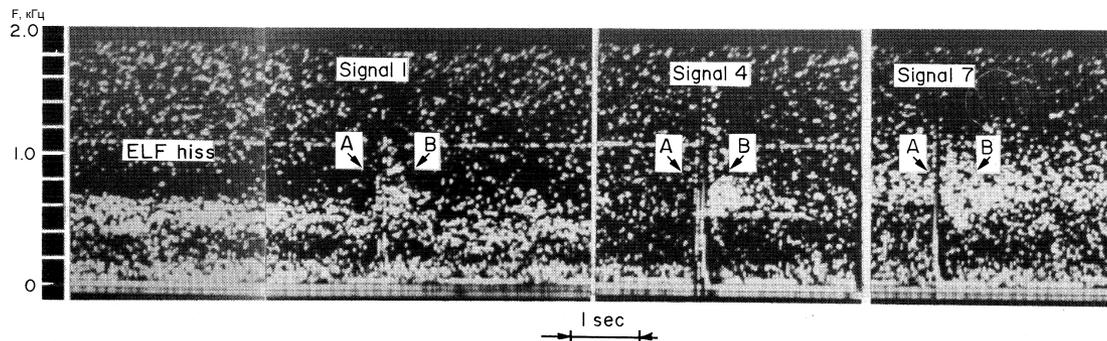
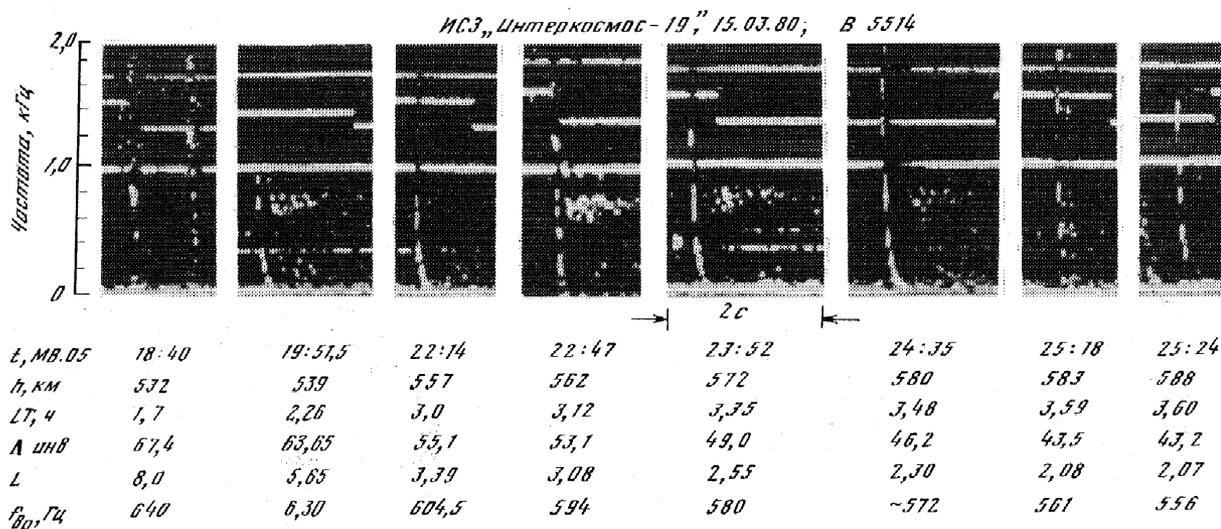


Цифровой спектрально-временной анализ  
электромагнитных излучений,  
зарегистрированных на спутниках «Интеркосмос-  
14» и «Интеркосмос-19» в диапазоне частот  
20 – 20 000 Гц

Г.А.Михайлова, Н.И.Будько



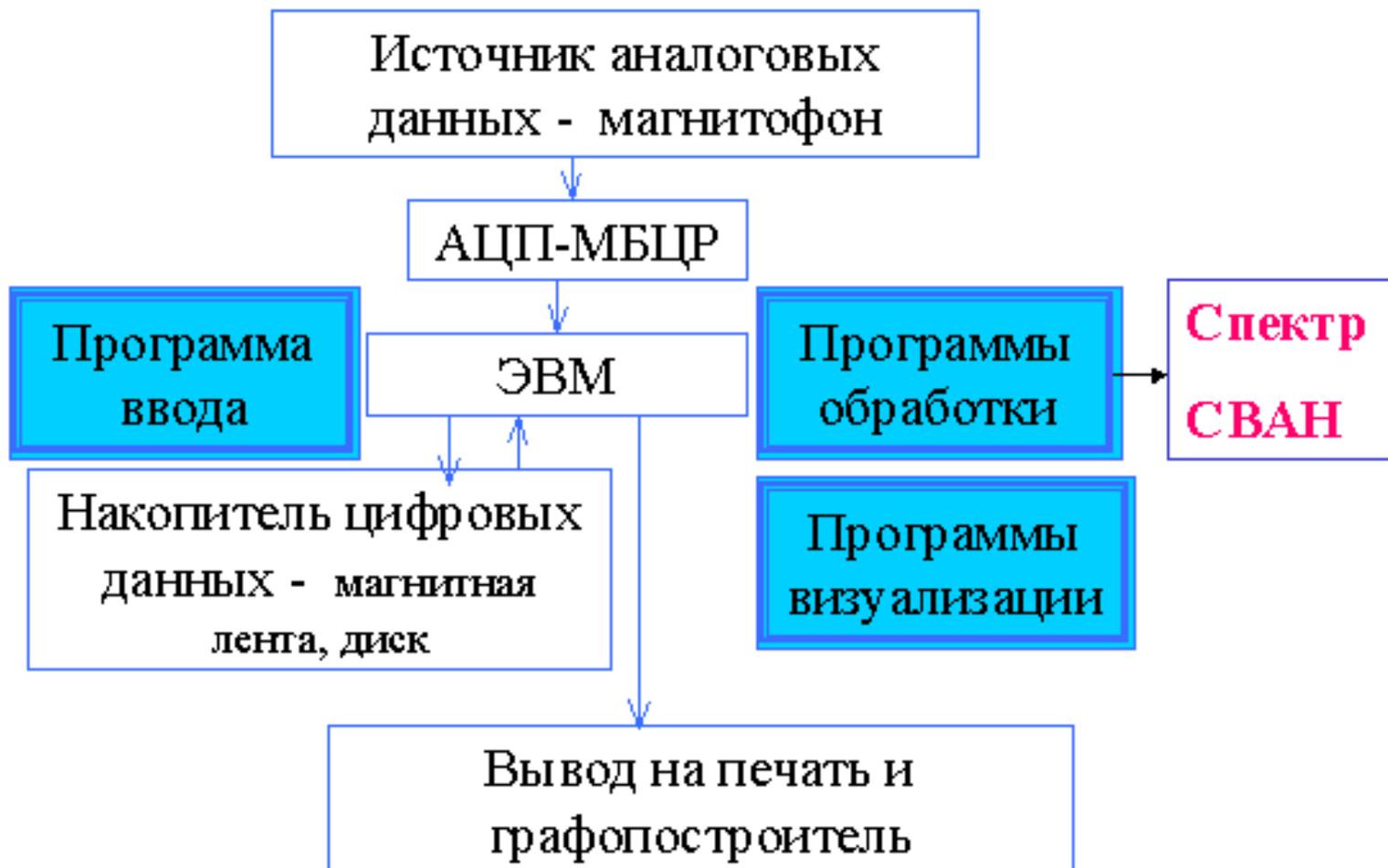
Спектрограммы КСА (А) и стимулированного излучения (В) на ИСЗ «Интеркосмос – 14»



