напротив, происходит уменьшение полного электронного содержания, максимальные значения ПЭС не превышают в эти дни 15 TECU. После окончания основной стадии

потепления, в период спада стратосферной температуры (5–16 января), наблюдается резкий рост значений ПЭС, не связанный с геомагнитными возмущениями. Максимальные величины ПЭС в эти дни достигают 25 TECU. В Новосибирске, Якутске и Звенигороде картина поведения ПЭС и температуры стратосферы бала аналогичной. Подобное увеличение значений ПЭС в течение восстановительной фазы ВСП 2013 г. в экваториальных широтах зарегистрировано также в работе (Goncharenko et al., 2013).

В Паратунке, которая находилась дальше от очага потепления, повышения и понижения ПЭС были менее выраженными. Кроме того, с 25 по 30 декабря в этой точке регистрировался заметный рост ночных значений ПЭС (~ на 3–5 TECU). Следует также отметить, что во всех исследуемых пунктах регистрировались значительные увеличения ПЭС 17–18 января и 25–27 января, связанные с геомагнитными возмущениями.

Распределения отклонений ПЭС от фонового уровня (dI), а также поведение амплитуды суточных вариаций ПЭС (A) в исследуемых пунктах во время стратосферного потепления декабря 2012–января 2013 гг. показаны на *рис. 5*. Как и во время ВСП зимы 2008/2009 гг., в течение потепления (с 20 декабря по 5 января) регистрируется уменьшение амплитуды суточных вариаций ПЭС относительно соседних дней. При этом наименьшая амплитуда наблюдалась в Новосибирске: значения A в этой точке 29 декабря составляло менее 8 TECU.

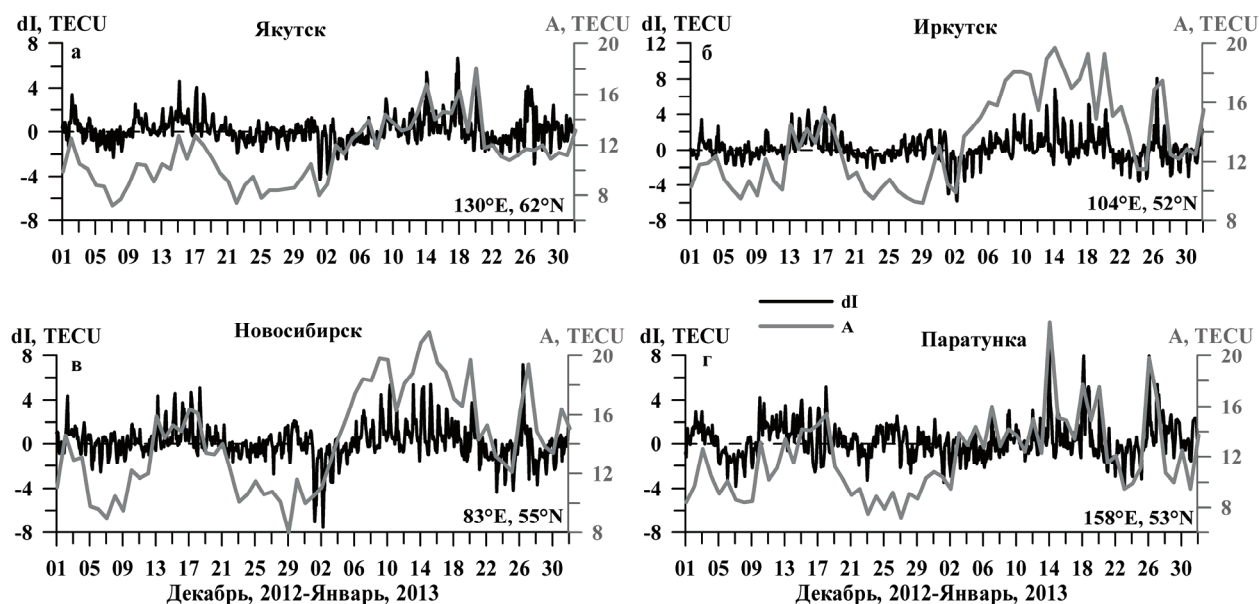


Рис. 5. Отклонения ПЭС от среднемесячных значений (dI) и поведение амплитуды суточных вариаций ПЭС (A) во время ВСП 2012-2013 гг.

