

УДК 550.388.2

## ВЫЯВЛЕНИЕ КЛАССОВ ИОНОСФЕРНОЙ ВОЗМУЩЕННОСТИ ПО МНОГОЛЕТНИМ ДАННЫМ О КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЕ СЛОЯ $F_2$

© 2012 г. Н. А. Бархатов<sup>1</sup>, О. М. Бархатова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Нижегородский государственный педагогический университет, г. Н. Новгород

<sup>2</sup>Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, г. Н. Новгород

e-mail: nbarkhatov@inbox.ru

Поступила в редакцию 28.12.2010 г.

После доработки 08.04.2011 г.

Разработаны основы методики классификации ионосферной возмущенности, вызванной солнечно-геомагнитной активностью, по данным о критической частоте слоя  $F_2$ . Для исследования вариаций критической частоты ионосферного слоя  $F_2$  были использованы данные за полный цикл солнечной активности с 1975 по 1986 гг. Критическая частота измерялась на ионосферной обсерватории Москва ( $55^{\circ}45' N$ ,  $37^{\circ}37' E$ ) с интервалом в 1 ч. Пропуски значений критической частоты заполнялись методом кубической интерполяции. Уровень солнечной активности оценивался по значениям индекса  $F10.7$ . Геомагнитная возмущенность определялась по индексам  $Kp \times 10$ ,  $Dst$  и  $AE$ . Согласно созданной классификации введен индекс ионосферной активности. Анализ полученных значений индекса для года минимума и максимума солнечной активности показывает, что увеличение абсолютных значений индекса происходит, как правило, при возрастании глобальной геомагнитной и/или авроральной возмущенности. Это свидетельствует о достаточной информативности разработанного индекса для характеристики ионосферной активности любого сезона. Кроме того, по знаку индекса можно судить о понижении или повышении концентрации ионосферного слоя  $F_2$ , поскольку значения рассматриваемого индекса соответствуют реальным колебаниям критической частоты среднеширотной ионосферы.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование ионосферной возмущенности в зависимости от уровня гелиогеофизической активности является одной из современных задач геофизики. Одним из эффективных параметров для диагностики состояния ионосферы являются критические частоты, поскольку в них содержится информация о концентрации электронов и ионов в слоях ионосферы. Наряду с критической частотой также часто используются и другие ионосферные параметры, на основе анализа которых проводится изучение как долгопериодных вариаций ионосферы, определяемых в основном циклом солнечной активности [Laštovička et al., 2008; Danilov, 2008], так и ионосферных возмущений, связанных с солнечной и геомагнитной активностью [Liu et al., 2007; Mikhailov et al., 2007].

Среди исследований, в которых анализируется поведение критических частот в различных условиях солнечной и магнитосферной активности, следует выделить работы по классификации ионосферной возмущенности и созданию индексов ионосферной погоды [Kutiev and Muchtarov, 2001; Bremer et al., 2006; Gulyaeva et al., 2008]. Эта проблема является наиболее актуальной, поскольку создание универсального индекса характеристики ионосферной возмущенности позволяет осуществлять оперативный контроль и про-

гноз состояния ионосферы в изменяющихся гелиогеофизических условиях.

В настоящей работе проводится анализ критической частоты ионосферного слоя  $F_2$  над ст. Москва в год минимума (1975 г.) и максимума (1982 г.) солнечной активности. Основной целью исследования является создание методики классификации ионосферной возмущенности средних широт и последующая разработка индекса ионосферной активности на основе установленных классов. Преимущество предлагаемого метода заключается в использовании данных “очищенных” критических частот, которые включают в себя только возмущения ионосферы, и не содержат ее долгопериодных вариаций (годовой ход, сезонный ход, вариации, связанные с коротацией Солнца и т.д.). Также из рассмотрения исключается суточный ход критической частоты. Однако в предлагаемой классификации учитывается уровень ионосферной возмущенности, связанный с годом цикла солнечной активности и с глобальной геомагнитной возмущенностью. В этой связи представленные классы можно считать универсальными.

Полученный на основе проведенной классификации индекс ионосферной активности учитывает положительные и отрицательные возмущения в ионосфере. Сопоставление значений индекса с глобальной геомагнитной возмущенностью,

характеризуемой индексом  $Dst$  и авроральной возмущенностью, характеризуемой индексом  $AE$  показывает хорошую согласованность. Таким образом, предложенный в данной работе индекс ионосферной активности средних широт может быть использован для определения состояния ионосферы и осуществления прогноза ионосферной возмущенности.

## 2. ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ И ИХ ОБРАБОТКА

Исследование вариаций критической частоты ионосферного слоя  $F2$  было проведено на данных за полный цикл солнечной активности с 1975 по 1986 гг. полученных на ионосферной ст. Москва ( $55^{\circ}45' N$ ,  $37^{\circ}37' E$ ) с интервалом в 1 ч. Пропуски значений критической частоты были заполнены методом кубической интерполяции. Для определения уровня солнечной активности использовался индекс  $F10.7$ . Уровень геомагнитной возмущенности определялся по индексам  $Kp \cdot 10$ ,  $Dst$  и  $AE$  с временным разрешением 1 ч. Индекс  $Kp \cdot 10$  представляет собой модифицированный индекс  $Kp$ , в котором стандартным значениям 0, 0+, 1-, 1, 1+, ..., 9-, 9 соответствуют значения 0, 3, 7, 10, 13, ... 87, 90.

Для выявления ионосферной возмущенности, не связанной непосредственно с сезонными и суточными вариациями, выполнялась очистка исходных данных по критической частоте. Для этого была разработана методика обработки критических частот, основанная на спектральном анализе и преобразовании Фурье. Анализ проводился для временных интервалов длиной в месяц.