При анализе данных ИСЗ “Интеркосмос-14”, а затем “Интеркосмос-19” был обнаружен ранее неизвестный эффект возбуждения во внешней ионосфере КНЧ - шумового электромагнитного излучения под воздействием коротких свистящих атмосфериков (КСА). Он наблюдался в период сильной грозовой активности в ночное местное время. Интенсивность стимулированного излучения (СИ) более, чем на порядок выше интенсивности естественного шумового фона и одного порядка или ниже интенсивности запускающего сигнала. Эти пакеты волн генерируются на частотах, совпадающих с частотами интерференционных максимумов пары КСА. Эффект наблюдается, когда интенсивность в максимуме превышает некоторый порог.

N	$t$ , МОСК	$h$ , км	$\lambda$ , E	$\varphi$ , N	L	$B_0 10^4$ , нТ
ВИТОК 2016		07.05.1976				
1	03.55,18	460	7°31'	60°25'	3,89	4,16
2	03.55,30	450	8°22'	59°48'	3,72	4,15
3	03.56,08	440	10°17'	58°07'	3,35	4,14
4	03.56,35	430	12°00'	56°24'	3,04	4,13
5	03.56,51	420	12°42'	55°06'	2,85	4,11
6	04.00,18	365	21°18'	42°25'	1,63	3,91
ВИТОК 2069		11.05.1976				
7	00.50,16	451	35°30'	65°12'	4,52	4,41

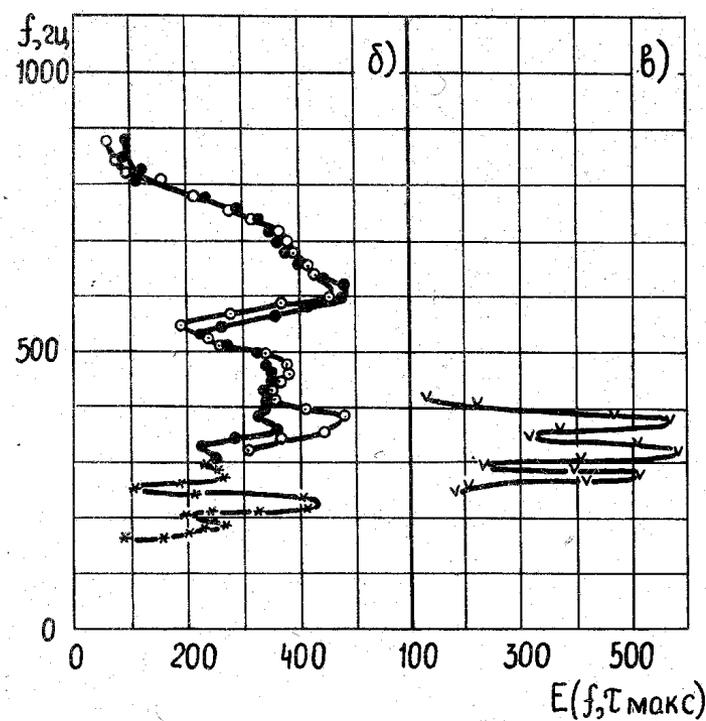
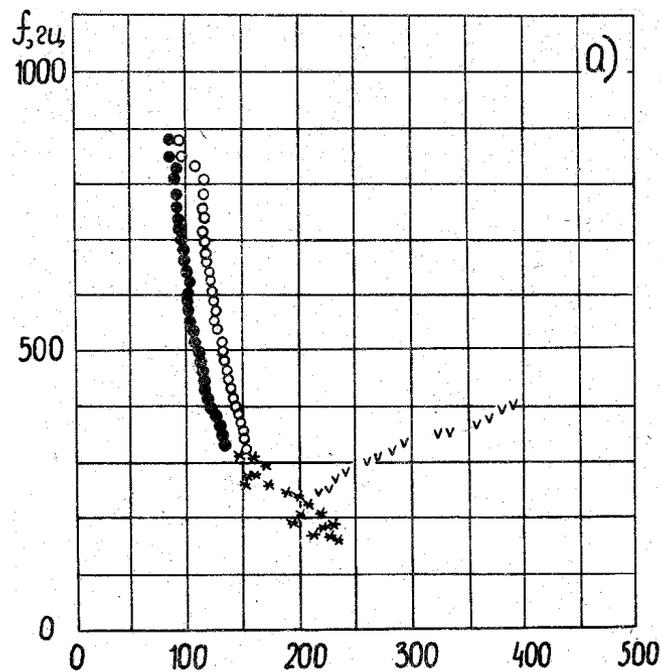
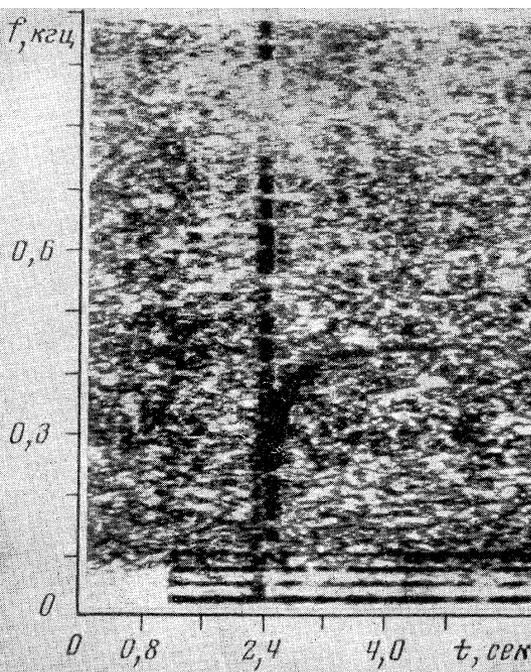
В 60-70-х годах прошлого столетия ИЗМИРАН совместно со спецсектором ИФЗ был создан комплекс цифрового спектровременного анализа (**ЦСА**)

