

Отклик ионосферы над регионом Восточной Сибири во время внезапного стратосферного потепления 2009 г. по данным наземного и спутникового радиозондирования

Б.Г. Шпынев¹, Д. Панчева², П. Мухтаров², В.И. Куркин¹, К.Г. Ратовский¹,
М.А. Черниговская¹, А.Ю. Белинская³, А.Е. Степанов⁴

¹ Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия, E-mail: shpynev@iszf.irk.ru

² Национальный Институт геофизики, геодезии и географии, София, Болгария

³ Геофизическая служба СО РАН обсерватория «Ключи», Новосибирск, Россия

⁴ Институт космофизических исследований и аэрономии СО РАН, Якутск, Россия

В работе исследуется взаимосвязь динамических процессов в средней атмосфере и ионосфере сибирского региона во время внезапного стратосферного потепления (ВСП) в январе 2009 г. Для анализа глобальной динамики средней атмосферы используются данные Британского метеоцентра UKMO и данные по средней атмосфере MLS Aura. Для анализа параметров ионосферы используются данные спутниковой программы COSMIC и данные сибирской сети ионозондов в Новосибирске, Иркутске, Норильске и Якутске. Стратосферное потепление 2009 г. явилось одним из самых мощных событий в период затянувшегося минимума солнечной активности 2005–2010 гг. Источником ВСП явилась энергия, выделяемая вследствие изменения глобальной циркуляции в зимней полярной атмосфере, когда зимний циркумполярный вихрь разделился на две пары циркуляций циклонического и антициклонического типа. Максимальный эффект ВСП наблюдался на тех границах циклонов и антициклонов где циркуляция направлена к полюсу. Данные сети сибирских ионозондов показали, что динамические эффекты, связанные с ВСП также проявились на высотах ионосферы, причем эти эффекты зависели от положения пункта наблюдения относительно зоны циркуляции. Наибольший ионосферный эффект наблюдался в Якутске в виде повышения высоты максимума ионизации hmF2 до ~50 км в течение шести дней. В данных ионозондов Новосибирска и Иркутска вариации fmF2 и hmF2 показали обратную динамику, которая зависела от времени суток, однако эффект ВСП также был однозначно зафиксирован. В качестве механизма, обуславливающего вариации параметров ионосферы, рассматривается подъем / опускание молекулярного газа на высоты/с высот нижней термосферы в активных зонах циркуляций.

Ключевые слова: верхняя и средняя атмосфера, ионосфера, взаимодействие слоев атмосферы, волновые возмущения.

Введение

Динамический режим средней атмосферы в период зимнего солнцестояния во многом определяется крупномасштабными планетарными волнами (ПВ). В эти сезоны, в отсутствие освещенности и при низкой геомагнитной активности, в полярной атмосфере отсутствуют источники тепловой энергии, и глобальная циркуляция определяется стационарным геострофическим течением (западный перенос), образующим циркумполярный вихрь. В этих условиях кинетическая энергия вихря постоянно возрастает за счет снижения гравитационного потенциала остывающего и опускающегося атмосферного газа. На развитие вихря преобладающую роль играют квазистационарные планетарные волны, которые распространяются вверх в мезосферу и в некоторых случаях достигают высот термосферы, что было показано для северного полушария в работе (Mukhtarov et al., 2010).

Поскольку ПВ модулируются приливами, то взаимодействие этих волн со стационарным зональным потоком выводит его из состояния геострофического течения, возбуждая разные моды планетарных волн Россби (Педлоски, 1984). Когда кинетическая энергия

циркумполярного вихря достигает некоторого критического значения и ПВ усиливаются фазоразностным лунным приливом (Liu, Roble, 2002), циркумполярный вихрь выходит из стационарного состояния, в результате чего структура циркуляции кардинально меняется, и энергия, высвобождаемая при этом, выделяется в виде стратосферного потепления. В тех областях, где зональный поток останавливается или даже меняет знак, в стратосфере происходит адиабатический нагрев, известный как ВСП. Недавние исследования показали, что возмущения в мезосфере и термосфере, вызванные эффектами ВСП в субавроральной области, могут наблюдаться даже в низких широтах в области экваториальной аномалии (Chau et al., 2009; Goncharenko et al., 2010a,b).

Глобальная структура ионосферного отклика, связанного с ВСП исследовалась в работе Pancheva and Mukhtarov (2011) на основе базы данных COSMIC, где анализировались критическая частота (f_0F2), высота максимума ионизации ($hmF2$) и электронная концентрация на фиксированной высоте. Исследования показали, что средние зональные значения электронной концентрации показывают отрицательный отклик на событие ВСП, но такая реакция характерна в основном для средних и низких широт. Реакция субавроральной ионосферы в области, где непосредственно происходит потепление, детально не исследовалась.

Известным фактом является то, что спусковым механизмом для больших ВСП является аномальная волновая активность в тропосфере, вызванная метеорологическими аномалиями. Также были попытки использовать долговременные вариации параметров стратосферы для долгосрочных (более недели) метеопрогнозов (Baldwin, Dunkerton, 2001; Thompson et al., 2002). По этим причинам мы рассматриваем ВСП как глобальный динамический процесс, одновременно захватывающий нескольких областей атмосферы, и пытаемся проследить механизмы, вызвавшие наиболее мощное и продолжительное в истории наблюдений стратосферное потепление в январе 2009 г. (Manney et al., 2009). Особое внимание мы уделяем ионосферному отклику на ВСП над территорией Сибири, где спутниковые данные дополнены данными сети ионозондов, три из которых, в Новосибирске, Иркутске и Якутске расположены на расстоянии $\sim 20^\circ$ по широте и позволяют исследовать параметры ионосферы над разными зонами циркуляции в стратосфере и мезосфере.

