

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra24.01.044>

УДК 537.874.4; 550.388.2

С. К. ПАНИШКО, О. А. ЛИТВИНЕНКО

PACS numbers: 94.20.dm,  
94.20.Vv, 94.20.wsОбсерватория “УРАН-4”,  
Радиоастрономический институт НАН Украины,  
ул. Пушкинская, 37, г. Одесса, 65011, Украина  
E-mail: spanishko@ukr.net, uran4@te.net.ua

## ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО ИНДЕКСА ИОНОСФЕРНЫХ МЕРЦАНИЙ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ КОСМИЧЕСКИХ РАДИОИСТОЧНИКОВ В ДЕКАМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ВОЛН

*Предмет и цель работы: С точки зрения радиоастрономии, ионосферные мерцания дискретных космических радиоисточников являются нежелательным эффектом. Вместе с тем ионосферные мерцания несут информацию о турбулентности ионосферы и являются отдельным объектом исследования. По наблюдениям на радиотелескопе УРАН-4 мощных космических радиоисточников (3C144, 3C274, 3C405 и 3C461) на частотах 20 и 25 МГц получены оценки параметров ионосферных мерцаний: индекса, характерного периода и спектрального индекса. Взаимосвязь спектрального индекса мерцаний, измеренного по временному спектру мерцаний, со спектральным индексом пространственного спектра неоднородностей позволяет рассматривать первый как показатель изменения неоднородной структуры ионосферы. Целью работы является анализ особенности поведения спектрального индекса ионосферных мерцаний в сравнении с поведением индекса ионосферных мерцаний на разных временных интервалах.*

*Методы и методология: Для анализа данных ионосферных мерцаний применялись статистические методы.*

*Результаты: Получены оценки параметров ионосферных мерцаний космических радиоисточников за период 1998–2007 гг. Показано, что средние для каждого радиоисточника значения спектрального индекса зависят от угловой высоты, на которой наблюдается источник, чего не обнаружено для индекса мерцаний. Сравнение трендов среднегодовых значений не показывает корреляции спектрального индекса с индексами солнечной и геомагнитной активности ( $F10.7$  – потоком солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см, и  $A_p$  -индексом). Для среднемесячных значений характерна хорошо выраженная сезонно-суточная зависимость. Максимальные значения спектрального индекса проявляются, в основном, в ночное время суток, но наблюдается также небольшое увеличение в дневное время с 9:00 до 11:00. Для разных временных интервалов поведения параметров ионосферных мерцаний, полученных для радиоисточников, наблюдающихся на больших угловых высотах (3C405 и 3C461), заметно отличается от поведения параметров для радиоисточников, наблюдающихся на более низких угловых высотах.*

*Заключение: Использование данных, полученных в результате многолетнего мониторинга группы дискретных космических радиоисточников на радиотелескопе УРАН-4, позволило исследовать поведение спектральных индексов ионосферных мерцаний на большом временном интервале. Обнаруженные особенности поведения спектральных индексов ионосферных мерцаний космических радиоисточников требуют дальнейшего анализа для объяснения в рамках существующих сейчас представлений о распространении радиоволн в такой неоднородной среде, как ионосфера.*

*Ключевые слова: дискретные радиоисточники, ионосферные мерцания, индекс мерцаний, спектральный индекс, сезонно-суточная зависимость*

### 1. Введение

При наблюдениях космических радиоисточников в декаметровом диапазоне волн существенным является влияние земной ионосферы. Ионосфера – неоднородная по своей структуре среда, с неоднородностями различных пространственных масштабов, от нескольких метров до тысяч километров [1]. Спектр неоднородностей электронной концентрации ионосферы в предположении их изотропности имеет степенной вид [2],  $\Phi_N(k) \sim k^{-n}$ ,

где  $k$  – пространственное волновое число,  $n \approx 2 \div 3.6$  в интервале размеров от нескольких метров до нескольких километров [3]. Взаимодействие сигнала от дискретного космического радиоисточника с неоднородной ионосферой приводит к флуктуациям амплитуды сигнала со временем в месте наблюдений – мерцаниям. Эффект мерцаний можно характеризовать такими параметрами, как индекс, характерное время (период) и показатель наклона спектра (спектральный индекс) флуктуаций.

Спектральный индекс временного спектра флуктуаций сигнала радиоисточника, полученный

из наблюдений на радиотелескопе, связан с показателем наклона пространственного спектра ионосферных неоднородностей соотношением  $p = n - 1$  [4]. Такая взаимосвязь между этими параметрами позволяет рассматривать индекс  $p$  как показатель изменения неоднородной структуры ионосферы.

Поскольку индекс мерцаний более подробно рассматривался в предыдущей работе [5], а период мерцаний, как будет показано ниже, связан с индексом обратно пропорциональной зависимостью, целью настоящей работы является исследование особенностей поведения спектрального индекса в сравнении с поведением индекса мерцаний.

## 2. Наблюдения и методика обработки

Настоящее исследование основано на наблюдениях четырех мощных космических радиоисточников – 3C144, 3C274, 3C405, 3C461, на радиотелескопе УРАН-4 в период с 1998 по 2007 г. Наблюдения проводились на частотах 20 и 25 МГц и на двух поляризациях. Они состояли в том, что в течение суток с помощью модуляционного радиометра (эквивалент перемножения сигналов двух половин антенной решетки) записывалось несколько прохождений каждого радиоисточника через диаграмму направленности радиотелескопа, которая последовательно переключалась, принимая ряд положений в интервале часовых углов радиоисточника от  $-4^{\text{h}}$  до  $+4^{\text{h}}$ . Данные вводились в память компьютера и обрабатывались с помощью разработанного пакета компьютерных программ. Более подробно методика наблюдений, оценка качества исходных данных и общая обработка записей рассмотрены в работе [6]. Здесь кратко приведена методика получения оценок параметров ионосферных мерцаний из записи наблюдений радиоисточника.

Чтобы выделить флуктуационную часть сигнала радиометра, содержащую мерцания, в исходную запись сигнала  $I(t_i)$ , где  $i$  – номер отсчета, вписывалась, с использованием метода наименьших квадратов, диаграмма направленности радиотелескопа  $F(t_i)$ , которая затем вычиталась из исходного ряда. Амплитуда регулярной части принимаемого сигнала  $A$  определялась как максимум вписанной диаграммы направленности. Для уменьшения влияния функции диаграммы

обрабатывались данные, относящиеся к интервалу длиной 16 мин вблизи максимума вписанной диаграммы (ряд  $S(t_i)$ ), интервал между отсчетами был равен  $\Delta t = 1$  с, соответственно длина ряда –  $N = 960$  отсчетов. В результате обработки числового ряда  $S(t_i)$  были получены параметры ионосферных мерцаний.

