

## К ВОПРОСУ О ФОРМИРОВАНИИ СЛОЯ F1 ВО ВРЕМЯ ВНЕЗАПНЫХ СТРАТОСФЕРНЫХ ПОТЕПЛЕНИЙ

### ON THE FORMATION OF THE F1 LAYER DURING SUDDEN STRATOSPHERIC WARMING EVENTS

**Н.М. Полев**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, polekh@iszf.irk.ru*

**М.А. Черниговская**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, cher@iszf.irk.ru*

**О.Е. Яковлева**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, yakovleva@iszf.irk.ru*

**N.M. Polekh**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, polekh@iszf.irk.ru*

**M.A. Chernigovskaya**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, cher@iszf.irk.ru*

**O.E. Yakovleva**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, yakovleva@iszf.irk.ru*

**Аннотация.** На основе данных вертикального зондирования, полученных с помощью Иркутского дигизонда DPS-4 в течение 2003–2016 гг., проведено исследование частоты появления слоя F1 в зимних условиях. Показано, что при любом уровне магнитной активности частота появления слоя F1 в декабре–январе более чем в два раза ниже по сравнению с февралем. В спокойных геомагнитных условиях при умеренной и низкой солнечной активности появлению слоя F1 в средних широтах Северного полушария в зимние месяцы могут способствовать активные термодинамические процессы на высотах средней атмосферы, которые приводят к трансформации или разрушению циркумполярного вихря. Такие глобальные динамические перестройки, происходящие в зимней стратомезосфере, часто связаны с событиями внезапных стратосферных потеплений, которые сопровождаются усилением генерации атмосферных волн различного масштаба. Эти волновые возмущения могут распространяться вверх на высоты нижней термосферы и ионосферы, перенося с собой значительный вертикальный поток энергии и вызывая вариации состава и термодинамических параметров нейтральной атмосферы и ионосферы.

**Ключевые слова:** ионосфера, нижняя атмосфера, стратосферное потепление, слой F1.

**Abstract.** Using vertical sounding data obtained by the Irkutsk digisonde DPS-4 from 2003 to 2016, we have studied the frequency of occurrence of the F1 layer in winter conditions. The frequency of occurrence of the F1 layer in December–January is shown to be more than twice lower than that in February at any level of magnetic activity. At moderate and low solar activity under quiet geomagnetic conditions, the appearance of F1 layer in midlatitudes of the Northern Hemisphere may be caused by active thermodynamic processes, which lead to transformation or destruction of the circumpolar vortex at heights of the middle atmosphere. Such global dynamic changes occurring in the winter stratosphere are often associated with sudden stratospheric warming events, which are accompanied by increased generation of atmospheric waves of various scales. These wave disturbances can propagate upward to the heights of the lower thermosphere and ionosphere, carrying a significant vertical flow of energy and causing variations in the composition, thermodynamic parameters of the neutral atmosphere and ionosphere.

**Keywords:** ionosphere, low atmosphere, stratospheric warming, F1 layer.

### ВВЕДЕНИЕ

Слой F1 наблюдается только в дневное время, в основном при низкой солнечной активности и малых зенитных углах Солнца. Поэтому зимой при высокой солнечной активности слой F1 регистрируется крайне редко и степень его развития сильно изменяется в течение дня [Поляков и др., 1968; Иванов-Холодный, Никольский, 1969; Брюнелли, Намгаладзе, 1988]. На рис. 1 приведены ионограммы (высотно-частотные характеристики), иллюстрирующие появление слоя F1 в зимнее время. Ионограммы получены с помощью дигизонда DPS-4 и обработаны с использованием интерактивного программного обеспечения SAO-Explorer [Khmyrov et al., 2008]. Видно (рис. 1), что 22 декабря 2009 г. слой F1 выражен

в виде перегиба трека на ионограмме, а 2 января 2006 г. четко выражены все треки, соответствующие отражениям от слоев E, F1 и F2.

Ниже высоты максимума слоя F1 ( $h_mF1$ ) ионосферная плазма состоит в основном из ионов  $NO^+$  и  $N_2^+$  с примесями ионов  $O_2^+$  и  $O^+$ . Выше  $h_mF1$  концентрация ионов  $O^+$  сначала становится сопоставимой с концентрацией  $NO^+$  и  $N_2^+$ , а затем, с ростом высоты, становится больше концентрации молекулярных ионов. Следовательно, слой F1 формируется в условиях, когда переход от преобладания молекулярных ионов  $[M^+]$ , т. е. ионов  $[NO^+]$  и  $[O_2^+]$ , к преобладанию атомарных ионов  $[O^+]$  (или переход от квадратичного закона потерь электронов к линейному) происходит выше максимума концентрации  $[M^+]$ .

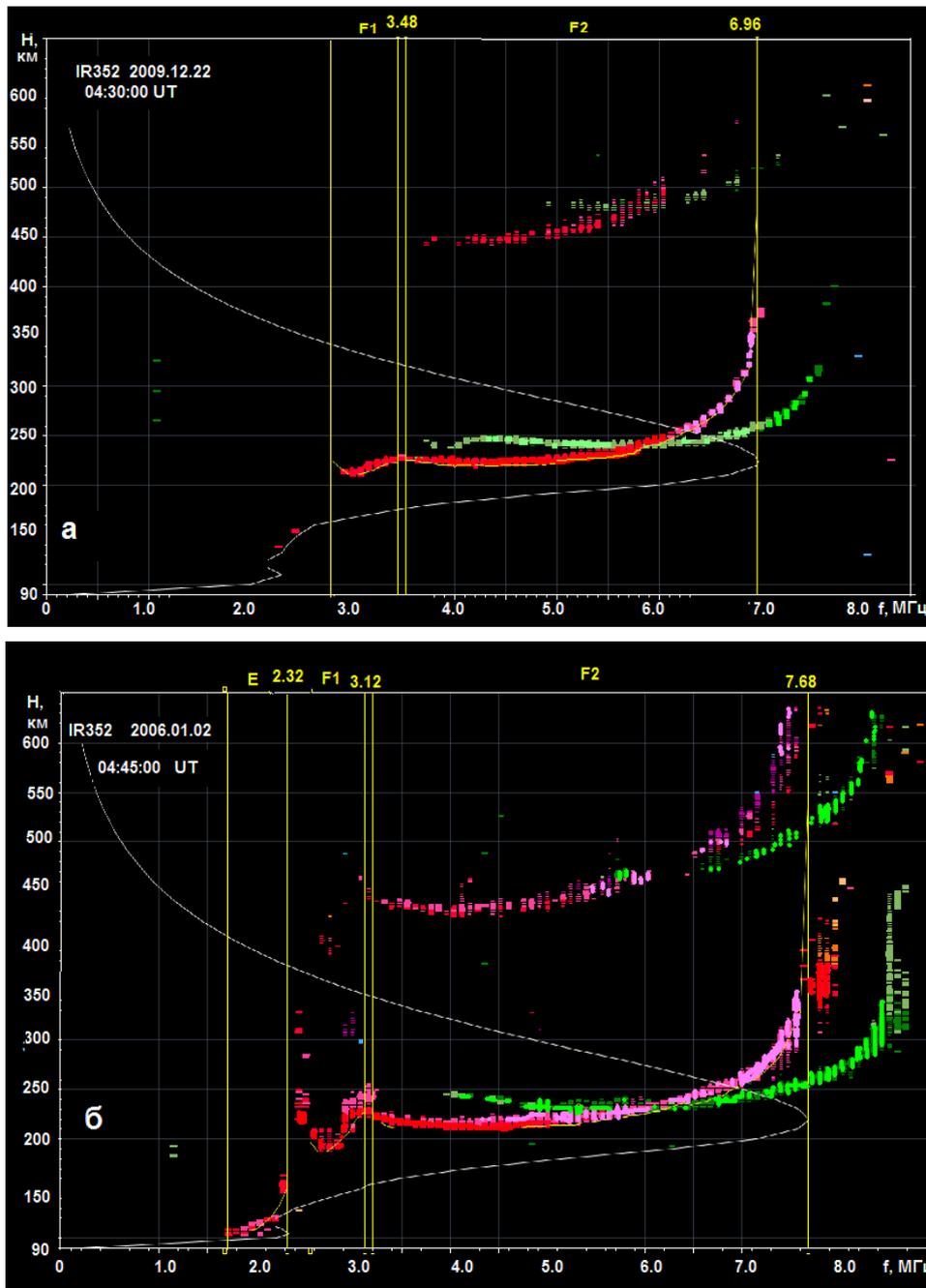


Рис. 1. Ионограммы, иллюстрирующие разные типы развития слоя F1 над Иркутском (LT=UT+7): а — 22.12.2009 в 04:30 UT; б — 02.01.2006 в 04:45 UT. Штриховой линией показан рассчитанный профиль электронной концентрации

Таким образом, степень развития F1 определяется высотным соотношением концентраций  $[O^+]$  и  $[M^+]$ : чем меньше отношение  $[O^+]/[M^+]$ , тем лучше развит слой F1. Следовательно, изменение газового состава играет важную роль в формировании слоя F1.

