УДК 551.510.535

ОСОБЕННОСТИ ВАРИАЦИЙ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ F2-СЛОЯ ВО ВРЕМЯ ВНЕЗАПНЫХ СТРАТОСФЕРНЫХ ПОТЕПЛЕНИЙ 1966—2009 гг. ПО ДАННЫМ СТАНЦИЙ КАЛИНИНГРАД И ИРКУТСК

© 2021 г. А. В. Тимченко^{1, 2,} *, Ф. С. Бессараб^{1, 2}, Ю. Н. Кореньков², Н. А. Коренькова², О. П. Борчевкина^{1, 2}, К. Г. Ратовский³

¹Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград, Россия ²Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (КФ ИЗМИРАН), г. Калининград, Россия ³Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия *e-mail: timchenko.leks@gmail.com Поступила в редакцию 12.11.2019 г. После доработки 12.02.2020 г. Принята к публикации 24.09.2020 г.

Представлено исследование волновой изменчивости критической частоты F2-слоя ионосферы над станциями Калининград (54.6° N, 20° E) и Иркутск (53° N, 103° E) во время сильных внезапных стратосферных потеплений. Для всех отобранных случаев общим фактором являлась низкая солнечная активность. Результаты вейвлет-анализа временны́х вариаций *foF2* показали, что во время большинства потеплений, произошедших в период 1965–2009 гг., происходило усиление колебаний с периодами в 4–10 дней. Амплитуда длиннопериодных (25–30-дневных) колебаний, напротив, уменьшалась. Аналогичный анализ, выполненный для зимы 1975–1976 гг., когда потеплений не было, показал, что амплитуды колебаний *foF2* с периодами 25–30 дней, напротив, очень стабильны и меняются незначительно. Еще одним проявлением внезапных стратосферных потеплений над Калининградом и Иркутском является усиление изменчивости спектра колебаний *foF2* и в других частотных диапазонах.

DOI: 10.31857/S0016794021010168

1. ВВЕДЕНИЕ

Вопрос о связи метеорологических параметров и критических частот *F*-области ионосферы давно привлекает к себе внимание исследователей, что нашло свое отражение в многочисленных работах [Pancheva and Samardjiev, 1992; Altadill, 1993; Apostolov and Altadill, 1996; Danilov et al., 1987; Vanina and Danilov, 2003; Борчевкина и Карпов, 2017].

Возросший интерес к проблеме волнового взаимодействия нижних слоев атмосферы и ионосферы связан с развитием измерительной техники и появлением новых экспериментальных данных [Mikhailov et al., 1998; Laštovička et al., 2003; Goncharenko and Zhang, 2008; Pancheva and Mukhtarov, 2011; Chernigovskaya et al., 2015; Shpynev et al., 2015].

Известно, что одной из причин, приводящей к образованию нерегулярной по высоте ветровой и температурной структуры, могут являться внезапные стратосферные потепления (ВСП). Это метеорологическое явление заключается в драматическом повышении температуры высокоширотной зимней стратосферы на высотах ~30 км преимущественно в северном полушарии. Температура при этом может возрастать на несколько десятков градусов по отношению к фоновым значениям. Потепление может продолжаться в течение нескольких дней и даже недель.

Во время этого события происходит возбуждение волн различных масштабов, которые могут проникать до высот мезосферы и термосферы (см., например, [Laštovička et al., 2003; Pancheva and Mukhtarov, 2011; Yiğit and Medvedev, 2012]). Наиболее сильно на динамический режим стратосферы во время потепления влияют планетарные волны. В стратосфере регулярно наблюдаются планетарные волны (ПВ) с периодами ~2, 5–7, 8-10 дней, которые распространяются преимущественно в зональном направлении [Altadill and Apostolov, 2003]. Стратосферные ПВ, взаимодействуя с фоновым ветром и приливами, могут изменять параметры верхней термосферы и, следо-



Рис. 1. Среднегодовые значения коэффициента *F*10.7 с 1956 по 2018 гг. Прямая линия показывает среднее значение *F*10.7 за весь период. Х – даты, в которые зафиксированы сильные внезапные стратосферные потепления; ● – слабые внезапные стратосферные потепления.

вательно, влиять на динамику F2-слоя ионосферы [Liu et al., 2010].