На первом этапе очистки были построены спектры критических частот на основе быстрого преобразования Фурье. На рисунке 1 представлены примеры таких спектров для января, марта, июня и сентября 1972 и 1982 г., которые являются годом минимума и годом максимума солнечной активности, соответственно.

Полученные спектры независимо от сезона и года геомагнитной активности содержат характерные частотные пики, которые соответствуют гармоническим составляющим с периодами 24 и 12 ч. Такие спектральные составляющие отвечают суточному ходу критической частоты. Кроме того, на этих спектрах присутствуют и долгопериодные вариации — годовые, сезонные, а также вариации, связанные с коротацией Солнца и т.д. Такие вариации не имеют отношения к анализируемой в работе ионосферной возмущенности, вызванной солнечно-геомагнитной активностью.

Поэтому на втором этапе из сигнала критической частоты было произведено удаление ряда гармоник с периодами 24 и 12 ч и с периодами более 24 ч. Для этого было произведено разложение исходного сигнала на спектральные составляющие с использованием метода гармонического анализа, подробно описанного в книге [Янов-

ский, 1978, с. 389–393]. На рисунке 2 приведены примеры первых двух спектральных составляющих критических частот, полученных на основе указанного метода.

На заключительном этапе очистки производилась свертка сигнала — суммирование оставшихся гармоник. В результате были получены новые “очищенные” значения критической частоты (ОКЧ), которая содержит в себе только вариации, связанные непосредственно с существованием ионосферной возмущенности. На рисунке 3 представлены спектры таких ОКЧ для января, марта, июня и сентября 1972 и 1982 гг.

## 3. СВЯЗЬ ИОНОСФЕРНОЙ ВОЗМУЩЕННОСТИ С СОЛНЕЧНО-ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТЬЮ

Анализ полученных значений ОКЧ (рис. 4) для каждого месяца показал, что их вариации, связанные с ионосферной возмущенностью, колеблются около конкретного среднемесячного значения. Величина среднемесячного значения зависит от сезона и цикла солнечной активности. На рисунке 4 представлены изменения среднемесячных значений ОКЧ и соответствующие им изменения среднемесячных значений индекса  $Kp \times 10$ ,  $Dst$  и  $F10.7$  для года минимума (1975 г.) и года максимума (1982 г.) солнечной активности. На рисунке также показаны коэффициенты корреляций последовательности среднемесячных значений ОКЧ с последовательностями  $Kp \times 10$ ,  $Dst$  и  $F10.7$ .

Согласно полученным результатам, сезонный ход ОКЧ, представленный вариациями среднемесячных значений, имеет в год минимума солнечной активности высокую корреляцию с геомагнитной активностью. Коэффициент линейной корреляции между годовыми вариациями среднемесячных значений ОКЧ и индекса  $Dst$  составляет 0.6, а между ОКЧ и индексом  $Kp \times 10$  коэффициент линейной корреляции равен  $-0.65$ . Отметим, что коэффициент корреляции ОКЧ с индексом интенсивности радиоизлучения Солнца заметно ниже — его величина равна 0.35. Это может означать, что сезонные вариации ионосферы средних широт в год минимума солнечной активности в основном определяются уровнем геомагнитной активности, а не непосредственным влиянием солнечного излучения. В год максимума солнечной активности наблюдается отсутствие линейной корреляции сезонного хода ОКЧ как с геомагнитной активностью, так и с радиоизлучением Солнца. Это может свидетельствовать о нерегулярности ионосферных процессов в указанный период. В год максимума солнечной активности возрастает частота выбросов излучения различных типов и вещества с поверхности Солнца. Суммарный эффект от подобной активности может привести к повышенной иони-

