

УДК 551.510:523

## СВЯЗЬ ВАРИАЦИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ С МАГНИТНЫМИ $PC$ ИНДЕКСАМИ

© 2012 г. В. Я. Вовк, Л. В. Егорова

ГУ “Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт”, г. Санкт-Петербург  
e-mail: eglar@aari.nw.ru

Поступила в редакцию 13.09.2010 г.  
После доработки 08.04.2011 г.

При совместном анализе данных вертикального зондирования ионосферы арктической ст. о-в Хейса, антарктической ст. “Восток” и геомагнитного индекса  $PC$ , характеризующего геоэффективную составляющую межпланетного магнитного поля, показано, что в возмущенный геомагнитный период, когда  $PC > 2$  в годы максимума солнечной активности (СА) в зимний сезон наблюдаются, преимущественно, положительные фазы ионосферных возмущений. В ночные часы может происходить увеличение критических частот  $foF2$  в 2–3 раза. В возмущенный геомагнитный период при уровне  $PC > 1.5$  в летний сезон наблюдаются, главным образом, отрицательные фазы ионосферных возмущений. В годы максимальной и умеренной СА уменьшение  $foF2$  по сравнению с их медианными значениями составляет в ночное время ~30%. В годы низкой СА величина уменьшения значительно слабее. При значительном понижении уровня  $PC$  индекса в районе геомагнитного полюса на ст. “Восток”, в отдельных случаях, происходит заметное увеличение уровня электронной плотности в  $F$ -области с запаздыванием в 0.5 ч, при этом между вариациями  $PC$  индекса и  $foF2$  наблюдается значимая корреляционная связь ( $r = -0.57$ ).

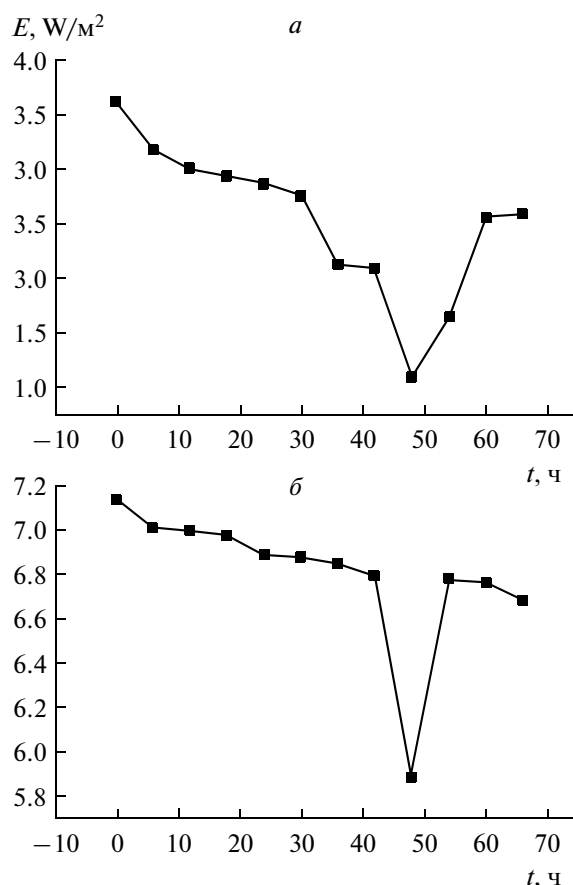
### 1. ВВЕДЕНИЕ

На процесс ионизации в верхней атмосфере большое влияние оказывает волновая радиация Солнца в широком диапазоне длин волн. Излучение на длине волны  $L = 121$  нм, например, влияет на ионизацию в  $D$ -области ионосферы. Считается, что ионизация спокойной области  $E$  создается рентгеновским излучением в диапазоне  $L = 10–100$  нм. Источником ионизации  $F$ -области считается излучение с длиной волн в единицы нм, а также в 20–35 нм. Рентгеновское излучение подвержено значительным вариациям во времени, что влияет на изменение уровня электронной концентрации в ионосфере [Дэвис, 1973].

На рисунке 1, в качестве примера, приведены вариации уровня рентгеновского излучения 25–27 апреля 2004 г. для длины волны  $L = 7$  нм (рис. 1а) и 11–13 сентября 2004 г. для  $L = 121$  нм (рис. 1б). Видно, что уровень рентгеновского излучения, влияющего на ионизацию  $F$ -области, за период менее 20-ти часов, начиная с 30-го часа, уменьшается в 2.5 раза, а затем снова возрастает в течение 10-ти часов, [http://lasp.colorado.edu./sorce/data/ssi.data.htm], 2006.