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 умень-

шение ПЭС наблюдалось в Иркутске (до -6 TECU) и в Новосибирске (до -8 TECU). Наименьшие значения отклонений ПЭС были зарегистрированы в Паратунке (рис. 5з), в пункте, находящемся в зоне стратосферного антициклона. Величина dI в этой точке в период ВСП примерно в два раза ниже, чем в точках, расположенных над очагом потепления. После 6 января, напротив, регистрировался значительный рост ПЭС, 10–14 января величина отклонений ПЭС от фонового уровня в Новосибирске и в Паратунке достигала +8 TECU. Регистрировалось также резкое увеличение амплитуды суточных вариаций ПЭС.

Суточная динамика ПЭС во время ВСП 2012-2013 гг.

Для анализа изменения суточной динамики ПЭС во время потепления были проанализированы суточно-временные распределения ПЭС dI в исследуемых регионах. Полученные распределения dI в Иркутске и Паратунке показаны цветом на рис. 6. По вертикальной шкале на рисунках отложено местное время, по горизонтальной – дни с декабря 2012 по январь 2013 г. Распределения dI для Новосибирска во время рассматриваемого события практически аналогичны распределениям dI для Иркутска.

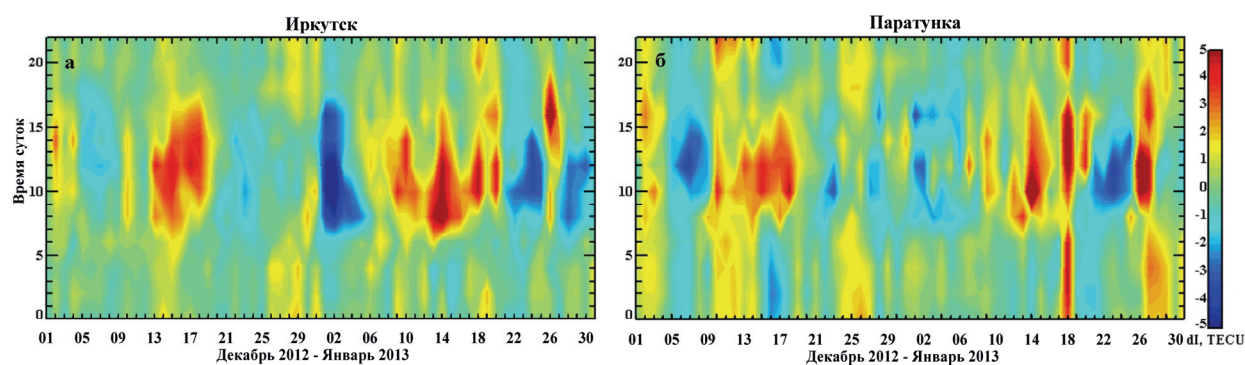


Рис. 6. Суточно-временная динамика отклонений ПЭС (dI) в декабре 2012–январе 2013 гг.

На рис. 6а видно, что изменения в суточном ходе ПЭС в период стратосферного потепления в Иркутске регистрировались, в основном, в утренние и дневные часы местного времени: с 6 до 16 LT. Во время основной стадии ВСП (31 декабря – 7 января), наблюдается значительное уменьшение околополуденных значений ПЭС. Наибольшие отрицательные отклонения ПЭС регистрируются около 12 часов LT и превышают -5 TECU. После окончания максимальной фазы ВСП с 5 января регистрируется рост дневных значений ПЭС. В ночные/утренние часы во время ВСП над Иркутском наблюдается незначительный рост ПЭС относительно фоновых значений.

В Паратунке, которая в период потепления находилась дальше от очага ВСП, картина менее отчетливая (рис. 6б). Повышенные относительно фонового уровня значения ПЭС регистрируются в ночные часы 25–30 декабря. В период максимального развития ВСП не-

значительные отрицательные отклонения ПЭС наблюдается только в околополуденные часы. Следует также отметить, что на *рис. 6* в течение всех суток регистрируются сильные положительные отклонения ПЭС (до 5 TECU и более) в дни геомагнитных возмущений.

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. Следует добавить, что смещение суточного максимума ПЭС к более ранним часам местного времени во время ВСП в ионосфере экваториальных широт также было отмечено в работе (Sumond et al., 2012).

Заключение

Проведено исследование ионосферных эффектов в период мощных стратосферных потеплений зим 2008–2009 и 2012–2013 гг. в азиатском регионе России. Установлено, что во время основной стадии ВСП в ионосфере наблюдается уменьшение амплитуды суточных вариаций ПЭС относительно соседних дней. Показано, что динамика отклонений ПЭС от фонового уровня может быть различной в зависимости 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. Показано, что наибольшие отклонения ПЭС от фонового уровня в течение ВСП регистрируются в околополуденные часы местного времени. В суточном ходе отмечается провал дневных значений и рост ночных/утренних величин ПЭС относительно спокойных дней. Возможно, эти эффекты могут быть связаны с проявлением полусуточной планетарной волны на высоте ионосферы. После окончания основной стадии потепления, в период возвращения стратосферы к нормальному режиму, в ионосфере наблюдается быстрый рост значений ПЭС, не связанный с геомагнитной активностью.

