

СПОРАДИЧЕСКИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЗАТМЕННОГО РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ ЗОНДИРОВАНИЯ НА ТРАССАХ СПУТНИКИ GPS-FORMOSAT-3

С.С. МАТЮГОВ, О.И. ЯКОВЛЕВ, А.Г. ПАВЕЛЬЕВ, А.А. ПАВЕЛЬЕВ, А.В. АНУФРИЕВ

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,

141190, Московская область, Фрязино, пл. Введенского, 1,

E-mail: pvlv@ms.ire.rssi.ru

«XII Всероссийская Открытая конференция Современные Проблемы
Дистанционного Зондирования Земли из Космоса»

11 ноября 2014 г.

Москва Институт Космических Исследований РАН

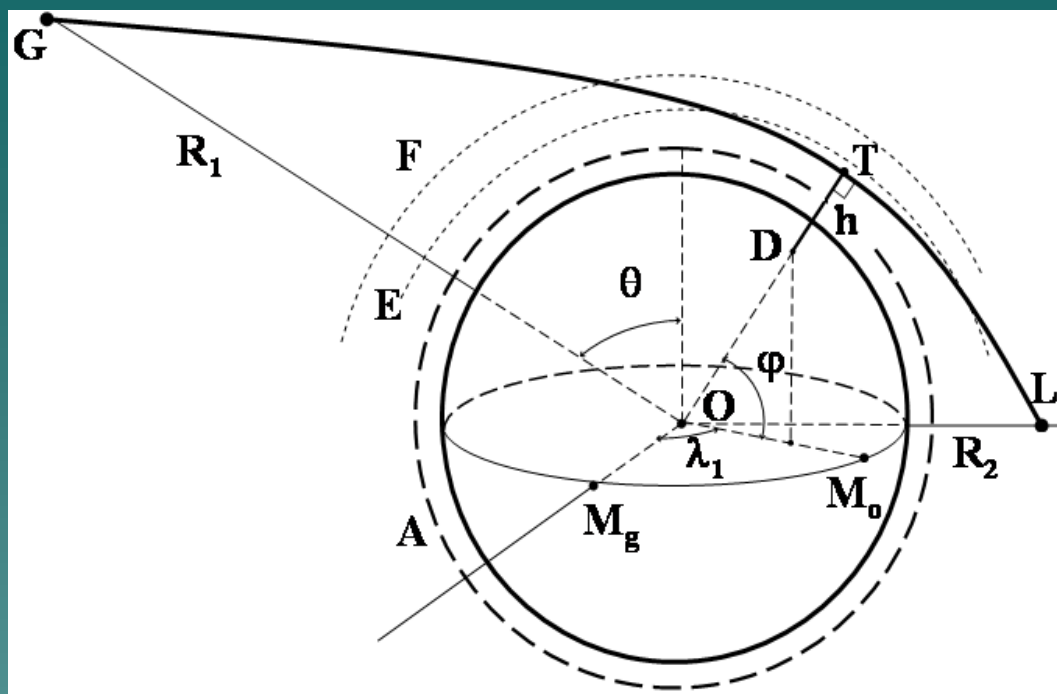
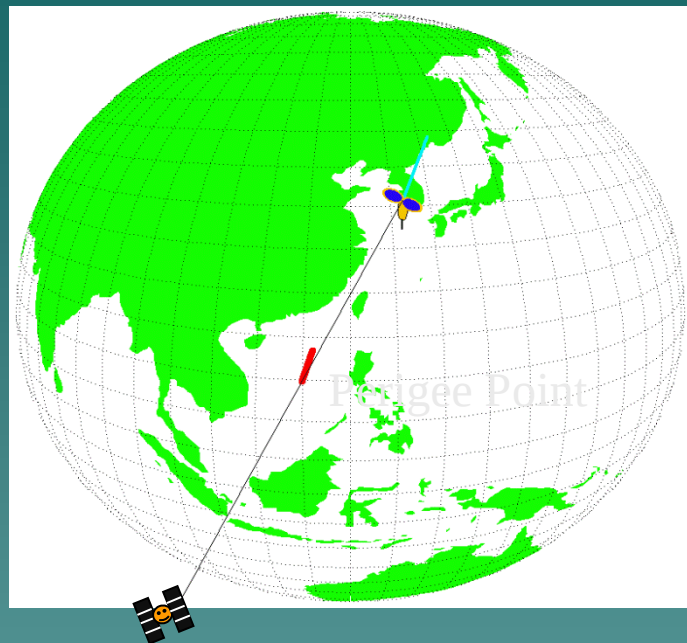