Вторым важным фактором, влияющим на уровень электронной концентрации в высокоширотной ионосфере, является энергия солнечного ветра и, связанные с ним, магнитно-ионосфер-

ные возмущения. Отрицательные фазы ионосферных возмущений, проявляющиеся в уменьшении электронной плотности в  $F$ -области ионосферы, а значит и уменьшении критических частот  $foF2$  при вертикальном зондировании (ВЗ), связывают с уменьшением нейтральной компоненты на высотах ионосферы. При этом уменьшается отношение  $O/N_2$ , которое в условиях фотохимического равновесия пропорционально концентрации электронов [Danilov, 2001]. Вопрос, касающийся положительных фаз возмущений и, соответственно, увеличения электронной концентрации относительно среднего уровня, проявляющегося в увеличении критических частот  $foF2$ , изучен недостаточно. В качестве возможных источников положительных возмущений вариаций электронной плотности предлагаются потоки электронов и протонов в области каспа, а также дрейф  $F$ -области под действием циркуляции. Отмечены различия вероятности проявления положительных возмущений в зависимости от сезона и широты наблюдения. В частности, на приполюсной ст. Резольют Бэй,  $\Phi_0 = 83.07^\circ$ , в зимний сезон вероятность появления положительной фазы ионосферного возмущения, сменяющейся отрицательной, в десять раз выше, чем в приэкваториальной области, ст. Уанкайю,  $\Phi_0 = -0.59^\circ$  [Данилов и Морозова, 1987].



**Рис. 1.** Вариации уровня рентгеновского излучения: *a* – для длины волны  $L = 7$  нм 25–27 апреля 2004 г.; *б* –  $L = 121$  нм, 11–13 сентября 2004 г.

В периоды магнитно-ионосферных возмущений методом наклонного обратного рассеяния (НОР) также наблюдаются перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ), которые являются ионосферным проявлением внутренних атмосферных гравитационных волн (АГВ) в атмосфере. Для крупномасштабных ПИВ характерны периоды 0.5–3 ч и горизонтальные скорости 400–1000 км/час. Среднемасштабные ПИВ имеют периоды 15–45 мин. Подобные возмущения при регистрации методом вертикального зондирования будут проявляться как изменения критической частоты  $F2$ -слоя [Благовещенская и др. 1997].

## 2. ОЦЕНКА УРОВНЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ В $F$ -ОБЛАСТИ СЕВЕРНОЙ И ЮЖНОЙ ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЫ В ЗИМНИЙ СЕЗОН ГОДА МАКСИМУМА СА

Для оценки вариаций электронной плотности  $F2$ -слоя в зависимости от изменения геомагнитной обстановки были взяты данные  $foF2$  на при-

полюсной ст. о-в Хейса ( $\Phi_0 = 80^\circ$ ) и южнополярной ст. “Восток” ( $\Phi_0 = 78^\circ$ ). Рассматривались данные ВЗ в годы максимальной – 1979 г, средней – 1978 г. и низкой – 1976 г. СА. Надо отметить, что точно снять критическую частоту  $foF2$  на ст. “Восток” часто затруднительно из-за наличия рассеяния, поэтому для оценки уровня электронной концентрации в  $F$ -области ионосферы была выбрана максимальная частота  $F$ -рассеяния, которую в дальнейшем будем обозначать  $fF2$ . На рисунке 2 приведены, в качестве примера, 15-минутные вариации частот  $fF2$  на ст. “Восток” (снизу) и соответствующие им 15-минутные изменения  $PC$  индекса, характеризующего геоэффективную часть межпланетного магнитного поля (ММП), [Janzhura et al., 2007] (сверху). Видно, что на рис. 2*a* и *б* кривые значений  $fF2$  и  $PC$  индекса изменяются в фазе, а на рис. 2*в* – в противофазе. Иными словами, изменению  $PC$  индекса может соответствовать как увеличение электронной плотности в ионосфере, так и ее уменьшение в зависимости от конкретных условий.