Работа выполнена в рамках гранта № НШ-2942.2014.5 Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ, при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 12-05-00865_a) и Гранта Президента РФ № МК-3771.2012.5.

Литература

1. Казимировский Е.С., Кокоуров В.Д. Движения в ионосфере. Новосибирск: Наука, 1979. 344 с.
2. Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 568 с.
3. Шпынев Б.Г., Панчева Д., Мухтаров П., Куркин В.И., Ратовский К.Г., Черниговская М.А., Белинская А.Ю., Степанов А.Е. 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.
4. 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. of Atmos. and Solar-Terr. Phys. 2012. Vol. 90-91. P. 77–85.
5. Chau J.L., Aponte N.A., Cabassa E., Sulzer M.P., Goncharenko L.P., González S.A. Quiet time ionospheric variability over Arecibo during sudden stratospheric warming events // J. of Geophys. Res.: Space Phys. 2010. Vol. 115. Issue A9.
6. Goncharenko L.P., Chau J.L., Liu H.L., and Coster A.J. Unexpected connections between the stratosphere and ionosphere // Geophys. Res. Lett. 2010a. Vol. 37. L10101.
7. Goncharenko L.P., Coster A.J., Chau J.L., and Valladares C.E. Impact of sudden stratospheric warmings on equatorial ionization anomaly // J. Geophys. Res. 2010b. Vol. 115.
8. Goncharenko L.P., Chau J.L., Condor P., Coster A., and 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. P. 1-5. doi:10.1002/grl.50980.
9. Harada Y., Goto A., Hasegawa H., and Fujikawa N. A Major Stratospheric Sudden Warming Event in January 2009 // J. of the Atmos. Sci. 2010. Vol. 67. P. 2056–2069.
10. Labitzke K. Stratospheric-mesospheric midwinter disturbances: a summary of observed characteristics // J. Geophys. Res. 1981. Vol. 86. No. C10. P. 9665–9678.
11. Labitzke K., Kunze M. On the remarkable Arctic winter 2008/2009 // J. Geophys. Res. 2009. Vol. 114. D00I02.
12. Mannucci A.J., Wilson B.D., Yuan D.N., Ho C.H., Lindqwister U.J., and Runge T.F. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements // Radio Sci. 1998. Vol. 33. No. 3. P. 565–582.
13. Matsuno T. A dynamical model of the Stratospheric Sudden Warming // J. of Atmos. Sci. 1971. Vol. 28. P. 1479–1494.
14. Pancheva D., Mukhtarov P. Stratospheric warmings: The atmosphere–ionosphere coupling paradigm // J. of Atmos. and Solar-Terr. Phys. 2011. Vol. 73. P. 1697–1702.
15. 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.
16. Perevalova N.P., Polyakova A.S., Zalozovski A.V. Diurnal variations of the total electron content under quiet helio-geomagnetic conditions // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys. 2010. Vol. 72. P. 997–1007.
17. Schoeberl M.R. Stratospheric Warmings: Observations and Theory // Rev. of Geophys. and Space Phys. 1978. Vol. 16. No. 4. P. 251–538.
18. Sumod S.G., Pant T.K., Jose Lijo, Hossain M.M., Kumar K.K. Signatures of Sudden Stratospheric Warming on the Equatorial Ionosphere-Thermosphere System // Planetary and Space Sci. 2012. Vol. 63–64. P. 49–55.
19. Yue X., Schreiner W.S., Lei J., Rocken C., Hunt D.C., Kuo Y.-H., and Wan W. Global ionospheric response observed by COSMIC satellites during the January 2009 stratospheric sudden warming event // J. Geophys. Res. 2010. Vol. 115. A00G09.

Ionospheric effects of sudden stratosphere warmings in East Siberian region of Russia

A.S. Polyakova, M.A. Chernigovskaya, N.P. Perevalova

*Institute of Solar-Terrestrial Physics of Siberian Branch of RAS
Irkutsk 664033, Russia
E-mail: annpol@iszf.irk.ru*