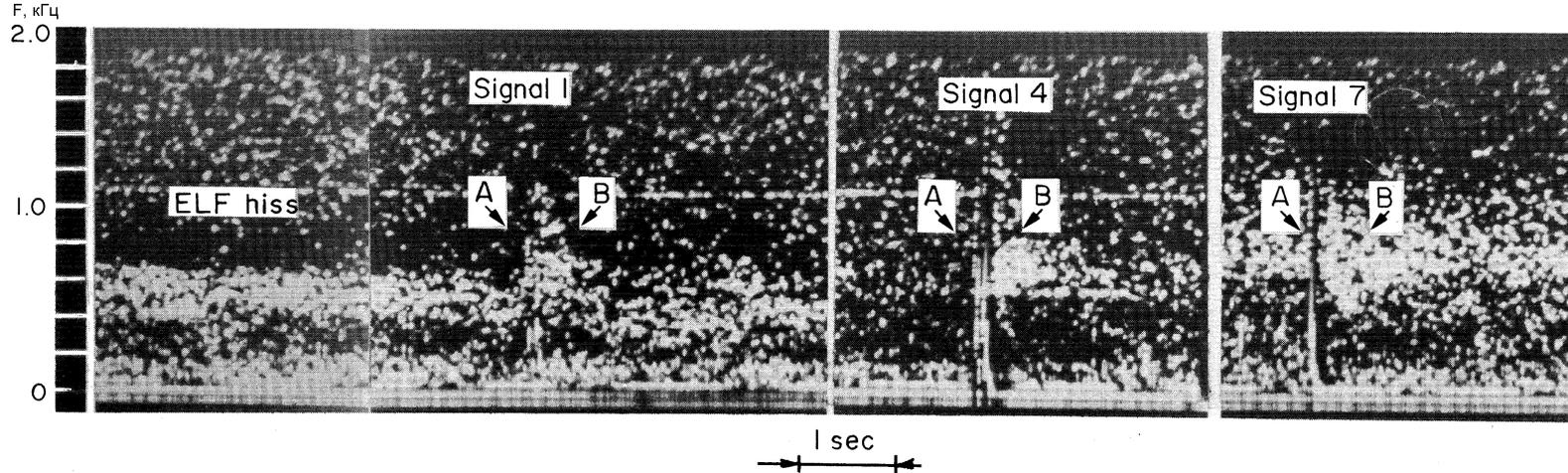


Программы обработки позволяют получать следующие характеристики аналоговых сигналов:

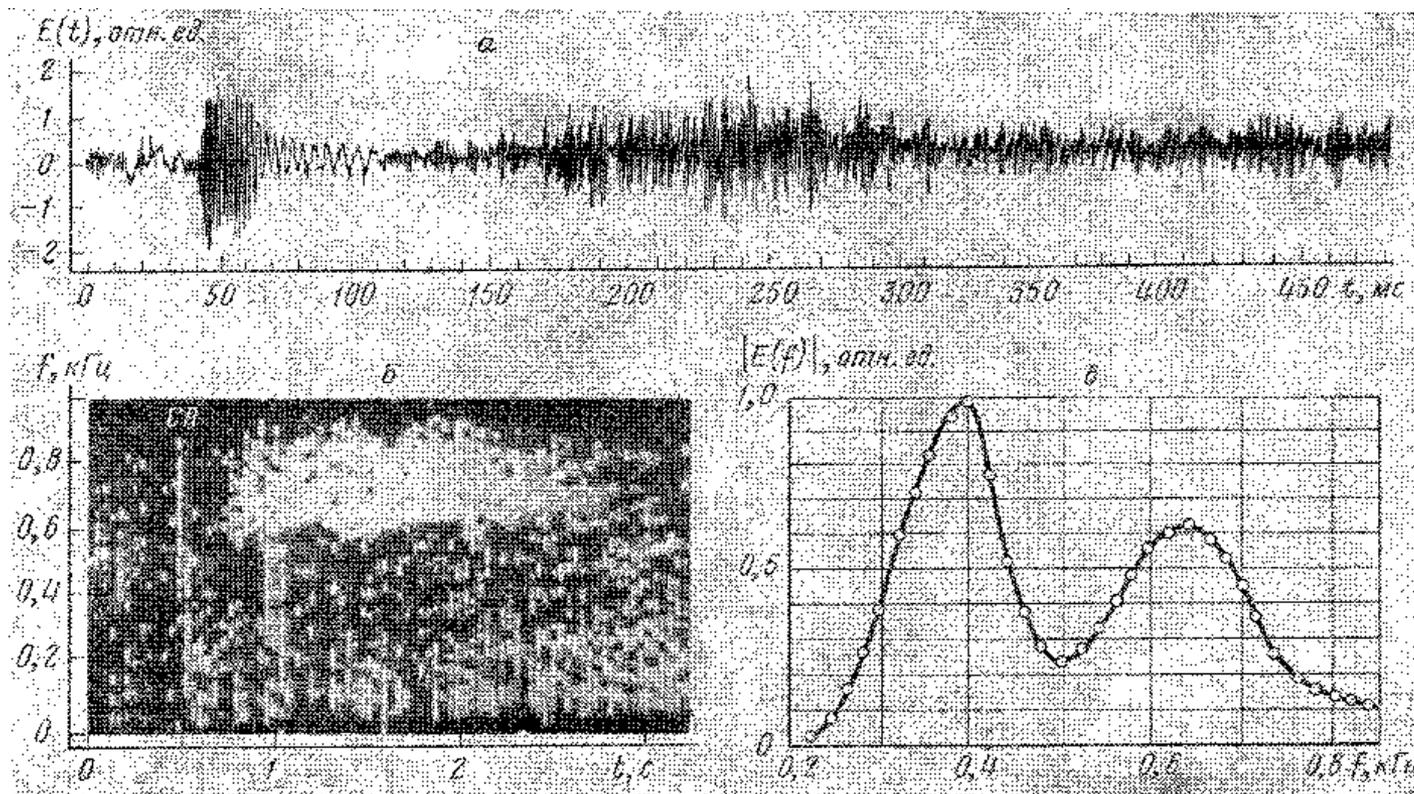
- Временную форму сигнала  $E(t)$ .
- Комплексный спектр  $E(f)$ .
- Цифровую спектрограмму  $E(t, f)$  набором гауссовых фильтров с оптимальной шириной фильтра  $\Delta F_{\text{opt}}$   
 $\Delta F_{\text{opt}} = 2\sqrt{(\beta \ln 1,43/\pi)}$  и соответственно с оптимальным разрешением по времени  $\Delta_1 t^2 = \Delta F^2/\beta^2 + \Delta t$ , зависящими от скорости изменения частоты с временем  $\beta = df/dt$  входного сигнала, каким является свистящий атмосферик. В этом состоит отличие ее от аналоговой спектрограммы.