Абстракт

Анализируются результаты осуществленных за шесть лет с 2007 по 2012 гг. 4057 радиозатменных зондирований нижней ионосферы в двух экваториальных районах. Рассмотрены особенности изменений амплитуды дециметровых радиоволн при радиопросвечивании спорадических структур разных типов на трассах спутник-спутник. Приведены зависимости высоты и толщины E_s образований от времени суток. В разные дни ночью E_s структуры существуют в виде одного или одновременно двух слоев: первый слой расположен на средней высоте 116 км, а второй – на 96 км. В дневные часы высота первого слоя уменьшается и вечером формируются неоднородные структуры, высота которых случайным образом распределена в интервале от 90 до 100 км. Обсуждаются изменения амплитуды сигнала при высоте лучевой линии 70÷85 км, когда осуществляется зондирование мезосферы. Приведена статистика наблюдений спорадических структур, находящихся в районах Африки и Индонезии в пределах широтного пояса от 4 гр. ю.ш. до 3 гр.с.ш. (1) от 19 гр. до 29 гр. в.д.; (2) от 129 гр. до 139 гр. в.д. В среднем за год грозовая активность в первом районе во много раз выше, чем во втором.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 13-02-00526-а и Программы Президиума РАН 22.

Принцип радиозатменного мониторинга атмосферы



Приемник на спутнике L регистрирует сигналы на двух частотах, изменения фазы и амплитуды которых содержат информацию о характеристиках околоземного пространства вдоль трассы распространения радиоволн GTL. При допущении о локальной сферической симметрии околоземной среды эти изменения вызваны, главным образом, влиянием областей ионосферы и атмосферы вблизи точки перигея T лучевой траектории. Далее по измеренным изменениям фаз и амплитуд и по известным эфемеридам спутников G и L можно рассчитать высотный профиль угла рефракции и затем, с помощью преобразования Абеля, найти высотную зависимость показателя преломления в атмосфере, а также электронной концентрации в ионосфере.

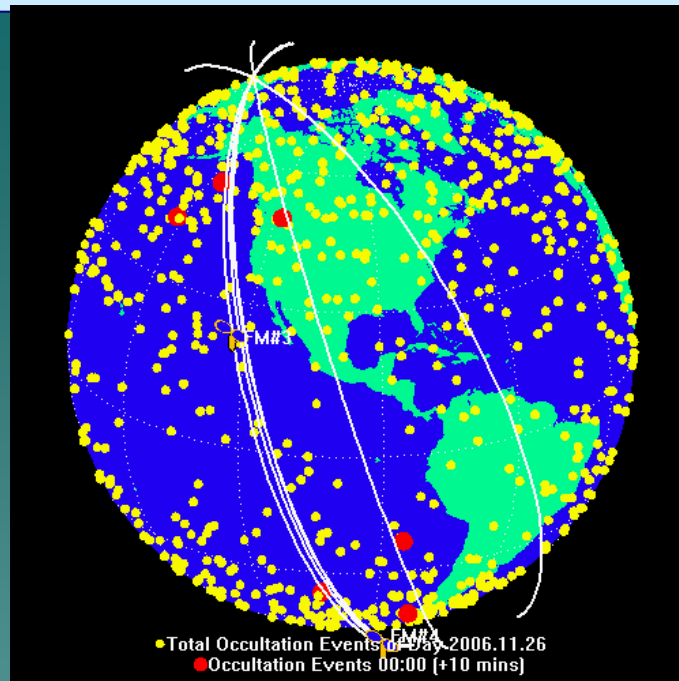
Научные КА радиозатменного зондирования, запущенные в 1995-2009 гг.

GPS/MET (Micro-Lab-1), CHAMP, SAC-C, GRACE, METOP etc.

Эти спутники (массой 70-250 кг) были оснащены приемниками GPS-сигналами, прошедшими через слои атмосферы и ионосферы. Принятые сигналы передавались на наземные станции, где обрабатывались для прецизионного вычисления физических параметров атмосферы и ионосферы.

OceanSAT-2 (с 2009 г.) имеет в составе БА РЗЗА «ROSA» на сигналы GPS и ГЛОНАСС

CanX-2 (с 2008 г.) – наноспутник массой 3,5 кг с БА РЗЗА на сигналы GPS



“Formosat-3” (NSPO, China-Taiwan): 6 микроспутников ($m=69$ кг). Орбиты: $H=800$ км, $i=72^\circ$ **Запущены в апреле 2006 г.**

Мониторинг физических параметров:

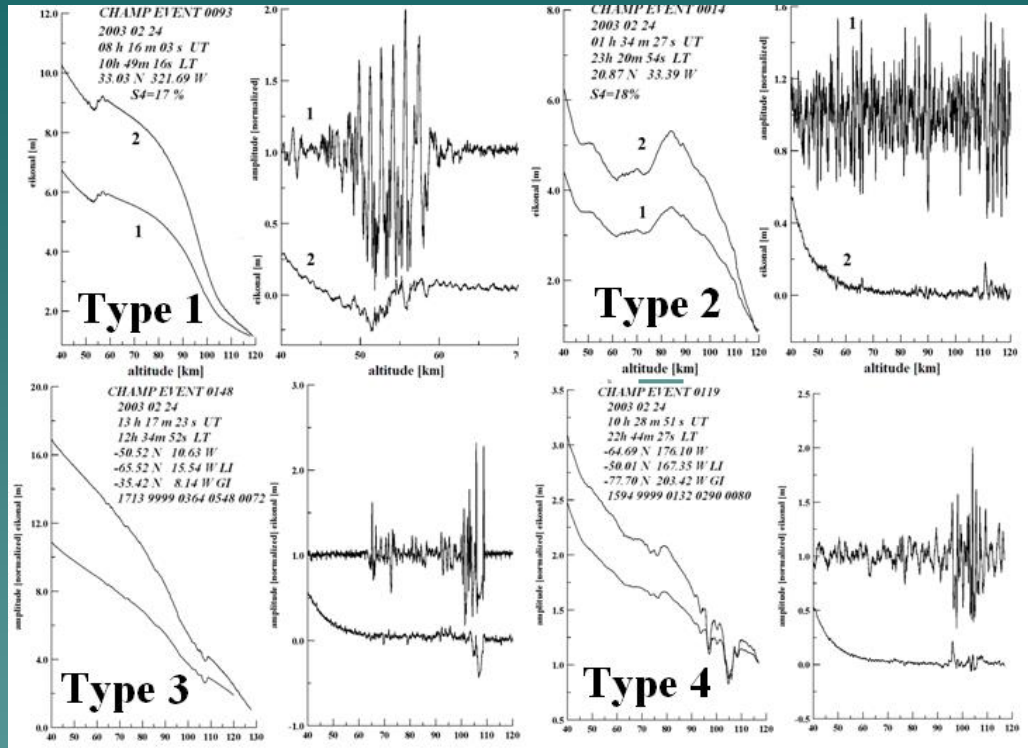
- в нижней атмосфере на высотах – 1...35 km с вертикальным разрешением 100 - 600 м;

- в ионосфере на высотах – 90...400 км с вертикальным разрешением – 800 м

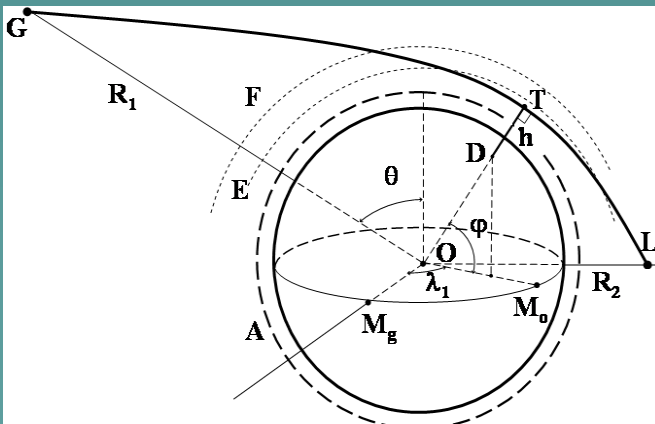
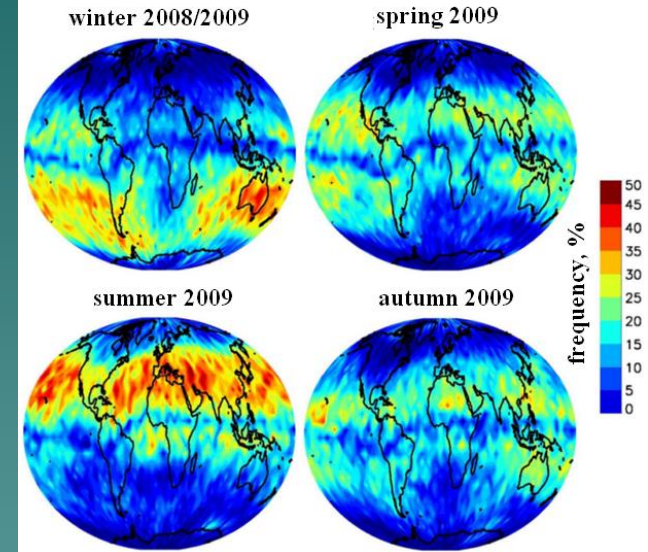
Погрешность измер. температуры – 0,2-1 К (до 30 км), 2-8 К (выше 35 км)

До 2500 зондирований в день в

Types of the ionospheric influence on the radio occultation (RO) signal (phase path excess at two GPS frequencies f1, f2 (left, curves 1 and 2) and amplitude at f1 (right, curve 1)) as functions of the altitude of the RO ray perigee h. Geographic and diurnal distributions of the radio waves intensity scintillations from FORMOSAT-3 RO (2008-2009).



Frequency of RO observations of the ionospheric sporadic plasma layers in the 90 -120 km altitude interval, % obtained using method introduced by Wickert and Pavelyev, 2004, Wickert et al, 2010 at 1575.42 MHz



$$S_4 = [\langle I - \langle I \rangle \rangle^2]^{1/2} / \langle I \rangle$$

Variations of the intensity of radio waves $I(t)$ are described by the S_4 scintillation index, where $\langle \rangle$ corresponds to the average value.