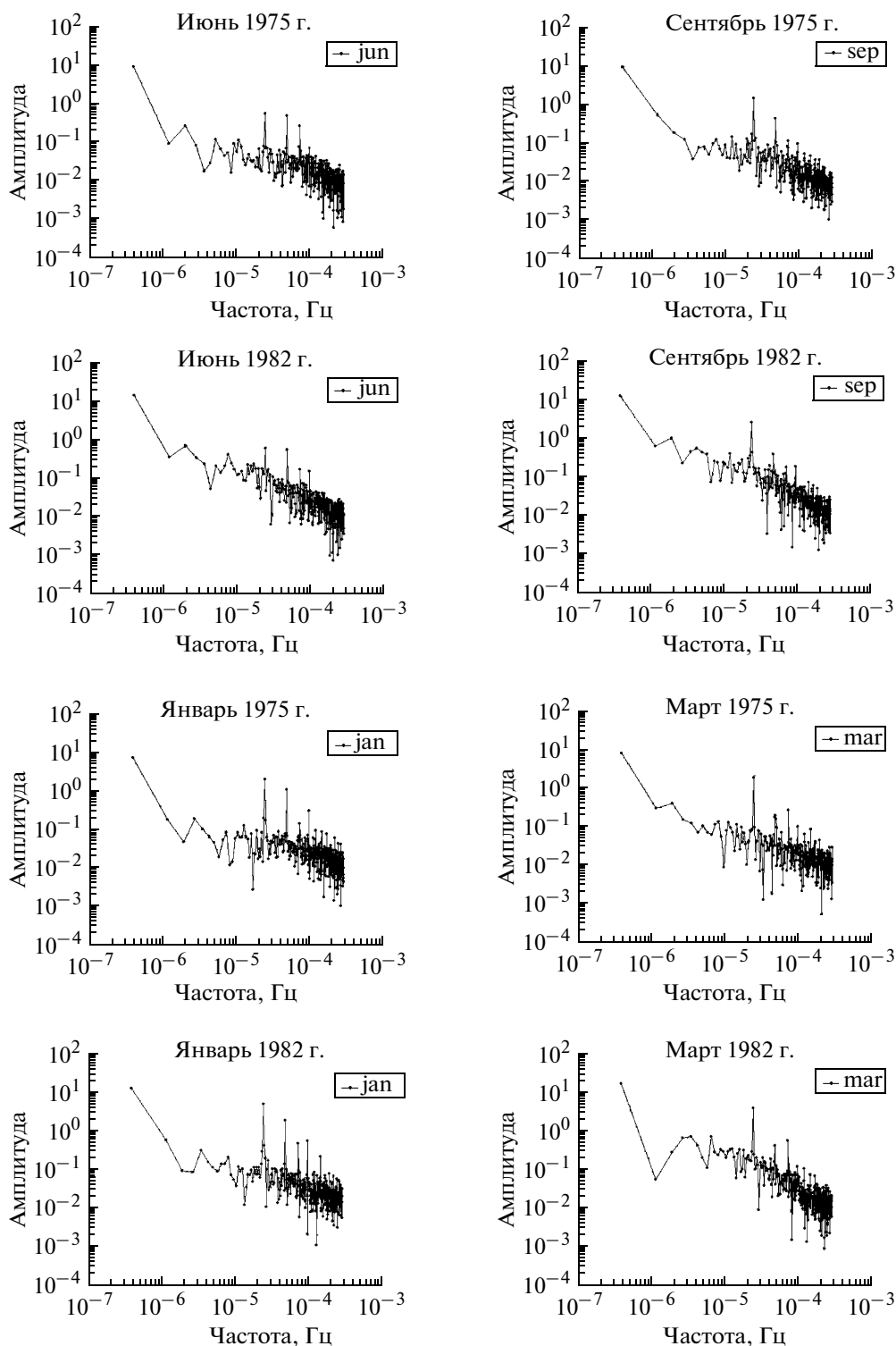


Рис. 1. Примеры спектров критических частот на ст. Москва для января, марта, июня и сентября 1975 и 1982 гг.

зации ионосферы средних широт на протяжении всего периода. Это отражается на уровне среднемесячных значений, которые в год максимума значительно выше по сравнению с годом минимума солнечной активности. В то же время утра-

чивается непосредственная связь сезонных вариаций ОКЧ с геомагнитной возмущенностью.

Разработка объективной оценки ионосферной возмущенности, вызванной солнечно-геомагнитной активностью, требует приведения значе-

ний ОКЧ к общему уровню. Для этого было выполнено вычитание из значений ОКЧ их среднемесячных величин. Такая операция не влияет на амплитуду вариаций полученных критических частот, однако позволяет получить общий нулевой уровень, не зависящий от сезона и года солнечной активности, от которого происходят отклонения. На рисунке 5 показаны примеры вариаций ОКЧ для марта, июня и сентября 1982 г.: левая панель – вычисленные значения ОКЧ, правая панель – приведенные значения ОКЧ. Для дальнейшего изучения будут использоваться только приведенные вариации ОКЧ.

При сопоставлении приведенных ОКЧ с индексами  $F10.7$  и  $Kp \cdot 10$ , которые характеризуют уровень солнечной и геомагнитной активности в рассматриваемом месяце, было обнаружено, что в большинстве рассматриваемых случаев вариации ОКЧ имеют характерные скачки при возрастании индекса  $Kp \cdot 10$ . Это свидетельствует о наличии связи между полученными вариациями и геомагнитной возмущенностью. Также было обнаружено, что в годы максимума солнечной активности амплитуда вариаций ОКЧ заметно возрастает, что свидетельствует о значительном влиянии солнечного излучения на вариации. На рисунке 6 представлены примеры возрастания амплитуд ОКЧ при увеличении значений индекса  $Kp \cdot 10$  для февраля 1975 г. и апреля 1982 г. Стрелками отмечены скачки в вариациях ОКЧ и соответствующие им скачки индекса  $Kp \cdot 10$ .

Сопоставление скачков ОКЧ и  $Kp \cdot 10$  для всех сезонов и периодов цикла солнечной активности дает сходные результаты, что свидетельствует о наличии связи между полученными вариациями и геомагнитной активностью, которая заметно возрастает в годы максимума солнечной активности. Обнаруженная связь вариаций ионосферного и магнитосферного параметров является следствием реакции среднеширотной ионосферы на глобальное геомагнитное возмущение. Наличие такой реакции может быть вызвано прохождением в ионосфере акустико- и магнитогравитационных волн различных типов, которые генерируются интенсивными токовыми системами в магнитосфере и высокоширотной ионосфере.

Другая отмечаемая характерная особенность – это общее увеличение амплитуд ОКЧ в годы максимума солнечной активности. Это может объясняться увеличением частоты возникновения активных процессов на Солнце в эти годы, что приводит к поглощению ионосферой большего количества ионизирующего излучения. В этом случае ионосфера становится сильно ионизованной, особенно в дневные часы, и с большей чувствительностью реагирует на любые внешние возмущения.

