

СПЕКТР НИЗКОЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИИ РАДИОЭМИССИИ КАК ГЛОБАЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭВОЛЮЦИИ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА СОЛНЦЕ

^аО. Г. ГОНТАРЕВ и ^бЭ. И. МОГИЛЕВСКИЙ

^аСектор ионосферы АН Каз. ССР, Алма-Ата, СССР

^бИЗМИРАН СССР, Москва, СССР

Абстракт: Анализируются материалы длительных наблюдений квазипериодических низкочастотных колебаний (КНК) радиоизлучения Солнца на $\lambda = 3,2$ см с целью определения возможной глобальной характеристики развития активной области (А.О.). Рассчитанные на ЭВМ Фурье-спектры КНК для дней с различным уровнем активности сравниваются между собой по энергетическим характерис-

тикам. Показано, что в процессе эволюции А. О. происходит «перекачка» энергии КНК из крупномасштабных (долгопериодических КНК) в маломасштабные (короткопериодические КНК) элементы иерархической структуры. Проведен численный эксперимент на ЭВМ по обоснованию модели колебательной иерархии, поясняющей основные характеристики спектров КНК.

Вопрос о том, как охарактеризовать развитие активной области (А. О.) на Солнце, что может служить физическим параметром состояния и тенденции развития А. О., является сложной и актуальной задачей. Сложность задачи состоит в том, что многообразие явлений в А. О. (оптические, радио, рентгеновские и т. д.) вряд ли можно охарактеризовать единообразно, если только не найти соответствие наблюдаемых явлений определенной энергетической характеристике, определяющей или отражающей степень и состояние развития А. О. Актуальность этой задачи определяется как общей проблемой исследования природы явлений активности, так и необходимостью прогнозирования явлений для ряда прикладных задач [1]. Задача эта хотя и изучалась многими авторами, однако удовлетворительное решение еще не найдено. Развитие солнечной магнитогидродинамики показало, что практически все наблюдаемые явления в А. О. прямо или косвенно определяются магнитным полем (величиной, структурой, изменчивостью его). Одной из характеристик тонкой структуры солнечной магнитоплазмы, определяемой развитием А. О., может служить спектр низкочастотных колебаний поля [1]. Исследования последних лет показали [2 – 6], что, по-видимому, колебания магнитного поля определяют низкочастотные колебания доплеровских скоростей и яркости в элементах А. О. Эти квазипериодические

низкочастотные колебания (КНК) уже давно изучаются в оптике [7 – 10], а в последние годы также в диапазоне радиоэмиссии А. О. [11 – 15]. То, что спектр колебаний поля скоростей на уровне фотосферы и хромосферы тесно связан с модуляцией радиоэмиссии А. О. посредством магнитного поля, особенно хорошо проявляется для радиоэмиссии магнитотормозной (синхротронной) природы: радиовсплески IV типа, континуум шумовых бурь, S-компоненты, особенно для коротковолновой ($\lambda < 5$ см) части спектра [17]. В исследовании спектров флуктуаций наблюдения в радиодиапазоне имеют одно существенное преимущество перед оптикой. В радиодиапазоне удалось в последние годы [18 – 21] обнаружить колебания с периодами порядка нескольких секунд и меньшие, тогда как в оптике в этом диапазоне существенной помехой являются колебания атмосферы. С другой стороны, пространственное разрешение в оптическом диапазоне позволило показать [10, 22], что отдельные элементы явлений в А. О. (пятна и структурные элементы хромосферы – фибриллы, волокна, спикулы и т. д.) имеют свои собственные частоты колебаний. Радионаблюдения Солнца, которые проводятся с малыми антеннами, дают суммарный спектр дискретных колебаний в радиоисточнике, отражающий собственные частоты колебаний структурных элементов магнитоплазмы А. О. Предметом настоя-

шей работы является поиск и обоснование возможности охарактеризовать развитие А. О. с помощью спектра флуктуаций радиоизлучения S-компоненты на длине волны 3, 2 см, в излучении которой существенную роль играет магнитное поле [17].

Наблюдения и процедура анализа

Наблюдения проводились в секторе ионосферы АН Каз. ССР в течение нескольких лет с радиотелескопом на волне 3,2 см. Телескоп с параболической антенной диаметром 2 метра был установлен в горах (на высоте ~ 3000 м). Наблюдения флуктуаций проводились качанием диаграммы (компенсацией полного потока). Антенная температура $T \cong 1800^\circ$, постоянная времени $\tau = 16$ сек, температура шумовой дорожки $\leq 15^\circ$. Из ряда дней наблюдений выбирались совершенно безоблачные дни, для которых влияние атмосферы не существенно, и имеется достаточно полная информация о характере и интенсивности активности. С учетом аппаратных возможностей и условий наблюдений была поставлена задача анализа спектров флуктуаций в уже изученном диапазоне¹ (для периодов $T^m \leq T \leq 30^m$). Пятнадцатисекундные значения интенсивности эмиссии для массивов длиной не меньше 7680 сек² обрабатывались на ЭВМ БЭСМ-3М. Перед проведением Фурье-анализа исходные данные фильтровались (методом скользящего среднего с весовыми коэффициентами) для устранения нестационарностей в виде медленных трендов и колебаний с периодами, которые превышали длину реализации. Возникающие при этом ограничения, связанные с удовлетворением условий стационарности, определяющих достоверность спектров флуктуаций, обсуждались в работе [24]. По автокорреляционным функциям вычислялись рассматриваемые ниже спектры мощности. Для сглаживания использовалось окно Тьюки [25]. Все

записи усреднялись с постоянным периодом усреднения $T = 1095$ сек. При описанной процедуре стационаризации и усреднения получающиеся спектры мощности флуктуаций огрубляют те параметры спектра, которые могут служить характеристикой развития А. О. Они могут рассматриваться только как среднесуточная характеристика квазистационарного развития А. О. Получение более полного представления о статистически значимых изменениях в спектрах мощности флуктуаций радиоэмиссии, связанных с резкими изменениями в магнитных полях А. О., например во время солнечных вспышек, требует повышения временного разрешения и чувствительности радиотелескопа.