Как следует из анализа фотохимических процессов [Иванов-Холодный, Никольский, 1969; Брюнелли, Намгаладзе, 1988], цикл реакций, приводящий к образованию слоя F1, связан с температурным режимом нижней термосферы. Его вариации приводят к изменению скорости рекомбинационных процессов, в результате которых могут изменяться концентрации основных составляющих термосферы. Отношение концентраций  $[O]/[N_2]$  и  $[O]/[O_2]$  уменьшается от зимы к лету, и этим объ-

ясняется появление слоя F1 преимущественно в летнее время [Брюнелли, Намгаладзе, 1988]. Рост геомагнитной активности также приводит к уменьшению отношения  $[O^+]/[M^+]$  на высоких и средних широтах (что является причиной развития отрицательных ионосферных возмущений в F2-области [Prölss, 1987; Vuonsanto, 1999; Danilov, Laštovička, 2001]) и к возникновению условий, когда электронная концентрация на высотах слоя F1 становится выше, чем в максимуме слоя F2 (условие G) [Buresova, Laštovička, 2001; Деминов и др., 2011a; Polekh et al., 2015].

Внезапное стратосферное потепление (ВСП) представляет собой значительное крупномасштабное метеорологическое явление, возникающее в высоко-

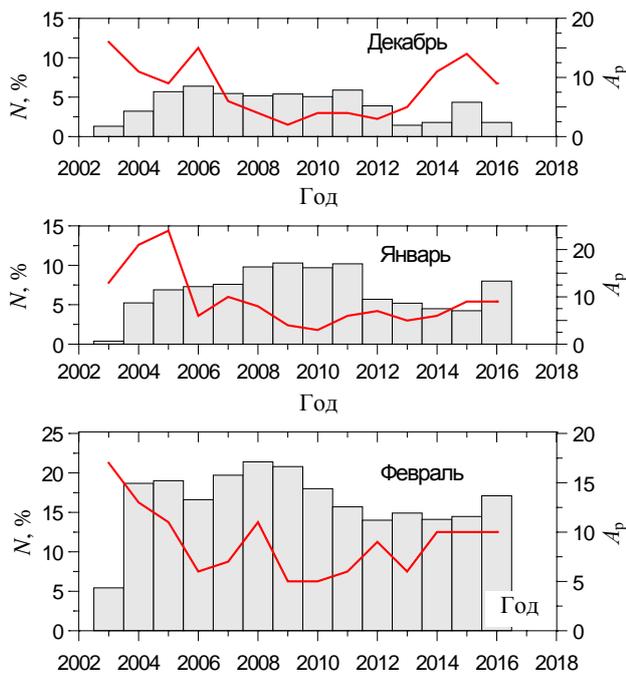


Рис. 2. Гистограммы появления слоя F1 по годам в зимнее время. Красной линией обозначен среднемесячный индекс  $A_p$

широтной зимней стратосфере. Во время ВСП в течение нескольких дней и даже недель в полярной стратосфере наблюдается повышение температуры, сопровождающееся существенным замедлением зонального ветра (слабые, или минорные ВСП) или даже изменением его направления с западного на восточное (сильные, или мажорные ВСП). Многочисленные исследования, посвященные экспериментальному изучению влияния ВСП на параметры нейтральной атмосферы и ионосферы, показали, что возмущения термодинамического режима во время сильных ВСП наблюдаются не только в стратосфере. Они охватывают большой диапазон высот и регистрируются как в полярной зоне, так и на средних и экваториальных широтах [Funke et al., 2010; Pedatella, Forbes, 2010]. Эти возмущения проявляются в изменении скоростей горизонтальных и вертикальных ветров [Noske et al., 2015], в вариациях параметров эмиссий молекул гидроксидов и кислорода [Фишкова, 1978; Medvedeva et al., 2012; Medvedeva, Ratovsky, 2018]. Возмущения, связанные с ВСП, были выявлены в вариациях критических частот и высот максимума слоя [Pancheva, Mukhtarov, 2011; Sumod et al., 2012; Shpynev et al., 2015a; Chernigovskaya et al., 2018], ионных температур [Goncharenko, Zhang, 2008], полного электронного содержания (ПЭС) [Goncharenko et al., 2010a, b; Polyakova et al., 2014; Черниговская и др., 2018] и др. Было показано, что во время ВСП наблюдается усиление полусуточных гармоник, что приводит к увеличению ночных значений электронной концентрации и ПЭС. Кроме того, Shpynev et al. [2015b], Chernigovskaya et al. [2018] показали, что вариации ионосферных параметров, наблюдавшиеся на разных долготах Северного полушария, существенно зависят от положения ионозондов относительно структур преобладающей стратомезосферной циркуляции. Разница в значениях

критических частот слоя F2 для ионозондов, разнесенных по долготе на  $15\text{--}20^\circ$ , может достигать  $1.5\text{--}2$  МГц.

Данная работа посвящена исследованию появления слоя F1 в зимнее время и возможного воздействия стратосферных потеплений на его формирование в спокойных геомагнитных условиях.

## АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для анализа были использованы результаты ручной обработки данных вертикального зондирования ионосферы, полученных с 15-минутным интервалом зондирования дигизондом DPS-4, размещенным в Иркутске ( $52.5^\circ$  N,  $104^\circ$  E), в течение зимних месяцев (декабрь–февраль) 2003–2016 гг. Высотно-временные распределения температуры в стратомезосфере над регионом Иркутска получены по измерениям СВЧ-зондом MLS (Microwave Limb Sounder) на борту космического аппарата EOS Aura. Спутниковые данные MLS/Aura по температуре представлены в виде высотных профилей от уровня поверхности земли до высоты  $10^{-5}$  гПа (0–130 км) [[https://mls.jpl.nasa.gov/products/temp\\_product.php](https://mls.jpl.nasa.gov/products/temp_product.php)].

Частота появления слоя F1 оценивалась как отношение количества регистраций слоя F1 к общему числу сеансов зондирования в данном месяце (в %). На рис. 2 приведены гистограммы появления слоя F1 для зимних месяцев по годам. Учитывались все случаи появления слоя F1, даже когда он четко не сформирован и виден на ионограмме как перегиб трека (см. рис. 1, а). Как следует из рис. 2, в феврале частота появления слоя F1 в 2–3 раза выше, чем в декабре–январе, в основном из-за увеличения длительности светового дня. В последнюю декаду февраля слой F1 регистрируется гораздо чаще, и продолжительность его регистрации возрастает независимо от уровня магнитной возмущенности (рис. 3).

Появление слоя F1 в декабре–январе в годы высокой и средней солнечной активности, как правило, обусловлено повышенным уровнем магнитной активности (рис. 2), хотя он эпизодически наблюдается и в спокойных геомагнитных условиях вблизи полуденных часов. Можно предположить, что частота появления слоя F1 связана с вариациями ионосферных параметров в периоды развития зимних стратосферных потеплений, когда происходит глобальная перестройка термодинамического режима нижележащей атмосферы. Для иллюстрации влияния уровня магнитной возмущенности и длительности светового дня на условия формирования слоя F1 рассмотрим местное время (LT) его появления в феврале 2003 г. и феврале 2010 г. (рис. 3). В феврале 2003 г. стратосферного потепления не наблюдалось, и отдельные случаи регистрации слоя F1 в первой половине февраля связаны с изменением термосферного состава во время магнитных возмущений. В 2010 г. развивалось ВСП с максимумом температуры 9 февраля [[https://mls.jpl.nasa.gov/products/temp\\_product.php](https://mls.jpl.nasa.gov/products/temp_product.php)].

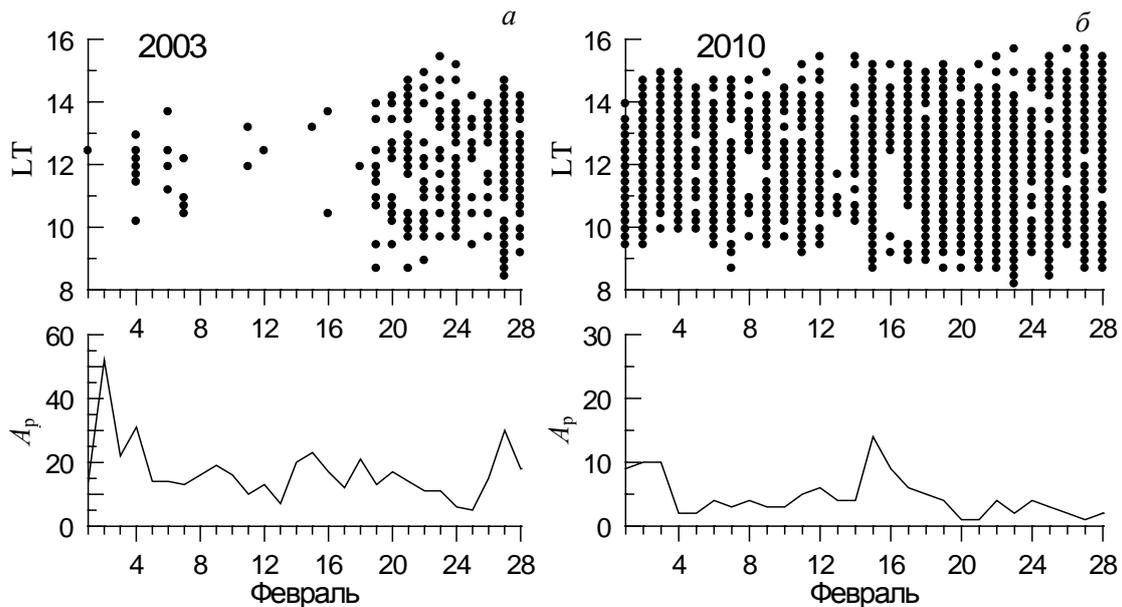


Рис. 3. Частота появления слоя F1 (вверху) и значения индекса  $A_p$  (внизу) в феврале: *a* — 2003 г.; *б* — 2010 г.