# Анализ квазипериодической структуры спектрограмм свистящих атмосфериков

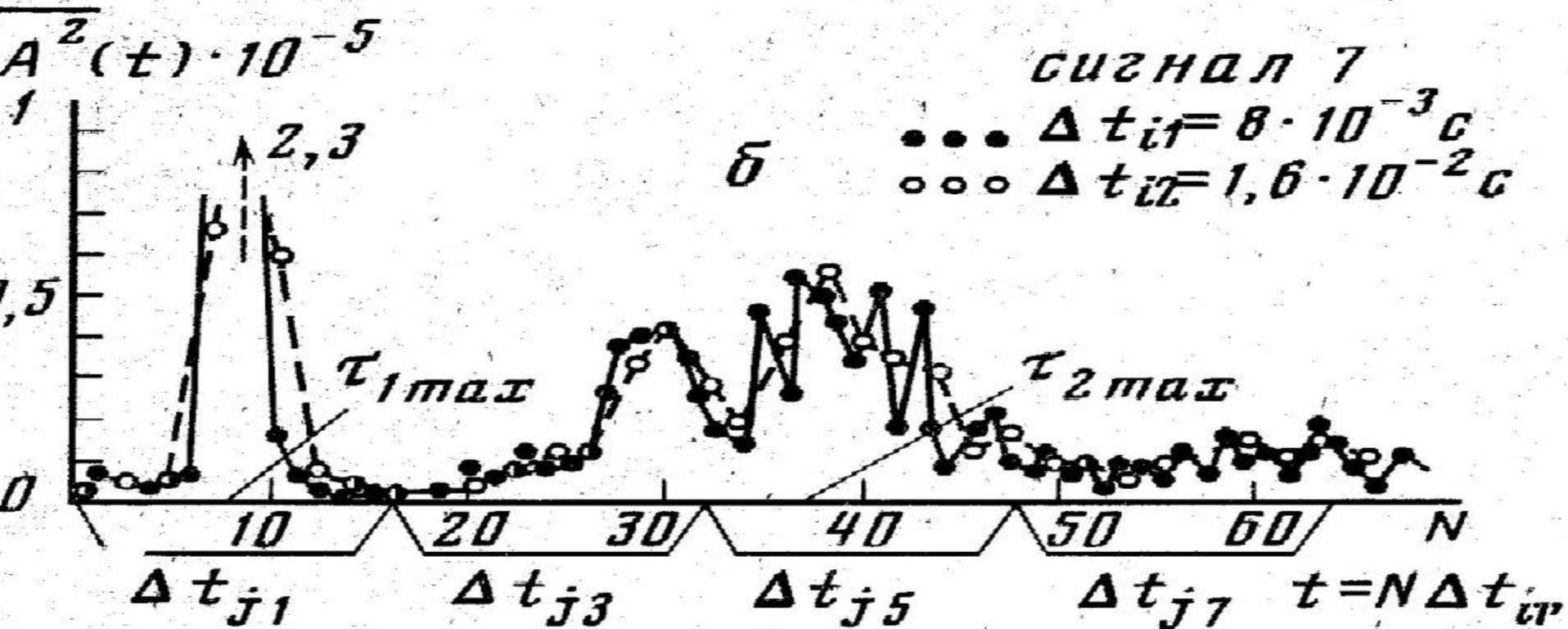
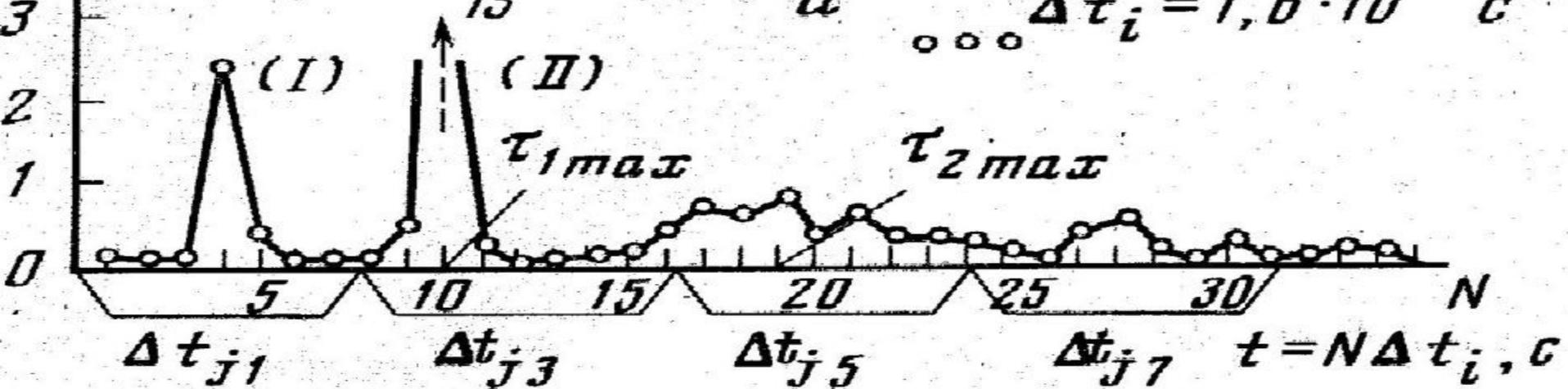