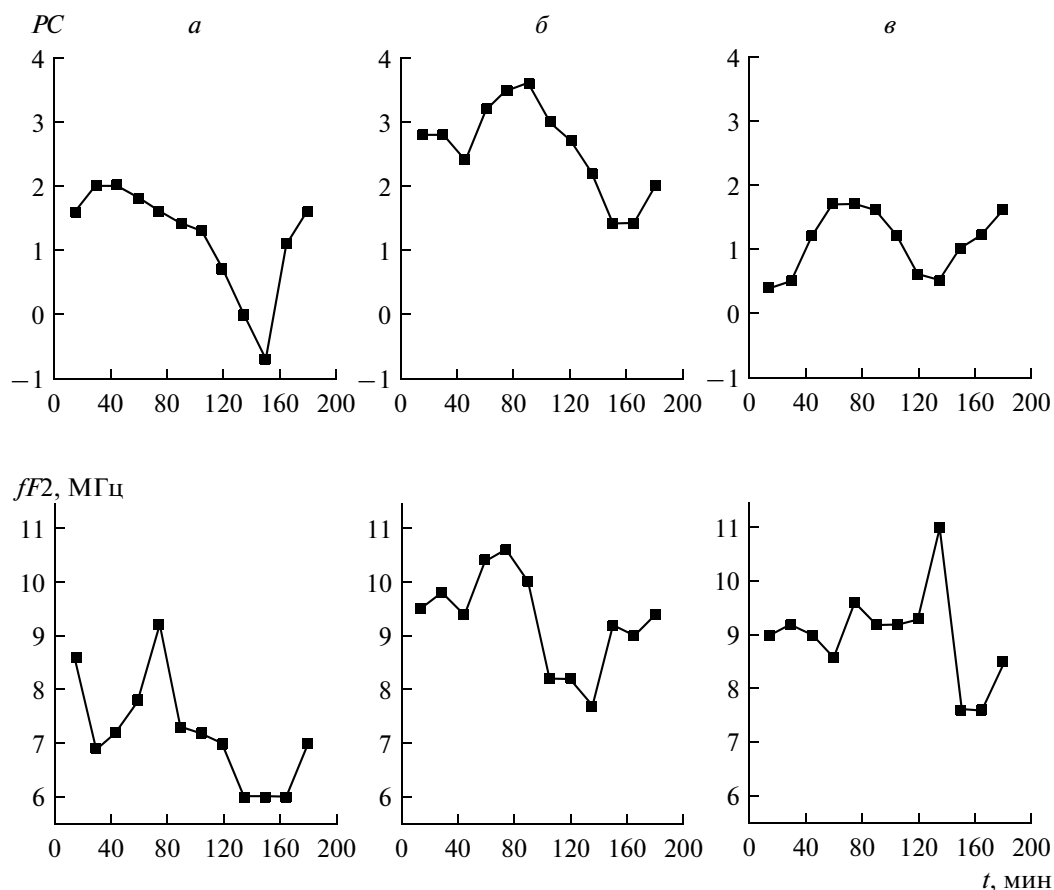
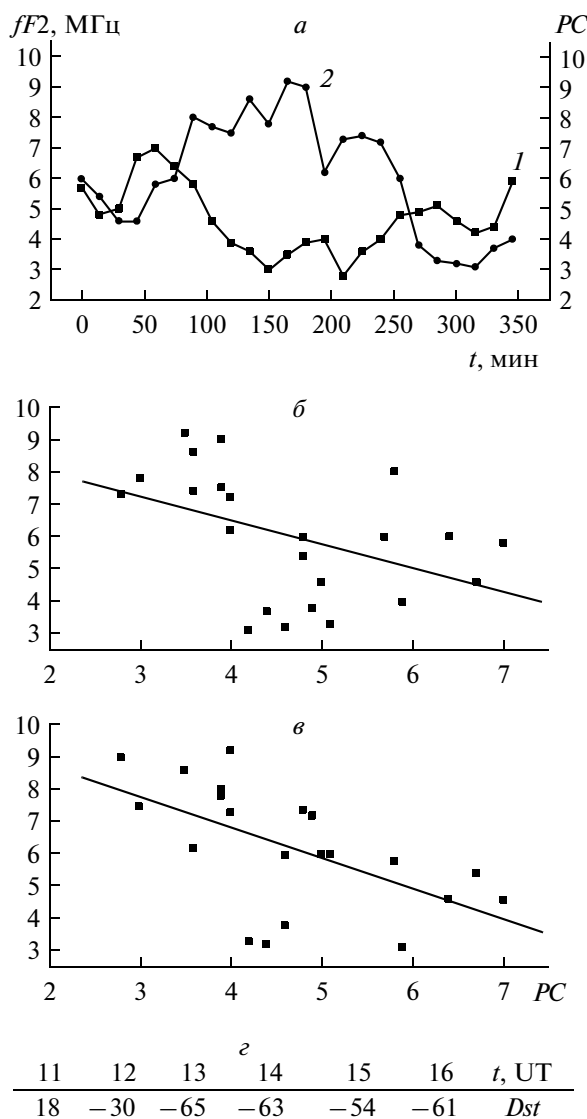