Из сравнения рис. 3, *a*, *б* видно, что в условиях развития ВСП в спокойной геомагнитной обстановке существенно возросла частота появления слоя F1 в первой половине февраля 2010 г. К последней декаде февраля увеличивается продолжительность светового дня, что также увеличивает вероятность появления слоя F1. Поэтому в дальнейшем мы будем использовать для анализа данные только за два зимних месяца — декабрь и январь. Для исключения влияния возмущенных условий на частоту появления слоя F1 были рассмотрены только потепления, наблюдавшиеся в геомагнитно-спокойные и слабо-возмущенные периоды.

### Зима 2005–2006 гг.

Стратосферное потепление зимой 2005–2006 гг. относится к числу сильных потеплений. С середины декабря средняя скорость стратосферного зонального ветра на широте  $60^\circ$  N начала быстро уменьшаться и в конце января — начале февраля изменила направление с западного на восточное. Максимальная скорость восточного ветра достигла 33 м/с [<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/strat-trop>].

На рис. 4, *a* приведены высотно-временные вариации температуры средней атмосферы на высотах 10–100 км над регионом Иркутска. Максимальное увеличение температуры (295 K) наблюдалось 31.12.2005 на высоте 46 км. На средней панели рис. 4, *б* представлены вариации аврорального AE-индекса и среднеширотного планетарного  $K_p$ -индекса. Видно, что в рассматриваемом интервале до наступления температурного стратосферного максимума наблюдалось ионосферное возмущение, вызванное слабой магнитной бурей 27 декабря с минимальным *Dst*-индексом  $-39$  нТл. Эта буря характеризовалась длительной фазой восстановления — вплоть до 1 января 2006 г. Индекс солнечной активности *F10.7* (поток солнечного радиоизлучения на волне 10.7 м,

$10^{-22}$  Вт/(м<sup>2</sup>Гц)) менялся незначительно в пределах от 80.6 до 89.5. На рис. 4, *в* приведены вариации критических частот слоев F2 и F1 ( $f_oF2$  и  $f_oF1$  соответственно) с 26 декабря 2005 г. по 5 января 2006 г. (т. е. за 5 дней до и после наступления температурного максимума в стратосфере). Синяя линия иллюстрирует вариации скользящей медианы  $f_oF2$ , рассчитанной по 15 дням, центрированной на данную дату. Обоснованность выбора 15-дневного интервала для расчета медианы приведена в работе [Демин и др., 2011б]. На рис. 4, *в* видно, что с 27 декабря усредненные околополуденные значения  $f_oF2$  (04–06 UT) превышали соответствующие медианы. Значения  $f_oF2$ , рассчитанные для околополуденных часов (16–19 UT), были ниже медианных. После 28 декабря ночные значения  $f_oF2$  возросли в целом на 0.3–0.5 МГц. В этом временном интервале эпизодически регистрировался слой F1. Трудно однозначно сказать, чем вызвано формирование слоя F1. Возможно, оно обусловлено наложением двух эффектов: ионосферных возмущений, связанных с магнитной бурей, и стратосферного потепления в нижележащей атмосфере. Можно предположить, что рост дневных критических частот вызван положительными ионосферными возмущениями, характерными для зимних среднеширотных ионосферных бурь. Рост ночных критических частот может быть связан с усилением полусуточной гармоника, вызванной ВСП.

Вторая часть рассматриваемого интервала (1–5 января) характеризовалась спокойными геомагнитными условиями. В эти пять суток также регистрировались положительные отклонения в дневные часы, и наибольшие из них наблюдались в течение 3 сут после наступления стратосферного температурного максимума. В последующие сутки дневные  $f_oF2$  медленно снижались до медианных значений и 4–5 января были ниже их. Максимальные повышения ночных  $f_oF2$  (~0.8–0.9 МГц) относительно медианы

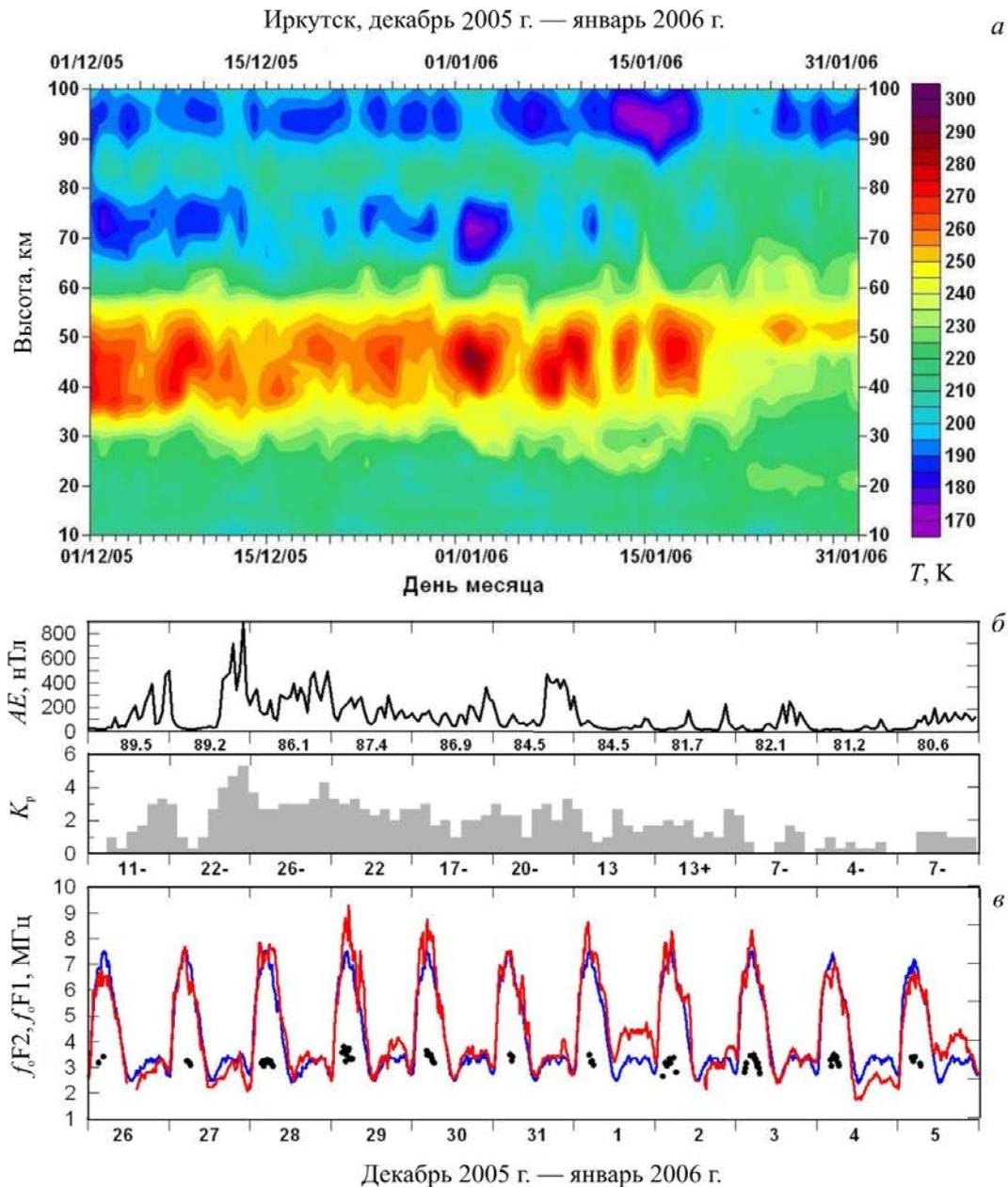


Рис. 4. Карта высотно-временного распределения температуры в средней атмосфере на высотах 10–100 км (а) в декабре 2005 г. — январе 2006 г.; вариации индексов  $AE$  и  $K_p$  (б) и критических частот  $f_oF2$  (красная линия) и  $f_oF1$  (кружки) 26 декабря 2005 — 5 января 2006 г. (в). Синяя линия показывает ход медианных величин  $f_oF2$ . Под графиком  $AE$ -индекса (б) приведены значения индекса солнечной активности  $F10.7$ ,  $K_p$ -индекса — суммарный  $K_p$ -индекс для данных суток

наблюдались 1 и 5 января. Отмечено некоторое уменьшение высоты максимума слоя F2 ( $h_mF2$ ) относительно медианных значений. Приведенные вариации  $f_oF2$  и  $f_oF1$  свидетельствуют о колебаниях критических частот с периодами в несколько суток. Заметим, что слой F1 с частотами 2.8–3.4 МГц регистрировался наиболее часто 2 и 3 января и высота его максимума менялась от 145 до 163 км.