Взаимосвязь динамики тропосферы и стратосферы

Развитие и поддержание мощного циркумполярного вихря в стратосфере связано с уникальными характеристиками этой области, которые обеспечиваются положительным градиентом температуры между тропопаузой и стратопаузой. Здесь действует устойчивый механизм адиабатического нагрева/охлаждения, когда остывающий газ опускается вниз, передавая энергию кинетическому движению циркуляции. В тропосфере отрицательный градиент температуры, формируемый испарением/конденсацией водяного пара, порождает неустойчивость зональной циркуляции, что способствует постоянной генерации возмущений на неоднородностях рельефа, а также возмущений, связанных с приливными волнами. В мезосфере также присутствует отрицательный градиент температуры, но в этой области он приводит к неустойчивости волн, распространяющихся снизу, к их нелинейной транс-

формации и к разрушению в области турбопаузы. В контексте развития ВСП стратосфера является накопителем кинетической энергии геострофического течения, а процессы в тропосфере и мезосфере играют роль дестабилизирующих факторов, приводящих к изменению структуры циркуляции в стратосфере и переходу «лишней» кинетической энергии в тепло.

Динамические процессы в тропосфере и стратосфере исследовались нами на основе базы данных Британского метеоцентра (UK Met Office UKMO), в которую ассимилированы данные наземных станций и спутниковых наблюдений в виде трехмерных полей температуры, геопотенциала и компонент скорости ветра на разных уровнях: от поверхности Земли и до уровня давления 0,1 hPa (Swinbank, Ortland, 2003). Данные доступны с шагом 2,5° по широте и 3,75° по долготе. Устоявшимся критерием Всемирной метеорологической организации для классификации ВСП является смена знака средней зональной температуры и среднего зонального ветра на 10 hPa (высота ~ 30 км) на широте 60 N. Средняя зональная температура и ветер рассчитывались нами для временного интервала с 1 октября 2008 г. по 31 марта 2009 г. Эти данные представлены на *рис. 1* в виде высотно-временной карты, где температура приводится в Кельвинах, скорость ветра в м/с. Остановка и смена знака зонального ветра происходит одновременно с ростом температуры. По данным MLS Aura (*рис. 2*) максимум температурной аномалии над Новосибирском и Иркутском наблюдался в стратосфере 19–25 января и сопровождался одновременным понижением температуры в нижней стратосфере и тропосфере. Пик температуры и смена знака зонального ветра приходятся на 23 января, что может считаться максимальной фазой ВСП. После этого момента структура циркуляции в средней и нижней стратосфере оставалась нарушенной почти целый месяц.

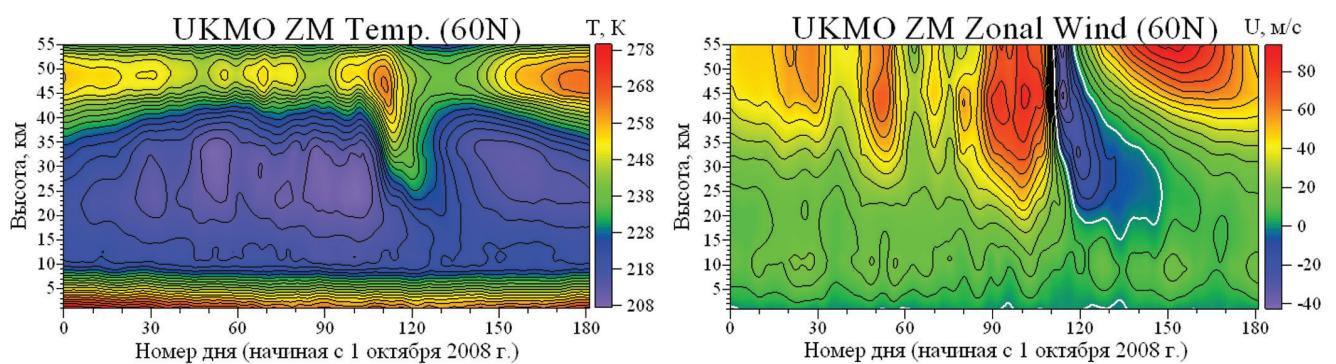


Рис. 1. Среднезональная температура (слева) и среднезональный ветер (справа) на широте 60 N по данным UKMO в области высот 1–55 км

Для количественной оценки изменения свойств полярной циркуляции традиционно используется амплитуда, так называемых стационарных планетарных волн (Stationary Planetary Waves) с периодами 24 часа (SPW1), 12 часов (SPW2) и 8 часов (SPW3). Амплитуды волн рассчитываются по данным геопотенциала путем аппроксимации поверхности постоянного давления на заданной широте соответствующими гармониками. Амплитуда SPW1 описывает степень смещения полярной циркуляции от полюса, а амплитуда SPW2 характеризует вытянутость или расщепление полярного вихря на чередующиеся пары циклонов и антициклонов. На *рис. 3* в левой колонке показаны амплитуда и фаза SPW1, справа – амплитуда и фаза SPW2. Амплитуды и фазы волн рассчитывались путем фитиро-

вания геопотенциала на заданной широте методом наименьших квадратов со скользящим 3-дневным окном и шагом 1 сутки. Вариации SPW1 показывают, что асимметрия полярной циркуляции возникает в ноябре (дни 30–60) и достигает максимума в декабре (дни 60–90), когда циркумполярный вихрь приобретает максимальную кинетическую энергию, и является наименее устойчивым. В вариациях амплитуды и фазы SPW1 также хорошо видны вариации, связанные с изменением фазы квадратурного прилива (~14 суток), который играет роль параметрического усилителя планетарной волны SPW2.