Индекс мерцаний задавался следующим выражением:

$$SI = A^{-1} \sqrt{\langle (S(t_i) - \langle S(t_i) \rangle)^2 \rangle}.$$

Характерный период мерцаний  $ST$  определялся по автокорреляционной функции  $AC(\tau)$ , соответствующей ряду  $S(t_i)$ . Он равен смещению по времени  $\tau$ , при котором функция  $AC(\tau)$  впервые достигает нулевого значения:  $ST = \tau$  при  $AC(\tau) = 0$ . Для определения  $\tau$  используется интерполяция дискретной автокорреляционной функции  $AC(\tau_j) = \langle S(t_i) \cdot S(t_i + \tau_j) \rangle$  вблизи нулевого значения.

Показатель наклона спектра, или спектральный индекс,  $SP$  вычислялся на основе спектра мощности мерцаний  $P(f_k)$ , который получался в результате фурье-преобразования ряда  $S(t_i)$ .

Далее значения функции  $P(f_k)$  и ее аргумента переводились в логарифмический масштаб. В инерционной (ниспадающей) части спектра выделялся участок в интервале частот, например,  $0.02 \leq f_k \leq 0.05$  Гц, в который вписывалась прямая линия. Ее наклон и определяет спектральный индекс  $SP$ .

На рис. 1 приведен пример последовательности обработки записи сигнала для получения индекса, периода и спектрального индекса ионосферных мерцаний радиоисточника 3C405 на частоте 25 МГц (поляризация А, часовой угол  $-120^{\text{m}}$ , время UT+2 ч;  $SI = 0.32$ ,  $ST = 16$  с,  $SP = 3.5$ ). Таким образом, были обработаны все пригодные к обработке записи сигналов радиоисточников, которые наблюдались в период 1998–2007 гг. Ниже рассмотрены результаты обработки и приведен анализ полученных данных.

## 3. Общие характеристики параметров ионосферных мерцаний

В табл. 1 приведены средние за весь рассматриваемый период значения параметров ионосферных

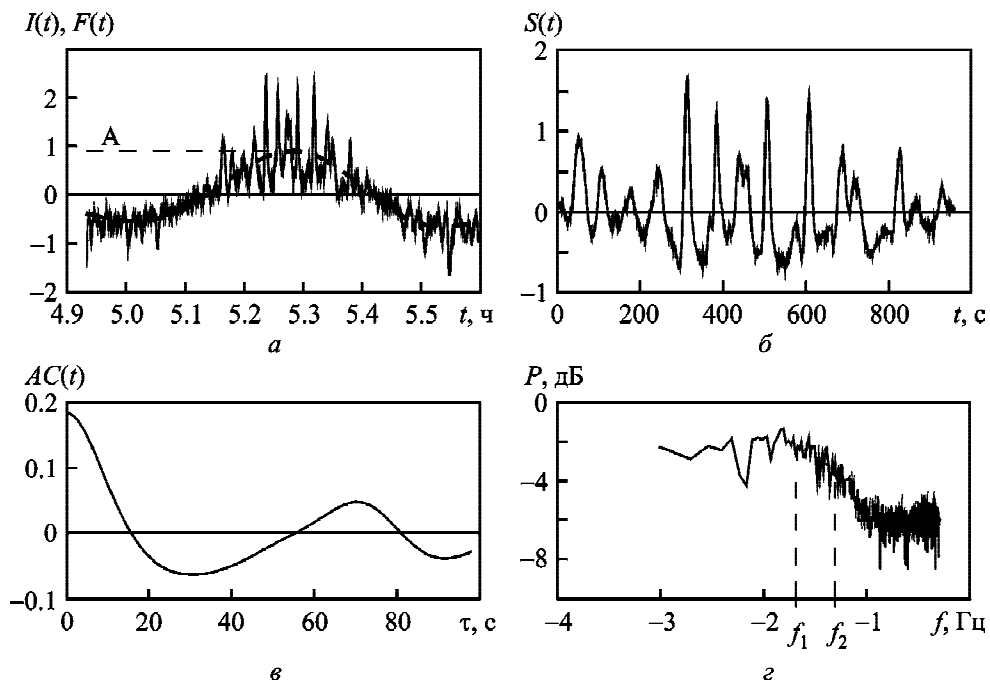


Рис. 1. Пример обработки записи сигнала радиосточника 3C405: *a* – исходная запись  $I(t)$  с вписанной диаграммой направленности  $F(t)$  (пунктирная линия); *b* – мерцания  $S(t)$ ; *c* – автокорреляционная функция мерцаний  $AC(\tau)$ ; *d* – спектр мощности мерцаний  $P(f)$  в логарифмической шкале с вписанной прямой линией в выделенном участке в интервале частот  $0.02 \div 0.05$  Гц

Таблица 1. Средние значения параметров ионосферных мерцаний, полученных по наблюдениям космических радиосточников с 1998 по 2007 г.

Источник	Частота 20 МГц				Частота 25 МГц			
	$m$	$SI$	$ST, c$	$SP$	$m$	$SI$	$ST, c$	$SP$
3C144	1348	$0.48 \pm 0.004$	$39.8 \pm 0.631$	$1.9 \pm 0.02$	1358	$0.40 \pm 0.004$	$36.6 \pm 0.631$	$1.9 \pm 0.02$
3C274	1426	$0.35 \pm 0.003$	$55.8 \pm 0.740$	$1.8 \pm 0.02$	1450	$0.32 \pm 0.003$	$52.5 \pm 0.834$	$1.8 \pm 0.02$
3C405	1515	$0.25 \pm 0.003$	$60.4 \pm 0.863$	$2.6 \pm 0.03$	1587	$0.25 \pm 0.003$	$39.8 \pm 0.631$	$2.8 \pm 0.03$
3C461	1606	$0.32 \pm 0.004$	$82.7 \pm 1.010$	$2.3 \pm 0.03$	1597	$0.24 \pm 0.004$	$90.8 \pm 1.096$	$2.3 \pm 0.02$

мерцаний каждого радиосточника на двух частотах: индекса мерцаний  $SI$ , периода мерцаний  $ST$  и спектрального индекса  $SP$ . Указаны также среднеквадратичные отклонения и количество среднесуточных значений индексов  $m$ , по которым проводилось усреднение.