Рис. 2. Вариации 15-минутных значений  $PC$  индекса (сверху) и соответствующих им критических частот ВЗ  $foF2$  на ст. "Восток" (снизу):  $a$  – 12 LT 12.08;  $b$  – 02 LT 19.08;  $v$  – 09 LT 28.08.1979 г.

Для оценки корреляционной связи между вариациями  $PC$  индекса, и вариациями электронной концентрации в  $F$ -области ионосферы на ст. "Восток", были взяты данные за период магнитной бури, начавшейся 13.08.1979 г. в 13 ч UT, причем уровень максимума  $Dst$  индекса составил  $-65$ . На рисунке 3а приведены вариации  $PC$  индекса (кривая 1) и  $foF2$  (кривая 2) за 6 ч, на рис. 3б и в – регрессионные прямые зависимости между данными  $PC$  и  $foF2$ : 3б – для одномоментных измерений; 3в – когда измерения  $foF2$  запаздывают относительно  $PC$  на 0.5 ч. На рисунке 3г представлены соответствующие ежедневные значения  $Dst$  с 11 по 16 UT. Для одномоментных измерений коэффициент корреляции невысок,  $r = -0.43$ , а с учетом получасового запаздывания частот ВЗ относительно  $PC$  индекса получается значимый коэффициент корреляции,  $r = -0.57$ . В этом случае уменьшение  $PC$  индекса с 7 до 3 опережает увеличение критической частоты ВЗ с 4.5 до 9 МГц, а значит и рост электронной концентрации в  $F$ -области, на полчаса.

Для статистической оценки вариаций уровня электронной концентрации в возмущенный геомагнитный период ( $PC > 2$ ) и сравнения их со спокойным уровнем, когда  $PC < 1$ , были взяты ежечасные данные суточных вариаций  $foF2$  в зимний сезон (февраль 1979 г.) на о-ве Хейса, а также  $foF2$  в зимний сезон южнополярной ст. "Восток" – август 1979 г. На рисунке 4а приведен усредненный суточный ход ежечасных данных  $PC$  индекса с уровнем  $PC > 2$  для августа 1979 г. (сверху), а снизу – соответствующие им данные  $foF2$  (кривая 1), а также данные, соответствующие спокойному уровню (кривая 2) ст. "Восток". Видно, что в ночные часы 21-06 LT возмущенный уровень частот значительно превышает средний спокойный уровень. Максимальное различие 2.5 МГц наблюдается в 03 LT. В полуденные часы это различие заметно уменьшается. Возможно, это связано с различиями в характере высыпаний частиц в течение суток. Роль волновой радиации в период полярной ночи представляется менее значимой. На рисунке 4б приведен усредненный суточный ход  $PC$  индекса



**Рис. 3.** Ход вариаций  $PC$  индекса и максимальной частоты  $F$ -рассеяния  $fF2$  13.08.1979 г. на ст. Восток – *a*; кривые регрессионной зависимости между ними, одномоментные значения – *б*; при запаздывании  $fF2$  на 0.5 ч – *в*; ежечасные значения  $Dst$  за период с 11 до 16 UT – *г*.