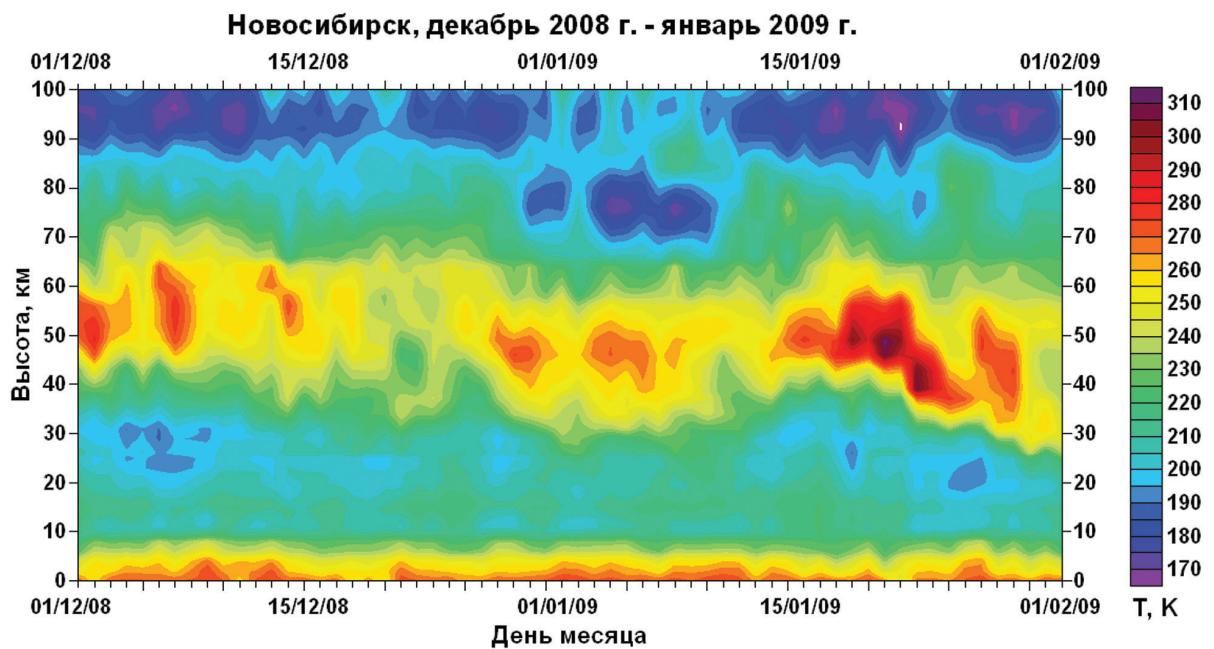


Рис. 2. Высотно-временные вариации температуры в Новосибирске по спутниковым данным MLS Aura