The amplitude variations of the RO signal may be described by the magnitude of the $S4$ scintillation index where $\langle \rangle$ is the average relevant, and $I(t)$ is the intensity of the RO signal. The $S4$ scintillation index can be easily connected with the refraction attenuation $X-1$ and the phase acceleration variations a . The last relationships give new connection of the $S4$ scintillation index with the phase acceleration, which may have a general significance. In particular, this connection can be important for the trans-ionospheric satellite-to-satellite and satellite-to-Earth links.

$$S4(X_a, X_p) = \sqrt{\frac{\langle X_{a,p}^2 \rangle - \langle X_{a,p} \rangle^2}{\langle X_{a,p} \rangle^2}}$$

$$X_a = \frac{I}{I_0}; I_0, I - \text{intensities in free space and in medium}$$

$$X_p = 1 - ma; a = \frac{d^2 \Phi(t)}{dt^2} = \frac{\lambda dF_d(t)}{dt}$$

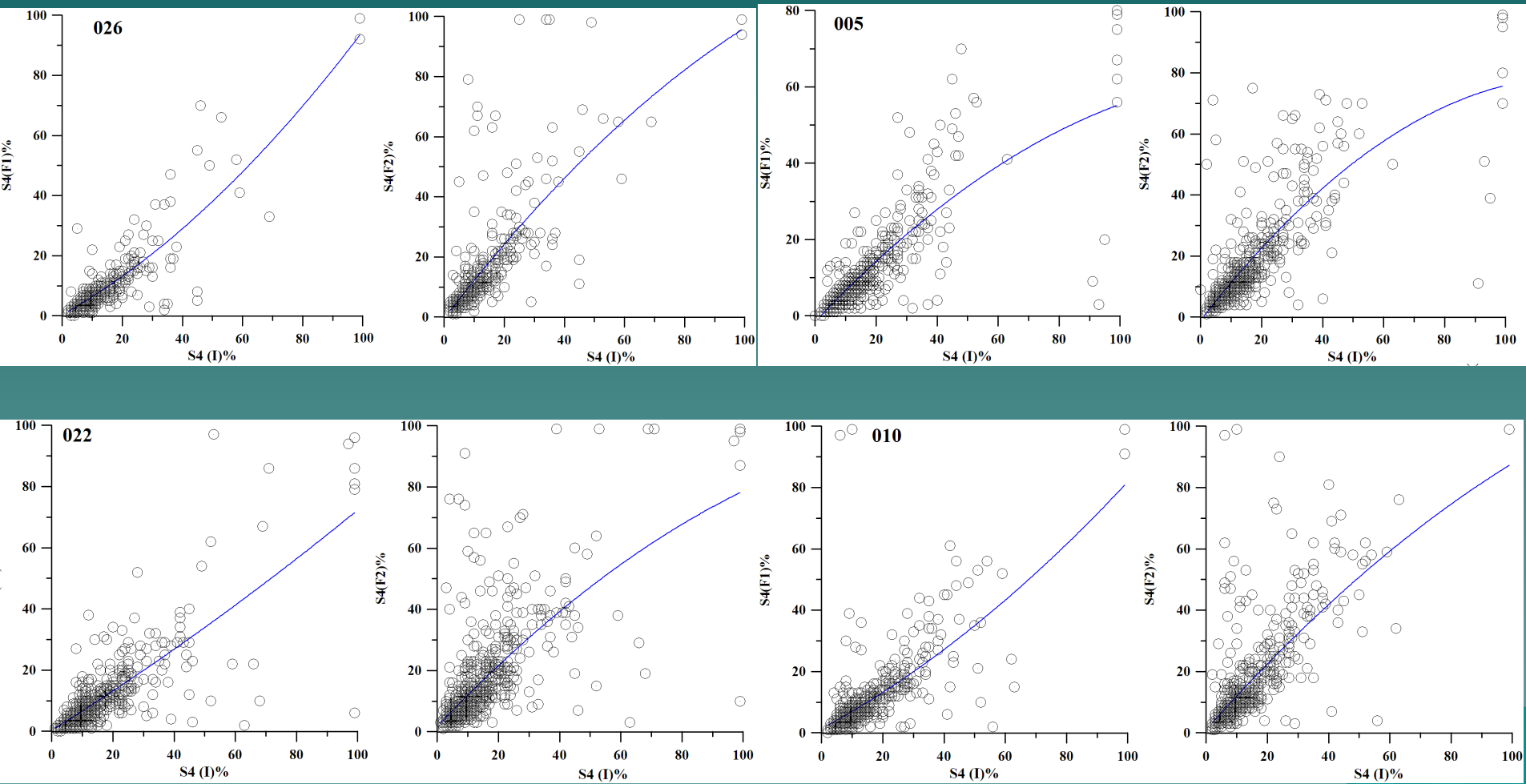
t is the time

a – is the eikonal acceleration

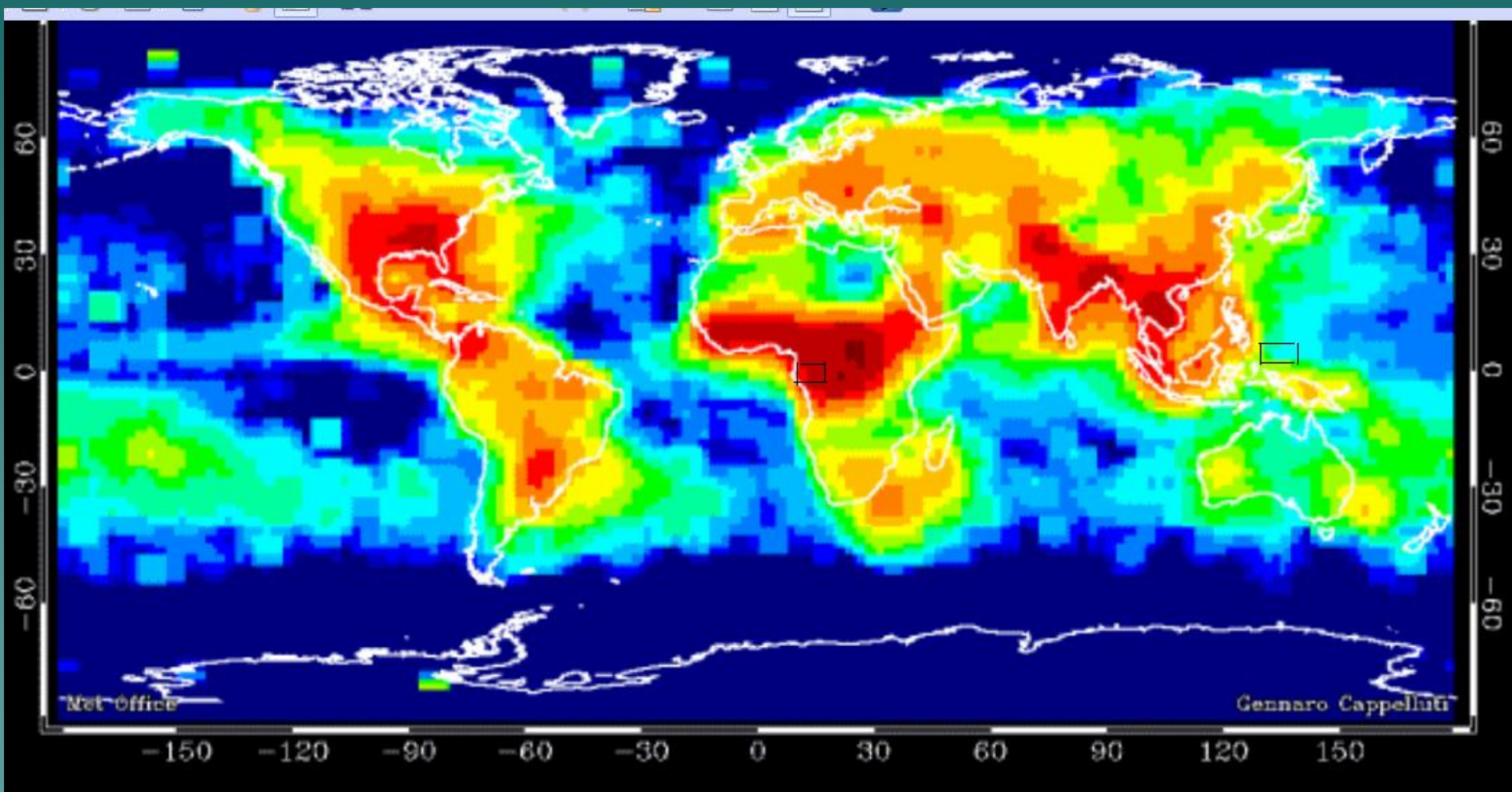
$\Phi(t)$ – is the phase path

$F_d(t)$ – is the Doppler frequency

Comparison of the indexes S4(I), S4(F1) и S4(F2) from FORMOSAT-3 RO data obtained during January 05; 10; 22 and 26 2012