Таким образом, изучение вариаций ОКЧ может дать достаточно полную картину состояния ионосферы в зависимости от уровня солнечной активности и глобальной геомагнитной возму-

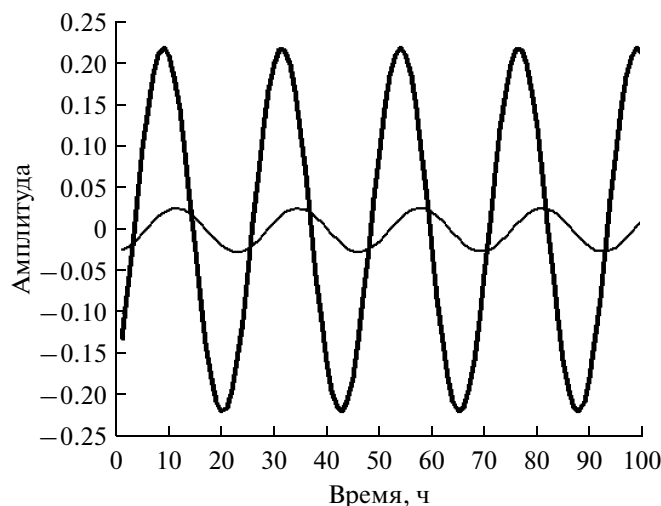


Рис. 2. Примеры первых двух гармоник, полученных на основе метода гармонического анализа.

щенности. Согласно полученным результатам, состояние ионосферы характеризуется непосредственно амплитудами отклонений ОКЧ от нулевого среднего уровня. Однако использовать такие вариации для проведения анализа достаточно сложно, поскольку они имеют малые периоды и сильно зашумлены фоновыми значениями.

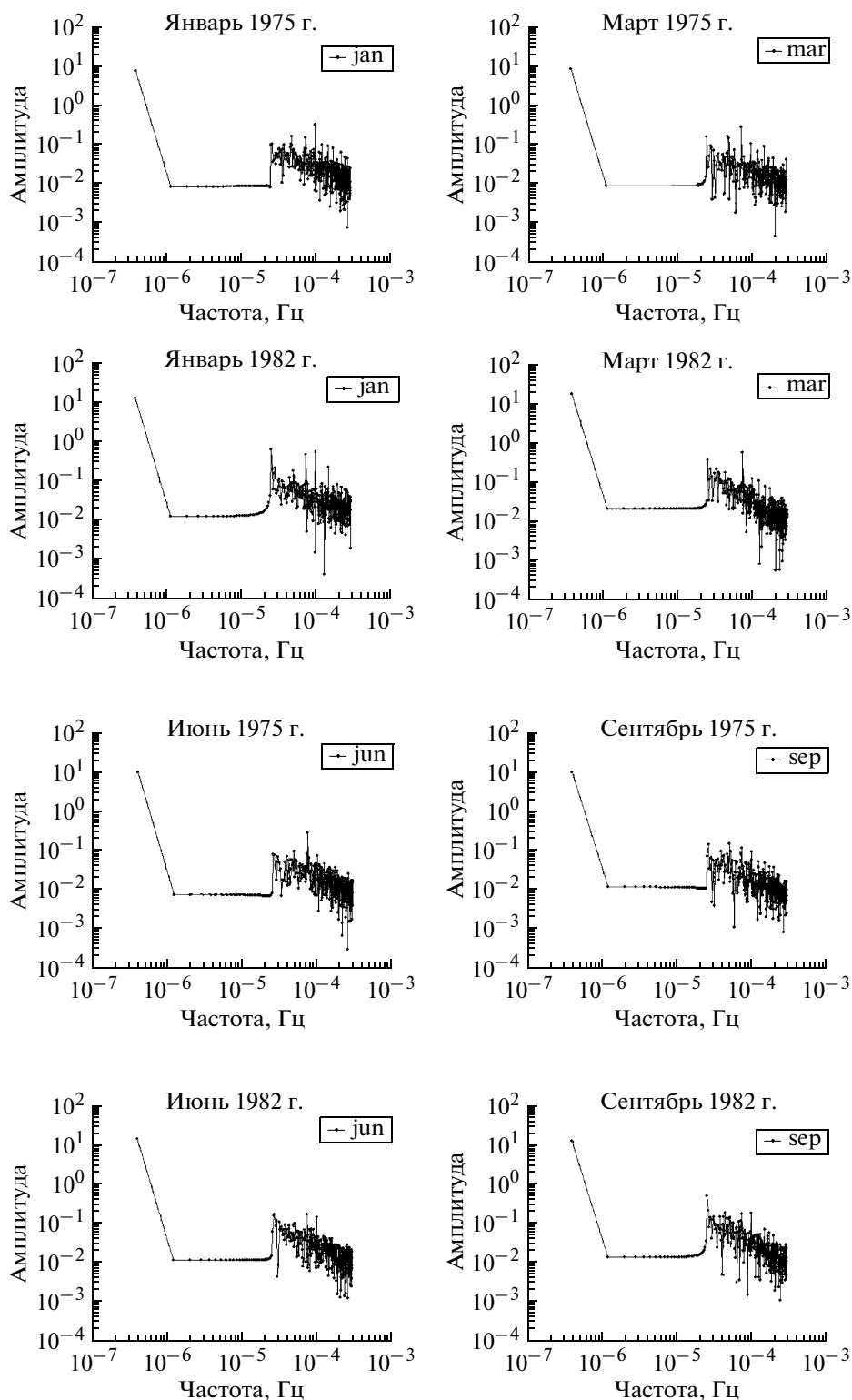
#### 4. РАЗРАБОТКА ИНДЕКСА ИОНОСФЕРНОЙ АКТИВНОСТИ

Для характеристики ионосферной возмущенности, связанной с непосредственным влиянием солнечной и геомагнитной активности, разработан индекс ионосферной активности IAI на основе вариаций ОКЧ.

На первом этапе разработки индекса, было проведено изучение среднемесячных отклонений приведенных ОКЧ в годы минимума и максимума солнечной активности с учетом значений индекса  $Dst$ . Оно позволило выявить основные классы возмущенности ионосферы.