В предыдущей работе было показано, что индекс и период мерцаний связаны между собой обратно пропорциональной зависимостью [6], что согласуется с результатами спутниковых измерений ионосферных мерцаний [3]. График этой зависимости, построенный по данным из табл. 1, продемонстрирован на рис. 2. Здесь и далее данные, полученные на частоте 20 МГц, изображены крестиками, а данные, полученные на частоте 25 МГц, – точками. Такой вид зависимости обусловлен вытянутостью неоднородностей элек-

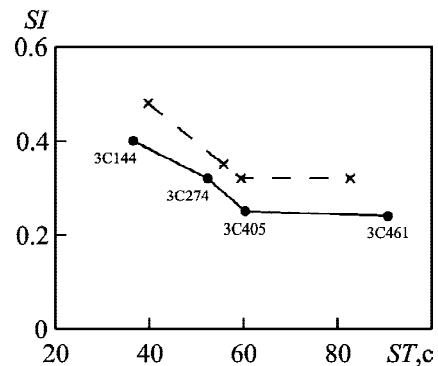


Рис. 2. Связь индекса ионосферных мерцаний с периодом мерцаний

тронной концентрации ионосферной плазмы вдоль линий геомагнитного поля (порядок следования источников на представленном графике соответ-

ствуется увеличению угла между вектором напряженности геомагнитного поля на ионосферных высотах и направлением на источник в момент его кульминации).

На рис. 3 показаны зависимости параметров мерцаний от прямого восхождения  $RA$  радиоисточников (верхние панели) и от их угла возвышения  $H$  над горизонтальной плоскостью (нижние панели).

Исходя из вида графиков, источники можно разделить на две группы. Первая группа – это источники 3C144 и 3C274, которые наблюдаются на более низких угловых высотах над горизонтом, и вторая группа – источники 3C405 и 3C461, которые наблюдаются вблизи зенита. Рис. 3, *а* и *б* подтверждают зависимость, изображенную на рис. 2. Из графиков на нижних панелях можно сделать вывод, что индекс и период мерцаний не зависят от угловой высоты (рис. 3, *г* и *д*), тогда как спектральный индекс показывает такую зависимость. На больших угловых высотах наблюдаются более крутые спектры ионосферных мерцаний с большими значениями спектрального индекса, соответствующие неоднородностям с большими пространственными размерами. Этот эффект может быть связан также с анизотропией ионосферных неоднородностей, обусловленной геомагнитным полем.

#### 4. Среднегодовые зависимости индекса и показателя наклона спектра ионосферных мерцаний

Рассматриваемый временной интервал наблюдений с 1998 по 2007 г. практически совпадает с 23-м циклом солнечной активности, который начался в мае 1996 г. и завершился в декабре 2008 г. [7]. Естественно было бы сравнить полученные среднегодовые оценки спектрального индекса с индексами солнечной и геомагнитной активности. На рис. 4 приведены графики среднегодовых значений  $SP$  (справа), для сравнения – среднегодовые значения индекса мерцаний  $SI$  (слева), а также среднегодовые значения солнечной радиации  $F_{10.7}$  на длине волны 10.7 см (внизу слева) и геомагнитного индекса  $A_p$  (внизу справа). Здесь нужно отметить, что в 2000 г. было мало данных, пригодных для обработки, а в 2003 г. радиотелескоп УРАН-4 работал только во второй половине года, что привело к некоторой селективности данных и отразилось на графиках.

Из рис. 4 можно видеть, что графики как индекса мерцаний, так и спектрального индекса мерцаний не отличаются подобием. Для того чтобы проявить поведение спектральных индексов в течение цикла солнечной активности, данные были преобразованы следующим образом. В ряды среднегодовых значений индексов  $SI$ ,  $SP$ ,

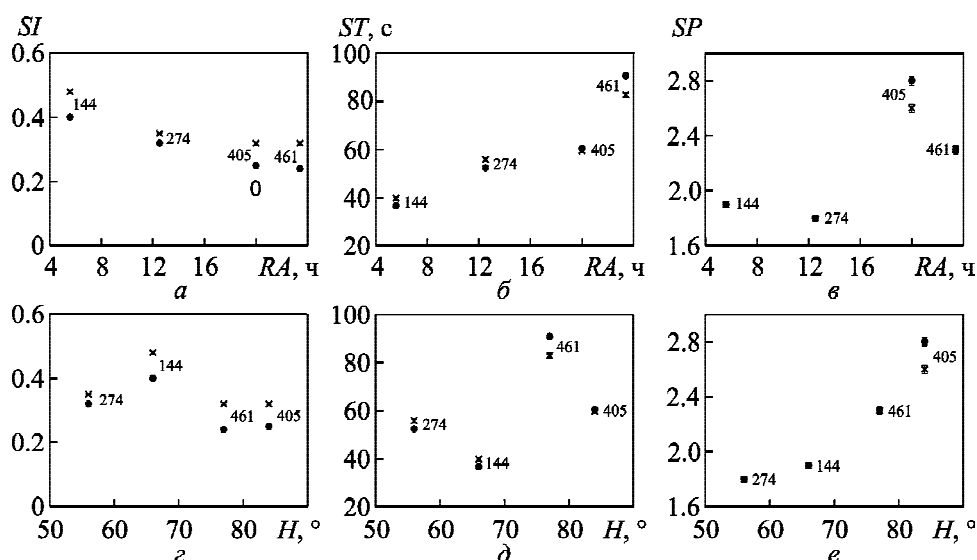
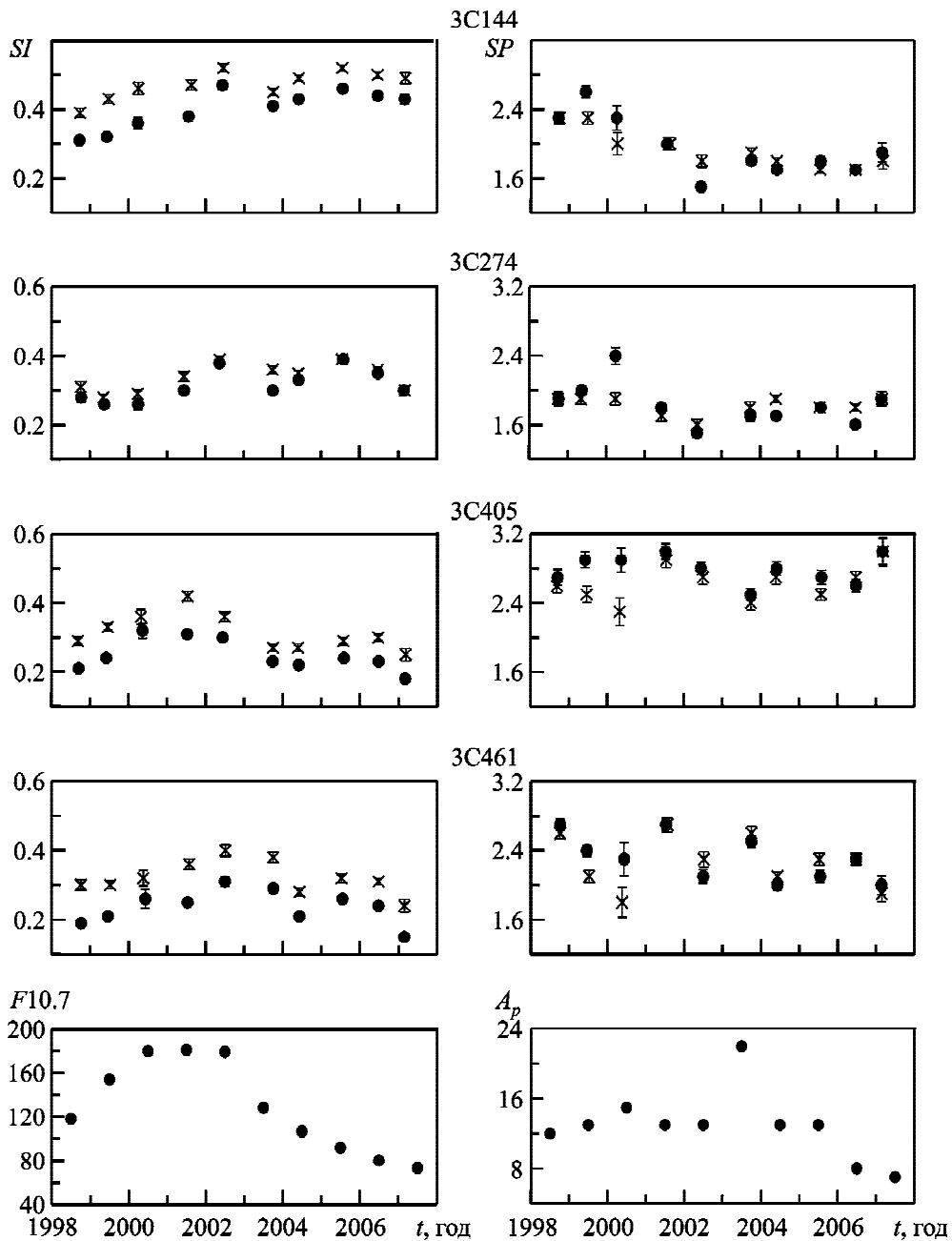