Поскольку нами использовался телескоп с малой антенной, то, естественно, что анализировалась интегральная радиоэмиссия от всего диска. На все дни наблюдений имеются детальные радиокарты Солнца на 8,6 мм, 9,1 см и 21 см [26] и одномерные сканы на 6 см [27] и 9,1 см [26]. Эти радиоданные, полученные с высоким разрешением, рассматриваемые совместно с детальными оптическими картами и фильтрограммами [26 – 27], позволяют достаточно полно определять соотношение величины S-компоненты и излучения всего диска, определить реальное соответствие спектра флуктуаций характеру развития явлений активности. Среди рассматриваемых нами выборочных дней наблюдений имеются дни: (а) с очень высокой (8,9 мая, 1971 г.) активностью (группа «А») рис. 1; (б) средней активности 18 сентября (группа «Б») рис. 2; (в) малой активности (11, 14 июня, 21 июня) (группа «В») рис. 3; и (г) спокойные (1 и 2 сентября) (группа «Г») рис. 4. Такое разделение носит несколько условный характер не только из-за, возможно, недостаточного числа используемых дней наблюдений. Понятие «степень активности» должно содержать не только величины параметров, например, площади пятен, значения магнитного потока или интенсивности S-компоненты, но и тенденцию развития А. О. (появление новых активных очагов, распад старых и т. д.), в значительной степени определяющую спектры КНК. Это как раз и есть искомая нами задача. Для того, чтобы сравнивать между собой спектры КНК, можно определить (в произвольных единицах) площади под «спектральными линиями». Величины S_n являются энергетической характеристикой

¹ Для исследований флуктуаций с периодами $T \leq T \leq T^m$, представляющими особый интерес для физики солнечной магнитоплазмы [23], ведутся в настоящее время соответствующие подготовительные работы.

² Генеральный массив, например, для наблюдений в июне 1971 г. имел длину 16740-24120 сек.

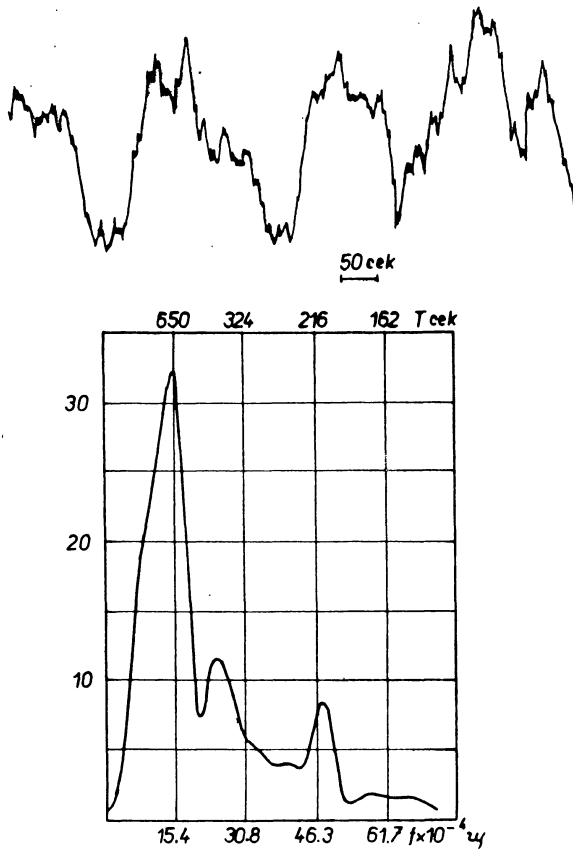


Рис. 1. Пример записи КНК (при значительной амплитуде) и образец результата Фурье-анализа длительной реализации того же дня.

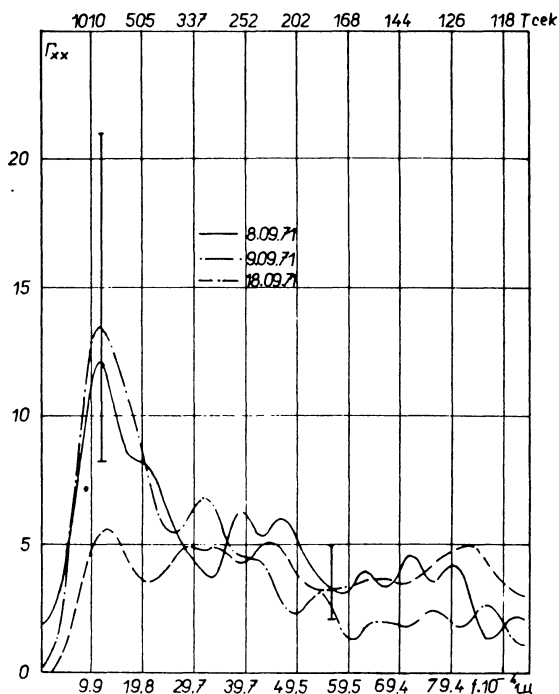


Рис. 2. Примеры спектров мощности для дней высокой и умеренной солнечной активности (группы «А» и «Б»).