**Первый класс возмущенности.** Этот класс соответствует спокойному состоянию ионосферы. В год минимума солнечной активности (1975 г.) для каждого месяца рассматривались международные невозмущенные дни, в пределах которых значения индекса  $Kp$  были около нуля ( $Q$ -days). В каждом месяце таких дней выделено 5 [http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/qddays/index.html]. В этот период среднее положительное и отрицательное отклонение ОКЧ от нулевого уровня составляло 0.75 и  $-0.7$  Гц, соответственно. Минимальное значение индекса  $Dst$  в рассматриваемые 60 невозмущенных дней года минимума солнечной активности составляло  $-25$  нТл.

**Второй класс возмущенности.** Этот класс соответствует состоянию ионосферы с малой возмущенностью. В годы минимума солнечной актив-



**Рис. 3.** Примеры спектров “очищенных” критических частот на ст. Москва для января, марта, июня и сентября 1975 и 1982 гг.

ности рассматривались международные возмущенные дни (*D*-days). Средние положительные и отрицательные отклонения от нулевого уровня ОКЧ в эти дни составляют 0.8 и  $-0.75$  Гц, соответ-

ственно. Минимальное значение индекса *Dst* в исследуемые возмущенные дни составляет  $-110$  нТл.

**Третий класс возмущенности.** Этот класс соответствует повышенной возмущенности ионосферы

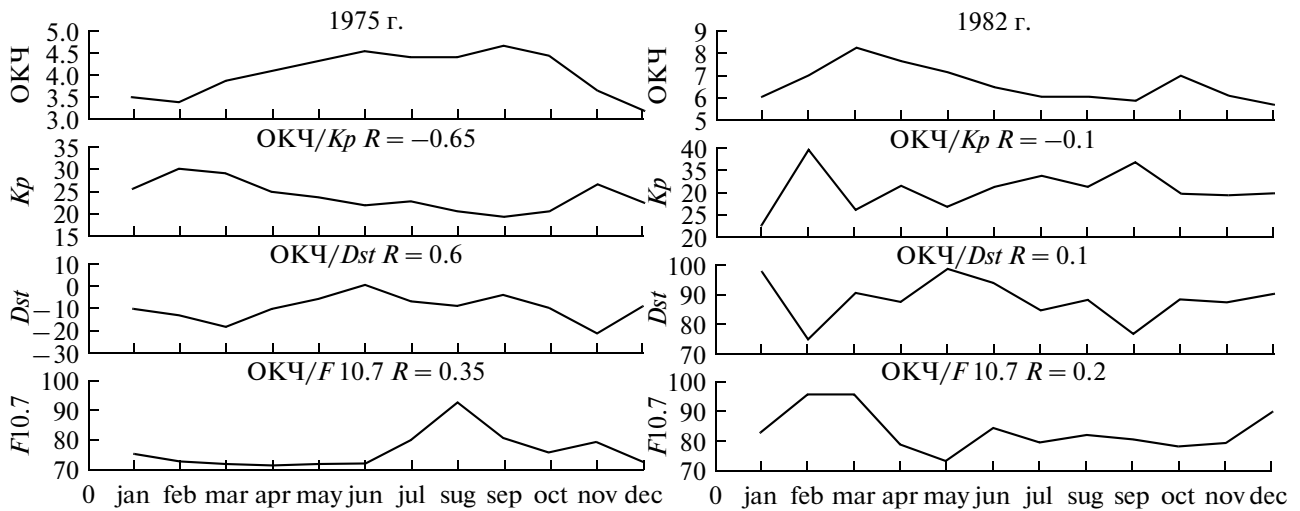


Рис. 4. Изменения среднемесячных значений ОКЧ и индексов  $Kp \cdot 10$ ,  $Dst$  и  $F10.7$  в течение 1975 и 1982 гг. Над тремя нижними панелями показаны коэффициенты корреляции последовательности среднемесячных значений ОКЧ с каждым из рассматриваемых индексов.

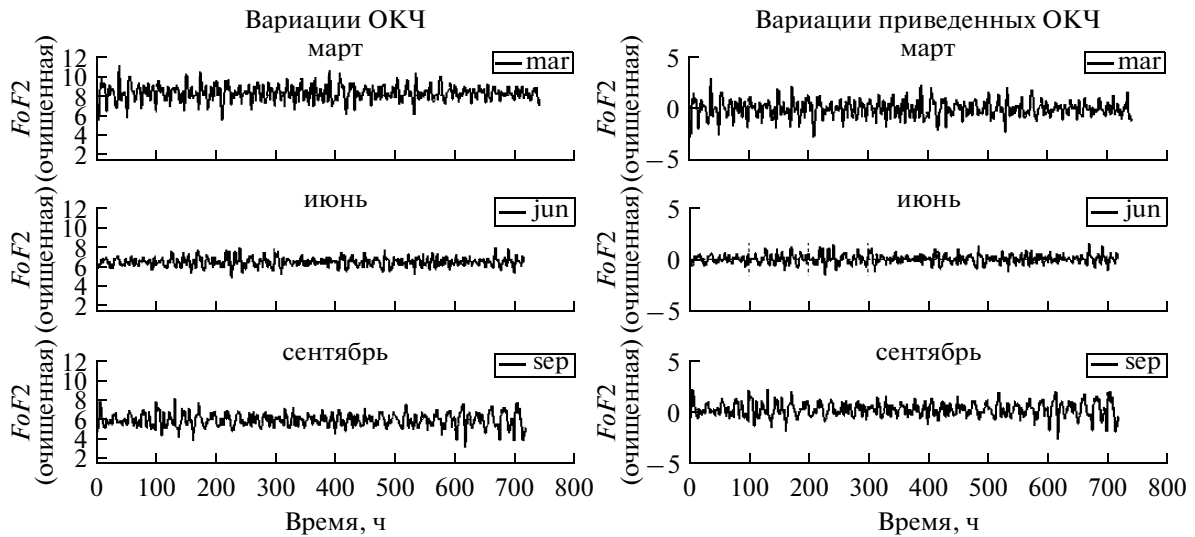


Рис. 5. Вариации “очищенных” критических частот: левая панель – вычисленные значения ОКЧ с учетом среднемесячного уровня, правая панель – приведенные значения ОКЧ для марта, июня и сентября 1982 г.