(сверху) и соответствующий ход  $foF2$  (кривая 1) в возмущенный период февраля 1979 г., а также февральская медиана (кривая 2) для северного полушария (снизу). В целом, средний возмущенный уровень в феврале превышает величину  $PC = 2.5$ . Характер суточных вариаций частот ВЗ на приполюсной ст. о-в Хейса сильно отличается от вариаций южнополярной ст. “Восток” в соответствующий зимний сезон. На о-ве Хейса так же, как и в южном полушарии, наблюдаются положительные ионосферные возмущения, но они значительно больше по амплитуде. В 10 ч возмущенный уровень критических частот  $foF2$  в три раза выше невозмущенного, а это значит, что уровень электронной плотности, пропорциональ-

ный квадрату частоты, более чем в 9 раз превышает спокойный уровень. Возможно, что это вызвано мощными высыпаниями электронов и протонов широкого спектра энергий в область полярного каспа с последующим разогревом атмосферы и изменением ветровых характеристик, [http://lasp.colorado.edu./sorce/data/ssi.data.htm], 2006. Связь повышенного уровня геомагнитной активности по данным  $PC$  индекса с уровнем критических частот ВЗ в области полярной шапки может быть применена для диагностики характеристик полярной ионосферы с использованием учащенных наблюдений ВЗ и соответствующих им данных  $PC$  индекса.

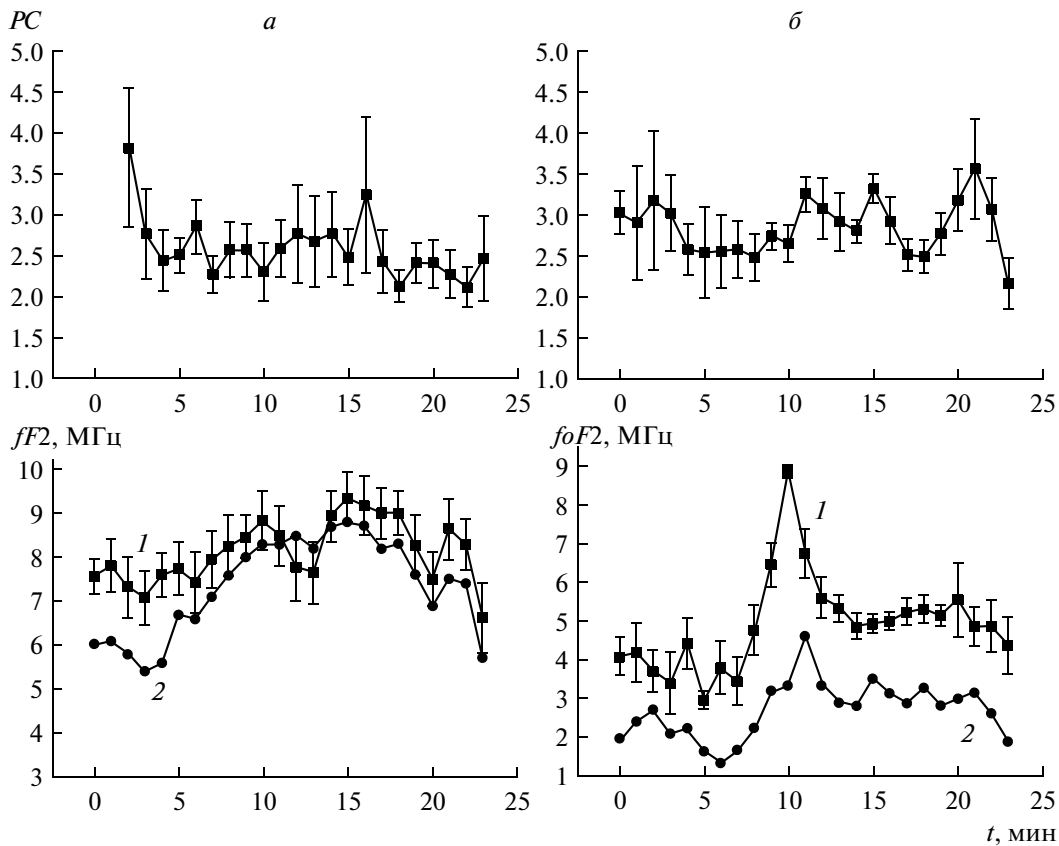
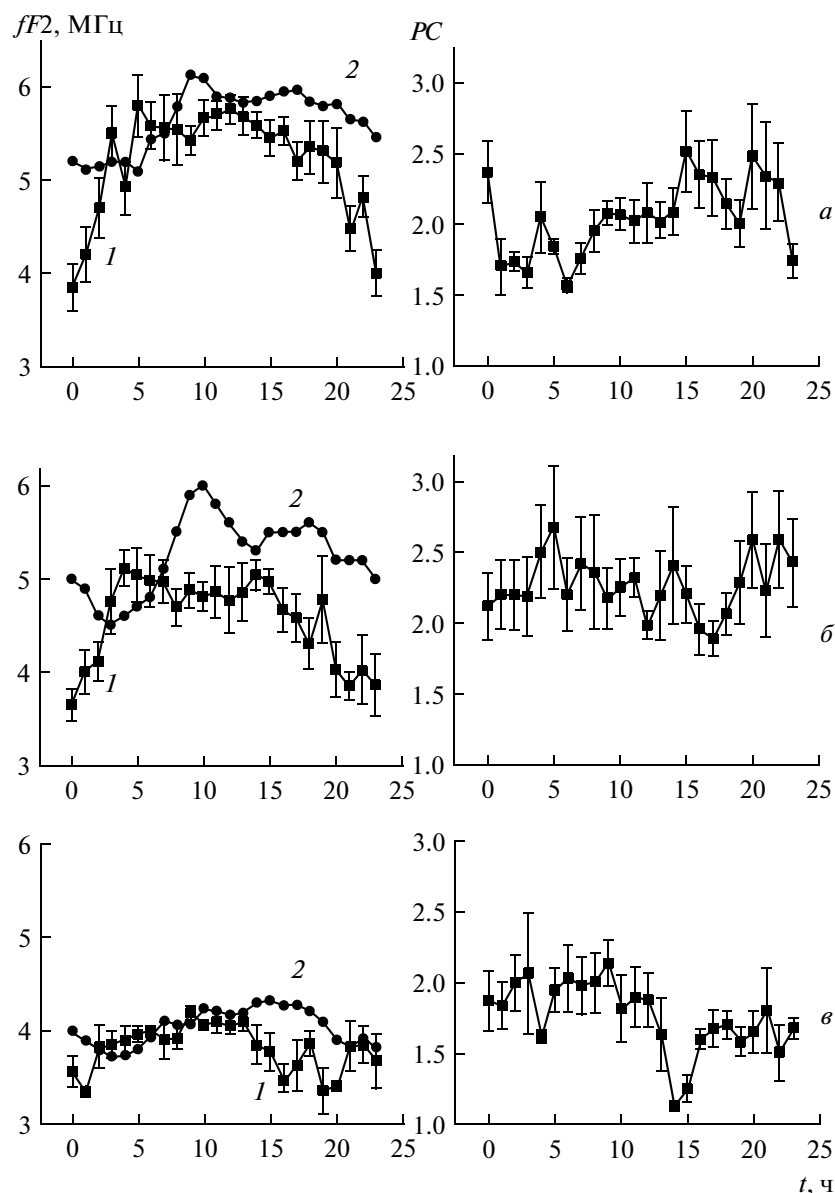