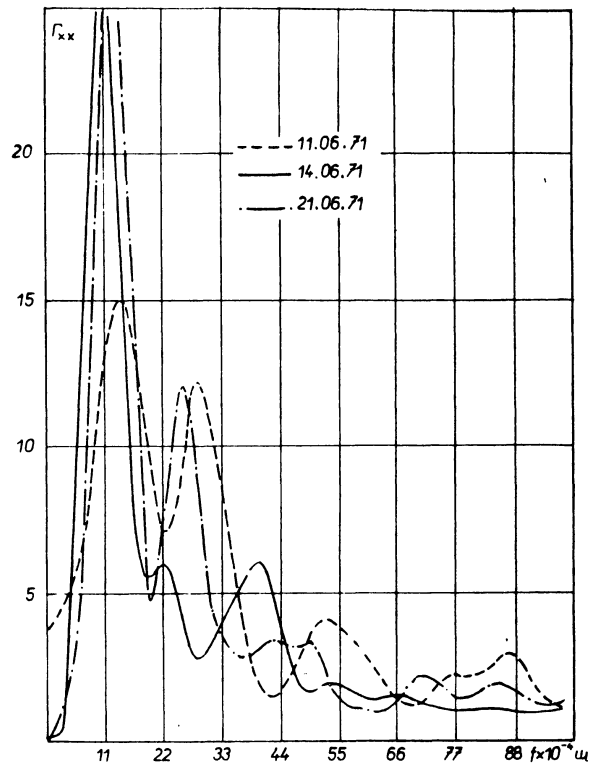


Рис. 3. Примеры спектров мощности для дней низкой активности (группы «В» и «Г»).

КНК на частотах максимума f_m при полуширине контура линии Δf . Эти данные для характерных дней наблюдений приводятся в таблице 1.

Некоторые характеристики спектров КНК

Из таблицы 1 и спектральных кривых можно установить следующее:

1. Спектры мощности КНК характеризуются наличием ряда *дискретных* линий. Контуров этих линий и энергетические параметры S_f , изменяющиеся в зависимости от уровня солнечной активности, могут служить количественной мерой рассматриваемого спектра.

2. Положение (f_i) спектральных линий на оси частот относительно стабильное. Отклонения от среднего периода данной линии находятся в пределах 16–20%.

3. Отмечаются значительные отклонения ($\geq 80-100\%$) от средней величины $\langle S_f \rangle$ для данной спектральной линии. Благодаря таким значительным разбросам энергии («интен-

Таблица 1. Энергетические характеристики спектров КНК

Группа «А»					Группа «Б»		Группы «В» и «Г» (низкая активность)					
22.08	25.08	18.09	9.05	10.05	15.05	27.05	11.06	2.09	12.06	13.06	21.06	19.06
7427	7134	5285	3890	3130	6284	6599	12625	9950	8047	8538	7836	6170
5	6	5	3	6	7	6	7	6	5	6	6	5
148,6	93,4	21,3	53,7	78,8	47,6	131,1	176,1	250,6	87,3	63,0	91,8	111,3
5373					6441		8861					
79,2					89,3		130,0					
4					6		6					

сности») линии имеет место значительное многообразие спектральных кривых, усиление или, напротив, отсутствие «привычных» частот. Так, например, наиболее «известная» линия с периодом 300 сек полностью отсутствовала (или неуверенно выявлялась) в 30 % рассмотренных спектрограмм.

4. Энергия колебаний для наибольшего периода ($\approx 15^m$) составляет значительную часть (от ~35 до ~70 %) общей энергии КНК. Энергия последующих (более короткопериодных) колебаний уменьшается с ростом частоты. Такая общая структура спектра характерна для дней с относительно низкой активностью или для дней появления «молодых» А. О. Для дней высокой активности (при распаде А. О.) значительно увеличивается интенсивность линий с большими частотами и структура спектра значительно меняется. Это видно из рис. 2. и таблицы 1.

5. Интегральная энергия ($\sum S_i = S_0$) КНК значительно меняется ото дня ко дню. Как видно из таблицы 1, S_0 имеет наибольшее значение в дни с низкой активностью и значительно уменьшается (в 2 – 3 раза) в дни с высокой активностью. Это соответствует данным других авторов [13, 14], отмечавших значительный спад КНК при высокой вспышечной активности.

6. Вариации интенсивности спектральных линий, связанных с изменением уровня и характера солнечной активности, отмечались рядом исследователей [11, 12, 14]. Для того, чтобы охарактеризовать эти изменения, была вычислена еще характеристика удельной энергии в линии