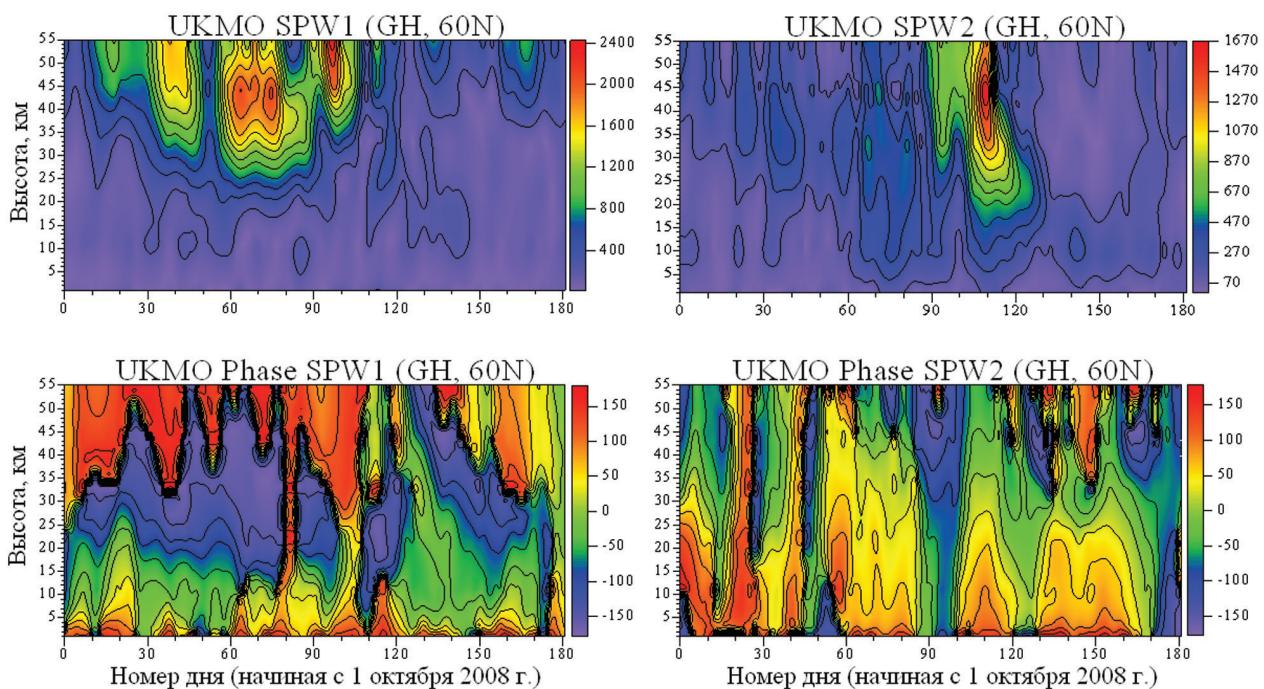


Рис. 3. Временные вариации амплитуд (в м, верхняя панель) и фаз (в градусах, нижняя панель) SPW1 (левые рисунки) and SPW2 (правые рисунки) по данным геопотенциала UKMO в области высот 1–55 км

Одновременно с ростом SPW1 в стратосфере, тропосфере и мезосфере усиливается влияние SPW2, которое стимулирует вытягивание циркумполярного вихря в стратосфере вдоль меридиана. Этот процесс заканчивается на ~ 105 -й день (19–20 января) разделением вихря на четыре части, что характеризуется резким увеличении SPW2. Это разделение начинается на 5–10 дней раньше в мезосфере (выше 50 км), как наименее устойчивой области. Однако для запуска процесса разделения циркумполярного вихря в стратосфере основную роль играет усиление SPW2 в тропосфере, за счет. Эти условия определяются метеорологической обстановкой в тропосфере, т.е. наличием мощных зимних течений взаимодействующих с горными массивами в юго-восточной Азии, и мощных антициклонов, создающих неоднородности давления между океаном и сушей. Приливы в тропосфере при спокойной геомагнитной обстановке контролируют фазы планетарных волн; причем связь спусковых механизмов ВСП с фазой приливов известна и наблюдается даже на высотах ионосферы (Goncharenko et al., 2010b).

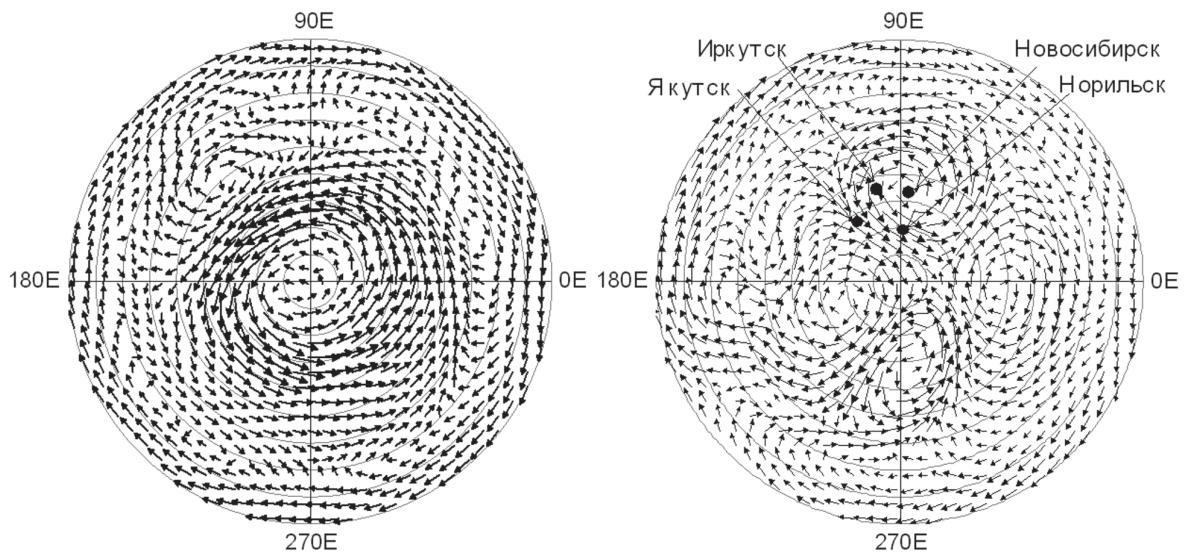


Рис. 4. Горизонтальный ветер на высоте 30 км для 8 января 2009 г. перед началом ВСП (слева) и для 23 января 2009 г. во время максимального развития ВСП (справа)

Разница в структуре циркуляции до и во время ВСП для рассматриваемого события показана на *рис. 4* в виде карт горизонтальной скорости на высоте 30 км для 8 января (слева) и для 23 января 2009 г. (справа). После расщепления полярной циркуляции в стратосфере система снова является симметричной относительно полюса (SPW1 мала). У циркуляции, состоящей из четырех вихрей, существует две области, на границах западного циклона и восточного антициклона в которых происходит столкновение потоков двух циркуляций и далее общий перенос к полюсу. В этих областях происходит адиабатическое сжатие газа, результатом которого является нагрев и вертикальный перенос вверх и вниз из зоны повышенного давления. Теплый воздух из зоны нагрева движется преимущественно в сторону низкого давления к центру циклона, одновременно опускаясь почти до высоты тропопаузы. Это особенно хорошо видно в вариациях температуры над Новосибирском (*рис. 2*), где наблюдались максимальные значения температуры на высоте 30–40 км. В двух процессах нагрева и вертикального расширения данной области происходит высвобождение лишней кинетической энергии циркуляции, накопленной при охлаждении полярной атмосферы.

Этот процесс длится до тех пор, пока энергия вихрей не ослабнет, и они не распадутся под действием стационарного западного переноса. Для ВСП 2009 г. структура циркуляции восстанавливается только через 8–10 суток.