**Зима 2008–2009 гг.**

Стратосферное потепление в зимний период 2008–2009 гг. относится к наиболее интенсивным и продолжительным. Поскольку потепление наблюдалось при крайне низком уровне солнечной активности и в спокойных геомагнитных условиях, этот

временной интервал представляется наиболее благоприятным для изучения воздействия процессов в нижележащей атмосфере на распределение ионосферных параметров [Pedatella, Forbes, 2010; Шпынев и др., 2013; Chernigovskaya et al., 2015 и ссылки в них].

На верхней панели рис. 5 приведены высотно-временные вариации температуры средней атмосферы для региона Иркутска на высотах 10–100 км с 1 по 27 декабря 2008 г. Видно, что 7 декабря отмечалось возрастание стратосферной температуры до 292.6 К на высоте 46 км. Индекс  $AE$  не превышал 200 нТл, а трехчасовой индекс  $K_p$  был меньше 2 с 8 по 16 декабря за исключением последних шести часов 16 декабря, когда его значение достигло 3– (рис. 5, б).

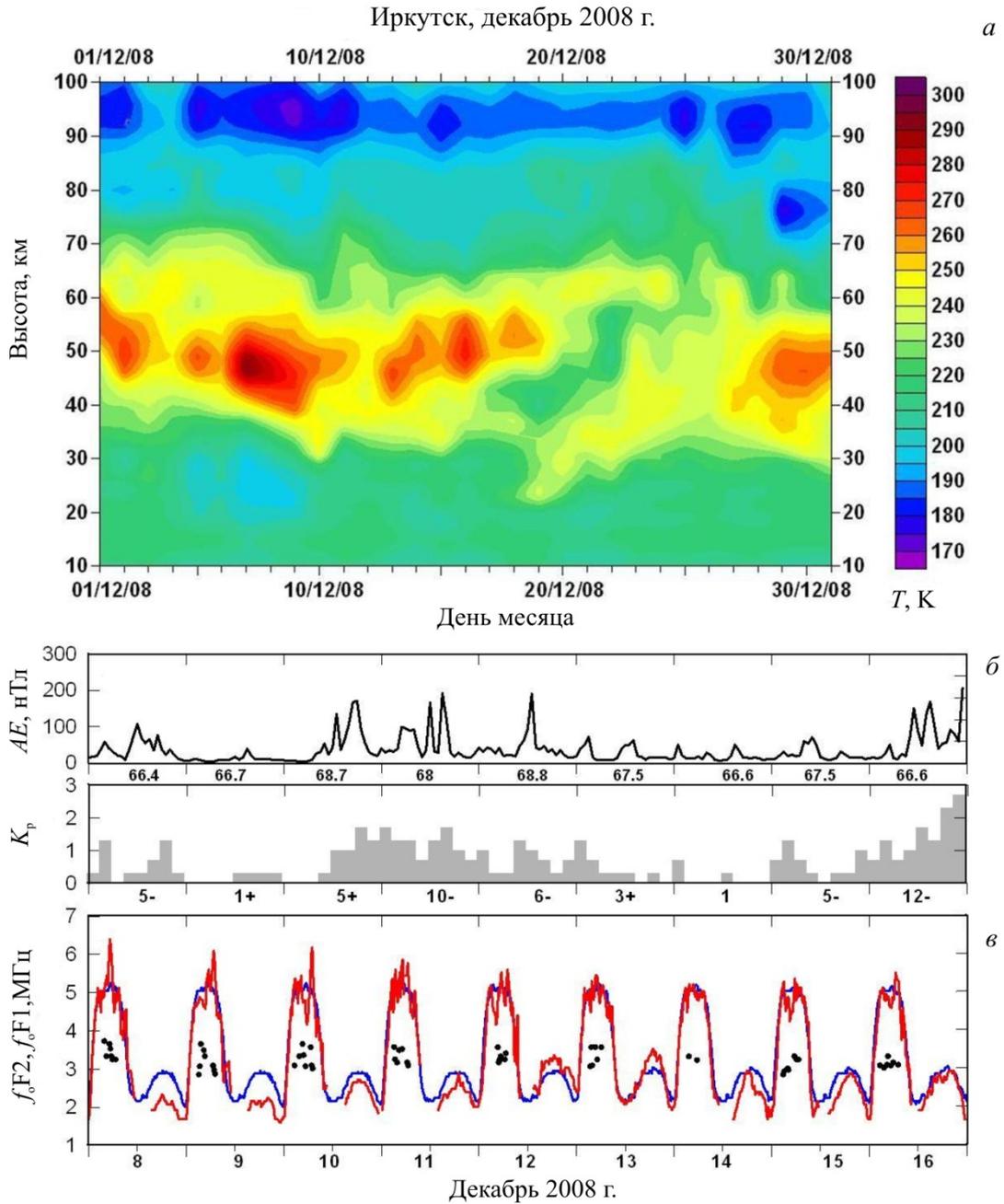


Рис. 5. Карта высотно-временного распределения температуры в средней атмосфере на высотах 10–100 км для декабря 2008 г. (а); вариации  $AE$ - и  $K_p$ -индекса (б) и изменение  $f_oF2$  и  $f_oF1$  с 8 по 16 декабря 2008 г. (в). Обозначения те же, что на рис. 4

Индекс солнечной активности  $F10.7$  изменялся от 66.4 до 68.7. На нижней панели приведены вариации  $f_oF1$  и  $f_oF2$  и значения скользящей медианы  $f_oF2$ . Резкие колебания критических частот, зарегистрированные в околополуденные часы, обусловлены перемещающимися ионосферными возмущениями (ПИВ). На ионограммах отчетливо регистрировались дополнительные «серпы» вблизи критической частоты F2-слоя. Значения  $f_oF1$  менялись в пределах 2.78–3.56 МГц, высоты максимума слоя — от 144 до 196 км. Максимальные отклонения дневных значений  $f_oF2$  от их медиан наблюдались 8 декабря, т. е. на другой день после наступления максимума температуры в стратосфере, а наибольшее увеличение отклонений в ночные часы было зарегистрировано 12–13 декабря.

### Зима 2012–2013 гг.

Температурный и динамический режим стратосферного потепления зимой 2012–2013 гг. подробно исследован Варгиным и Медведевой [2015]. Это стратосферное потепление наблюдалось в условиях высокой солнечной активности. Авторы установили, что первое повышение температуры было 23–26 декабря, затем в начале января температура поднялась еще на ~20 К и оставалась в январе выше среднеклиматической на 10–20 К. После наступления температурного максимума 5–6 января 2013 г. изменился меридиональный градиент температуры между полюсом и широтой 60° N, направление зонального ветра поменялось с западного на во-

сточное, а полярный вихрь разделился в нижней и средней стратосфере на две части. Варгин и Медведева [2015] показали, что главной фазе ВСП предшествовало усиление потоков волновой активности из тропосферы в стратосферу в конце ноября, 21–25 декабря и в начале января 2013 г. Поэтому мы рассмотрели два интервала появления слоя F1: 18–31 декабря 2012 г. и 1–12 января 2013 г.

Рисунок 6 иллюстрирует высотно-временные вариации температуры средней атмосферы (а), геомагнитных индексов (б) и  $f_oF1$  и  $f_oF2$  (в) 18–31 декабря 2012 г. Индекс  $F10.7$  изменялся от 104.2 до 112.4. На фоне относительно спокойных геомагнитных условий 18 и 20 декабря регистрировались всплески  $AE$ -индекса до 280 и 536 нТл соответственно, и планетарный  $K_p$ -индекс возрастал до 2+ и 3 (рис. 6, б). В целом в этом временном интервале слой F1 регистрировался гораздо реже, чем зимой 2008 г., и время его регистрации было ограничено полуденными (12–13 LT) часами (см. рис. 6, в). Первые двое суток (18 и 19 декабря) дневные значения  $f_oF2$  превышали медианные и довольно часто наблюдался слой F1 с критическими частотами 3.6–3.8 МГц. В последующие дни, до 25 декабря, дневные критические частоты снижались, и слой F1 регистрировался гораздо реже. Ночью критические частоты незначительно отличались от соответствующих медианных величин.