Рис. 4. Усредненный суточный ход значений  $PC$  индекса для возмущенного уровня  $PC > 2$  — сверху и соответствующих критических частот  $foF2$  (кривая 1) и их медиан (кривая 2) — снизу:  $a$  — в августе 1979 г. на ст. “Восток”;  $б$  — в феврале 1979 г. на о-ве Хейса.

### 3. ОЦЕНКА ЗНАЧЕНИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ ОБЛАСТИ $F$ ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЫ ЛЕТНЕГО СЕЗОНА В ГОДЫ РАЗНОГО УРОВНЯ СА

Для оценки уровня электронной концентрации  $F$ -области в спокойный и возмущенный периоды геомагнитной активности летнего сезона были выбраны данные ВЗ ст. о-в Хейса для трех уровней СА:  $W = 2$ , (июль 1976 г.),  $W = 60$ , (август 1978 г.),  $W = 150$ , (июнь 1979 г.). На рисунке 5 слева приведены усредненные значения частот  $foF2$  суточного хода для трех вышеуказанных уровней СА, для событий, при которых  $PC > 1.5$  (кривая 1), и медианные значения, соответствующие спокойному уровню  $PC < 1$ , (кривая 2). В качестве критерия возмущенных условий использовались данные уровня  $PC > 1.5$ . Критерий был снижен по сравнению с зимним периодом года высокой СА потому, что при низкой СА недостаточно данных ВЗ при  $PC > 2$ . Справа на рис. 5 приведены соответствующие кривые суточного хода  $PC$ . Видно, что в год максимума СА,  $W = 150$ , спокойный уровень  $foF2$  на 45% выше (рис. 5а), чем в год минимума  $W = 2$  (рис. 5б), когда вариации частот в