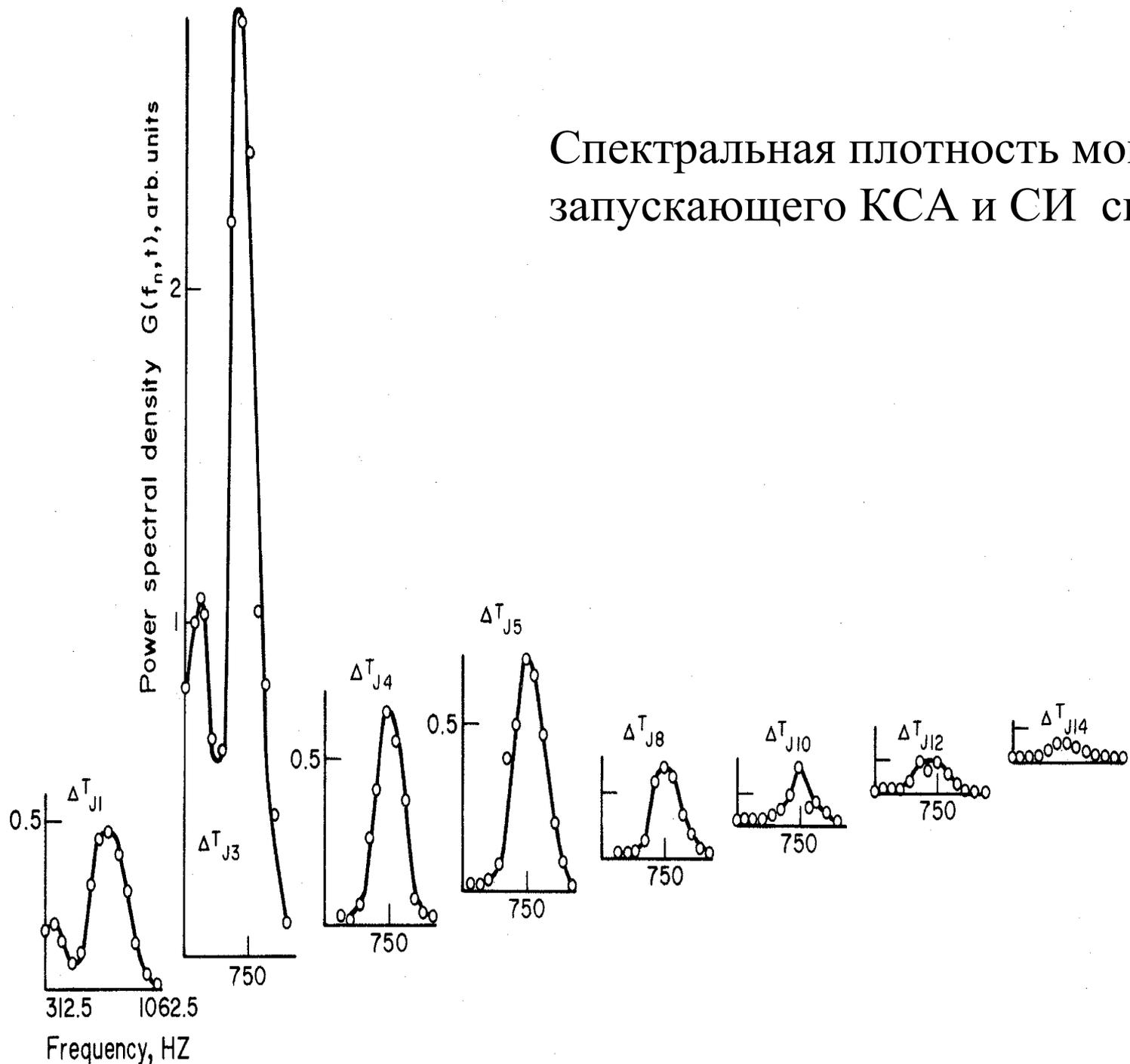
## Запускающий КСА (А) и СИ (В) «Интеркосмос – 14»