Отклик ионосферы над Восточной Сибирью на ВСП в январе 2009 г.

Следующим шагом данной работы является исследование реакции ионосферы субавроральных и средних широт на динамические процессы в стратосфере и мезосфере. Для этой цели нами были использованы ряды ионосферных параметров, полученные на ионосферных станциях Новосибирск (54,6 N, 83,2 E), Иркутск (52 N, 104,6 E), Якутск (62 N, 129,7 E) и Норильск (69 N, 88 E). Предыдущие работы по исследованию взаимодействия стратосферы и ионосферы во время ВСП (Pancheva, Mukhtarov, 2011) проводились на основе данных COSMIC и относились в основном к средним и низким широтам. В этих исследованиях средние зональные значения электронной концентрации показали отрицательный отклик на событие ВСП.

В работе (Chau et al., 2009) было обнаружено, что ионосферный отклик в экваториальной области был в основном вызван изменением скорости дрейфа плазмы вследствие возмущения ветрового режима термосферы. Для экваториальной ионосферы такой отклик наиболее характерен, поскольку горизонтальный дрейф в меридиональной плоскости практически совпадает с направлением геомагнитного поля, и в плазме преобладает горизонтальный перенос. Хотя механизм передачи энергии возмущенной циркуляции из стратосферы в термосферу исследован лишь частично (Liu, Roble, 2002), важен факт наличия такой связи, и то, что часть этой энергии проходит через мезосферу и турбопаузу в нижнюю термосферу, меняя там скорость дрейфа плазмы и газовый состав.

Для субавроральных и авроральных широт, где магнитное поле имеет большое наклонение, увлечение плазмы нейтральным ветром относительно мало и выражается в виде подъема или опускания слоя ионизации как целого, практически без изменения формы. То есть на этих широтах преобладает вертикальный перенос ионов. Если увлечение направлено вверх, наблюдается общее увеличение электронной концентрации; если вниз, то уменьшение. Однако в среднеширотной и субавроральной ионосфере на концентрацию ионов в гораздо большей степени влияет изменение содержания молекулярных газов в нижней термосфере, которые способствуют стоку плазмы вниз. В связи с этим, для анализа отклика ионосферы на ВСП, кроме механизма ветрового увлечения, необходимо также рассматривать возможность подъема молекулярного газа из области активной циркуляции в стратосфере и мезосфере. Изменения электронной концентрации в зависимости от состояния нижней термосферы подробно исследованы в работе (Prölss, 1987). В данной работе показано, что увеличение концентрации молекулярного газа в нижней термосфере выражаются в одновременном уменьшении критической частоты (f_{oF2}) и увеличении высоты максимума ($hmF2$). Если концентрация молекулярных частиц уменьшается, и граница между молекулярным и атомарным газом опускается, то это приводит к увеличению f_{oF2} и уменьшению $hmF2$.

На рис. 5 и 6 показаны среднедневные и средненочные значения критических частот и высоты максимума ионизации, полученные на трех ионозонах в Новосибирске, Иркутске и Якутске. Данные рассчитывались путем усреднения внутри шестичасового интервала локального времени с центром в 00LT и 12LT. Для авроральной станции Норильск приведены только среднедневные вариации этих параметров, поскольку ночной слой F2 в это время обычно экранирован спорадическим слоем E_s . Также на рис. 6 приведены индексы A_e и K_p , которые показывают, что геомагнитная обстановка во время ВСП 2009 г. была спокойной, и эффекты в ионосфере можно с уверенностью рассматривать, как отклик на вариации в нижележащей нейтральной атмосфере.

В правой части рис. 4 на карте направления горизонтального ветра в северном полушарии точками указано положение обсерваторий относительно ячеек циркуляции 23 января 2009 г. Как видно из рисунка, Новосибирск находится под центром циклонического вихря в стратосфере, Иркутск также внутри циклона, но ближе к границе вихрей, Якутск находится прямо под зоной максимального динамического сжатия, Норильск находится в области, где начинается расширение газа.