The ionospheric phenomena during sudden stratospheric warmings (SSWs) of 2008–2009 and 2012–2013 winters, in the Asian region of Russia have been studied. To identify the ionosphere perturbations, most probably related to the SSWs, a joint analysis of the total electron content (TEC) global ionospheric map data, the measurements of temperature vertical profiles, obtained by the Microwave Limb Sounder (EOS Aura), as well as of the NCEP/NCAR Reanalysis archive data was carried out. It was revealed that during strong SSWs the reduction of the diurnal TEC

variation amplitude is observed in the mid-latitude ionosphere. It was established that during the SSW peak, the midday TEC maximum decreases and the night/morning TEC grows relative to quiet day values. It has shown that the dynamics of TEC deviations from the background level during SSWs is different depending on the observation point location: positive deviations of TEC are registered at points located within the stratospheric cyclone, negative - inside anticyclone. These effects are likely to be associated with the vertical transfer of molecular gas from the stratospheric warming zone, leading to a decrease/increase of the electron concentration in different areas. After the main stage of the warming, a rapid increase in TEC values, not connected with the geomagnetic activity, is observed in the ionosphere.

Keywords: ionospheric disturbances, GPS TEC, Sudden Stratosphere Warming.

References

1. Kazimirovsky E.S., Kokourov V.D., *Dvigeniya v ionosfere* (Motions in the ionosphere), Novosibirsk: Nauka, 1979, 344 p.
2. Hromov S.P., Mamontova L.I., *Meteorologicheskii slovar'* (The Meteorological dictionary), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1974, 568 p.
3. Schpynev B.G., Pancheva D., Muhtarov P., Kurkin V.I., Ratovsky K.G., Chernigovskaya M.A., Belinskaya A.Yu., Stepanov A.E., Otklick ionosferi nad regionom Vostochnoy Sibiri vo vremya vnezapnogo stratosferno-go potepleniya 2009 g. po dannim nazemnogo i sputnikovogo radiozondirovaniya (Ionosphere response over East Siberia during the 2009 Sudden Stratosphere Warming derived from data of ground based and satellite sounding), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 1, pp. 153–163.
4. 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.
5. Chau J.L., Aponte N.A., Cabassa E., Sulzer M.P., Goncharenko L.P., González S.A., Quiet time ionospheric variability over Arecibo during sudden stratospheric warming events, *J. of Geophys. Res.: Space Phys*, 2010, Vol. 115, Issue A9.
6. Goncharenko L.P., Chau J.L., Liu H.L., and Coster A.J., Unexpected connections between the stratosphere and ionosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 2010a, Vol. 37, L10101.
7. Goncharenko L.P., Coster A.J., Chau J.L., and Valladares C.E., Impact of sudden stratospheric warmings on equatorial ionization anomaly, *J. Geophys. Res.*, 2010b, Vol. 115.
8. Goncharenko L.P., Chau J.L., Condor P., Coster A., and 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.
9. Harada Y., Goto A., Hasegawa H., and Fujikawa N., A Major Stratospheric Sudden Warming Event in January 2009, *J. of the Atmos. Sci.*, 2010, Vol. 67, pp. 2056–2069.
10. Labitzke K., Stratospheric-mesospheric midwinter disturbances: a summary of observed characteristics, *J. Geophys. Res.*, 1981, Vol. 86, No. C10, pp. 9665–9678.
11. Labitzke K., Kunze M., On the remarkable Arctic winter 2008/2009, *J. Geophys. Res.*, 2009, Vol. 114, D00I02.
12. Mannucci A.J., Wilson B.D., Yuan D.N., Ho C.H., Lindqwister U.J., and 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.
13. Matsuno T., A dynamical model of the Stratospheric Sudden Warming, *J. of Atmos. Sci.*, 1971, Vol. 28, pp. 1479–1494.
14. Pancheva D., Mukhtarov P., Stratospheric warmings: The atmosphere–ionosphere coupling paradigm, *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.*, 2011, Vol. 73, pp. 1697–1702.
15. 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.
16. Perevalova N.P., Polyakova A.S., Zalizovski A.V., Diurnal variations of the total electron content under quiet helio-geomagnetic conditions, *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.*, 2010, Vol. 72, pp. 997–1007.
17. Schoeberl M.R., Stratospheric Warmings: Observations and Theory, *Rev. of Geophys. and Space Phys.*, 1978, Vol. 16, No. 4, pp. 251–538.
18. Sumod S.G., Pant T.K., Jose Lijo, Hossain M.M., Kumar K.K., Signatures of Sudden Stratospheric Warming on the Equatorial Ionosphere-Thermosphere System, *Planetary and Space Sci.*, 2012, Vol. 63–64, pp. 49–55.
19. Yue, X., Schreiner W.S., Lei J., Rocken C., Hunt D.C., Kuo Y.-H., and Wan W., Global ionospheric response observed by COSMIC satellites during the January 2009 stratospheric sudden warming event, *J. Geophys. Res.*, 2010, Vol. 115, A00G09.