Достаточно подробные исследования квазиволновых вариаций *foF2* с периодами, равными периодам ПВ, были выполнены в работах [Apostolov and Altadill, 1996; Altadill and Apostolov, 2001, 2003; Laštovička et al., 2003].

Ранее нами проводились исследования временны́х вариаций критических частот спорадического слоя *Es* и слоя *F*2 для зимних условий 2008—2010 гг. с целью выявления характерных особенностей в поведении *foEs* и *foF*2 во время стратосферных потеплений [Korenkova et al., 2015; Кореньков и др., 2018].

В настоящей работе представлен анализ временны́х вариаций критической частоты F2-слоя ионосферы (foF2) по данным вертикального зондирования ионосферных станций Калининград (54.6° N, 20° E) и Иркутск (53° N, 103° E) за период декабрь—март для нескольких лет, в которые наблюдались сильные ВСП. Основная цель работы состояла в определении периодов осцилляций, которые содержит временно́й ряд foF2 и которые могут ассоциироваться с периодами планетарных волн, возникающих в стратосфере во время ВСП.

Для обнаружения во временно́й последовательности *foF*2-колебаний с периодами планетарных волн нами применялся метод непрерывного вейвлет-преобразования.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОД

В данной работе мы ограничились исследованием сильных (*major*) ВСП, так как влияние таких потеплений на параметры ионосферы должно быть более выраженным по сравнению со слабыми (*minor*) потеплениями. Зимы, в которые были зафиксированы сильные ВСП, выбирались на основе критериев, приведенных в статье [Palmeiro et al., 2015]. Все рассматриваемые сильные стратосферные потепления наблюдались в январе/ феврале и характеризовались аномальным повышением средней температуры в высоких широтах на высоте ~30 км и разрушением циркумполярного вихря. Полагая, что эффекты от ВСП в ионосфере могут маскироваться геомагнитными возмущениями, среди отобранных событий мы оставляли те, которые приходились на годы минимумов 11-летних шиклов солнечной активности (рис. 1). В настоящей работе используются данные наблюдений на ионосферных станциях Калининград и Иркутск за зимний период 1965-1966; 1976–1977; 1984–1985; 1986–1987; 2007– 2008; 2008-2009 гг.

Единичные пропуски в часовых данных заполнялись с помощью линейной интерполяции. Заметим, что для поиска колебаний с периодом несколько дней такие пропуски не являются критичными. Для последующего анализа использовались среднедневные (с 10:00 LT до 14:00 LT) значения *foF2* за период декабрь—март.

Поиск осцилляций в вариациях *foF2* во время ВСП выполнялся с помощью непрерывного вейвлет-преобразования. В качестве базисной функции использовалась вещественная часть вейвлета Морле. Для наиболее наглядного представления результатов анализа полученные коэффициенты затем были нормализованы с помощью метода *LIM* (*Local Intermittency Measure*) [Farge, 1992]:

$$LIM_{a,t0} = \frac{W(a,t_0)^2}{\langle W(a,t)^2 \rangle_t},$$

где $W(a, t_0)$ – коэффициент вейвлет-преобразования; a – период вариаций; t – время; угловые скобки означают усреднение.

ТИМЧЕНКО и др.



Рис. 2. Среднезональная температура, усредненная по широтам с 60° до 90° N, на высоте ~30 км. Прямая линия – среднее значение температуры за исследуемый период. Номер дня отсчитывается от 1 декабря.

Для определения даты начала и окончания ВСП в рассматриваемые зимы нами использовались значения температуры на уровне 10 гПа (высота ~30 км) по данным базы реанализа Центра прогнозирования окружающей среды/национального центра атмосферных исследований (NCEP/NCAR) США [Kalnay et al., 1996]. Данные доступны с пространственным разрешением 2.5° × 2.5° и минимальным временны́м шагом 6 ч. Архив данных пополняется с 1948 г.

Геомагнитная активность за исследуемые периоды определялась на основе поведения *Ар*-индекса, значения которого представлены на сайте (*http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/*).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 2 приведены вариации среднезональной температуры, усредненной в области широт 60° —90° N на высоте 30 км за исследуемые годы. Начало и окончание ВСП определялось по устойчивому превышению температуры над ее средним за исследуемый период значением. В некоторые годы отмечалось несколько потеплений (например, в декабре 1965, 1984 и 1986 гг.), однако, эти события не относятся к сильным ВСП. Заметим также, что наблюдавшееся повышение температуры в марте (после 90-го дня) не связано с ВСП, а является обычным сезонным потеплением.