$$q_i = \frac{S_i}{\Delta f_i},$$

Таблица 2. Частотно-энергетические характеристики спектров КНК

Дни, группа	T_i		$\% S_i/q_i$		T_i		$\% S_i/q_i$		T_i		$\% S_i/q_i$		T_i		$\% S_i/q_i$	
	T_i	$\% S_i/q_i$	T_i	$\% S_i/q_i$	T_i	$\% S_i/q_i$	T_i	$\% S_i/q_i$	T_i	$\% S_i/q_i$	T_i	$\% S_i/q_i$	T_i	$\% S_i/q_i$	T_i	$\% S_i/q_i$
28.08 (А)	860	59,8/6,9	330	20,2/4,2	180	10,5/9,8	140	7,1/5,8	110	2,4/90	—	—	—	—	—	—
25.08 (А)	1000	48,3/5,1	400	28,3/8,1	180	8,2/160	170	8,8/191	135	3,9/11,8	105	3,5/16/16,7	—	—	—	—
18.09 (А)	930	17,6/1,2	390	22,1/7,3	290	14,3/11,8	20	20,1/5,8	—	—	120	25,2/8,3	—	—	—	—
9.05 (А)	860	34,9/1,4	730	18,8/40	145	46,3/16,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10.05 (А)	900	44,1/1,9	460	30,4/1,6	360	10,7/2,9	236	5,4/2,1	300	2,7/1,5	115	6,6/5,9	—	—	—	—
15.05 (Б)	900	32,2/2,5	430	19,1/1,8	280	12,1/3,4	250	13,7/3,8	180	17,3/8,9	135	2,9/4,9	105	2,6/6,6	—	—
27.05 (Б)	250	56,7/5,3	410	15,9/1,8	300	11,4/1,6	—	—	140	3,4/6,8	115	4,1/101	—	—	—	—
11.06 (В,Г)	880	63,8/8,3	380	17,8/4,7	230	6,4/9,2	180	5,9/6,8	140	1,2/6,6	125	2,3/8,7	110	1,9/9,9	—	—
2.09 (В,Г)	940	71,5/118	450	11,1/7,4	400	2,4/3,8	—	—	130	3,6/9,4	—	—	105	2,7/9,8	—	—
12.06 (В,Г)	790	46,6/460	350	34,9/5,8	190	13,1/10,3	140	4,3/12,8	—	—	110	1,2/5,3	—	—	—	—
13.06 (В,Г)	—	—	460	38,1/3,4	315	16,7/8,4	215	15,8/9,1	180	14,1/19,1	130	7,7/14,6	110	7,1/21,4	—	—
21.06 (В,Г)	860	47,8/8,3	400	21,4/5,1	235	8,4/4,5	200	6,9/6,1	140	7,6/102	—	—	—	—	—	—
14.06 (В,Г)	940	52,7/4,1	450	15,6/3,4	350	19,4/5,6	180	7,1/4,7	150	5,2/6,1	—	—	—	—	—	—

где Δf_i – полуширина линии. Из таблицы 2 видно, что для активных периодов Q_f значительно растет с частотой. Для дней с низкой активностью имеет место либо примерное равенство Q_f для различных f_i , либо $Q_{f_i} > Q_{f_k}$ при $f_i < f_k$, т. е. обратное тому, что наблюдается для дней с высокой активностью.

7. Правила (4–6) приводят к следующему важному для понимания природы КНК заключению. С развитием солнечной активности происходит: (а) процесс «перекачки» энергии долгопериодных колебаний в короткопериодные, (б) общая диссипация энергии КНК. Характер этих процессов виден при сравнении, например, спектров за 22.08.71 и 18.09.71. В этом случае на диске была практически одна А. О. В августе при очень высокой активности (мощная группа пятен с площадью $S_p = 3200$ ед. магнитного класса $\beta\gamma - \beta$, однако с тенденцией распада) характеристики КНК были: $S_0 = 7134$ при $S_{T=1000} = 48\%$, $S_{T=400} = 28\%$, $S_{T=180} = 7\%$, $S_{T=160} = 9\%$, $S_{T=125} = 4\%$. В сентябре, при повторном выходе той же активной области (площадь группы уменьшилась на порядок, магнитный класс $\beta \rightarrow \alpha\beta$) характеристики КНК были уже следующие: $S_0 = 5285$ при $S_{T=745} = 18\%$, $S_{T=390} = 22\%$, $S_{T=290} = 14\%$, $S_{T=220} = 21\%$, $S_{T=120} = 25\%$.

Модель процесса КНК

1. Качественные и количественные сопоставления КНК в радиоэмиссии с КНК для лучевых скоростей, яркости и магнитного поля фотосферных и хромосферных явлений [3, 12, 29] приводят к заключению о том, что КНК в радиоэмиссии непосредственно связаны с флуктуациями поля в А. О. на малых высотах. Измерения спектров КНК в магнитном поле ядер солнечных пятен, проведенных одновременно на двух уровнях (в фотосфере и нижней хромосфере) с помощью двойного вектор-магнитографа [3] показали, что от фотосферы в направлении силовых линий магнитного поля, уходящих в хромосферу и корону, распространяются трехмерные макромагнитные волны [23]. Эти волны, слабо поглощаясь в солнечной атмосфере, строго гидрируются магнитным полем. Характер их распространения в значительной степени подобен гидромагнитным пульсациям в земной магнитосфере

[28]. Пришедшие из фотосферы и хромосферы КНК магнитного поля вызывают в источниках S-компоненты радиоэмиссии или радиовсплесков IV типа, наблюдаемые флуктуации радиоэмиссии. Такое понимание КНК в радиоэмиссии подтверждается наблюдениями во время мощного активного периода в августе 1972 г. В работе [29] было показано, что очень большая (до 90 %!) глубина модуляции в компоненте IV mV длительного (несколько часов) радиовсплеска при мощной протонной вспышке 4-го августа 1972 г. непосредственно связана с колебаниями магнитного поля, возникшими при колебательных возмущениях в «спокойном» волокне вблизи мощной группы «д» магнитной конфигурации. Этот результат был получен при сопоставлениях фильтрограммного H₂-фильма с радиоданными. Измерения КНК в радиоэмиссии [29] для этого периода показали, что их спектр существенно меняется при значительных изменениях магнитного поля А. О. (при относительном сдвиге областей N и S магнитной полярности в группе [30]). Наконец, проведенные исследования КНК для магнитного поля Солнца, рассматриваемого «как звезда», показали [31], что спектры КНК в этом случае имеют примерно тот же вид, что КНК для радиоэмиссии. В последнем случае, при котором преднамеренно ухудшилось пространственное разрешение для получения КНК магнитного поля усредненного Солнца, оптические измерения были близки к тому, что получается при измерении КНК радиоэмиссии в наших измерениях с малой антенной.

Таким образом, при обсуждении природы КНК можно считать, что между КНК в радиоэмиссии и магнитном поле имеется тесное физическое соответствие.