Рис. 3. Средние значения параметров ионосферных мерцаний в зависимости от прямого восхождения (верхние панели) и угловой высоты (нижние панели) радиоисточников: *а*, *г* – индекса мерцаний  $SI$ ; *б*, *д* – периода мерцаний  $ST$ ; *в*, *е* – спектрального индекса  $SP$



**Рис. 4.** Среднегодовые значения индекса ионосферных мерцаний (слева) и спектрального индекса ионосферных мерцаний (справа) на частотах 20 и 25 МГц в сравнении со среднегодовыми значениями индексов солнечной и геомагнитной активности  $F10.7$  (внизу слева) и  $A_p$  (внизу справа)

$F10.7$  и  $A_p$  вписывались полиномы второго порядка для обозначения низкочастотных трендов. Эти тренды нормировались на максимальное значение. Графики полученных рядов приведены на рис. 5. Здесь данные, как и ранее, обозначены крестиками (20 МГц) и точками (25 МГц). На каждой панели пунктирной линией изображен график индекса  $A_p$  и сплошной линией – график  $F10.7$ .

Как отмечалось в предыдущем разделе, средние значения параметров ионосферных мерцаний ведут себя по-разному для “низких” и “высоких” радиоисточников, что справедливо и в случае среднегодовых величин.

Из рис. 5 можно видеть, что индекс мерцаний, в основном, следует поведению показателей солнечной и геомагнитной активности, большее со-

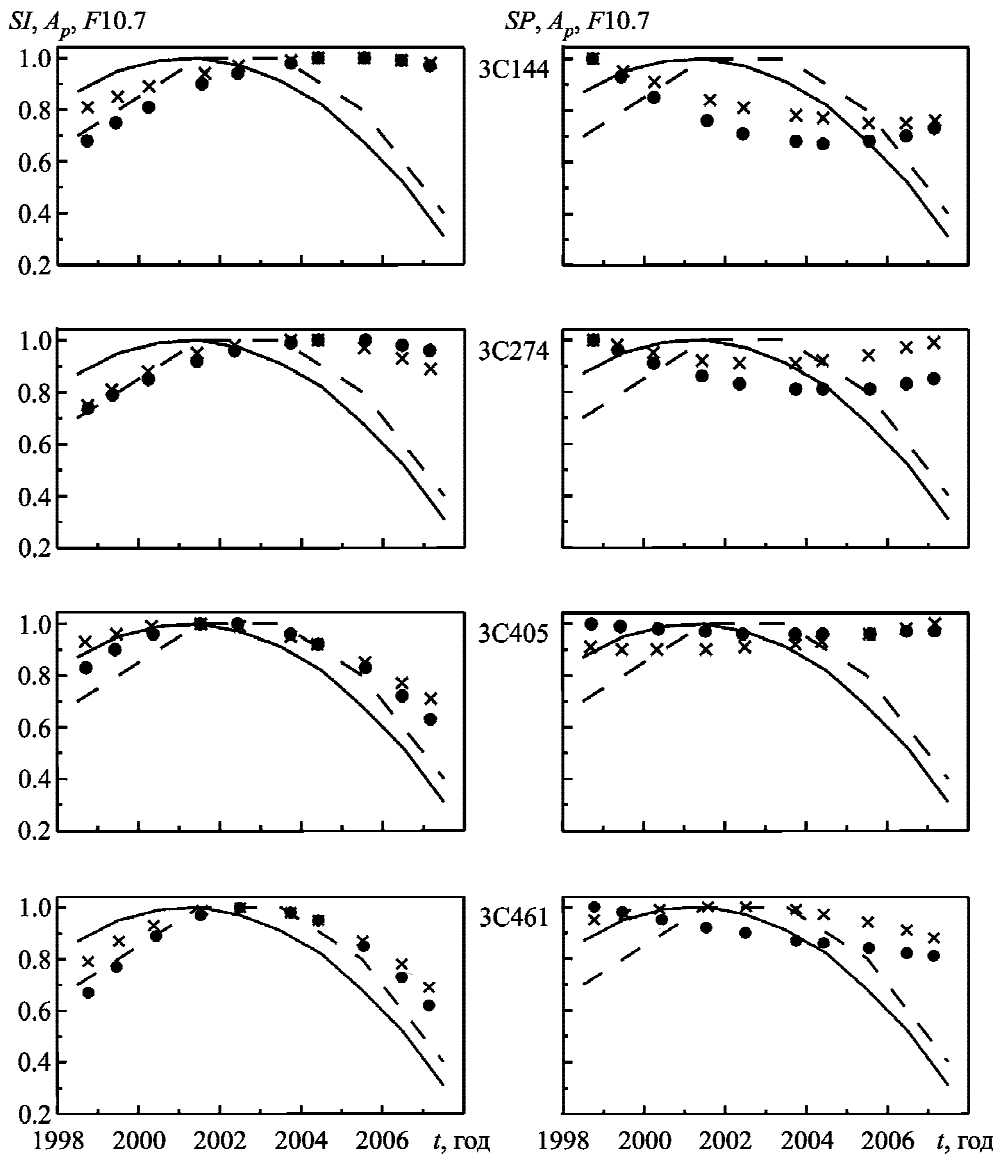


Рис. 5. Тренды среднегодовых значений индекса мерцаний (слева), спектрального индекса (справа), а также солнечного потока  $F10.7$  (сплошная линия) геомагнитного  $A_p$ -индекса (пунктирная линия)

гласие наблюдается для “высоких” источников. Для “низких” источников характерно то, что интенсивность мерцаний уменьшается очень медленно на ниспадающей ветви солнечного цикла. Что касается спектрального индекса, то его относительные изменения в течение цикла гораздо меньше, чем индекса мерцаний, который меняется подобно индексам  $F10.7$  и  $A_p$ . Особенно это заметно для “высоких” радиоисточников. Параметры для “низких” меняются сильнее, но “в противофазе” с  $F10.7$  и  $A_p$ . Такое поведение параметров ионосферных мерцаний требует своего объяснения.