ры. Для каждого месяца года максимума солнечной активности (1982 г.) рассматривались международные невозмущенные дни ( $Q$ -days). Средние положительные и отрицательные отклонения ОКЧ от нулевого уровня составляли 1.2 и  $-1.2$  Гц, соответственно. Минимальное значение индекса  $Dst$  в исследуемые дни составляет  $-83$  нТл. Отметим, что уровень глобальной геомагнитной возмущенности, оцениваемый по величине  $Dst$ , здесь ниже, чем во втором классе. Однако при проведении классификации ионосферной возмущенности следует учитывать не только уровень геомагнитной активности, но и общий уровень солнечной активности. Известно, что в годы максимума значительно возрастает поток радиоизлу-

чения Солнца, что приводит к увеличению ионизации ионосферы и как следствие к возрастанию амплитуд вариаций критических частот.

**Четвертый класс возмущенности.** Соответствует высокой возмущенности ионосферы. Здесь для рассмотрения были использованы международные возмущенные дни в год максимума солнечной активности. Средние положительные и отрицательные значения отклонений ОКЧ от нулевого уровня составляли 1.5 и  $-1.5$  Гц, соответственно. Минимальное значение индекса  $Dst$  в рассматриваемые периоды составляет  $-325$  нТл. Отметим, что при значительном возрастании геомагнитной возмущенности по сравнению со вторым и третьим классами, средние амплитуды ОКЧ возрас-

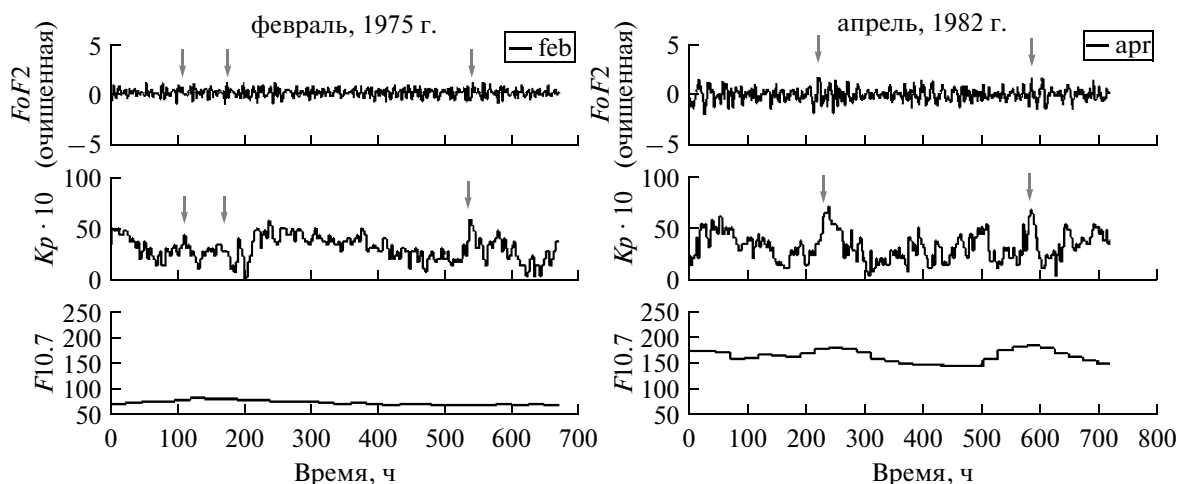


Рис. 6. Примеры возрастания амплитуд ОКЧ при увеличении значений индекса  $Kp \cdot 10$  для февраля 1975 г. и апреля 1982 г. Стрелками отмечены скачки в вариациях ОКЧ и соответствующие им скачки индекса  $Kp \cdot 10$ .

тают незначительно. Это может объясняться отсутствием непосредственной связи между среднеширотной ионосферой и магнитосферными токами.

**Пятый класс возмущенности.** Соответствует состоянию ионосферы с экстремальной возмущенностью. В этот класс попадают события, для которых амплитуды отклонений ОКЧ от нулевого уровня более 1.5 или менее  $-1.5$  Гц.

Выделенные классы ионосферной возмущенности были положены в основу создания индекса ионосферной активности IAI. Значения этого индекса учитывают положительные и отрицательные вариации ОКЧ в пределах каждого из указанных классов возмущенности. В таблице значениям каждого класса возмущенности присвоены величины индекса IAI.