2. В работе [10, 22] были измерены спектры КНК-интенсивности для ряда характерных элементов хромосферной структуры: одной А. О.: в ядре пятна, полутени, в фибриллах, волокнах, узлах супергранул. Периоды флуктуаций яркости в этих элементах значительно различались: в пятне преобладал 300 сек период, тогда как в остальных элементах отмечались 2–3-минутные колебания. Этим было показано, что различные структурные элементы А. О. имеют свои собственные периоды колебаний, которые зависят от размеров магнитного поля и плотности магнитоплазмы этих образований. Спектр дискретных линий КНК при наблюдениях с малым пространственным

разрежением можно, поэтому, рассматривать как отражение набора дискретных колебаний ряда структурных элементов магнитоплазмы А. О. Наблюдаемые изменения «собственных частот» колебаний могут происходить с развитием явлений в А. О., и они обнаруживаются также при радионаблюдениях. Следует считать, что каждой «линии» спектра КНК соответствует свой характерный размер «источника», определяемый локальной альвеновской скоростью в хромосферно-корональной плазме А. О. Условием возможности когерентных колебаний источника размера L должно быть соотношение $L \leq \lambda_A$, где λ_A — длина волны колебательных возмущений магнитного поля в источнике радиоэмиссии. Для случая $L \gg \lambda_A$ (речь идет о короткопериодических $T \approx 0,1 - 10$ сек колебаниях радиоэмиссии, обнаруженных в радиовсплесках IV типа) условием возможности существования глубокой модуляции является равенство частот колебаний поля для множества некогерентных колебаний элементов магнитоплазмы составляющих источника L . Такую «резонансную» частоту возмущения поля могут давать предельно малые исходные элементы магнитоплазмы — субгранулы [23].

3. Многочисленные оптические наблюдения привели к представлению [32] о существовании на Солнце связанных между собой иерархических структур. Гигантские гранулы [32] (совокупность или крупномасштабный комплекс А. О.; КНК с периодом в ~ 40 минут [15], по-видимому, соответствуют колебаниям гигантских гранул), супергранулы, гранулы и субгранулы [23] являются элементами этой иерархической «лестницы». Наблюдаемые явления солнечной активности в А. О. можно рассматривать как дискретные составные части общей иерархической структуры, которые своим магнитным полем уходят к подфотосферному полю А. О. Энергетика и динамика (в том числе КНК) этих элементов определяется посредством магнитного поля подфотосферной конвективной зоны. Чисто феноменологически А. О. следует рассматривать как линейно-связанные дискретные элементы иерархической структуры, каждый из которых имеет собственную частоту колебаний. Во всей этой совокупности элементов может возбуждаться спектр колебаний при воздействии на нее через магнитное поле «белого шума» конвективной зоны, т. е. «белый шум» фильтруется рядом резонансных

фильтров — элементами А. О. Такую модель можно статистически описать [25] процессом авторегрессии (непрерывным или дискретным) m -го порядка:

$$\sum_{i=1}^m a_i \frac{d^i x}{dt^i} + [X(t) - \mu] = Z(t),$$

где $Z(t)$ — вход системы, принимаемый за белый шум, $X(t)$ — отклик системы, $\mu = \frac{\sum x}{N}$, a_i — постоянные. С помощью ЭВМ можно провести численное моделирование нашего процесса, подбирая такие параметры a_i, μ , при которых будет наилучшее согласие численной модели с нашим процессом.

Первый результат такого численного моделирования процесса, проведенный на ЭВМ БЭСМ-4, представлен на рис. 4, 5. Основной пока его результат сводится к тому, что для ряда рассмотренных нами дней наблюдений можно действительно рассматривать КНК как процесс авторегрессии m -го порядка. Суще-

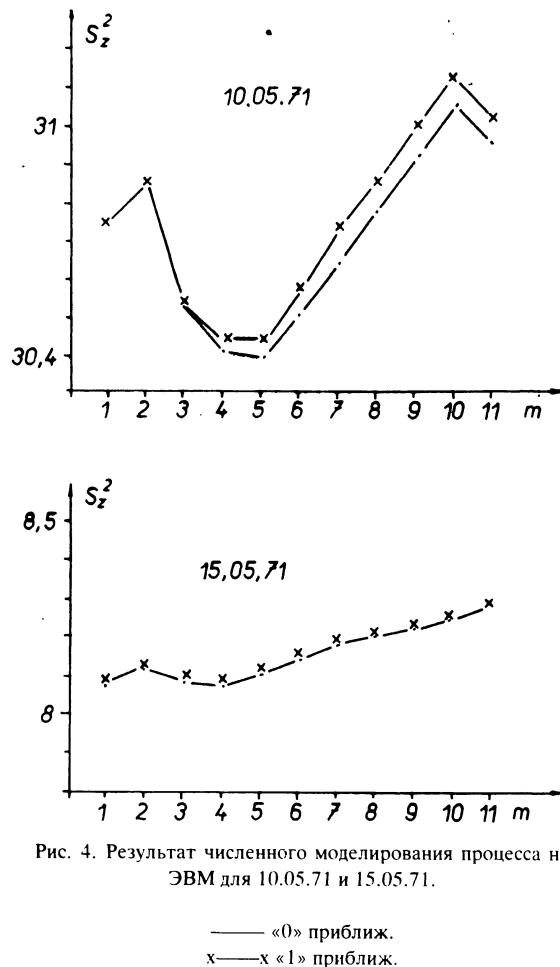


Рис. 4. Результат численного моделирования процесса на ЭВМ для 10.05.71 и 15.05.71.

— «0» приближ.
x—x «1» приближ.