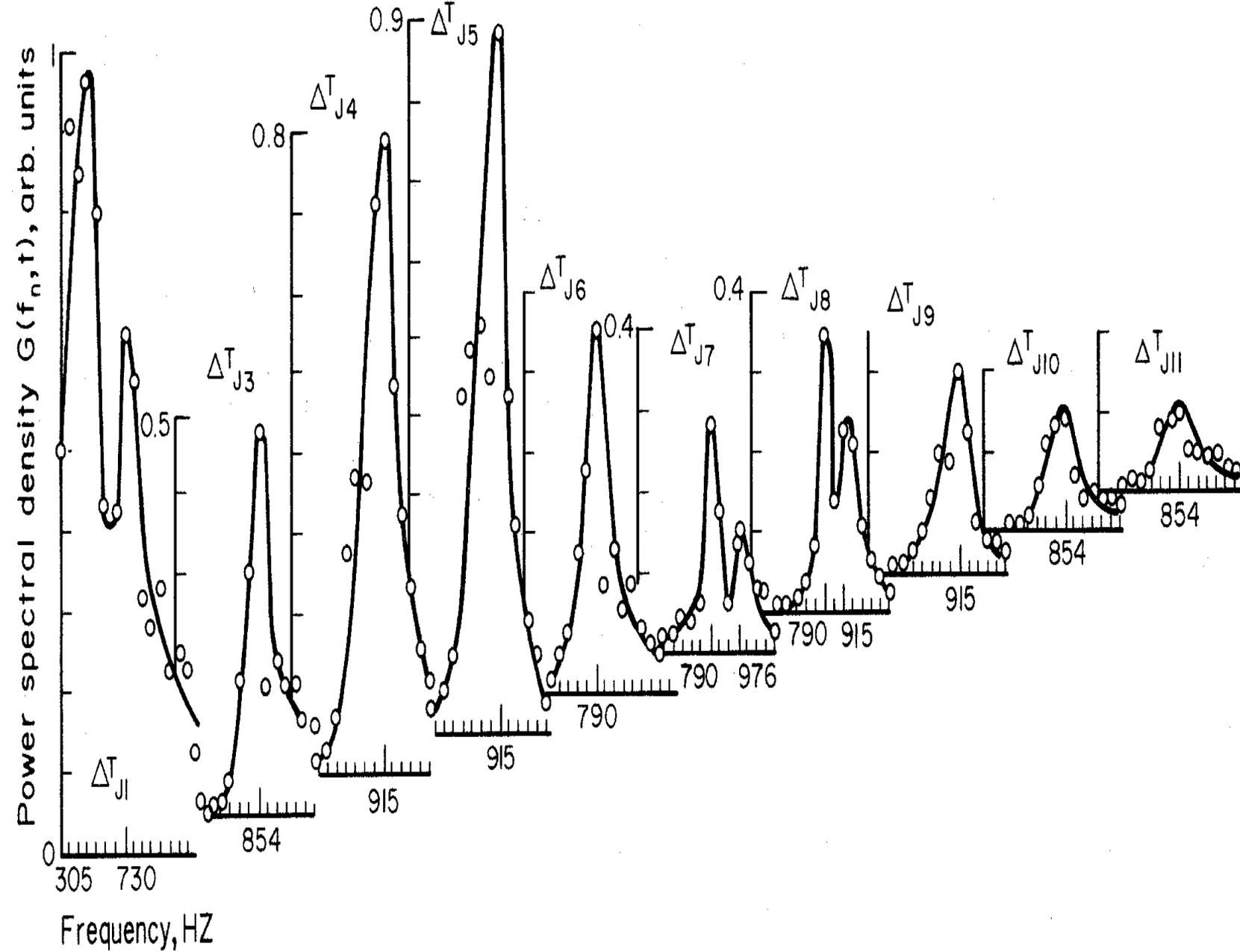


В2016, 7.V.1976,  $t=04^{\text{h}}00'18''$  м. в.,  $h=364$  км



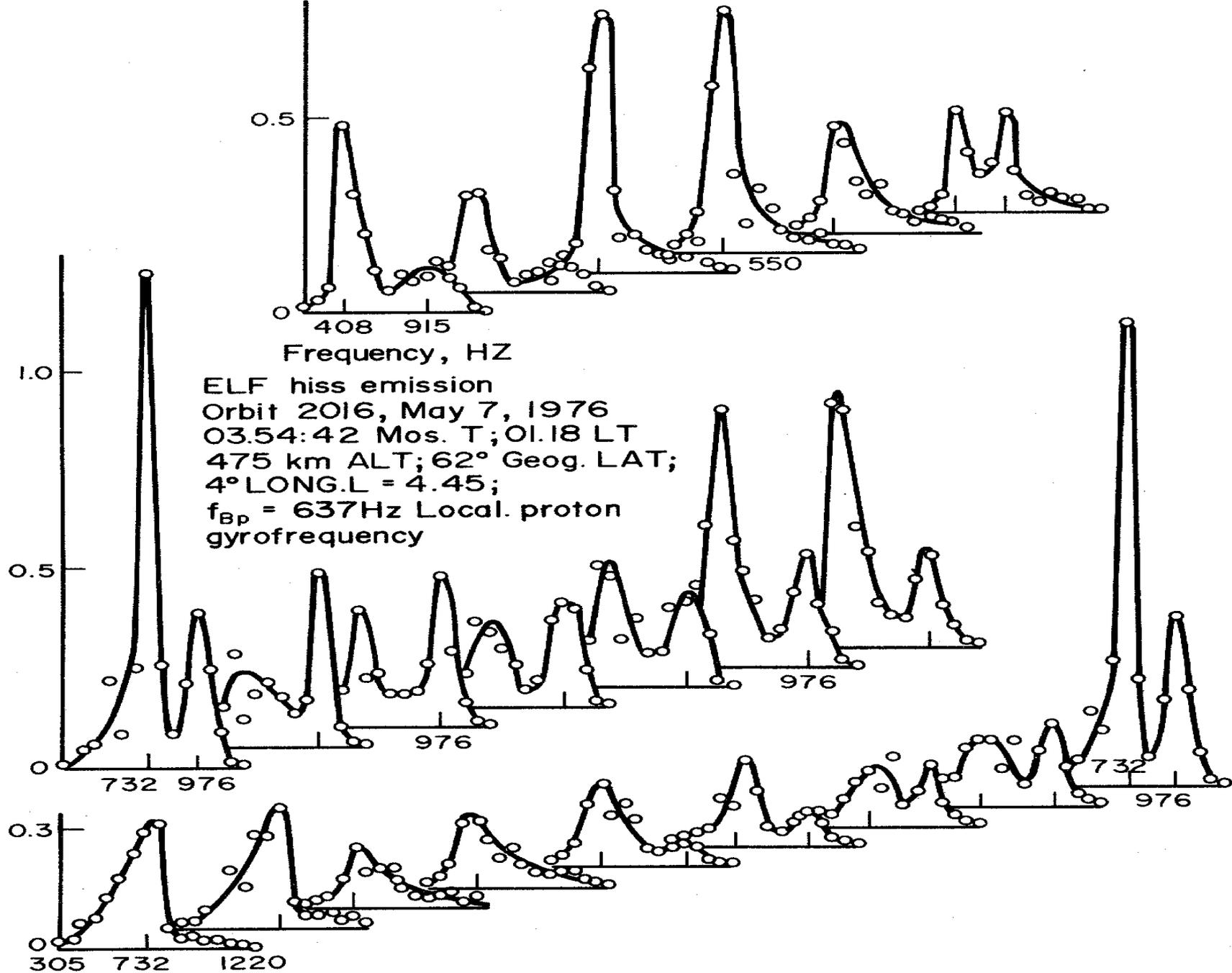
# Спектральная плотность мощности запускающего КСА и СИ сигнала 4