Значения индекса IAI были вычислены для всех сезонов в годы минимума и максимума солнечной активности и сопоставлены с глобальными геомагнитными возмущениями, характеризу-

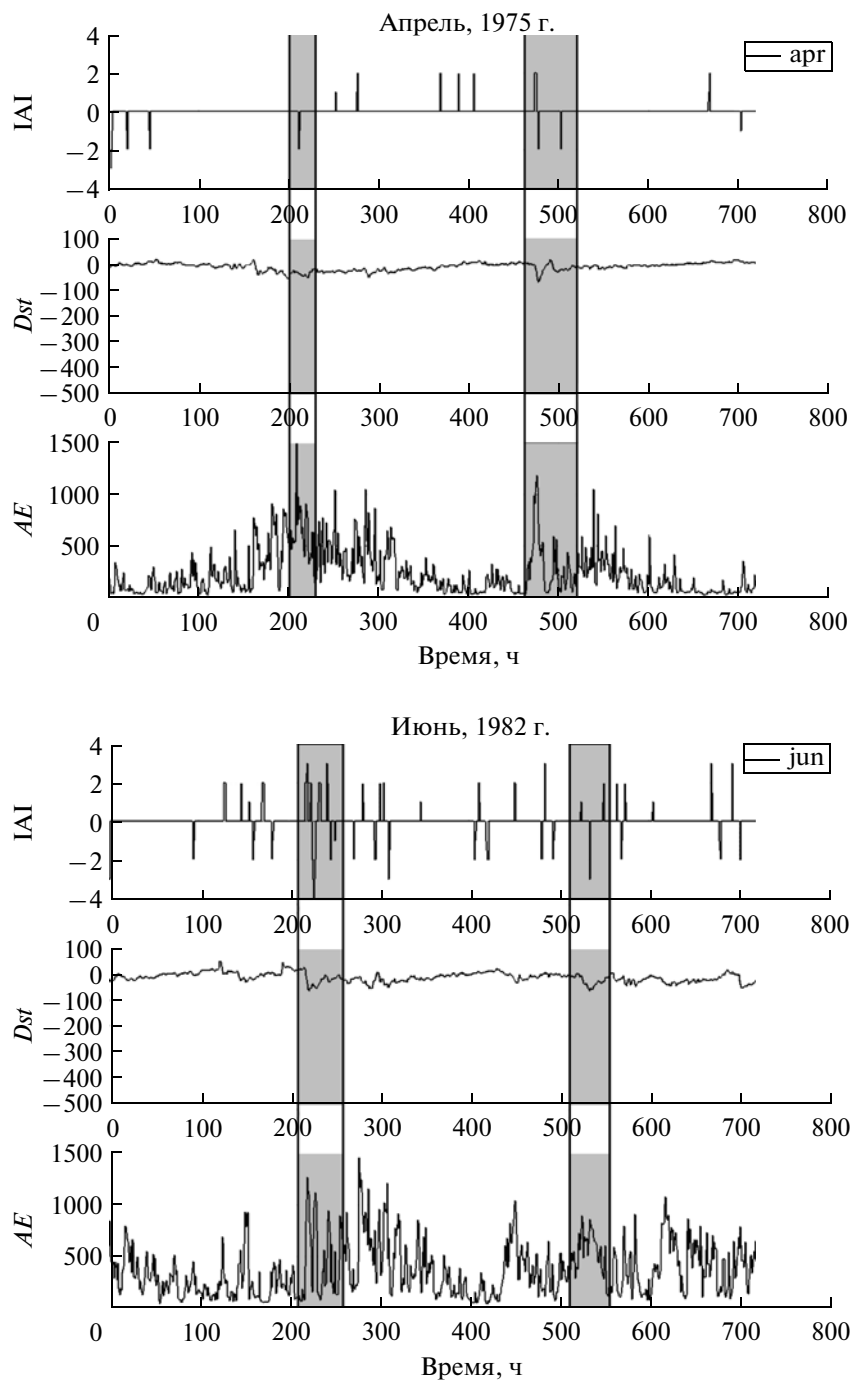
емыми индексом  $Dst$  и возмущениями в авроральной области, характеризуемыми индексом  $AE$ . На верхней панели рис. 7 представлены примеры вариаций IAI для апреля 1975 г. и июня 1982 г. На средней панели показано соответствующее изменение индекса  $Dst$ , на нижней панели – вариации индекса  $AE$ . Серым цветом отмечены магнитные бури, в пределах которых наблюдались интенсивные авроральные возмущения и повышенные значения индекса IAI.

Сопоставление значений индекса IAI со значениями индексов  $Dst$  и  $AE$  (см. рис. 7) показывает, что во времена развития геомагнитных возмущений наблюдаются высокие отрицательные значения IAI. Для двух геомагнитных возмущений в апреле 1975 г. максимальное отрицательное значение  $IAI = -2$ . Характерно, что в этот период имеет место всплеск активности в авроральной области – значения индекса  $AE$  более 1000 нТл. В июне 1982 г. наблюдаются несколько геомагнитных бурь малой интенсивности. Во время первой бури максимальное отрицательное значение индекса  $IAI = -4$ , что соответствует классу экстремальных возмущений в ионосфере. Отметим, что в этот период имели место интенсивные авроральные возмущения в виде последовательности суббурь, для каждой из которых значения индекса  $AE$  превышали 1000 нТл. Для второй магнитной бури значение индекса  $IAI = -3$ . В пределах рассматриваемого интервала активность авроральной области также повышена – значения индекса  $AE \sim 700$  нТл.

Таким образом, во времена развития магнитных бурь, которые сопровождаются интенсивными суббурями в авроральной области, наблюдаются высокие отрицательные значения индекса IAI, которые свидетельствуют о понижении концентрации ионосферы средних широт в эти периоды.

#### Выделенные классы ионосферной возмущенности

Класс ионосферной возмущенности	Интервалы вариаций ОКЧ	Значения индекса ионосферной активности IAI
Класс 1	$-0.7 < ОКЧ < 0.75$	0
Класс 2	$0.75 \leq ОКЧ < 0.8$	1
	$-0.75 < ОКЧ < -0.7$	-1
Класс 3	$0.8 \leq ОКЧ < 1.2$	2
	$-1.2 < ОКЧ \leq -0.75$	-2
Класс 4	$1.2 \leq ОКЧ < 1.5$	3
	$-1.5 < ОКЧ \leq -1.2$	-3
Класс 5	$ОКЧ \geq 1.5$	4
	$ОКЧ \leq -1.5$	-4



**Рис. 7.** Верхняя панель — примеры вариаций индекса IAI для апреля 1975 г. и июня 1982 г., средняя панель — синхронные вариации индекса *Dst*, нижняя панель — синхронные вариации индекса *AE*. Серым цветом отмечены магнитные бури, в пределах которых наблюдались интенсивные авроральные возмущения и повышенные значения индекса IAI.