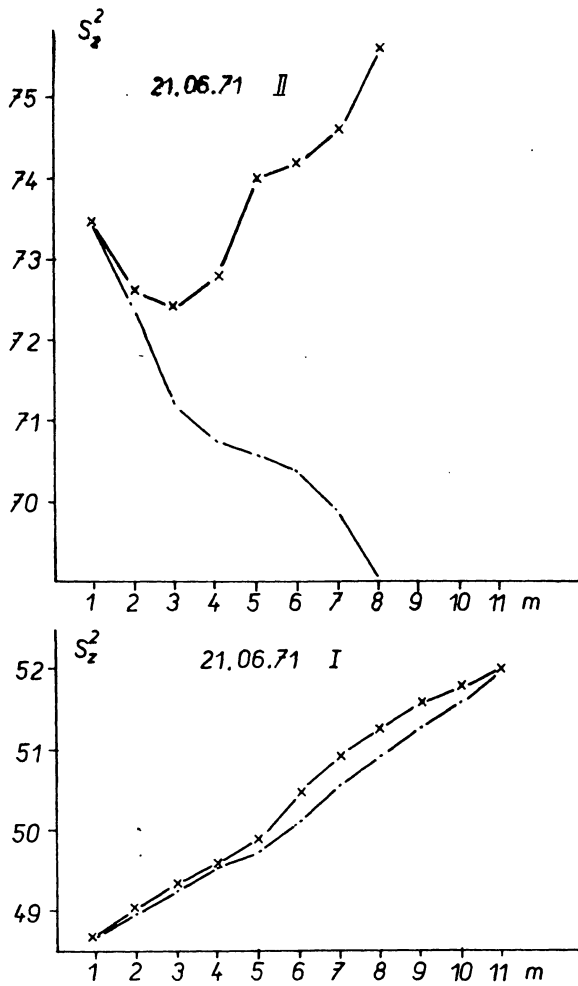


Рис. 5. То же, что и на рис. 4, для 21.06.71.

твенно, как это видно из рис. 4, 5, что процесс авторегрессии имеет низкий порядок (1–3). Это указывает, что мы можем рассматривать процесс КНК как совокупность колебательных явлений в единой системе А. О., возбуждаемой белым шумом. Дальнейший анализ при подобном численном моделировании может позволить получить информацию о свойствах функции $Z(t)$ (белый шум подионосферной области), о характере передачи и распространении возбуждений системы в процессе развития явлений солнечной активности. Это может послужить не только подтверждением справедливости принятой модели, но и рассматриваться как новый источник информации о развитии А. О.

4. О характере связи между дискретными элементами А. О. можно получить некоторое представление при рассмотрении спектров

КНК. Если предположить, что контур спектральной линии отражает вход (участок подъема в линии) или выход (ниспадающий участок контура) энергии при взаимодействии дискретных иерархических элементов А. О., то в случае изотропной турбулентности этого процесса должно выполняться условие [33] типа

$$\Gamma_{xx}^2 \approx f^{-5/3}$$

Для ряда спектров были проведены такого рода контрольные расчеты, представленные на рис. 6–8. Из рис. 6 видно, что ход кривой на участке (АВ) хорошо аппроксимируется кривой типа $\sim f^{-5/3}$. Расхождения наступают на участке появления соседних частот. Независимо от конкретного механизма энергопередачи, действующего между элементами, ответственными за дискретные частоты КНК, можно утверждать, что, например, в передаче колебаний с $T \approx 15^m$ к колебаниям элементов с $T < 15^m$ происходит преимущественно в результате статистически случайных взаимодействий. В то же время ясно видно (см. рис. 8), что единым процессом, например, изотропной турбулентности, спектральные кривые явно не описываются. То, что для спектров КНК при высокой активности отклонения от «закона 5/3» наибольшие, можно отнести, вероятно, за

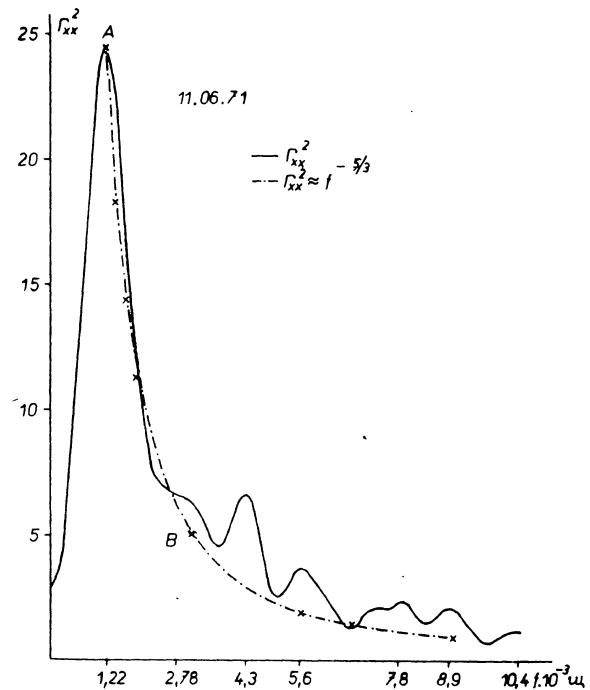


Рис. 6. Сравнение спектра мощности с расчетной кривой $\Gamma_{xx}^2 \approx f^{-5/3}$ для 11.06.71