Для оценки геомагнитной обстановки были использованы среднесуточные значения *Ар*-индекса, взятые с сайта Мирового Центра Данных в Киото (WDC). Диаграммы *Ар*-индекса показаны на рис. 3. Видно, зима 2008–2009 гг. была самой геомагнитно-спокойной — среднесуточный *Ар*-индекс не превышал значения 20 нТл. Единичные кратковременные увеличения *АР*-индекса (~60 нТл) наблюдались в марте 1966 г. и феврале–марте 1985г. Небольшой рост среднесуточно-го *Ар* происходил также в декабре 1976 г. ~50 нТл, в феврале 1987 и 2008 гг. – 30 нТл, и до 40 нТл – в марте 2008 г. В целом, геомагнитная обстановка в исследуемые зимы менялась от спокойной до слабовозмущенной.

Результаты вейвлет-анализа вариаций критической частоты F2-слоя для ионосферных станций Калининград и Иркутск в виде изолиний значений LIM-коэффициентов представлены на рис. 4. Здесь по горизонтальной оси отложен номер дня, отсчитываемый от 1 декабря, по вертикальной — периоды колебаний, измеряемые в сутках. Штриховыми линиями обозначено начало и окончание внезапного стратосферного потепления, а прямыми горизонтальными линиями для удобства мы выделили (4–10)-дневные периоды колебаний. Для дальнейшего анализа мы ограничились максимальным периодом, равным 30 сут.

Как видно, во время изучаемых зим периоды преобладающих по амплитуде колебаний плавно изменялись. На рисунках этот эффект наблюдается в виде характерных "трендов", растущих или убывающих. Эти "тренды" могут менять свой характер в течение одной зимы, как, например, в 2009 г., в Иркутске или в 1977 г. в Калининграде. Также отчетливо видны колебания с периодами 25–30 и 12–15 дней, близкие к периоду и полови-



Рис. 3. Ар-индекс для исследуемых периодов.

не периода вращения Солнца соответственно и (4–10)-дневные колебания, которые часто связывают с планетарными волнами. Известно, что Солнце является главным генератором регулярных вариаций в параметрах ионосферы, соответственно относительное ослабление этих вариаций может служить индикатором усиления волновых процессов в ионосфере, генерируемых ВСП.

На рисунках видно, что амплитуды (25–30)дневных колебаний во время ВСП уменьшались. Исключением являются зимы 1984–1985 и 1986– 1987 гг., в которые эта закономерность нарушается. Так, в Калининграде колебания с указанными периодами во время ВСП усиливались, а над Иркутском такие колебания хоть и отсутствовали во время ВСП, но и не наблюдались весь предшествующий ВСП интервал времени.

Закономерности в поведении (12-15)-дневных колебаний foF2, которые также могут быть связаны с вращением Солнца, выражены менее четко. Во время ВСП амплитуды этих колебаний усиливались в Калининграде: зимой 2007–2008 и 2008-2009 гг., а ослабевали в Калининграде: зимой 1965-1966, в Иркутске: 1965-1966 и 1976-1977 гг. Наблюдались также случаи, когда амплитулы вариаций foF2c этими периодами во время ВСП сначала возрастали, а затем уменьшались, например: в Иркутске зимой 1984-1985, 2007-2008 и 2008-2009 гг., в Калининграде - зимой 1986-1987 гг. Также надо отметить два случая, когда гармоники с периодами 12-15 сут. практически полностью отсутствовали: 1984—1985 гг. в Калининграде и 1986-1987 в Иркутске.

Изменение амплитуды (4—10)-дневных колебаний *foF*2, которые ассоциируются с планетарными волнами, носит также достаточно сложный характер. В разные годы для них видны как нисходящие, так и восходящие "тренды". В большинстве случаев колебания с такими периодами имеют ярко выраженное возрастание во время ВСП, исключением являются 1987 г. (Калининград и Иркутск) и 2009 г. (Калининград).

Таким образом, сложная динамика спектра вариаций *foF2* на среднеширотных станциях не позволяет уверенно идентифицировать начало и окончание сильного ВСП, можно лишь предположить наличие потепления в рассматриваемую зиму по усилению изменчивости спектра в диапазонах 25-30 и 4-10 сут.