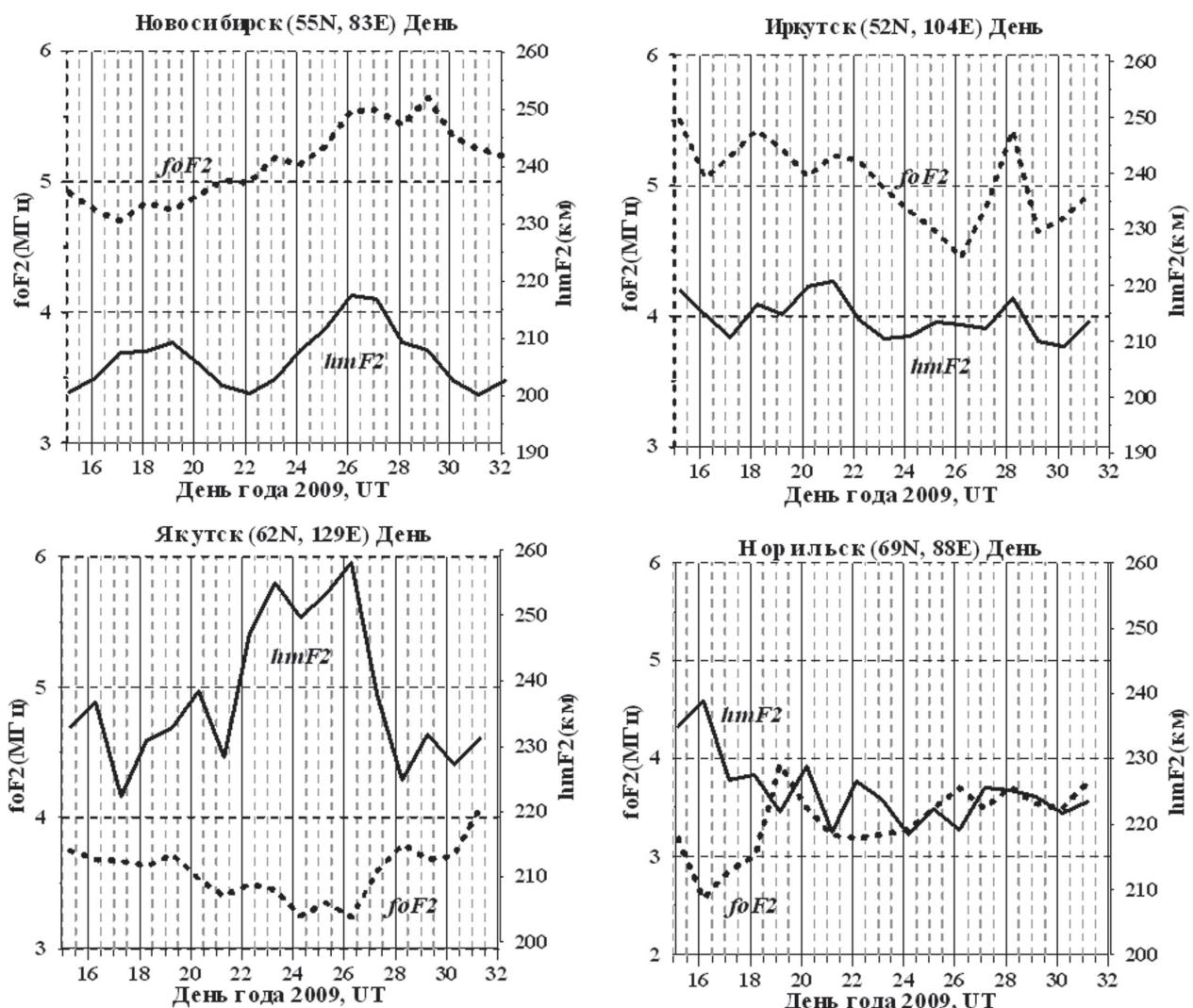


Рис. 5. Среднедневные значения $foF2$ и $hmF2$ в Новосибирске, Иркутске, Якутске и Норильске