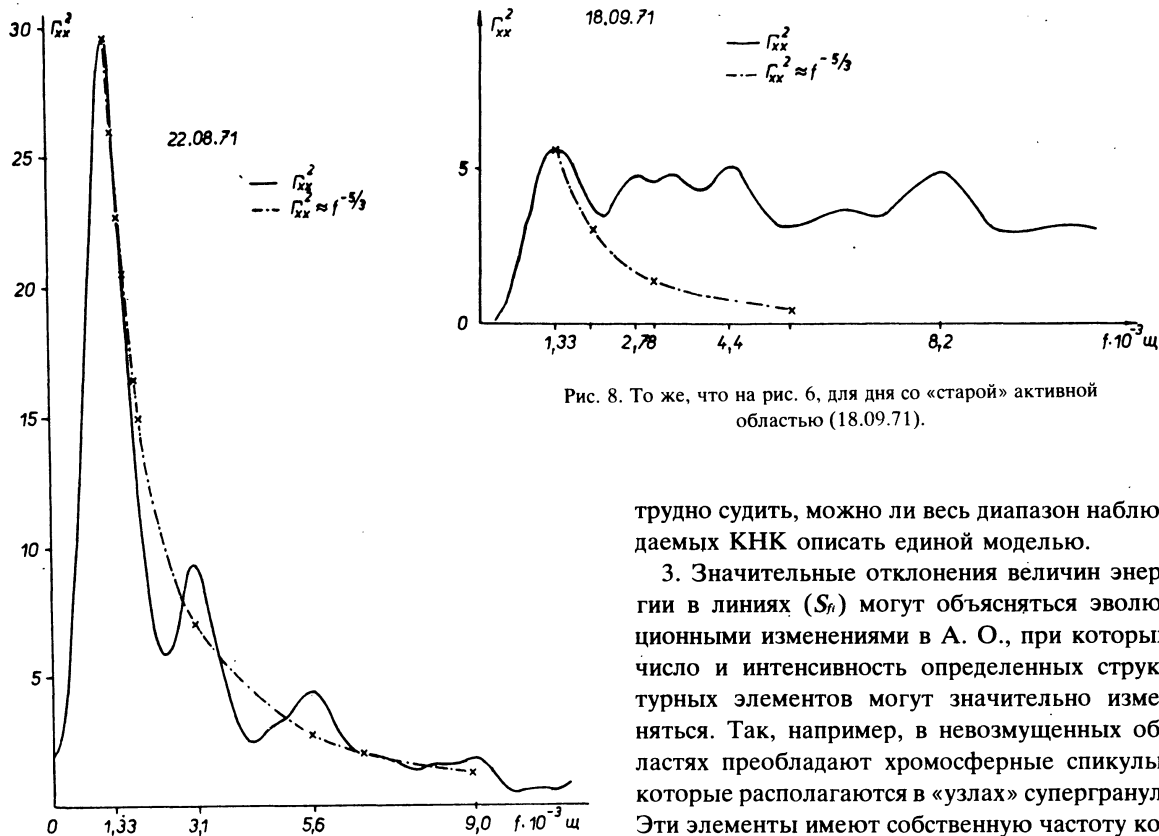


Рис. 7. То же, что на рис. 6, для 22.08.71.

Рис. 8. То же, что на рис. 6, для дня со «старой» активной областью (18.09.71).

счет резкого нарушения изотропности в энергопередаче, связанной с гидрирующим влиянием магнитного поля.

Обсуждение

Произведем качественное сравнение указанных в п. (3) свойств спектров КНК с рассматриваемой моделью.

1. Дискретность спектра КНК была принята как исходное в модели. Отсюда следует также и то, что S_n и их соотношения по спектру могут служить количественной мерой спектра КНК.

2. Относительное постоянство дискретных частот f_i указывает на неслучайный характер параметров дискретных структур, ответственных за КНК. Следует учесть, что ограниченный спектральный диапазон наших спектрограмм не содержит информации о короткопериодных (0,1–10 сек) и, напротив, длиннопериодных ($T \geq 30^m$) КНК. В настоящее время

трудно судить, можно ли весь диапазон наблюдаемых КНК описать единой моделью.

3. Значительные отклонения величин энергии в линиях (S_n) могут объясняться эволюционными изменениями в А. О., при которых число и интенсивность определенных структурных элементов могут значительно изменяться. Так, например, в невозмущенных областях преобладают хромосферные спикюлы, которые располагаются в «узлах» супергранул. Эти элементы имеют собственную частоту колебаний ≈ 300 сек [34], в А. О., особенно при сложных магнитных полях, супергрануляционные элементы сохраняются в несколько деформированном виде. Изменение размеров, времени жизни, интенсивности супергранул и резкое уменьшение числа спикюл в А. О. существенно меняет величину энергии для линии «300 сек». В то же время появление в А. О. новых структурных элементов магнитоплазмы приводит к росту короткопериодных КНК. Подобный же результат был получен при оптических наблюдениях поля [3] и лучевых скоростей [4].

4. Пункты (4)–(7) приведенных выше свойств КНК указывают на характерный процесс «перекачки» энергии колебаний от низких к более высоким частотам в процессе эволюции А. О. Это может быть следствием двух причин: (а) в процессе эволюции А. О. происходит дробление структурных элементов, проявление тонкой структуры магнитоплазмы вследствие диффузионных процессов в магнитном поле А. О. Подобное явление наблюдается и описывается гипотезой А. О. Лейтона [35]; (б) концентрация наибольшей энергии в долгопериодной линии спектра КНК при по-

явлении А. О. и последующий процесс «перекачки» может указывать на то, что образование А. О. связано с инъекцией энергии (и возбуждением КНК) прежде всего в крупномасштабных элементах А. О. Возбуждение более короткопериодных КНК может происходить в процессе эволюции А. О. путем обычной тенденции к минимизации энергии системы. Такая схема соответствует модели развития солнечной активности Бабкока – Лейтона [35]. Согласно этой теории дифференциальное вращение Солнца и случайные (диффузионные) движения составляющих исходных эле-

ментов А. О. приводят в процессе эволюции к расширению и такой деформации рассчитанных контуров А. О., которые хорошо соответствуют наблюдениям. В этом случае начальная энергия, полученная А. О. из подфотосферных слоев, постепенно релаксирует, хотя за время существования А. О. возможны усложняющие процессы дополнительной «подкачки» энергии. Это происходит благодаря влиянию «всплывающих» новых очагов, действующих как на всю область, так и на ее элементы. Спектры КНК в радиоэмиссии отражают этот процесс эволюции.