В качестве дополнения нами было рассмотрено поведение относительной спектральной энергии осцилляций *foF*2:

$$\varepsilon_{a,b} = \frac{E_{a,b}}{\sum_{a} E_{a,b}}$$

Здесь *а* – период в днях, *b* – номер дня. Заметим, что квадрат вейвлет-коэффициентов имеет смысл спектральной энергии. Для вейвлета Морле, который содержит действительную и мнимую часть $E_{a,b} = (\text{Re}(W(a,b)))^2 + (\text{Im}(W(a,b)))^2$. Для сопоставления вариаций *foF*2 с изменением солнечной активности аналогичная процедура была выполнена и для индекса *F*10.7. Изолинии относительной спектральной энергии вариаций *foF*2



Рис. 4. *LIM*-коэффициенты вариаций *foF*2 для станций Калининград (слева, KLD) и Иркутск (справа, IRK). Штриховыми линиями выделены моменты начала и окончания потеплений.



Рис. 5. Относительная спектральная энергия осцилляций индекса *F*10.7 (справа) и *foF*2 для станций Иркутск (в центре, IRK) и Калининград (слева, KLD). Штриховыми линиями выделены начало и окончание потепления.

для станций Калининград и Иркутск, а также индекса *F*10.7 представлены на рис. 5.

Видно, что в большинстве случаев основная часть относительной спектральной энергии (ОСЭ)

в вариациях F10.7 приходится на колебания с периодами 25–30 дней. Эта закономерность нарушается зимой 2008–2009 гг., когда главный вклад в спектральную энергию вносят колебания с пе-



Рис. 6. Относительная спектральная энергия F10.7 (слева) и *foF*2 для зимы 1975–1976 гг., ст. Калининград (справа, KLD), ст. Иркутск (центр, IRK).

риодами 15–20 дней, а колебания с периодами 25–30 дней сильно ослабевают. Также в разные зимы можно наблюдать колебания с более короткими периодами. Например, зимой 1976–1977 гг. кратковременно возрастает спектральная энергия колебаний с периодами ~20 дней, а зимой 2007–2008 гг. 11–15 дней.

Учитывая роль солнечной ионизации в формировании F2-слоя, можно ожидать, что поведение спектральной энергии *foF2* будет соответствовать вариациям *F*10.7, по крайней мере, в длиннопериодной части спектра, а основные отличия проявятся в его короткопериодной части. Вероятные нарушения этой закономерности с одновременным усилением спектральной энергии в области (4–10)-дневных колебаний можно интерпретировать как проявление эффектов ВСП, вызванных усилением планетарных волн.

Анализ рис. 5 показывает, что общая картина изолиний относительной спектральной энергии вариаций foF2 над станциями Калининград и Иркутск в разные годы может значительно отличаться. Тем не менее, следует обратить внимание на общие закономерности, наблюдаемые в интересующих нас частотных диапазонах. Во-первых, во время ВСП над Калининградом и Иркутском отчетливо проявляется тенденция усиления (4-10)дневных колебаний. В некоторые зимы этот эффект проявляется сразу после начала потепления (1966, 1977, 1985 гг. над обеими станциями, 2008 и 2009 гг. над Иркутском), иногда только к концу потепления (2008 и 2009 гг. над Калининградом). Исключением является ВСП 1987 г., в котором эта закономерность нарушается. Во-вторых, прослеживается тенленция ослабления спектральной энергии колебаний с периодом 25-30 дней во время ВСП, исключение – поведение foF2 над Калининградом в 1985 г. Причем, важно отметить, что изменение энергии (25-30)-дневных колебаний происходит в противофазе с изменением (4–10)-дневных. Еще одним проявлением ВСП и в Калининграде, и в Иркутске является

также усиление изменчивости спектра колебаний foF2 в других частотных диапазонах.

Спектры на рис. 5 можно сравнить с аналогичными, построенным для зимы 1975—1976 г. и представленными на рис. 6. Зима 1975—1976 гг. является единственной из имеющегося массива наблюдений, относящейся к минимумам солнечного цикла, во время которой не наблюдались ВСП.

Видно, что в Калининграде основная часть спектральной энергии *foF2* в течение всей зимы приходится на колебания с периодами 23–30 дней. Рост энергии колебаний с периодами 4–11 дней, наблюдающийся в феврале—марте, про-исходит одновременно с усилением 25-дневных колебаний. Заметим, что во время ВСП изменение энергии (25–30)-дневных и (4–10)-дневных колебаний проходило в противофазе.