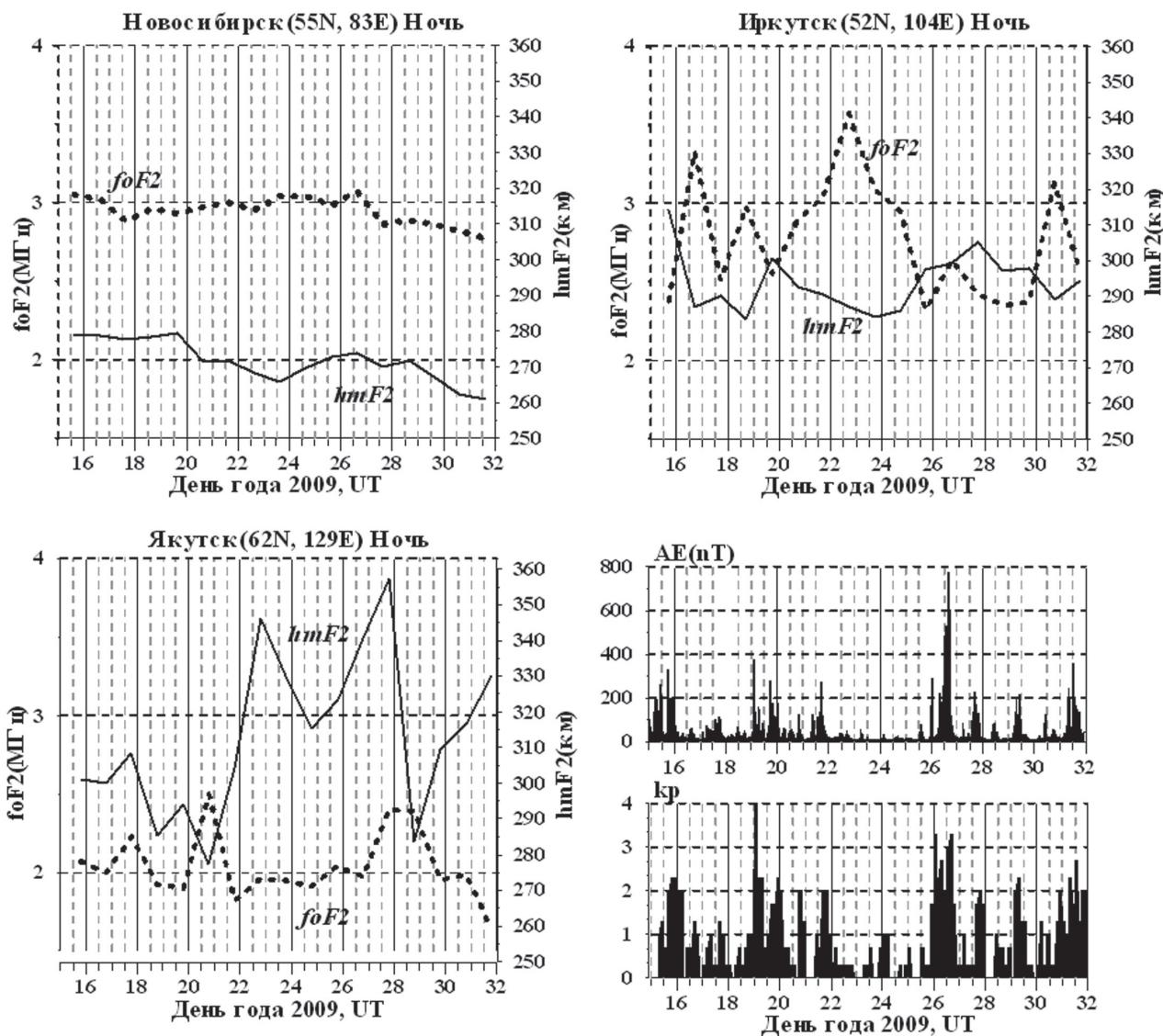


Рис. 6. Средненочные значения $foF2$ и $hmF2$ в Новосибирске, Иркутске и Якутске, а также временные вариации индексов A_e и K_p

Среди трех ионосферных станций наиболее значимый эффект наблюдался в Якутске, где высота максимума ионизации на 20–30 км. превышала средние значения днем и на 40–50 км. ночью, в течение 6 дней, совпадающих с основной фазой ВСП. При этом критические частоты ночью оставались почти неизменными, а днем наблюдалось уменьшение критической частоты на ~ 0,5 МГц. Такая динамика ионосферных параметров обычно связана с увеличением высоты переходного слоя термосферы (100–150 км), в котором состав газа изменяется от молекулярного типа к атомарному. В спокойных геофизических условиях эта граница достаточно выраженная, что подтверждается постоянным присутствием спорадического слоя по данным Норильска. Днем, когда в ионосфере действует собственный источник ионизации, молекулярный газ увеличивает сток ионов и уменьшает критическую частоту. Ночью ионизация поддерживается исключительно потоком из плазмосферы, и при низких абсолютных значениях $foF2$, высота максимума зависит только от положения переходного слоя (Rishbeth, 2006). Поэтому, судя по наблюдаемым вариациям, эффект ВСП в Якутске связан именно с вертикальным переносом

молекулярного газа в нижнюю термосферу из области нагрева в стратосфере, под которой находился Якутск.

Совсем другая динамика наблюдалась в Новосибирске, который находился в центре циклонического вихря. Из геофизической гидродинамики (Педлоски, 1984) известно, что над и под циклоническим вихрем создаются области низкого давления, в которых происходит адиабатическое расширение газа и его охлаждение. Этот процесс отчетливо виден по данным температуры MLS Aura в Новосибирске, где температура падает до $\sim 170^{\circ}\text{K}$ в мезосфере и до $\sim 180^{\circ}\text{K}$ на высотах близких к тропопаузе. За счет объемной вязкости молекулярный газ с высотой нижней термосферы увлекается стратосферным циклоном, геопотенциальная поверхность прогибается, и в Новосибирске наблюдается непрерывный рост $foF2$, начиная с 16 и вплоть до 28 января. В максимальной фазе ВСП также наблюдается существенное понижение дневных значений $hmF2$, вызванное «прогибом» геопотенциальной поверхности. Среди трех станций, в Новосибирске наблюдаются самые низкие значения $hmF2$, на $\sim 30\text{--}50$ км меньше, чем в Якутске, и на ~ 20 км меньше, чем в Иркутске, хотя широта Новосибирска и Иркутска отличается незначительно.

Вариации ионосферных параметров в Иркутске показывают динамику, среднюю между вариациями в Новосибирске и Якутске. До 24 января Иркутск находился в зоне действия циклона, и вариации параметров ионосферы здесь схожи с вариациями этих параметров в Новосибирске. После 24 января Иркутск оказался вблизи границы циркуляций и параметры ионосферы стали близкими к аналогичным параметрам в Якутске. Следует также отметить резкий рост ночных значений $foF2$ в Иркутске во время главной фазы ВСП. Это вероятнее всего связано с совпадением эффекта опускания переходного слоя внутри циклона и фазой квадратурного лунного прилива, который хорошо наблюдается в вариациях $hmF2$ в виде 4–5-суточной волны, а также в вариациях температуры в стратосфере и мезосфере по данным MLS Aura (рис. 3).

Заключение

В настоящей работе сделана попытка оценить механизмы, ответственные за развитие внезапного стратосферного потепления в январе 2009 г., начиная с высот тропосферы и заканчивая ионосферным откликом. Основным источником энергии, порождающим ВСП, является кинетическая энергия циркумполярного вихря, накопленная при адиабатическом остывании стратосферы в условиях полярной ночи. Механизмами, выводящими циркумполярный вихрь из равновесия, являются процессы в зимней тропосфере, генерирующие атмосферные структуры на крупных неоднородностях рельефа и границах земля/суша. Спусковым механизмом разрушения циркумполярного вихря является резонансное взаимодействие планетарных волн и приливов. Формирование четырех ячеек циркуляции в стратосфере во время ВСП 2009 г. также изменяет систему циркуляции в мезосфере и нижней термосфере. Эти изменения соответствуют классическим механизмам геофизической гидродинамики и явно проявляются в вариациях параметров ионосферы. Основной механизм воздействия на ионосферу снизу – это изменение концентрации

молекулярного газа в нижней термосфере. Над циклоном прогиб геопотенциальной поверхности приводит к увеличению электронной концентрации и уменьшению высоты максимума ионизации. Над областью высокого давления, особенно над зоной потепления, подъем молекулярного газа приводит к уменьшению критических частот и увеличению высоты максимума ионизации.