Период 26–31 декабря характеризовался спокойными геомагнитными условиями. Ночью вариации  $f_oF2$  значительно отличались от хода медианных значений: наибольшие отклонения полуденных  $f_oF2$  от соответствующих медиан составили ~0.6–0.75 МГц. Наиболее часто слой F1 регистрировался с 25 по 31 декабря. Это совпало с ростом  $f_oF2$ . По-видимому, такие изменения  $f_oF2$  были обусловлены усилением волновой активности, вызванной развитием ВСП.

Интервал 1–12 января 2013 г. (рис. 6, г, д) включает 5 дней до наступления температурного максимума (5–6 января) и 5 дней после него. Он характеризовался спокойными геомагнитными условиями и ростом солнечной активности ( $F10.7$  увеличивался от 113.9 до 168.2). В течение первых двух суток рассматриваемого интервала текущие значения  $f_oF2$  днем и ночью были ниже соответствующих медиан (рис. 6, г). После наступления температурного максимума в стратосфере с 6 по 10 января дневные значения  $f_oF2$  превышали медианные на 0.3–0.4 МГц, затем они начали уменьшаться. Возможно, рост дневных  $f_oF2$  был обусловлен ростом солнечной активности, но к концу рассматриваемого периода (11–12 января) при достаточно высоком уровне солнечной активности ( $F10.7$  ~166.7–163.7) они были на 0.4–0.5 МГц ниже соответствующих медиан. Наибольшие отрицательные отклонения полуденных критических частот регистрировались перед наступлением температурного максимума (1–2 января), положительные — 9 января. Следует отметить, что наибольшие положительные отклонения  $f_oF2$  наблюдались в предрассветные часы (04–06 LT). Слой F1 регистрировался реже, чем 26–31 декабря, только после 9 января он стал появляться чаще.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Многочисленные исследования воздействия процессов в нижней и средней атмосфере на пространственно-временные вариации ионосферных параметров во время стратосферных потеплений выявили взаимосвязь динамических параметров средней атмосферы с вариациями ПЭС и параметрами ионосферы на разных высотных уровнях — от нижней ионосферы до высоты максимума слоя F2 [Goncharenko, Zhang, 2008; Goncharenko et al., 2013; Pancheva, Mukhtarov, 2011; Medvedeva et al., 2012; Шпынев и др., 2013; Hocke et al., 2015; Polyakova et al., 2014; Черниговская и др., 2018; Chernigovskaya et al., 2018] и др.

В целом сезонное формирование и затухание интенсивных циклонических вихрей над полюсом Земли в зимнем полушарии является наиболее выдающейся особенностью стратомезосферной циркуляции. Сильные западные циркумполярные ветры, формирующие стратосферное струйное течение на краю полярного вихря, разительно контрастируют с очень слабыми восточными ветрами в летнем полушарии Земли. В обоих полушариях Земли циркумполярные вихри (ЦПВ) начинают формироваться осенью, когда в полярных областях прекращается солнечный нагрев, достигают наибольшей силы в середине зимы и затухают к концу зимы — началу весны с возвращением солнечного нагрева в полярные регионы [Waugh, Polvani, 2010]. Наиболее распространенным объяснением возникновения зимнего ЦПВ является температурный градиент, который образуется как результат различий радиационного охлаждения внутри и снаружи этой зоны в течение зимы. Чем больше разница температур, тем значительнее градиенты давления и, следовательно, выше скорости ветра в стратосферном струйном течении.

Принято считать, что главной причиной возмущений в зимнем ЦПВ, приводящих к его глобальным трансформациям, являются планетарные волны Россби [Matsuno, 1971]. Они наиболее эффективно генерируются в тропосфере Северного полушария вследствие больших температурных градиентов из-за орографических особенностей материковой части и неравномерного нагрева поверхности суша/море. Эти крупномасштабные волны, распространяясь вверх, на стратосферных высотах взаимодействуют с преобладающим зональным ветром и возмущают его. Если возмущение достаточно интенсивное, уменьшается скорость стратосферного потока и даже изменяется его направление. При этом происходит распад ЦПВ на несколько вихрей циклонического и антициклонического типа, которые и смещаются к средним широтам [Matsuno, 1971; Yigit, Medvedev, 2015].

В работах [Shpynev et al., 2015b; Шпынев и др., 2016] рассмотрен другой физический механизм формирования зимнего ЦПВ, а именно охлаждение и опускание атмосферного газа во время полярной ночи при отсутствии освещенности и источников тепловой энергии.

В этих условиях кинетическая энергия вихря постоянно возрастает за счет снижения гравитационного

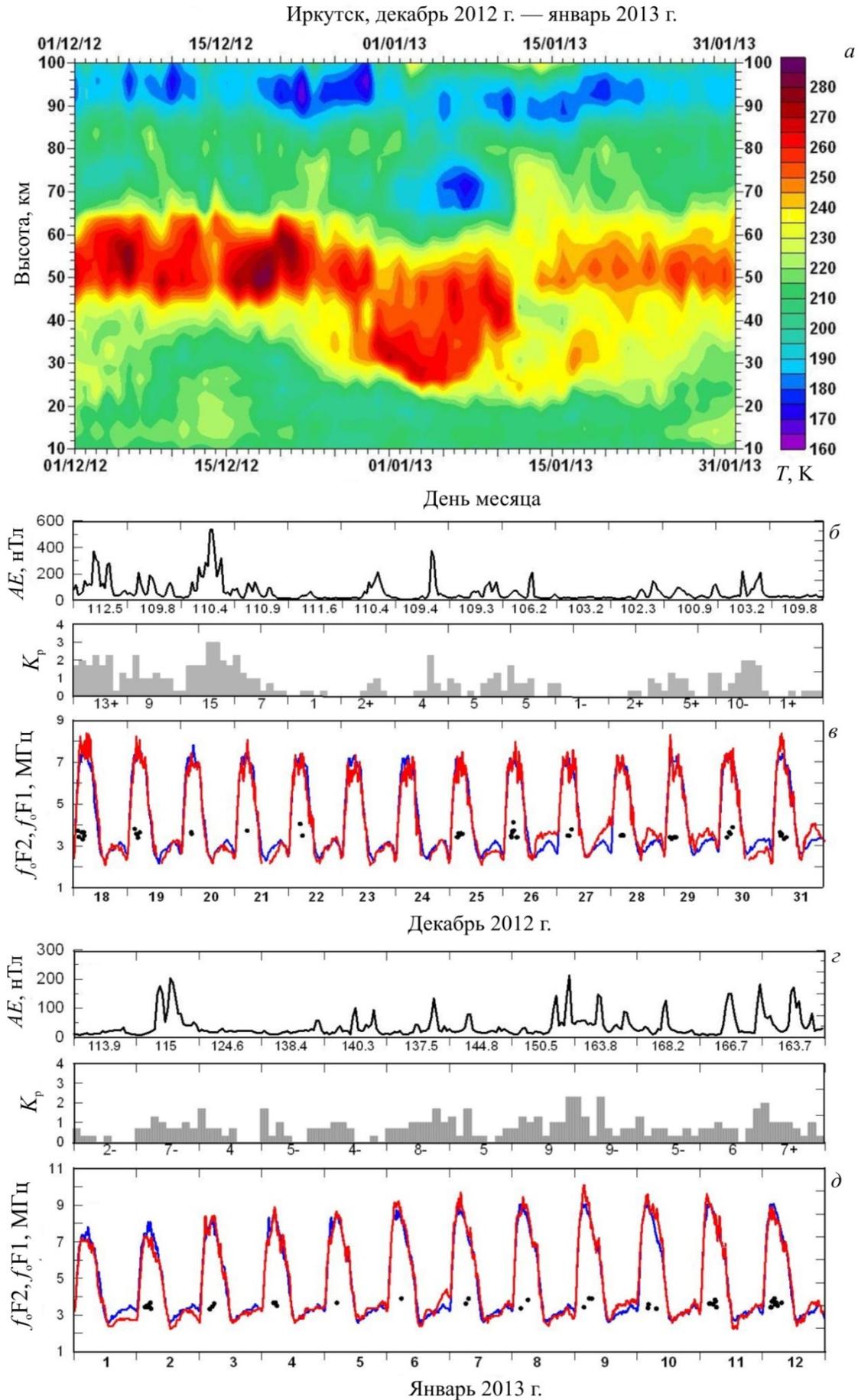


Рис. 6. То же, что и на рис. 5, для интервалов 1 декабря 2012 г. — 31 января 2013 г. (а) 18–31 декабря 2012 г. (б, в) и 1–12 января 2013 г. (г, д)

потенциала атмосферного газа. На уровне постоянного давления ЦПВ имеет структуру, подобную водовороту на поверхности воды. Внутри ЦПВ создаются условия для возникновения неустойчивостей, которые генерируют атмосферные волны различных масштабов, в том числе и внутренние гравитационные волны (ВГВ). Эти волны могут распространяться вверх, в мезосферу и нижнюю термосферу, перенося с собой значительный вертикальный поток энергии [Chernigovskaya et al., 2015, 2018]. На высотах нижней термосферы ВГВ приводят к вариациям термодинамического режима и состава атмосферы, вызывая тем самым вариации ионосферных параметров. Авторами [Шпынев и др., 2016] было показано, что опускание молекулярного газа из нижней термосферы в область активной циклонической циркуляции в мезосфере и стратосфере приводит к увеличению отношения  $[O]/[N_2]$  на высотах термосферы и, соответственно, к увеличению электронной концентрации и уменьшению высоты максимума ионизации. Наоборот, над областью высокого давления в антициклоне подъем молекулярного газа из области активной циркуляции в стратосфере и мезосфере на высоты нижней термосферы приводит к уменьшению отношения  $[O]/[N_2]$  и, следовательно, к уменьшению критической частоты и увеличению высоты максимума ионизации.