### 5. Среднесуточная зависимость спектров индекса ионосферных мерцаний

Как было показано в работе [5], среднемесячные значения индекса мерцаний имеют хорошо выраженную сезонно-суточную зависимость. Разделить влияние сезона и времени суток в сезонно-суточной зависимости не всегда представляется возможным из-за того, что каждому месяцу соответствует свое время кульминации источника. Сезонно-суточная зависимость спектрального индекса выражена еще более заметно (рис. 6).

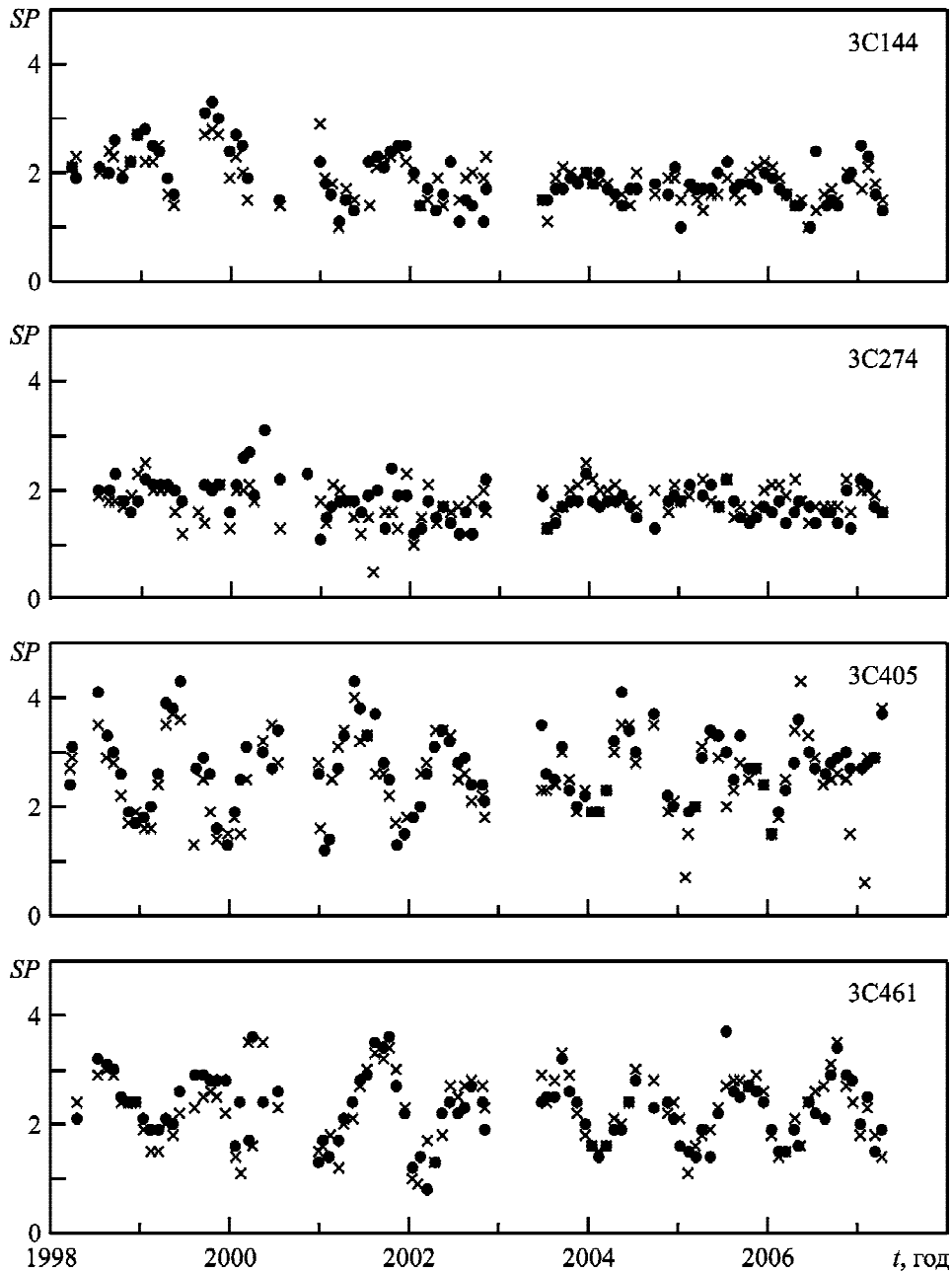


Рис. 6. Сезонно-суточная зависимость спектрального индекса, построенная по среднемесячным значениям

Из рис. 6 видно, что диапазон изменений спектрального индекса в течение интервала наблюдений для “высоких” радиоисточников намного больше, чем для “низких”.

На рис. 7 представлены усредненные среднемесячные значения (за весь рассматриваемый период) спектрального индекса (панели справа) и, для сравнения, индекса мерцаний (панели слева). На верхней шкале каждой панели приведены времена кульминаций радиоисточников в

месте наблюдения для середины соответствующего месяца.