суточном ходе незначительны и составляют 3.7–4.3 МГц. Уровень освещенности по-разному влияет на процесс ионизации в спокойный геомагнитный период при разных градациях СА. При всех уровнях СА наблюдается различное понижение электронной плотности в разные часы суток возмущенного периода относительно медианы. Наибольшая разница между уровнем  $foF2$  и медианой наблюдается при средней СА, она равна, приблизительно, 1.5 МГц почти все сутки, за исключением утренних часов 03–07 LT, рис. 5б, слева. При высокой СА наибольшее отличие наблюдается ночью в 21–02 LT и составляет также 1.5 МГц, рис. 5а. В год низкой СА вариации  $foF2$  лежат в пределах 3.2–4.1 МГц, это несколько ниже, чем в спокойный период, в послеполуденное время 14–21 LT это отличие достигает 0.6 МГц. Выявленное понижение электронной плотности области  $F$  в возмущенный геомагнитный период согласуется с данными работы [Данилов и Морозова, 1987], где показано, что летом на приполюсной ст. Резольют–Бэй число ионосферных возмущений с положительной фазой уменьшается на порядок по сравнению с зимним сезоном.



**Рис. 5.** Усредненный суточный ход критических частот  $foF2$  (кривая 1) и его медианных значений (кривая 2) на о-ве Хейса — слева и соответствующий ход возмущенного уровня  $PC > 1.5$  — справа для трех градаций солнечной активности: а — июнь 1979 г.,  $W = 150$ ; б — август 1978 г.,  $W = 60$ ; в — июль 1976 г.,  $W = 2$ .

#### 4. ВЫВОДЫ

Анализ 15-минутных данных ВЗ показал, что в периоды геомагнитных возмущений усилению вариаций уровня  $PC$  индекса соответствуют значимые изменения электронной плотности в  $F$ -области полярной ионосферы, что проявляется в усилении вариаций критических частот  $foF2$  на ст. "Восток". Изменение уровня электронной плотности в  $F$ -области в связи с понижением уровня  $PC$  индекса происходит с запаздыванием в 0.5 ч, при этом между вариациями  $PC$  индекса и  $foF2$  наблюдается значимая корреляционная связь ( $r = -0.57$ ).

В возмущенный геомагнитный период ( $PC > 2$ ) года максимума СА на высокоширотных станциях "Восток" и о-в Хейса в зимний сезон наблюдаются преимущественно положительные фазы ионосферных возмущений. В ночные часы может происходить увеличение критических частот в 2–3 раза.

В возмущенный геомагнитный период при уровне  $PC > 1.5$  в летний сезон в высокоширотной ионосфере по усредненным данным наблюдаются, главным образом, отрицательные фазы ионосферных возмущений. В год максимума СА уменьшение критических частот  $foF2$  в ночные

часы составляет, в среднем, 30%, в полуденные — ~7% относительно медианы. В годы умеренной СА это уменьшение составляет ~30% в течение всех суток, за исключением утренних часов. При низкой СА величина уменьшения  $foF2$  утром и днем не превышает 5, вечером — 15%.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Благовещенская Н.Ф., Вовк В.Я., Корниенко В.А., Москвин И.В. Волновые процессы в высокоширотной ионосфере по данным комплекса радиофизических наблюдений // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 37. № 5. С. 70–78. 1997.
- Данилов А.Д., Морозова Л.Д. Ионосферные бури. Морфология, физика, прогноз // Ионосферно-магнитная служба/ Ред. С.И. Авдюшин, А.Д. Данилов. Л.: Гидрометеоиздат. 244 с. 1987.
- Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир. 502 с. 1973.
- Danilov A.D. F2- region response to geomagnetic disturbances //J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 63. № 2. P. 441–449. 2001.
- <http://lasp.colorado.edu,/sorce/data/ssi.data,htm>. 2006.
- Janzhura A., Troshichev O., Stauning P. Unified PC indices: Relation to the isolated substorms // J. Geophys. Res. V. 112. A09207. doi:10.1029/2006JA012132. 2007.