Поведение спектральной энергии *foF2* над Иркутском более сложное. В течение зимы преобладают колебания с периодом ~15 дней, за исключением пятнадцати дней в феврале, когда максимум спектральной энергии приходился на колебания с периодами 20–25 дней. В течение всего периода отчетливо проявляются колебания с периодом менее 10 дней, а в конце марта энергия этих колебаний начинает доминировать, при этом усиление (4–10)-дневных колебаний проходило, как правило, на фоне ослабления (25–30)-дневных, как и во время ВСП. В целом, спектр вариаций *foF2* в измерениях над Иркутском в эту зиму демонстрирует большую изменчивость, так же как и в зимы с ВСП.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты вейвлетанализа вариаций критической частоты F2-слоя над ионосферными станциями Калининград и Иркутск во время шести сильных ВСП, отобранных с 1966—2009 гг. и приходившихся на минимумы одиннадцатилетнего солнечного цикла. Так как солнечная активность и связанная с ней геомагнитная обстановка в эти периоды были спокойными или слабовозмущенными, характерные изменения в вариациях критической частоты F2-слоя могут быть связаны с воздействием планетарных волн, усиливающихся во время стратосферных потеплений.

Результаты вейвлет-анализа показали, что во временны́х вариациях *foF*2 выделяются колебания с периодами 25—30 сут и 12—15 сут — близкими к периодам и полупериодам главных колебаний, генерируемых вращением Солнца, и колебания с периодами 4—10 дней, которые соответствуют периодам планетарных волн. Во время изучаемых зим периоды преобладающих по амплитуде колебаний плавно изменялись, что может свидетельствовать об усилении нелинейного взаимодействия волн, воздействующих на параметры ионосферы.

Амплитуды (25–30)-дневных колебаний непосредственно во время ВСП в большинстве случаев уменьшались, колебания же с периодами планетарных волн 4–10 дней, как правило, возрастали.

Дополнительную информацию об особенностях поведения foF2 дает анализ относительной спектральной энергии колебаний. Несмотря на заметные различия в поведении спектральной энергии над Калининградом и Иркутском, видны и общие закономерности ее изменений в интересующих нас частотных диапазонах. Так, во время ВСП над обеими станциями отчетливо проявляется тенденция усиления (4-10)-дневных колебаний. Исключением является ВСП 1987 г., в котором эта закономерность нарушается. Кроме того, во время ВСП прослеживается тенденция ослабления спектральной энергии колебаний с периодом 25-30 дней (кроме ВСП-1985 над Калининградом). Причем, важно отметить, что изменение энергии (25-30)-дневных колебаний происходит в противофазе с изменением (4-10)-дневных.

Аналогичный анализ, выполненный для зимы 1975-1976 гг. - единственной из имеющегося массива наблюдений, относящейся к минимуму солнечного цикла, во время которой не наблюдались ВСП – показал, что поведение спектральной энергии колебаний foF2 над Калининградом и Иркутском существенно различается. Так, энергия колебаний в диапазоне 25-30 сут над Калининградом очень стабильна, а колебания с периодом 4-10 сут малы и усиливаются только к концу зимы, одновременно с усилением (25-30)-дневных колебаний. Данная особенность спектра foF2 в эту зиму резко контрастирует с поведением foF2 в случаях с ВСП. К сожалению, единичный факт наблюдения не имеет статистической значимости, к тому же обнаруженная закономерность поведения foF2 над Калининградом в 1975-1976 гг. не подтверждается соответствующими измерениями над Иркутском.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Центру прогнозирования окружающей среды/национального центра атмосферных исследований (NCEP/NCAR), США за использование температурных данных и Мировому центру данных по геомагнетизму, Киото за использование геомагнитных индексов с веб-сайта (http:// wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 18-05-00594. В работе использованы экспериментальные данные Центра коллективного пользования "Ангара" (http://ckp-rf.ru/ckp/3056/), полученные в рамках базового финансирования программы ФНИ II.12.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– Борчевкина О.П., Карпов И.В. Ионосферные неоднородности в периоды метеорологических возмущений // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 57. № 5. С. 670–675. 2017.