Работа выполнена в рамках Российско-Болгарского проекта «Атмосферно-ионосферное взаимодействие во время внезапных стратосферных потеплений». Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований РФФИ (грант 13-05-00292-а) и Министерства образования и науки РФ (ГК № 14.518.11.7065).

Литература

1. *Педлоски Дж.* Геофизическая гидродинамика: В 2-х т. / Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 811с.
2. *Baldwin M.P., Dunkerton T.J.* Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes // *Science*. 2001. Vol. 294. P. 581–584.
3. *Chau J.L., Fejer B.G., Goncharenko L.P.* Quiet variability of equatorial ExB drifts during sudden stratospheric warming event // *Geophys. Res. Lett.* 2009. Vol. 36. L05101, doi:10.1029/2008GL036785.
4. *Goncharenko L.A., Coster A.J., Chau J.L., Valladares C.* Impact of sudden stratospheric warmings on equatorial ionization anomaly // *J. Geophys. Res.* 2010a. Vol. 115. A00G07, doi:10.1029/2010JA015400.
5. *Goncharenko L.P., Chau J.L., Liu H.-L., Coster A.J.* Unexpected connections between the stratosphere and ionosphere// *Geophys. Res. Lett.* 2010b. Vol. 37. L10101, doi:10.1029/2010GL043125.
6. *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). P. 4695, doi:10.1029/2001JD001533.
7. *Manney G.L., Schwartz M.J., Krueger K. et al.* Aura Microwave Limb Sounder observations of dynamics and transport during the record-breaking 2009 Arctic stratospheric major warming // *Geophys. Res. Lett.* 2009. Vol. 36. L12815, doi:10.1029/2009GL038586.
8. *Mukhtarov P., Pancheva D., Andonov B.* Climatology of the stationary planetary waves seen in the SABER/TIMED temperatures (2002–2007) // *J. Geophys. Res. – Space Physics*. 2010. Vol. 115. A06315, doi:10.1029/2009JA015156.
9. *Pancheva D., Mukhtarov P.* Stratospheric warmings: The atmosphere-ionosphere coupling paradigm// *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.* 2011. Vol. 73. P. 1697–1702, doi:10.1016/j.jastp.2011.03.066.
10. *Polvani L.M., Waugh D.W.* Upward wave activity flux as a precursor to extreme stratospheric events and subsequent anomalous surface weather regime // *J. Climate*. 2004. Vol. 17. P. 3548–3554.
11. *Prölss G.W.* Storm-induced changes in the thermospheric composition at middle latitudes // *Planet. Space Sci.* 1987. Vol. 35. P. 807–811.

12. Rishbeth H. F-region links with the low atmosphere? // J. Atmos. and Sola-Terr. Phys. 2006. V. 68. P. 469–478.
13. Swinbank R., Ortland D.A. Compilation of the wind data for the Upper Atmosphere Research Satellite (UARS) Reference Atmosphere Project // J. Geophys. Res. 2003. Vol. 108(D19). P. 4615, doi:10.1029/2002JD003135.
14. Thompson D.W.J., Baldwin M.P., Wallace J.M. Stratospheric connection to Northern Hemisphere wintertime weather: Implications for predictions // J. Climate. 2002. Vol. 15. P. 1421–1428.

**Ionosphere response over East Siberia during the 2009
Sudden Stratosphere Warming derived from data of ground based
and satellite radio sounding**

**B.G. Shpynev¹, D. Pancheva², P. Muchtarov², V.I. Kurkin¹, K.G. Ratovsky¹,
M.A. Chernigovskaya¹, A.Yu. Belinskaya³, A.E. Stepanov⁴**

¹ Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia; E-mail: shpynev@iszf.irk.ru

² National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography BAN, Sofia, Bulgaria

³ Altay-Sayan Branch of Geophysical survey SB RAS, Novosibirsk, Russia

⁴ Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia

The coupling of dynamical processes in the middle atmosphere and in the ionosphere over Siberia during Sudden Stratospheric Warming (SSW) on January 2009 is investigated in the paper. For middle atmosphere dynamics analysis the database of UK Met Office and MLS Aura data were used. Ionosphere dynamics was investigated by using COSMIC program data and data from Siberian ionosondes in Novosibirsk, Irkutsk, Norilsk and Yakutsk. The major SSW in January 2009 appears as one of most powerful events in the period of continuous Solar minimum in years 2005–2010. The driver of SSW was the global circulation energy, which released in the stratosphere when circumpolar vortex divided by two couples of cyclonic and anti-cyclonic vortexes. Maximal effect of SSW was observed on circulations borders with northward fluxes. Data of ionosondes network show SSW effects in the ionosphere and these effects depend on observational site positions relatively circulation zones. The major effect was observed in Yakutsk as increasing of ionization maximum height hmF2 up to ~50 km and decreasing the critical frequency foF2 during six days. In Novosibirsk and Irkutsk variations of hmF2 and foF2 showed inverse dynamics, which differed in night and day, but SSW effects were clearly visible. As mechanism of neutral atmosphere impact to the ionosphere we consider the uplifting/lowering molecular gas to/from lower thermosphere in active regions of circulations.

Keywords: the upper and middle atmosphere, interaction between atmospheric layers, wave disturbances.