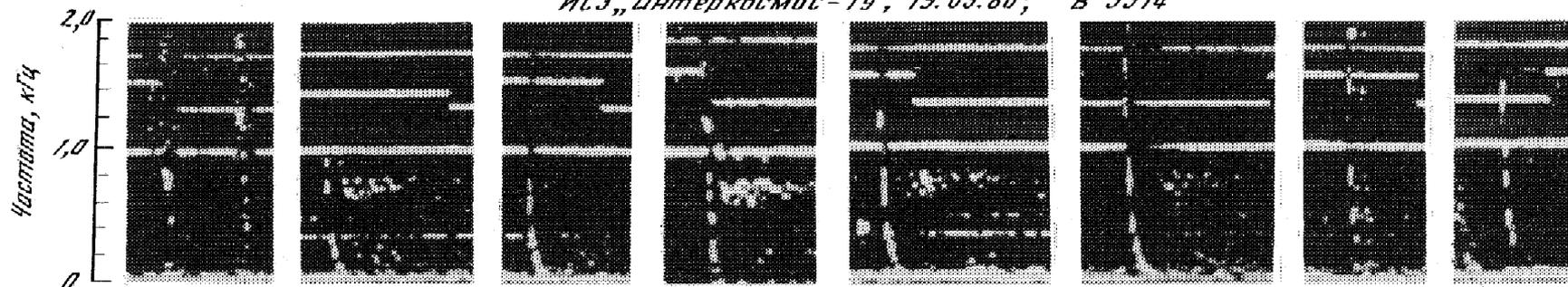


Спектральная плотность мощности СИ сигнала 7

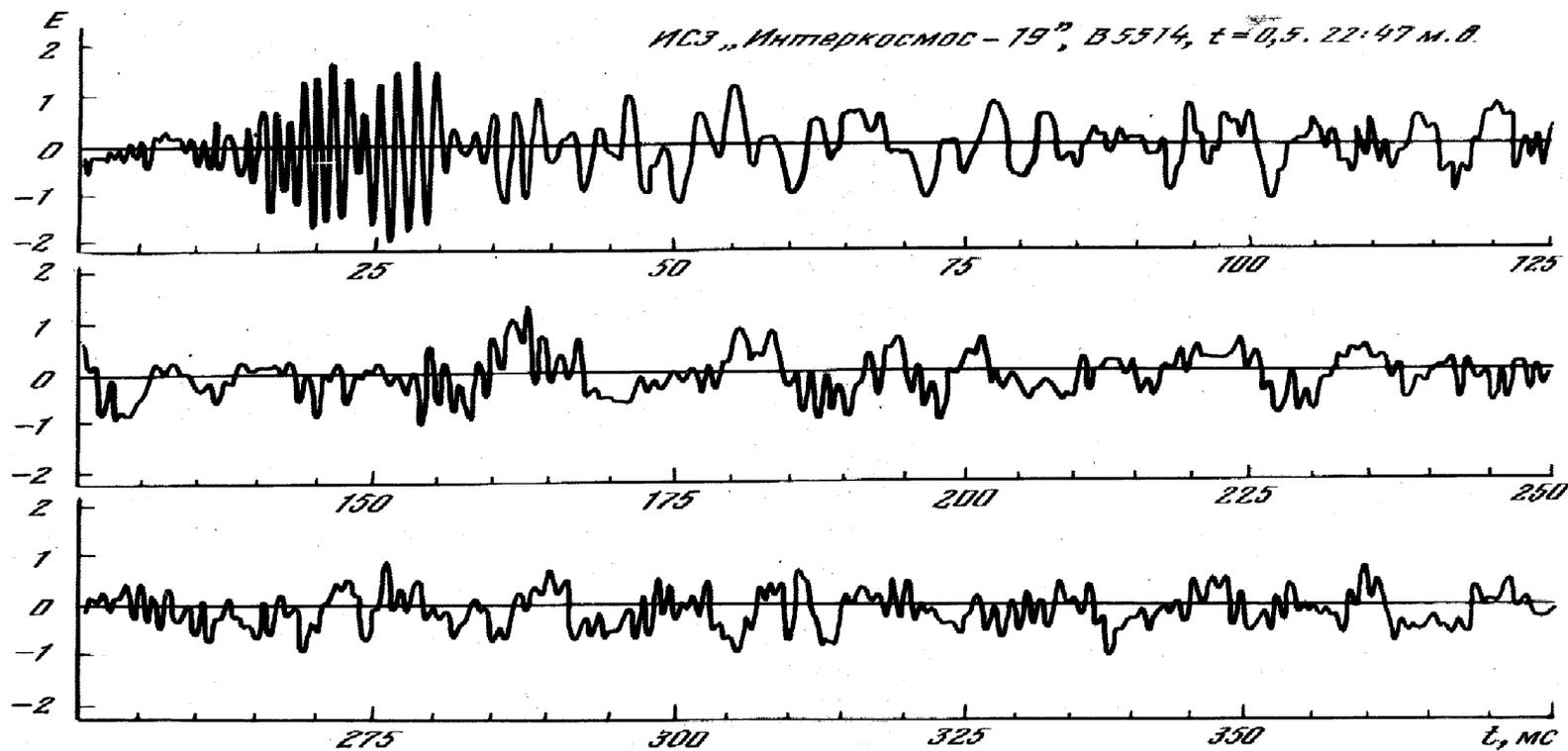
Power spectral density  $G(f_n, t)$ , arb. units



ИСЗ „Интеркосмос-19“, 15.03.80; В 5514



					2с			
$t, \text{MB.05}$	18:40	19:51,5	22:14	22:47	23:52	24:35	25:18	25:24
$h, \text{KM}$	532	539	557	562	572	580	583	588
$LT, \text{ч}$	1,7	2,26	3,0	3,12	3,35	3,48	3,59	3,60
$\Delta \text{ шнВ}$	67,4	63,65	55,1	53,1	49,0	46,2	43,5	43,2
$L$	8,0	5,65	3,39	3,08	2,55	2,30	2,08	2,07
$f_{\text{вр}}, \text{Гц}$	640	6,30	604,5	594	580	~572	561	556





за генерацию. Отличия от обычно рассматриваемого триггерного механизма в экваториальной плоскости магнитосферы – наиболее эффективно взаимодействие СА с электронами на черенковском резонансе  $\omega - k_z v_z = 0$ . Для этого необходимы энергии электронов  $\sim 50 - 100$  эВ, высыпания таких мягких электронов часто регистрируются вблизи южного края провала. На высотах  $< 1000$  км СА распространяется практически вертикально и черенковский резонанс может играть роль, а резонансных электронов для него оказывается значительно больше, чем для циклотронных резонансов.

Представляя СА как широкий пакет ВКБ – волн, методом стац фазы можно получить его представление в виде сигнала с медленно меняющейся амплитудой

$$E_z(s,t) = E_{z0}(s,t) \cos \Phi; \quad \Phi = \int_0^s k(\omega_0(s,t), \xi) d\xi - \omega_0(s,t)t$$

$S$  - координата вдоль вертикали,  $\theta$  - угол между магнитным полем и вертикалью, а текущая частота  $\omega_0(s,t)$  определяется из условия стационарности фазы пакета

$$\frac{\partial f}{\partial t} + v_z \cos \theta \frac{\partial f}{\partial s} - \frac{e}{m} E_z \frac{\partial f}{\partial v_z} = 0$$

Аналогия с ленгмюровской волной в неоднородной плазме (Карпман, Шкляр), но с существенным отличием  $-k$  и  $\omega$  являются функциями координат и времени. Для исследования условий группирования частиц перейдем в систему координат, связанную с резонансными электронами

$$t, s, v_z \Rightarrow t, \Phi, \dot{\Phi}, \text{ где } \dot{\Phi} = k_z(\omega_0(s, t), s)v_z - \omega_0(s, t)$$

Тогда

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \dot{\Phi} \frac{\partial f}{\partial \Phi} + \left\{ -\frac{e}{m} k_z E_{z0} \cos \Phi + R \right\} \frac{\partial f}{\partial \dot{\Phi}} = 0$$

$$R = \frac{\partial k}{\partial s} \frac{\omega_0^2}{k^2} + \left( \frac{\partial \omega_0}{\partial t} + \frac{\partial \omega_0}{\partial s} \frac{\omega_0}{k} \right) \left( \frac{\partial k}{\partial \omega_0} \frac{\omega_0}{k} - 1 \right)$$

При выводе выражения для  $R$  приняли, что для резонансных частиц  $\dot{\Phi} \approx 0$ . Соответствующее уравнение характеристик

$$\frac{d^2 \Phi}{dt^2} = -\frac{e}{m} k_z E_{z0} \cos \Phi + R$$

Захват частиц возможен при

$$R\tau^2 < 1, \text{ где } \tau = \sqrt{\frac{m}{ek_z E_{z0}}} \text{ -характерное время}$$

генерации стимулированного излучения. Для генерации следует удовлетворить и некоторым другим условиям, прежде всего, наличию достаточного числа резонансных частиц.

Некоторые оценки. Так как  $\frac{\partial \omega_0}{\partial s} = -\frac{\partial k}{\partial t} = -\frac{\partial k}{\partial \omega_0} \frac{\partial \omega_0}{\partial t}$ , то

$$R = \frac{\partial k}{\partial s} \frac{\omega_0^2}{k^2} - \frac{\partial \omega_0}{\partial t} \left( \frac{\partial k}{\partial \omega_0} \frac{\omega_0}{k} - 1 \right)^2 - \text{вид, удобный для оценок.}$$

Разные знаки членов  $R$  в верхней ионосфере! Вблизи той высоты  $s$ , где  $R=0$ , захват частиц в потенциальные ямы оказывается сильно облегченным.

Для частоты  $f_0 \approx 700$  Гц и экспериментального значения

$$\frac{\partial f_0}{\partial t} \approx -10^4 \text{ с}^{-2} \text{ условие } R \approx 0 \text{ выполняется при}$$

характерном масштабе неоднородности плотности  $H \approx 100$  км, что примерно соответствует реальности для высот около 400 км.