Можно видеть, что амплитуда изменений спектрального индекса гораздо выше для источников 3C405 и 3C461, чем для 3C144 и 3C274. Интенсивность мерцаний (индекс мерцаний) также меняется значительно больше для “высоких” радиоисточников. Зависимости индексов мерцаний 3C274 и 3C144 имеют два максимума (второй максимум в зависимости для 3C274 выра-

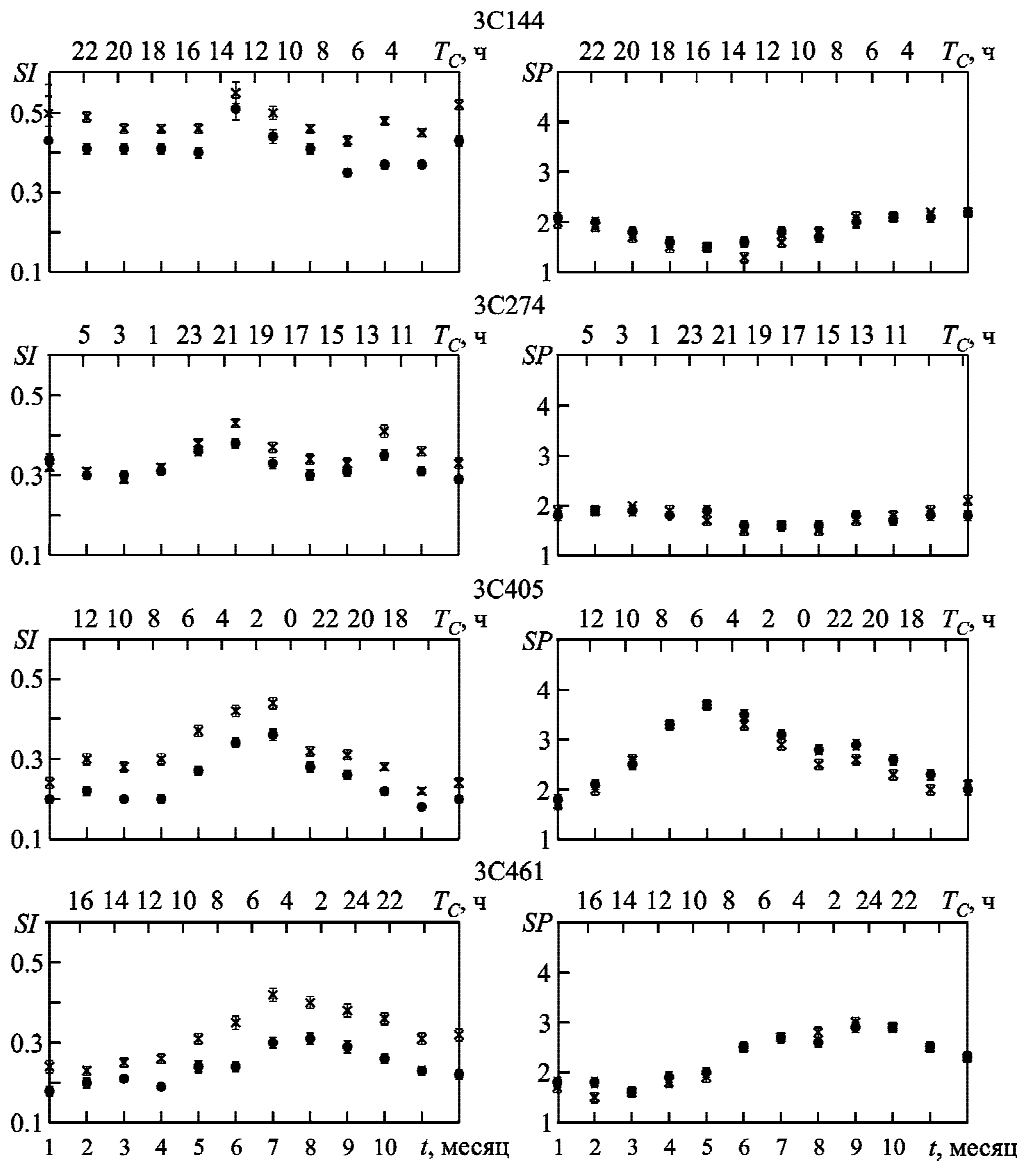


Рис. 7. Усредненные ежемесячные многолетние (за весь период наблюдений) значения индекса мерцаний (панели слева) и спектрального индекса мерцаний (панели справа). Верхняя шкала – время кульминации, нижняя – месяцы

жен хорошо, а в зависимости для 3C274 – меньше), для 3C405 и 3C461 наблюдаются более гладкие графики. В основном максимальные значения индекса мерцаний приходятся на летние и осенние месяцы.

Что касается спектрального индекса, то его максимальные значения наблюдаются для всех радиоисточников в ночное и вечернее время и, соответственно, в месяцы, когда источник в это время суток наблюдался. На графике для радиоисточника 3C405 можно видеть существование двух максимумов (май-июнь – главный максимум, сентябрь-октябрь – локальный), остальные

графики не имеют каких-либо выраженных особенностей. В табл. 2 приведены значения максимумов и минимумов спектрального индекса в зависимости от месяца и времени суток наблюдения.

Графики зависимости спектрального индекса от времени суток, полученные по измерениям ионосферных мерцаний бортовых радиомаяков искусственных спутников Земли в экваториальной зоне, приведенные, например, в работе [8], демонстрируют более крутые спектры после захода Солнца с максимальными значениями около часа ночи. В нашем случае этот эффект не



**Таблица 2. Распределение минимумов и максимумов показателя наклона спектра в зависимости от месяца и времени суток**

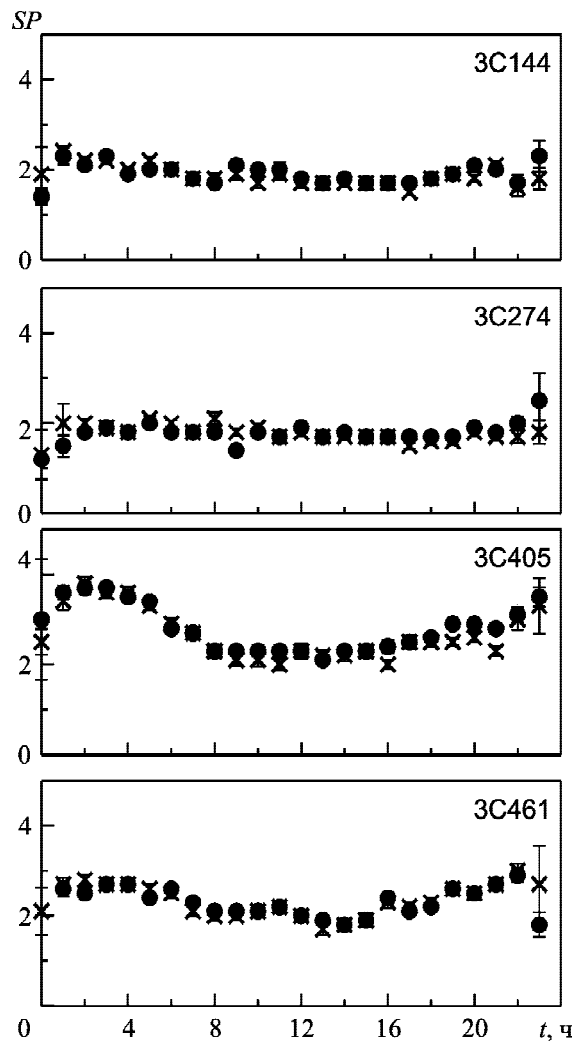
Радио-источник	Минимум <i>SP</i>		Максимум <i>SP</i>	
	Месяцы	Время суток	Месяцы	Время суток
3C144	04–06	14:00–16:00	11–01	22:00–02:00
3C274	06–08	17:00–21:00	02–04	01:00–05:00
3C405	12–02	10:00–14:00	04–06	02:00–06:00
3C461	02–04	12:00–16:00	08–10	22:00–02:00

так сильно выражен, возможно, из-за усреднения большого числа данных без учета интенсивности мерцаний, солнечной и геомагнитной активности. На рис. 8 изображены усредненные за весь рассматриваемый интервал времени среднечасовые спектральные индексы. Кроме уже упоминаемого увеличения индекса *SP* в вечернее и ночное время, наблюдается небольшой, но заметный локальный дневной максимум в интервале 9:00–11:00. Скорее всего, он связан со спорадическим  $E_s$  слоем ионосферы, который возникает в дневное время и вызывает ионосферные мерцания радиосигналов на средних широтах [9].