Литература

1. МОГИЛЕВСКИЙ, Э. И., Препринт ИЗМИРАН, № 19, In: M.S. McIntosh and M. Dryer (Eds). Progress in Astronautics and Aeronautics, 30, 411, MIT Press, Cambridge.
2. TANENBAUM, A. S., WILCOX, I. M., ROBERT, H. (1971): In: Solar Magnetic Fields, p. 348. Int. A. U. Symp. No. 43, Paris 1970. Dordrecht 1971.
3. МОГИЛЕВСКИЙ, Э. И., ОБРИДКО, В. Н., и ШЕЛЬТИНГ, Б. Д. (1972): Астрон. цирк., № 669, 1; Изв. ВУЗ Радиофизика, 16, 1973, № 9, 73.
4. BECKERS, J. M., SCHULTZ, V. B. (1972): Solar Phys., 27, 61.
5. GIOVANELLI, R. G. (1972): Solar Phys., 27, 71.
6. СЕВЕРНЫЙ, А. Б. (1967): Астрон. ж., 44, 481.
7. LEIGHTON, R. B., NOYES, R. W., SIMON, C. W. (1962): Astrophys. J., 135, 474.
8. FRAZIER, B. N. (1968): Astrophys. J., 152,
9. EDMONDS, F. N., WEBB, C. J. (1972): Sol. Phys., 22, 276; 25, 44.
10. HARVEY, J. W., HOWARD, R. (1972): Solar Phys., 23, 300.
11. ГЕЛЬФРЕЙХ, Г. Б., ДЕРЕВЯНКО, О. Г., КОРЖАВИН, А. Н. и СТАСЮК, Н. П. (1969): Солнечные данные, № 9, 98.
12. ДУРАСОВА, М. С., ЛАВРИНОВ, Г. А., ЧЕНДОВЕВ, К. А. и ЮДИН, О. И. (1968): Изв. ВУЗ Радиофизика, 11, 1782.
13. БЕЛОВ, И. Ф., КОБРИН, М. М. и КОРШУНОВ, А. И. (1969): Солнечные данные, № 11, 95.
14. ДУРАСОВА, М. С., КОБРИН, М. М. и ЮДИН, О. И. (1971): Nature, 229, 83.
15. KOBIRIN, M. M., KORSHUNOV, A. I. (1972): Solar Phys., 25, 339.
16. ЖЕЛЕЗНЯКОВ, В. В. (1964): Радиоизлучение Солнца и планет. Изд. Наука, Москва.
17. ROSENBERG, H. (1970): Astron. Astrophys., 9, 159.
18. GOTWOLS, V. C. (1972): Solar Phys., 25, 232.
19. AVRAMI, C. A. (1971): Solar Phys., 11, 104; 1972, 51, 365.
20. ZIMMERMAN, G. (1971): Astron. Astrophys., 15, 433.
21. BHATNAGAR, A., TANAKA, K. (1972): Solar Phys., 24, 87.
22. МОГИЛЕВСКИЙ, Э. И. In: R. Howard (Ed.): Solar Magnetic Fields, p. 480. I. A. U. Symp. NO 43, Paris, 1970. Dordrecht 1971.
23. ГОНТАРЕВ, О. Г. и ИЛЬИН, А. Л. (1973): Труды сектора ионосферы АН Каз. ССР, АН СССР, 4.
24. ДЖЕНКИНС, Г. и ВАТТС, Д. (1971): Спектральный анализ и его приложения. Изд. Мир, Москва.
25. Solar-Geophysical Data, US Dep. Som. NOAA, 1971—1972.
26. Солнечные данные, 1971—1972 гг.
27. ВАНЬЯН, Л. Л., АБРАШЕВ, Л. А. и др. (1973): Сб. Геомагнитные пульсации. Изд. Наука, Москва.
28. АКИНЬЯН, С. Т., ИШКОВ, В. Н., МОГИЛЕВСКИЙ, Э. И., БЕМЕ, А., КРЮГЕР, А. и ФЮРСТЕНБЕРГ, Ф. (1975): Сб. 7-й кон. конф. по физике Солнца, Татранска Ломница, 1973.
29. RUST, D. M. (1973): AFCRI-TR-73-0221, Envir. Res., Papers, No. 440, Soc. Peak, Ocs, 1973.
30. ИОШПА, Б. А., ОБРИДКО, В. Н. и ШЕЛЬТИНГ, Б. Д. (1973): Solar Phys., 29, 385.
31. БУМБА, В. (1970): Иерархия распределения солнечных магнитных полей. Докт. диссертация, 1969. ГАИШ; Solar Phys., 14, 80.
32. МОНИН, А. С. и ЯГЛОМ, А. М. (1965): Статистическая гидромеханика. Изд. Наука, Москва.
33. DEUBNER, F. L. (1971): Solar. Phys., 17, 6; 1972, 22, 118.
34. LEIGHTON, R. B. (1969): Astrophys. J., 156, 1.
35. BABCOCK, H. W. (1962): The solar magnetic cycle. Trans. J.A.U., 11, 419.