Отметим, что индекс IAI имеет максимальные отрицательные значения при спаде значений индекса *Dst*. Эта особенность прослеживается для всех представленных интервалов, что может объясняться понижением концентрации ионосферного слоя *F2* в периоды интенсификации кольцевого тока. Такое понижение, как правило, сопровождается предшествующим или последующим увеличением кон-

центрации, что приводит к возникновению высоких положительных значений индекса IAI. Возможно, такие колебания концентрации среднеширотной ионосферы свидетельствуют о присутствии волновых возмущений на средних широтах.

При рассмотрении полного месячного интервала, можно заметить, что индекс IAI имеет достаточно высокие значения и при отсутствии вы-



раженных глобальных геомагнитных или авроральных возмущений. Это может быть связано с тем, что в данном случае кольцевой ток или авроральные электроджеты не являются непосредственными источниками возмущений среднеширотной ионосферы.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе проведен анализ “очищенных” критических частот ионосферного слоя  $F_2$  над ст. Москва для года минимума (1975 г.) и максимума (1982 г.) солнечной активности.

При изучении сезонного хода ОКЧ обнаружено, что в год минимума среднемесячные вариации ОКЧ имеют высокую линейную корреляцию с глобальной геомагнитной активностью, определяемую индексами  $Kp \cdot 10$  и  $Dst$ . Для года максимума линейная корреляция ОКЧ с указанными индексами отсутствует.

Сопоставление вариаций ОКЧ для каждого сезона в течение двух лет с вариациями индекса  $Kp \cdot 10$  показывает их согласованность. Наблюдаются одновременные скачки амплитуд ОКЧ и  $Kp \cdot 10$  как в год минимума, так и в год максимума солнечной активности. Это означает, что вариации ОКЧ достаточно полно отражают состояние среднеширотной ионосферы в различных гелиогеофизических условиях.

Изучение средних значений вариаций ОКЧ в международные невозмущенные и возмущенные дни для 1975 и 1982 гг. позволило выделить пять классов ионосферной возмущенности, которые соответствуют спокойному состоянию ионосферы, состоянию ионосферы с малой, повышенной, высокой и экстремальной возмущенностью. На основе выделенных классов был создан индекс ионосферной активности IAI, который принимает значения от 0 до  $\pm 4$  в зависимости от уровня ионосферной возмущенности.

Анализ полученных значений индекса IAI для года минимума и максимума солнечной активности показывает, что увеличение абсолютных значений индекса происходит, как правило, при возрастании глобальной геомагнитной и/или авроральной возмущенности. Это свидетельствует о достоверности использования разработанного индекса для характеристики ионосферной активности в независимости от сезона. Кроме того, по знаку индекса IAI можно судить о понижении или

повышении концентрации ионосферного слоя  $F_2$ , поскольку значения рассматриваемого индекса соответствуют реальным колебаниям критической частоты среднеширотной ионосферы.

Разработанная методика классификации ионосферной возмущенности и созданный на ее основе индекс ионосферной активности IAI могут служить эффективным инструментом для оперативной диагностики и прогнозирования состояния среднеширотной ионосферы в зависимости от уровня гелиогеофизической активности. Совершенствование предложенной методики возможно при рассмотрении полного цикла солнечной активности и анализа критических частот на других ионосферных станциях. Это будет являться предметом дальнейших исследований.

Работа поддержана РФФИ грантами №№ 09-05-00495, 10-05-90733-моб\_ст и программой Министерства образования и науки “Развитие научного потенциала высшей школы, 2009–2010 гг., проект 1623”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Яновский Б.М. Земной магнетизм. Л.: Изд-во Ленинград. ун-та. 592 с. 1978.
- Bremer J., Cander Lj.R., Mielich J., Stamper R. Derivation and test of ionospheric activity indices from real-time ionosonde observations in the European region // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 68. № 18. P. 2075–2090. 2006.
- Danilov A.D. Long-term trends in the relation between daytime and nighttime values of  $foF_2$  // Ann. Geophysical. V. 26. № 5. P. 1199–1206. 2008.
- Gulyaeva T.L., Stanislwska I., Tomasik M. Ionospheric weather: cloning missed  $foF_2$  observations for derivation of variability index // Ann. Geophysical. V. 26. № 2. P. 315–321. 2008.
- Kutiev I., Muhtarov P. Modeling of midlatitude  $F$ -region response to geomagnetic activity // J. Geophys. Res. V. 106. № A8. P. 15501–15509. 2001.
- Laštovička J., Yue X., Wan W. Long-term trends in  $foF_2$ : their estimating and origin // Ann. Geophysicae. V. 26. № 3. P. 593–598. 2008.
- Liu L., Wan W., Yue X., Zhao B., Ning B., Zhang M.-L. The dependence of plasma density in the topside ionosphere on the solar activity level // Ann. Geophysicae. V. 25. № 6. P. 1337–1343. 2007.
- Mikhailov A.V., Depueva A.H., Depuev V.H. Daytime  $F_2$ -layer negative storm effect: what is the difference between storm-induced and  $Q$ -disturbance events? // Ann. Geophysicae. V. 25. № 7. P. 1531–1541. 2007.