Оценку порога амплитуды СА можно произвести из условия, что частота волны мало меняется за

характерный период колебания частиц в яме  $\frac{\partial f_0}{\partial t} \tau \ll f_0$ .

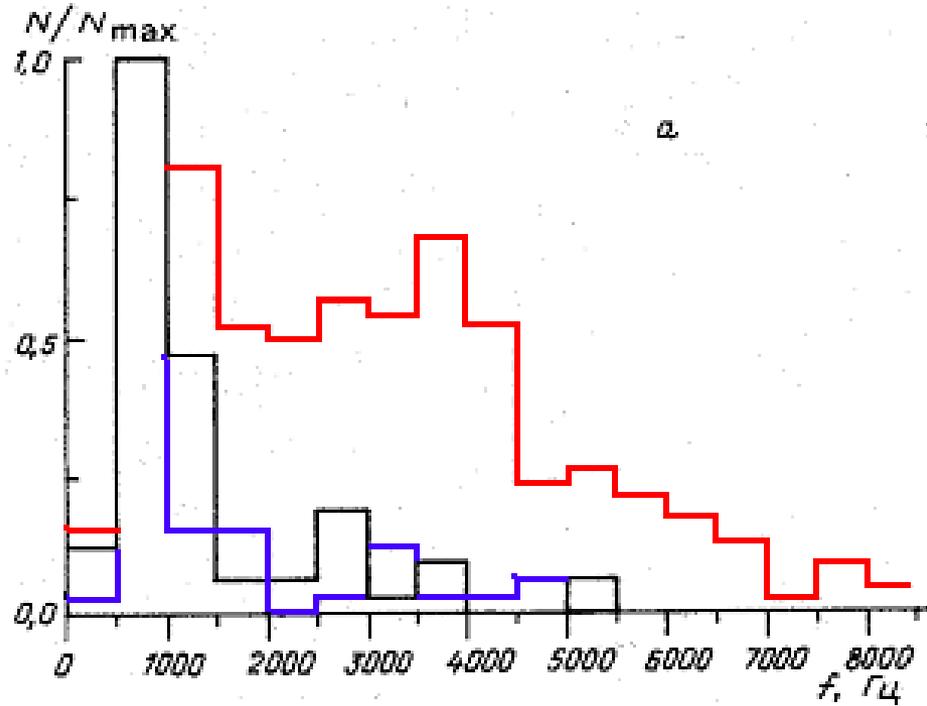
Михайлова Г.А., Капустина О.В., Михайлов Ю.М. Возбуждение сверхнизкочастотных пакетов волн в ионосфере короткими свистящими атмосфериками (наблюдения на ИСЗ Интеркосмос-14). Препринт №40(353). ИЗМИРАН. 1981. 24 с.

Михайлова Г.А., Капустина О.В., Михайлов Ю.М. Возбуждение сверхнизкочастотных пакетов волн в ионосфере короткими свистящими атмосфериками (наблюдения на ИСЗ "Интеркосмос-14")// Геомагнетизм и аэрономия. Т.22. №4. С.591-595. 1982.

Mikhailova G.A., Kapustina O.V. Mikhailov Yu.M. ELF emission in the outer ionosphere stimulated by short fractional-hop whistlers// J.Atmos.Terr.Phys. V.45. N12. P.823-832. 1983 .

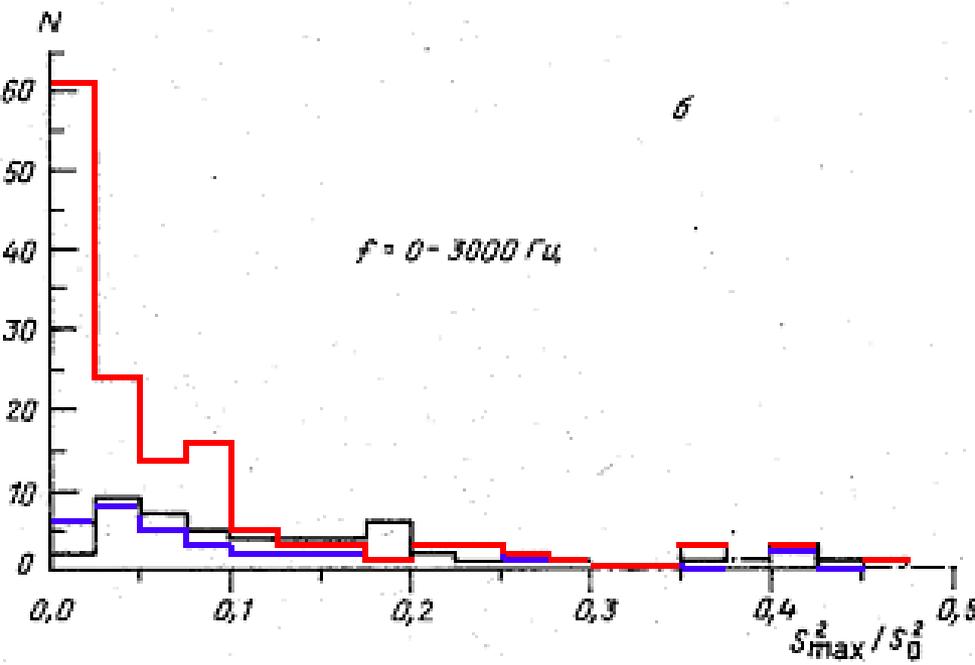
Михайлова Г.А., Капустина О.В., Белякова В.Н, Емельянов В.Г., Титова Е.Е., Яхнина Т.А. КНЧ шумовое излучение, стимулированное короткими свистящими атмосфериками в главном ионосферном провале (данные ИСЗ "Интеркосмос-19") // Взаимодействие радиоволн с ионосферой. М.:Наука. С.65-70. 1990.

Будько Н.И. О генерации стимулированного излучения свистящими атмосфериками в верхней ионосфере // Взаимодействие радиоволн с ионосферой. М.: Наука. С.61-65. 1990.



Гистограммы распределения:  
**a** - частот максимумов в спектре свистящих атмосфериков;  
**б** - относительной интенсивности этих максимумов:

**в спокойных условиях** при  $K_p < 3$  (черная линия);  
 при  $K_p < 3$ , но в **сейсмоактивный** период (красная линия);  
 при  $K_p > 3$  в период увеличенной **геомагнитной активности** в отсутствие землетрясений (**синяя** линия)



Анализ полученных данных показал, что:

1. С ростом **геомагнитной активности** растет затухание КНЧ-волн при их прохождении через *D*-слой ионосферы по сравнению со спокойным периодом, и она становится «дневной».
2. В **сейсмоактивный период** в подготовительную фазу землетрясений затухание, наоборот, уменьшается за счет увеличения **проводимости** *D*-слоя (В.И.Аксенов, 1966, 1967). Этот результат получен впервые.





