Результаты моделирования атмосферных и ионосферных эффектов ВСП для условий января 2009 г. воспроизвели картину увеличения температуры и скорости меридионального ветра, уменьшения электронной концентрации и отношения  $[O]/[N_2]$  на высоте 300 км в околополуденные часы в Северном полушарии [Bessarab et al., 2012]. Следовательно, возмущения, вызванные ВСП, проявляются на высотах всей области F и могут способствовать появлению слоя F1. В дальнейшем планируется провести расчеты относительного изменения состава термосферы во время стратосферных потеплений различной интенсивности по полумпирической модели слоя F1 [Щепкин и др., 1997].

Волновые возмущения играют существенную роль и в самом процессе развития неустойчивости, осуществляя обратную связь через дополнительный нагрев вышележащих слоев атмосферы. Анализ вариаций максимума электронной концентрации ионосферы и ПЭС над регионами Восточной Сибири и Дальнего Востока по данным ионозондов и приемников GPS/ГЛОНАСС выявил рост ионосферной изменчивости во время ВСП [Chernigovskaya et al., 2015; Ясюкевич и др., 2017]. Установлено, что зимой наблюдалось заметное повышение высокочастотной части изменчивости в максимуме электронной концентрации F2-слоя и ПЭС (в диапазоне периодов от 0.5 до 6 ч), которое в основном обусловлено перемещающимися ионосферными возмущениями, связанными с распространением снизу ВГВ. Значительная роль ВГВ в формировании ионосферной изменчивости во время ВСП была подтверждена теоретическими расчетами [Yigit et al., 2014].

Прохождение ВГВ сопровождается изменением высот максимумов слоев F1 и F2. На рис. 7, а, б

приведены зависимости изменения  $h_m F1$  от  $h_m F2$  для интервалов 17–22 января и 27–31 января во время сильного ВСП 2009 г. в спокойных геомагнитных условиях. Видно, что в первом случае (а) корреляция отсутствует (коэффициент корреляции равен 0.3), во втором (б) коэффициент корреляции выше. Более наглядно на рис. 7, в–е показано изменение высот максимумов слоев F1 и F2 со временем для двух соседних дат. Выбранные даты характеризуются также спокойными геомагнитными условиями. Видно, что в некоторых случаях наблюдается достаточно хорошая корреляция между этими параметрами, в других случаях корреляция отсутствует. Как уже было упомянуто, Шпыневым и др. [2016] показано, что вариации ионосферных параметров во время ВСП зависят от положения ионозондов относительно преобладающего зимнего струйного течения в стратомезосфере, вертикальные и горизонтальные скорости которого могут существенно изменяться во время ВСП. Это способствует генерации ВГВ различных временных масштабов, что вызывает изменение высот максимумов слоев F1 и F2.

## ВЫВОДЫ

В работе представлены результаты совместного анализа данных вертикального зондирования ионосферы дигизондом DPS-4, и спутниковых измерений температуры средней атмосферы с помощью MLS/Aura над регионом Иркутска в течение зимних месяцев (декабрь–февраль) 2003–2016 гг.

Показано, что частота появления слоя F1 в декабре–январе более чем в два раза ниже, чем в феврале, при любом уровне магнитной возмущенности. Главным фактором, определяющим частоту появления слоя F1, является длительность светового дня.

По мнению авторов, в средних и субполярных широтах Северного полушария на высотах стратомезосферы активные термодинамические процессы, в результате которых происходит трансформация или разрушение циркумполярного вихря и усиление волновой активности в нижележащей атмосфере, могут способствовать появлению среднеширотного слоя F1.

Полученные результаты могут быть полезны для исследования вариаций электронной концентрации на высотах ~150–200 км и состава термосферы в периоды развития зимних стратосферных потеплений.

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ И.16. Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056>]. Авторы выражают благодарность Европейскому центру среднесрочных прогнозов погоды (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) [[https://mls.jpl.nasa.gov/products/temp\\_product.php](https://mls.jpl.nasa.gov/products/temp_product.php)] за метеоданные архива реанализа ERA-Interim, использованные в настоящем исследовании. Авторы признательны администрации сайта [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>] за предоставление магнитных данных.

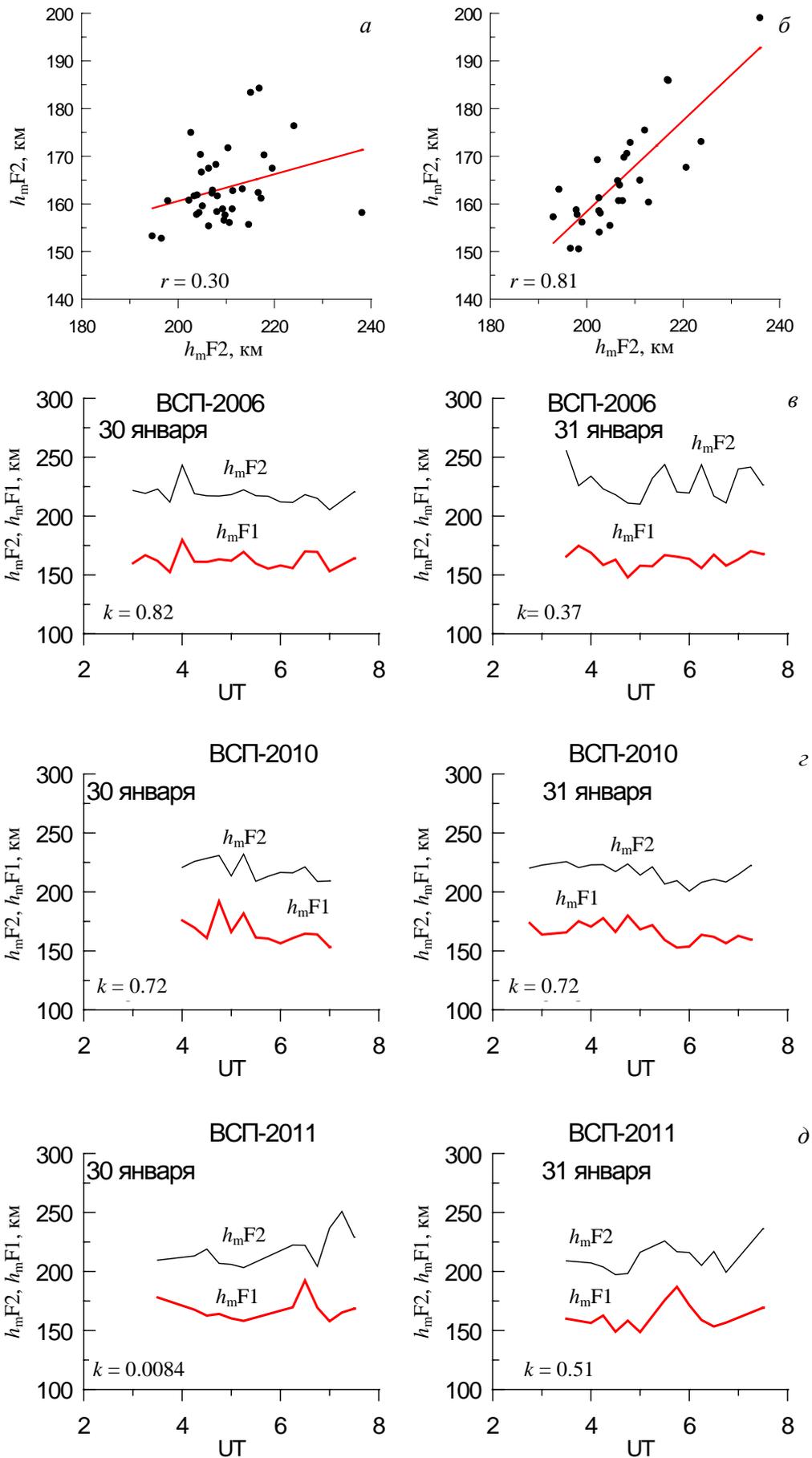


Рис. 7. Зависимость  $h_m F_1$  от  $h_m F_2$  для 17–22 января (*a*) и 27–31 января 2009 г. (*б*); *в–д* — вариации  $h_m F_1$  (красная линия) и  $h_m F_2$  (черная линия) со временем для двух последующих дат разных лет во время ВСП