### 6. Выводы

По данным регулярных наблюдений на радиотелескопе УРАН-4 мощных радиоисточников 3C144, 3C274, 3C405, 3C461 на частотах 20 и 25 МГц с 1998 по 2007 г. получены оценки индекса мерцаний и показателя наклона спектра ионосферных мерцаний. Сравнение этих величин позволяет сделать следующие выводы.

1. Средние значения спектрального индекса мерцаний меняются в интервале  $1.8 \div 2.6$  на частоте 20 МГц и в интервале  $1.8 \div 2.8$  на частоте 25 МГц.
2. В отличие от индекса мерцаний, средние значения спектрального индекса мерцаний радиоисточников зависят от угловой высоты, на которой наблюдается источник.
3. Не наблюдается корреляции среднегодовых значений спектрального индекса мерцаний и индексов солнечной и геомагнитной активности.
4. Среднемесячные значения спектрального индекса мерцаний демонстрируют хорошо выраженную сезонно-суточную зависимость.
5. Минимальные значения спектрального индекса мерцаний приходятся на дневное время



**Рис. 8.** Усредненные за период наблюдения среднечасовые значения спектрального индекса на частотах 20 и 25 МГц

суток, а максимальные – на ночное, что указывает на преобладание суточного цикла в поведении этого параметра. Усредненные за весь период наблюдений среднечасовые значения спектрального индекса ионосферных мерцаний каждого радиоисточника показывают небольшое увеличение в дневное время суток с 9:00 до 11:00.

6. По характеру изменений параметров ионосферных мерцаний на разных интервалах усреднения наблюдавшиеся радиоисточники можно разделить на две группы. К первой относятся 3C144 и 3C274, которые наблюдаются на более низких угловых высотах и при меньших углах между вектором напряженности геомагнитного поля и направлением на источник. Ко второй – 3C405 и 3C461, которые наблюдаются на больших угло-

вых высотах и при больших углах между вектором напряженности геомагнитного поля и направлением на источник.

Большинство полученных результатов требует дальнейших исследований для объяснения. Но можно сделать вывод, что изменения в неоднородной структуре ионосферы, генерация крупномасштабных и диссипация мелкомасштабных неоднородностей, о которых можно судить по поведению спектральных индексов ионосферных мерцаний, подчиняются определенным закономерностям, которые могут быть использованы для прогнозирования состояния ионосферы как составляющей космической среды.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Солодовников Г. К., Новожилов В. И., Фаткуллин М. Н. *Распространение радиоволн в многомасштабной неоднородной ионосфере*. Москва: Наука, 1990. 198 с.
2. Yeh K. C. and Liu C.-H. Radio Wave Scintillations in the Ionosphere. *Proc. IEEE*. 1982. Vol. 70, No. 4. P. 324–360. DOI: 10.1109/PROC.1982.12313
3. Солодовников Г. К., Синельников В. М., Крохмальников Е. Б. *Дистанционное зондирование ионосферы Земли с использованием радиомаяков космических аппаратов*. Москва: Наука, 1988. 191 с.
4. Яковлев О. И. *Распространение радиоволн в космосе*. Москва: Наука, 1985. 216 с.
5. Derevyagin V. G., Isaeva E. A., Kravetz R. O., Litvinenko O. A., and Panishko S. K. Observations of power cosmic radio sources on the radio telescope URAN-4 during 1998–2004. *Astron. Astrophys. Trans.* 2005. Vol. 24, No. 5. P. 421–424. DOI: 10.1080/10556790600631652
6. Lytvynenko O. A. and Panishko S. K. Seasonal variations of the ionosphere scintillation parameters obtained from the long observations of the power cosmic radio sources at decameter wave range. *Odessa Astronomical Publications*. 2015. Vol. 28, No. 2. P. 235–237. DOI: 10.18524/1810-4215.2015.28.71031
7. *Одесский астрономический календарь: 2009*. Под ред. В. Г. Каретникова. Одесса: Астропринт, 2008. Вып. 10. С. 158–163.
8. Spatz D. E., Franke S. J., and Yeh K. C. Analysis and interpretation of spaced receiver scintillation data recorded at an equatorial station. *Radio Sci.* 1988. Vol. 23, No. 3. P. 347–361. DOI: 10.1029/RS023i003p00347
9. Aarons J. Global morphology of ionospheric scintillations. *Proc. IEEE*. 1982. Vol. 70, No. 4. P. 360–378. DOI: 10.1109/PROC.1982.12314

## REFERENCES

1. SOLODOVNIKOV, G. K., NOVOZHYLOV, V. I. and FATKULLIN, M. N., 1990. *Radio wave propagation in multi-scale irregularity ionosphere*. Moscow, Russia: Nauka Publ. (in Russian).

2. YEH, K. C. and LIU, C.-H., 1982. Radio Wave Scintillations in the Ionosphere. *Proc. IEEE*. vol. 70, no. 4, pp. 324–360. DOI: 10.1109/PROC.1982.12313
3. SOLODOVNIKOV, G. K., SINELNIKOV, V. M. and KROKHMALNIKOV, YE. B., 1988. *Remote Sensing of the Earth's Ionosphere Using a Beacon Satellite*. Moscow, Russia: Nauka Publ. (in Russian).
4. YAKOVLEV, O. I., 1985. *Radio wave propagation in space*. Moscow, Russia: Nauka Publ. (in Russian).
5. DEREVYAGIN, V. G., ISAEVA, E. A., KRAVETZ, R. O., LITVINENKO, O. A. and PANISHKO, S. K., 2005. Observations of power cosmic radio sources on the radio telescope URAN-4 during 1998–2004. *Astron. Astrophys. Trans.* vol. 24, no. 5, pp. 421–424. DOI: 10.1080/10556790600631652
6. LYTVYENENKO, O. A. and PANISHKO, S. K., 2015. Seasonal variations of the ionosphere scintillation parameters obtained from the long observations of the power cosmic radio sources at decameter wave range. *Odessa Astronomical Publications*. vol. 28, no. 2, pp. 235–237. DOI: 10.18524/1810-4215.2015.28.71031
7. KARETNIKOV, V. G., ed 2008. *Odessa Astronomical Calendar: 2009*. Odesa, Ukraine: Astroprint Publ, 2008. vol. 10, pp. 158–163. (in Russian).
8. SPATZ, D. E., FRANKE, S. J. and YEH, K. C., 1988. Analysis and interpretation of spaced receiver scintillation data recorded at an equatorial station. *Radio Sci.* vol. 23, no. 3, pp. 347–361. DOI: 10.1029/RS023i003p00347
9. AARONS, J., 1982. Global morphology of ionospheric scintillations. *Proc. IEEE*. vol. 70, no. 4, pp. 360–378. DOI: 10.1109/PROC.1982.12314