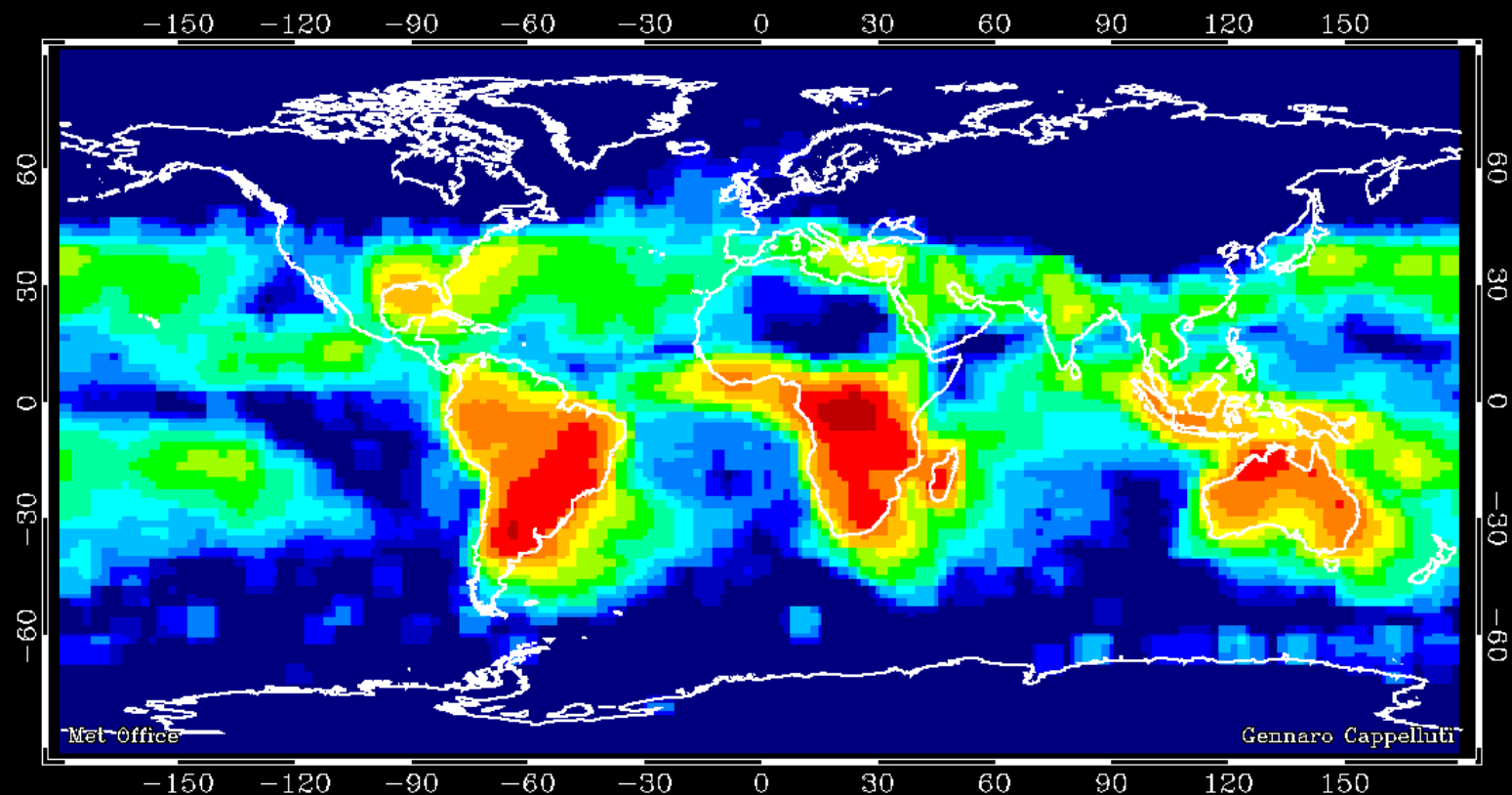
ГЛОБАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МОЛНИЙ 12-24 МАЯ



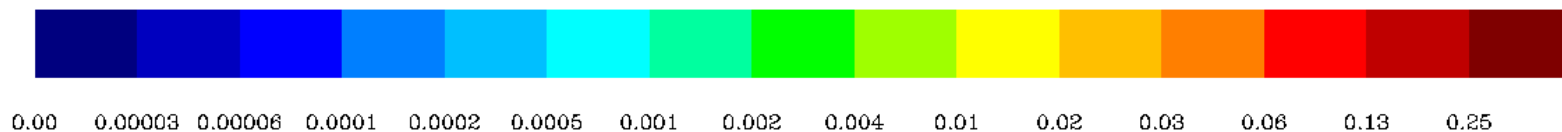
FD Mean [flashes $\text{km}^{-2} \text{ day}^{-1}$] @ 12-24 May