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 528 с.
- Варгин П.Н., Медведева И.В. Исследование температурного и динамического режимов внетропической атмосферы Северного полушария в период внезапного стратосферного потепления зимой 2012–2013 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51, № 1. С. 20–38. DOI: [10.7868/S0002351514060170](https://doi.org/10.7868/S0002351514060170).
- Деминов М.Г., Деминова Г.Ф., Жеребцов Г.А. и др. Изменчивость параметров максимума F2-слоя спокойной среднеширотной ионосферы при низкой солнечной активности: статистические свойства // Геомагнетизм и аэронаука. 2011а. Т. 51, № 3. С. 352–359.
- Деминов М.Г., Романова Е.Б., Тащилин А.В. Зависимость возникновения условия G в области F ионосферы от солнечной и геомагнитной активностей // Геомагнетизм и аэронаука. 2011б. Т. 51. С. 683–689.
- Иванов-Холодный Г.С., Никольский Г.М. Солнце и ионосфера. М.: Наука, 1969. 466 с.
- Поляков В.М., Щепкин Л.А., Казимировский Э.С., Кокоуров В.Д. Ионосферные процессы. Новосибирск: Наука, 1968. 536 с.
- Фишкова Л.М. О колебаниях интенсивности ночного излучения верхней атмосферы в периоды стратосферных потеплений // Геомагнетизм и аэронаука. 1978. Т. 18, № 3. С. 143–148.
- Черниговская М.А., Шпынев Б.Г., Ясюкевич А.С. и др. Ионосферная изменчивость над Европой зимой по данным ионозондов и GPS/ГЛОНАСС // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 4. С. 295–307.
- Шпынев Б.Г., Панчева Д., Мухратов 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.
- Шпынев Б.Г., Черниговская М.А., Хабитуев Д.С. Спектральные характеристики атмосферных волн, генерируемых зимним стратосферным струйным течением Северного полушария // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 2. С. 120–131. DOI: [10.21046/2070-7401-2016-13-2-120-131](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2016-13-2-120-131).
- Щепкин Л.А., Кушнаренко Г.П., Фрейзон И.А., Кузнецова Г.М. Связь электронной концентрации в средней ионосфере с состоянием термосферы // Геомагнетизм и аэронаука. 1997. Т. 37, № 5. С. 106–113.
- Ясюкевич А.С., Черниговская М.А., Мельникова А.А. и др. Сезонные вариации ионосферной возмущенности в различных гелиогеомагнитных условиях по данным GPS/ГЛОНАСС над регионами Восточной Сибири и Дальнего Востока // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 4. С. 249–262. DOI: [10.21046/2070-7401-2017-14-4-249-262](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-4-249-262).
- Bessarab F.S., Korenkov Yu.N., Klimenko M.V., et al. Modeling the effect of sudden stratospheric warming within the thermosphere–ionosphere system // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2012. V. 90–91. P. 77–85. DOI: [10.1016/j.jastp.2012.09.005](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.09.005).
- Buonsanto M.J. Ionospheric storms. A review // Space Sci. Rev. 1999. V. 88. P. 563–601.
- Buresova D., Laštovička J. Changes in the F1 region electron density during geomagnetic storms at low solar activity // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2001. V. 63. P. 537–544. DOI: [10.1016/S1364-6826\(00\)00167-X](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00167-X).
- Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Ratovsky K.G. Meteorological effects of ionospheric disturbances from vertical radio sounding data // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2015. V. 136. P. 235–243. DOI: [10.1016/j.jastp.2015.07.006](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.07.006).
- Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Ratovsky K.G., et al. Ionospheric response to winter stratosphere/lower mesosphere jet stream in the Northern Hemisphere as derived from vertical radio sounding data // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2018. V. 180. P. 126–136. DOI: [10.1016/j.jastp.2017.08.033](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.08.033).
- Danilov A.D., Laštovička J. Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere // Int. J. Geomagn. Aeron. 2001. V. 2. P. 209–224.
- Funke B., Lopez-Puertas M., Bermejo-Pantalen D., et al. Evidence for dynamical coupling from the lower atmosphere to the thermosphere during a major stratospheric warming // Geophys. Res. Lett. 2010. L13803. DOI: [10.1029/2010GL043619](https://doi.org/10.1029/2010GL043619).
- Goncharenko L., Zhang S.-R. Ionospheric signatures of sudden stratospheric warming: ion temperature at middle latitude // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35, L21103. DOI: [10.1029/2008GL035684](https://doi.org/10.1029/2008GL035684).
- Goncharenko L.P., Coster A.J., Chau J.L., Valladares C.E. Impact of sudden stratospheric warming on equatorial ionization anomaly // J. Geophys. Res. 2010a. V. 115, A00C07. DOI: [10.1029/2010JA015400](https://doi.org/10.1029/2010JA015400).
- Goncharenko L.P., Chau J.L., Liu H.-L., Coster A.J. Unexpected connections between stratosphere and ionosphere // Geophys. Res. Lett. 2010b. V. 37, L10101. DOI: [10.1029/2010GL043125](https://doi.org/10.1029/2010GL043125).
- Goncharenko L.P., Hsu V.W., Brum C.G.M., et al. Wave signatures in the midlatitude ionosphere during a sudden stratospheric warming of January 2010 // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2013. V. 118, iss. 1. P. 472–487. DOI: [10.1029/2012JA018251](https://doi.org/10.1029/2012JA018251).
- Hocke K., Lainer M., Schanz A. Composite analysis of a major sudden stratospheric warming // Ann. Geophys. 2015. V. 33. P. 783–788. DOI: [10.5194/angeocom-33-783-2015](https://doi.org/10.5194/angeocom-33-783-2015).
- Khmyrov G.M., Galkin I.A., Kozlov A.V., et al. Exploring digisonde ionogram data with SAO-X and DIDBase // Radio Sounding and Plasma Physics. AIP Conf. Proc. 2008. V. 974, iss. 1. P. 175–185. DOI: [10.1063/1.2885027](https://doi.org/10.1063/1.2885027).
- Matsuno T. A dynamical model of the stratospheric sudden warming // J. Atmos. Sci. 1971. V. 28. P. 1479–1494.
- Medvedeva I., Ratovsky K. Effects of the 2016 February minor sudden stratospheric warming on the MLT and ionosphere over Eastern Siberia // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2018. V. 180. P. 116–125. DOI: [10.1063/j.jastp.2017.09.007](https://doi.org/10.1063/j.jastp.2017.09.007).
- Medvedeva I.V., Semenov A.I., Chernigovskaya M.A., Perminov V.I. Studying manifestations of 2008–2011 sudden stratospheric warmings in East-Siberia and European Russia // Geophysica. 2012. V. 48, N 1-2. P. 91–103.
- Pancheva D., Mukhtarov P. Stratospheric warming: The atmosphere–stratospheric coupling paradigm // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2011. V. 73. P. 1697–1702. DOI: [10.1016/j.jastp.2011.03.006](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.03.006).
- Pedatella N.M., 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](https://doi.org/10.1029/2010GL043560).
- Polyakova A.S., Chernigovskaya M.A., Perevalova N.P. Ionospheric effects of sudden stratospheric warmings in Eastern Siberia region // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2014. V. 120. P. 15–23. DOI: [10.1016/j.jastp.2014.08.011](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2014.08.011).
- Prölss G.W. Storm-induced changes in the thermospheric composition at middle latitudes // Planet. Space Sci. 1987. V. 35, N 6. P. 807–811.
- Polekh N.M., Romanova E.B., Ratovsky K.G., Shi J.K., Wang X., Wang G.J. Studying the G condition occurrence in different latitudes under solar minimum: Observation and modeling // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2015. V. 130. P. 132–141.
- Shpynev B.G., Kurkin V.I., Ratovsky K.G., et al. High-midlatitude ionosphere response to major stratospheric warming // Earth, Planets and Space. 2015a. V. 67, article id. 18. DOI: [10.1186/s40623-015-0187-1](https://doi.org/10.1186/s40623-015-0187-1).

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

Sumod S.G., Pant T.K., Jose Lijo., et al. Signature of sudden stratospheric warming on equatorial ionosphere–thermosphere system // *Planet. Space Sci.* 2012. V. 63–64. P. 49–55. DOI: [10.1016/j.pss.2011.08.005](https://doi.org/10.1016/j.pss.2011.08.005).

Waugh D.W., Polvani L.M. Stratospheric Polar Vortices // *The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry*. 2010. P. 43–57. (Geophys. Monogr. Ser. V. 190.) DOI: [10.1029/2009GM000887](https://doi.org/10.1029/2009GM000887).

Yigit E., Medvedev A. Internal wave coupling processes in Earth's atmosphere // *Adv. Space Res.* 2015. V. 55. P. 983–1003. DOI: [10.1016/j.asr.2014.11.020](https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.11.020).

Yigit E., Medvedev A.S., England S.L., Immel T.J. Simulated variability of the high-latitude thermosphere induced by small-scale gravity waves during a sudden stratospheric warming // *J. Geophys. Res.* 2014. V. 119, iss. 1, P. 357–365. DOI: [10.1002/2013JA019283](https://doi.org/10.1002/2013JA019283).