S. K. Panishko and O. A. Lytvynenko

Observatory URAN-4,  
Institute of Radio Astronomy,  
National Academy of Sciences of Ukraine,  
37, Pushkinska St., Odesa, 65011, Ukraine

## PECULIARITIES IN THE IONOSPHERIC SCINTILLATION SPECTRAL INDEX BEHAVIOR BY OBSERVATIONS OF THE COSMIC RADIO SOURCES AT THE DECAMETER WAVELENGTHS

*Purpose:* With relation to radio astronomy, ionospheric scintillation of discrete cosmic radio sources is an undesirable effect. At the same time, ionospheric scintillations carry information on the ionospheric turbulence and are a separate object of study. From observations at the URAN-4 radio telescope of the power cosmic radio sources (3C144, 3C274, 3C405, and 3C461) at 20 and 25 MHz, the ionospheric scintillation parameters: index, characteristic period and spectral index were estimated. Correlation between spectral index measured from scintillation time spectrum and spectral index of space spectrum of irregularities have allowed considering the first of them as an index of ionospheric irregularity structure changing. Peculiarities of the ionospheric scintillation spectral index behavior compared with ionospheric scintillation index are analyzed for several time intervals.

*Design/methodology/approach:* For analyzing the ionospheric scintillation data, the statistical methods were used.

*Findings:* Estimations of ionospheric scintillation parameters were obtained during 1998–2007. It has been shown that spectral index mean values for each radio source depend on height at which it is observed that was not found for scintillation index. Comparison of yearly mean trends does not show the correlation of spectral index with the solar and geomagnetic activity indices (i.e. with the F10.7–flow of solar radiation at the wave length of 10.7 cm and  $A_p$ -index). The daily-seasonal dependence is clearly seen for the monthly mean values. In general, the maximum spectral index values were revealed at night, but small increase was also observed in day-time during 9–11 hours. For different time intervals, the behavior of ionospheric scintillation parameters obtained for the radio source been observed at greater angles of elevation (3C405 and 3C461) remarkably differ from that for the radio sources observed at lower angles of elevation.

*Conclusions:* Using the data obtained as a result of long-term monitoring of the group of discrete cosmic radio sources at the URAN-4 radio telescope made it possible to investigate the behavior of spectral indices of ionospheric scintillations over a large time interval. The peculiarities found in the ionospheric scintillation spectrum index behavior require further analysis for explaining within the limits of present conceptions of radio wave propagation in such an irregularity medium as ionosphere.

*Key words:* discrete radio sources, ionospheric scintillations, scintillation index, spectral index, daily-seasonal dependence

С. К. Панишко, О. О. Литвиненко

Обсерваторія УРАН-4,  
Радіоастрономічний інститут НАН України,  
вул. Пушкінська, 37, м. Одеса, 65011, Україна

#### ОСОБЛИВОСТІ ПОВЕДІНКИ ПОКАЗНИКА СПЕКТРАЛЬНОГО ІНДЕКСУ ІОНОСФЕРНИХ МЕРЕХТІНЬ ЗА СПОСТЕРЕЖЕННЯМИ КОСМІЧНИХ РАДІОДЖЕРЕЛ В ДЕКАМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ РАДІОХВИЛЬ

*Предмет і мета роботи:* З точки зору радіоастрономії, іоносферні мерехтіння дискретних космічних радіоджерел є небажаним ефектом. Разом з тим іоносферні мерехтіння несуть інформацію про турбулентність іоносфери і є окремим об'єктом дослідження. За спостереженнями на радіотелескопі УРАН-4 потужних космічних радіоджерел (3C144, 3C274,

3C405 та 3C461) на частотах 20 і 25 МГц одержано оцінки параметрів іоносферних мерехтінь: індексу, характерного періоду і спектрального індексу. Взаємозв'язок спектрального індексу, виміряного за часовим спектром мерехтінь, зі спектральним індексом просторового спектру неоднорідностей дозволяє розглядати перший як показник зміни неоднорідної структури іоносфери. Метою роботи є аналіз особливості поведінки спектрального індексу іоносферних мерехтінь у порівнянні з поведінкою індекса іоносферних мерехтінь на різних часових інтервалах.

*Методи і методологія:* Для аналізу даних іоносферних мерехтінь використовувались статистичні методи.

*Результати:* Отримано оцінки параметрів іоносферних мерехтінь космічних радіоджерел за період 1998–2007 рр. Показано, що середні для кожного радіоджерела значення спектрального індексу залежать від кутової висоти, на якій спостерігається джерело, чого не знайдено для індекса мерехтінь. Порівняння трендів середньорічних значень не показує кореляції спектрального індексу з індексами сонячної і геомагнітної активності (F10.7 – потоком сонячного радіо-випромінювання на довжині хвилі 10.7 см і  $A_p$ -індексом). Для середньомісячних значень характерна добре виражена сезонно-добова залежність. Максимальні величини спектрального індекса проявляються, в основному, у нічний час доби, але спостерігається також невелике підвищення вдень з 9:00 до 11:00. Для різних часових інтервалів поведінка параметрів іоносферних мерехтінь, отриманих для радіоджерел, які спостерігаються на більших кутових висотах (3C405 і 3C461), помітно відрізняються від поведінки параметрів радіоджерел, які спостерігаються на нижчих кутових висотах.

*Висновки:* Використання даних, отриманих у результаті багаторічного моніторингу групи дискретних космічних радіоджерел на радіотелескопі УРАН-4, дозволило досліджувати поведінку спектральних індексів іоносферних мерехтінь на великому часовому інтервалі. Виявлені особливості поведінки спектральних індексів іоносферних мерехтінь космічних радіоджерел потребують подальшого аналізу для пояснення в межах сучасних уявлень про поширення радіохвиль в такому неоднорідному середовищі, як іоносфера.

*Ключові слова:* дискретні радіоджерела, іоносферні мерехтіння, індекс мерехтінь, спектральний індекс, сезонно-добова залежність

Стаття постуила в редакцію 22.10.2018