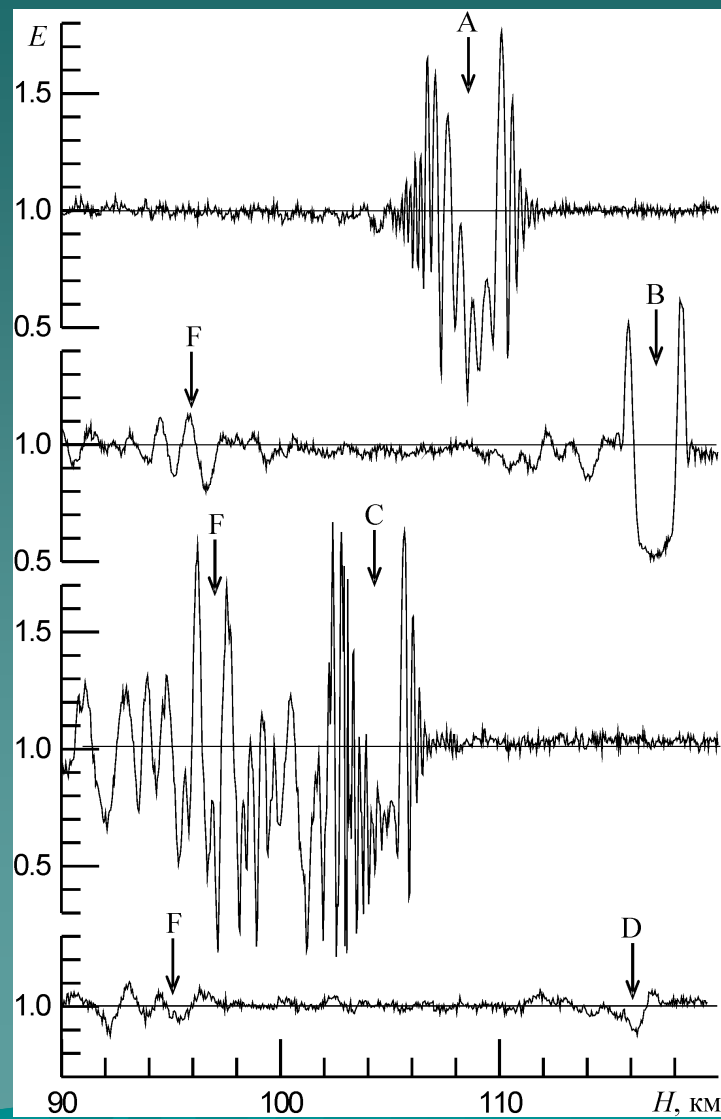
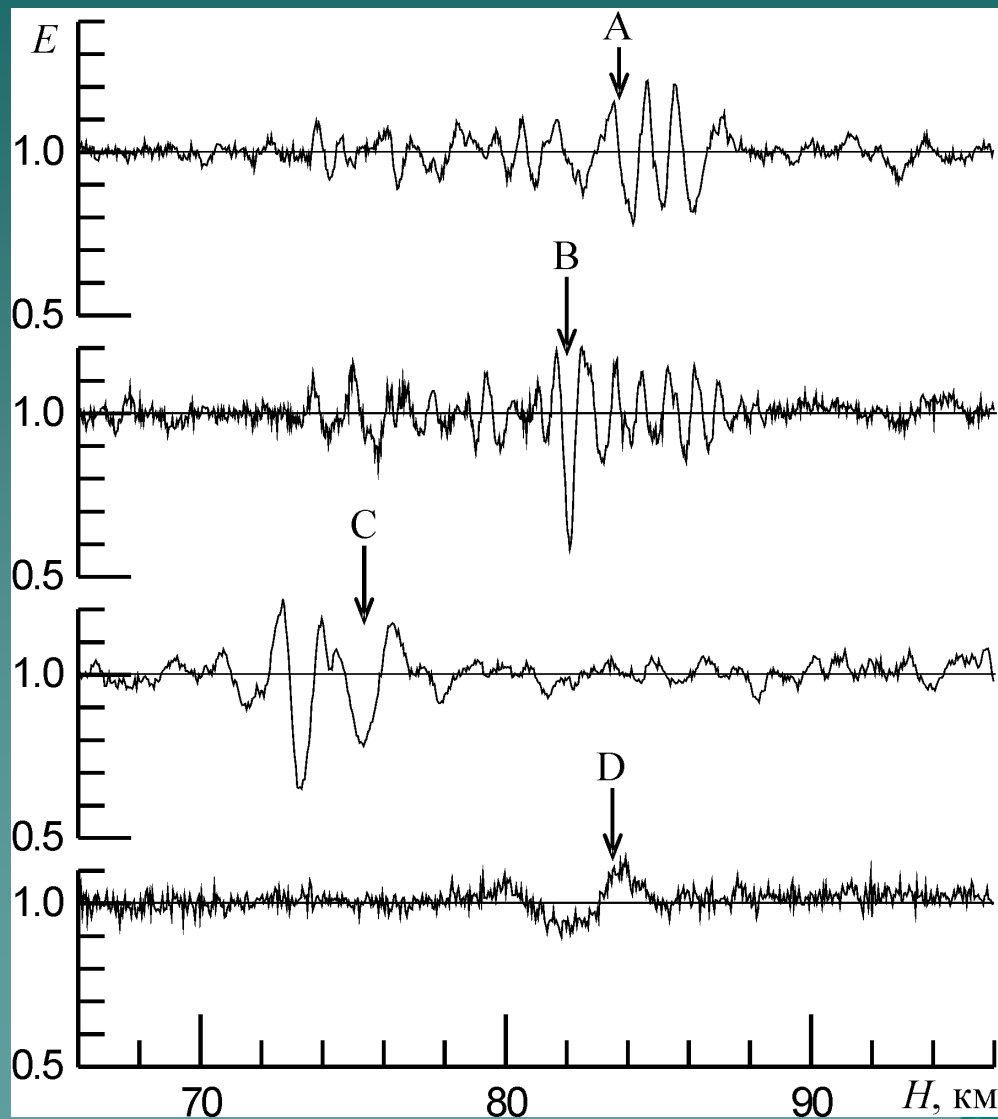
ГЛОБАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МОЛНИЙ 0-24 ЯНВАРЯ