## 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. Solar-Terr. Phys.* 2012, vol. 90–91, pp. 77–85. DOI: [10.1016/j.jastp.2012.09.005](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.09.005).

Brunelli B.E., Namgaladze A.A. *Fizika ionosfery* [Physics of the Ionosphere]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 528 p. (In Russian).

Buonsanto M.J. Ionospheric Storms. A review. *Space Sci. Rev.* 1999, vol. 88, pp. 563–601.

Buresova D., Lastovicka J. Changes in the F1 region electron density during geomagnetic storms at low solar activity. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2001, vol. 63, pp. 537–544. DOI: [10.1016/S1364-6826\(00\)00167-X](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00167-X).

Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Ratovsky K.G. Meteorological effects of ionospheric disturbances from vertical radio sounding data. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2015, vol. 136, pp. 235–243. DOI: [10.1016/j.jastp.2015.07.006](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.07.006).

Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Ratovsky K.G., Belinskaya A.Yu., Stepanov A.E., Bychkov V.V., Grigorieva S.A., Panchenko V.A., Korenkova N.A., Mielich J. Ionospheric response to winter stratosphere/lower mesosphere jet stream in the Northern Hemisphere as derived from vertical radio sounding data. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018, vol. 180, pp. 126–136. DOI: [10.1016/j.jastp.2017.08.033](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.08.033).

Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Yasyukevich A.S., Mylnikova A.A., Khabituiev D.S., Knizhova Koutska P., Kouba D., Melich I., Kozlovsky A. Ionospheric variability over Europe in winter from the ionosonde and GPS/GLONASS data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space]. 2018, vol. 15, no. 4, pp. 295–307. (In Russian).

Danilov A.D., Laštovička J. Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere. *Int. J. Geomagn. Aeron.* 2001, vol. 2, pp. 209–224.

Deminov M.G., Deminova G.F., Zherebtsov G.A., Pirog O.M., Polekh N.M. Variability of parameters of the F2-layer maximum of the quiet midlatitude ionosphere under low solar activity: 1. Statistical properties. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2011a, vol. 51, iss. 3, pp. 348–355. DOI: [10.1134/S001679321102006X](https://doi.org/10.1134/S001679321102006X).

Deminov M.G., Romanova E.B., Tashchilin A.V. Origination of G conditions in the ionospheric F region depending on solar and geomagnetic activity. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2011b, vol. 51, iss. 5, pp. 669–675. DOI: [10.1134/S0016793211050045](https://doi.org/10.1134/S0016793211050045).

Fishkova L.M. On variations of intensity of the upper atmosphere nightglow during sudden stratospheric warmings.

*Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 1978, vol. 18, no. 3. pp. 143–148. (In Russian).

Funke B., Lopez-Puertas M., Bermejo-Pantaleon D., Garcia-Comas M., Stiller G.P., von Clarmann T., Kiefer M., Linden A. Evidence for dynamical coupling from the lower atmosphere to the thermosphere during a major stratospheric warming. *Geophys. Res. Lett.* 2010, L13803. DOI: [10.1029/2010GL043619](https://doi.org/10.1029/2010GL043619).

Goncharenko L., Zhang S.-R. Ionospheric signatures of sudden stratospheric warming: ion temperature at middle latitude. *Geophys. Res. Lett.* 2008, vol. 35, L21103. DOI: [10.1029/2008GL035684](https://doi.org/10.1029/2008GL035684).

Goncharenko L.P., Coster A.J., Chau J.L., Valladares C.E. Impact of sudden stratospheric warming on equatorial ionization anomaly. *J. Geophys. Res.* 2010a, vol. 115, A00C07. DOI: [10.1029/2010JA015400](https://doi.org/10.1029/2010JA015400).

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

Goncharenko L.P., Hsu V.W., Brum C.G.M., Zhang S.-R., Fentzke J.T. Wave signatures in the midlatitude ionosphere during a sudden stratospheric warming of January 2010. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2013, vol. 118, iss. 1, pp. 472–487. DOI: [10.1029/2012JA018251](https://doi.org/10.1029/2012JA018251).

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

Ivanov-Kholodny G.S., Nikolsky G.M. *Solntse i ionosfera* [The Sun and the Ionosphere]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 466 p. (In Russian).

Khmyrov G.M., Galkin I.A., Kozlov A.V., Reinisch B.W., McElroy J., Dozois C. Exploring digisonde ionogram data with SAO-X and DIDBase. *Radio Sounding and Plasma Physics. AIP Conf. Proc.* 2008, vol. 974, iss. 1, pp. 175–185. DOI: [10.1063/1.2885027](https://doi.org/10.1063/1.2885027).

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

Medvedeva I., Ratovsky K. Effects of the 2016 February minor sudden stratospheric warming on the MLT and ionosphere over Eastern Siberia. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018, vol. 180, pp. 116–125. DOI: [10.1016/j.jastp.2017.09.007](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.09.007).

Medvedeva I.V., Semenov A.I., Chernigovskaya M.A., Perminov V.I. Studying manifestations of 2008–2011 sudden stratospheric warmings in East-Siberia and European Russia. *Geophysica.* 2012, vol. 48, no. 1–2, pp. 91–103.

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

Pedatella N.M., 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](https://doi.org/10.1029/2010GL043560).

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

Prölss G.W. Storm-induced changes in the thermospheric composition at middle latitudes. *Planet. Space Sci.* 1987, vol. 35, no. 6, pp. 807–811.

Polekh N.M., Romanova E.B., Ratovsky K.G., Shi J.K., Wang X., Wang G.J. Studying the G condition occurrence in different latitudes under solar minimum: Observation and modeling. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2015, vol. 130, pp. 132–141. DOI: [10.1016/j.jastp.2015.06.001](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.06.001).

Polyakov V.M., Shchepkin L.A., Kazimirovsky E.S., Koukurov V.D. *Ionosfernyye protsessy* [Ionospheric Processes]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1968, 536 p. (In Russian).

Shchepkin L.A., Kushnarenko G.P., Freizon I.A., Kuznetsova G.M. Connection between electron density in the middle ionosphere and thermospheric conditions. *Geomagnet-*

*izm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 1997, vol. 37, no. 5, pp. 106–113. (In Russian).

Shpynev B.G., Pabcheva D., Mukhratov 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* [Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space]. 2013, vol. 10, no. 1, pp. 153–163. (In Russian).

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

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

Shpynev B.G., Chernigovskaya M.A., Khabituyev D.S. Spectral characteristics of atmospheric waves generated by winter stratospheric jet flow of the Northern Hemisphere. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space]. 2016, vol. 13, no. 2, pp. 120–131. DOI: [10.21046/2070-7401-2016-13-2-120-131](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2016-13-2-120-131). (In Russian).

Sumod S.G., Pant T.K., Jose Lijo., Hossain M.M., Kumar K.K. Signature of Sudden stratospheric warming on equatorial ionosphere–thermosphere system. *Planet. Space Sci.* 2012, vol. 63–64, pp. 49–55. DOI: [10.1016/j.pss.2011.08.005](https://doi.org/10.1016/j.pss.2011.08.005).

Vargin P.N., Medvedeva I.V. Research into temperature and dynamic conditions of the Northern Hemisphere extratropical atmosphere during the sudden stratospheric warming in winter 2012–2013. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana* [Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics]. 2015, vol. 51, no. 1, pp. 20–38. DOI: [10.7868/S0002351514060170](https://doi.org/10.7868/S0002351514060170). (In Russian).

Waugh D.W., Polvani L.M. Stratospheric Polar Vortices. *The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry*. 2010, pp. 43–57. (Geophys. Monogr. Ser., vol. 190). DOI: [10.1029/2009GM000887](https://doi.org/10.1029/2009GM000887).

Yasyukevich A.S., Chernigovskaya M.A., Mylnikova A.A., Shpynev B.G., Khabituyev D.S. Seasonal variations of the ionospheric storminess during different heliogeomagnetic conditions from GPS/GLONASS data over East Siberia and Far East. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space]. 2017, vol. 14, no. 4, pp. 249–262. DOI: [10.21046/2070-7401-2017-14-4-249-262](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-4-249-262).

Yigit E., Medvedev A. Internal wave coupling processes in Earth's atmosphere. *Adv. Space Res.* 2015, vol. 55, pp. 983–1003. DOI: [10.1016/j.asr.2014.11.020](https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.11.020).

Yigit E., Medvedev A.S., England S.L., Immel T.J. Simulated variability of the high-latitude thermosphere induced by small-scale gravity waves during a sudden stratospheric warming. *J. Geophys. Res.* 2014, vol. 119, iss. 1, pp. 357–365. DOI: [10.1002/2013JA019283](https://doi.org/10.1002/2013JA019283).

*Как цитировать эту статью:*

Полех Н.М., Черниговская М.А., Яковлева О.Е. К вопросу о формировании слоя F1 во время внезапных стратосферных потеплений. *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5, № 3. С. 140–152. DOI: [10.12737/szf-53201914](https://doi.org/10.12737/szf-53201914).