- Кореньков Ю.Н., Бессараб Ф.С., Коренькова Н.А., Лещенко В.С. Периоды планетарных волн во временны́х вариациях *foF2* по данным ст. Калининград во время зим 2008–2010 гг. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 58. № 3. С. 434–442. 2018.

- Altadill D. Possible amplitude modulation effects in the F2 variations in the periodic range 30–200 hours // Bulg. Geophys. J. V. 19. № 3. P. 26–31. 1993.

- Altadill D., Apostolov E.M. Vertical propagating signatures of wave type oscillations (2- and 6.5-days) in the ionosphere obtained from electron density profiles// J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 63. No 9. P. 823–834. 2001.

– Altadill D., Apostolov E.M. Time and scale size of planetary wave signatures in the ionospheric F region: Role of the geomagnetic activity and mesosphere-lower thermosphere winds // J. Geophys. Res. V. 108. № A11. P. 1403. 2003. https://doi.org/10.1029/2003JA010015

− Apostolov E.M., Altadill D. Ten periodic bands of foF2 quasi-periodic oscillations from 2 to 35 days // Bulg. Geophys. J. V. 21. № 3. P. 20–24. 1996.

- Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Ratovsky K.G. Meteorological effects of ionospheric disturbances over Irkutsk according to vertical radio sounding data // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 136. P. 235–243. 2015.

https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.07.006

- Danilov A.D., Kazimirovsky E.S., Vergasova G.V. et al. The meteorological effects in the ionosphere. Leningrad: Hydrometeorological Press, 270 p. 1987.

– Farge M. Wavelet transforms and their applications to turbulence // Annu. Rev. Fluid Mech. V. 24. № 1. P. 395–458. 1992.

- Goncharenko L., Zhang S.-R. Ionospheric signatures of sudden stratospheric warming: Ion temperature at middle latitude // Geophys. Res. Lett. V. 35. № L21103. P. 1–4. 2008.

https://doi.org/10.1029/2008GL035684

- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R.E. et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // B. Am. Meteorol. Soc. V. 77. N_{2} 3. P. 437–472. 1996.

− Korenkova N.A., Leschenko V.S., Cherniak Iu.V. et al. Coupling between parameters of Es layer and planetary waves during SSW 2008, 2010 // Adv. Space Res. V. 56. \mathbb{N} 9 9. P. 1886–1894. 2015.

https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.07.031

– Laštovička J., Križan P., Šauli P. et al. Persistence of the planetary wave type oscillations in f0F2 over Europe // Ann. Geophysicae.V. 21. № 7. P. 1543–1552. 2003.

- Liu H.-L., Wang W., Richmond A.D. et al. Ionospheric variability due to planetary waves and tides for solar minimum conditions // J. Geophys. Res. V. 115. № A00G01. P. 1–13. 2010.

https://doi.org/10.1029/2009JA015188

- Mikhailov A., Vanina L., Danilov A. Relation between the parameters of the ionospheric F2 region and the stratosphere // Geomagn. Aeronomy. V. 38. \mathbb{N} 1. P. 121–125. 1998.

- Palmeiro F.M., Barriopedro D., García-Herrera R., Calvo N. Comparing sudden stratospheric warming definitions in re-

analysis data // J. Climate. V. 28. № 17. P. 6823–6840. 2015.

– Pancheva D., Mukhtarov P. Stratospheric warmings: The atmosphere–ionosphere coupling paradigm // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 73. № 13. P. 1697–1702. 2011.

- Pancheva D., Samardjiev T. Simultaneous quasi-periodical fluctuations observed in the mesosphere neutral wind and the lower and upper ionosphere // Bulg.Geophys. J. V. 18. N_{2} 2. P. 3–12. 1992.

- Shpynev B.G., Kurkin V., Ratovsky K., Chernigovskaya M. et al. High-midlatitude ionosphere response to major stratospheric warming // Earth Planets Space. V. 67. № 1. P. 18–28. 2015.

https://doi.org/10.1186/s40623-015-0187-1

– Vanina L., Danilov A. The relation of the F2 region to stratospheric parameters: a comparison of Gorky and Kaliningrad data //Geomagn. Aeronomy. V. 43. No 2. P. 206–210. 2003.

– *Yiğit E., Medvedev A.S.* Gravity waves in the thermosphere during a sudden stratospheric warming // Geophys. Res. Lett. V. 39. № 21. P. 2–7. 2012.