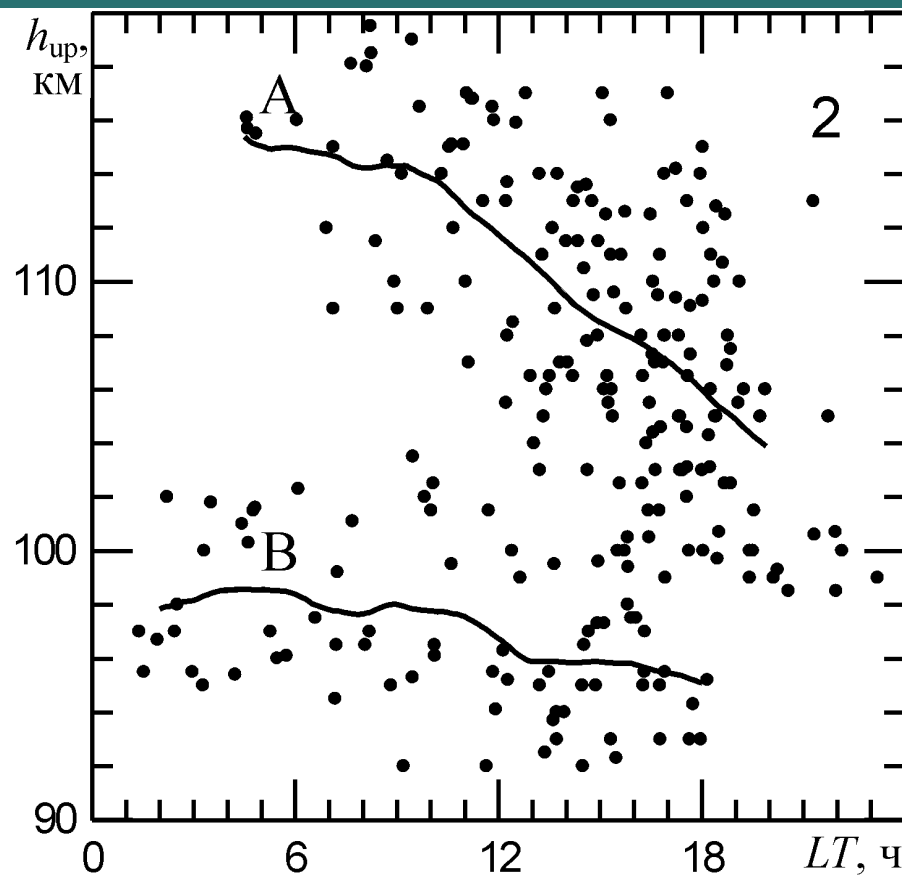
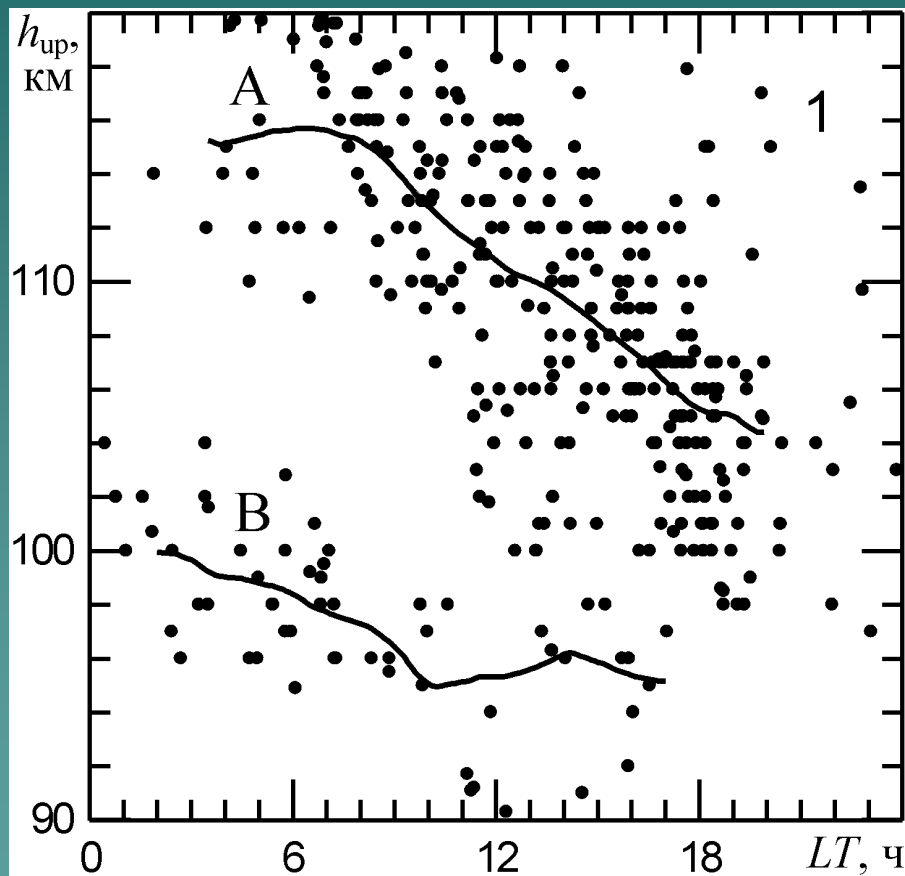
FD Mean [flashes $\text{km}^{-2} \text{ day}^{-1}$] @ 00-24 Jan



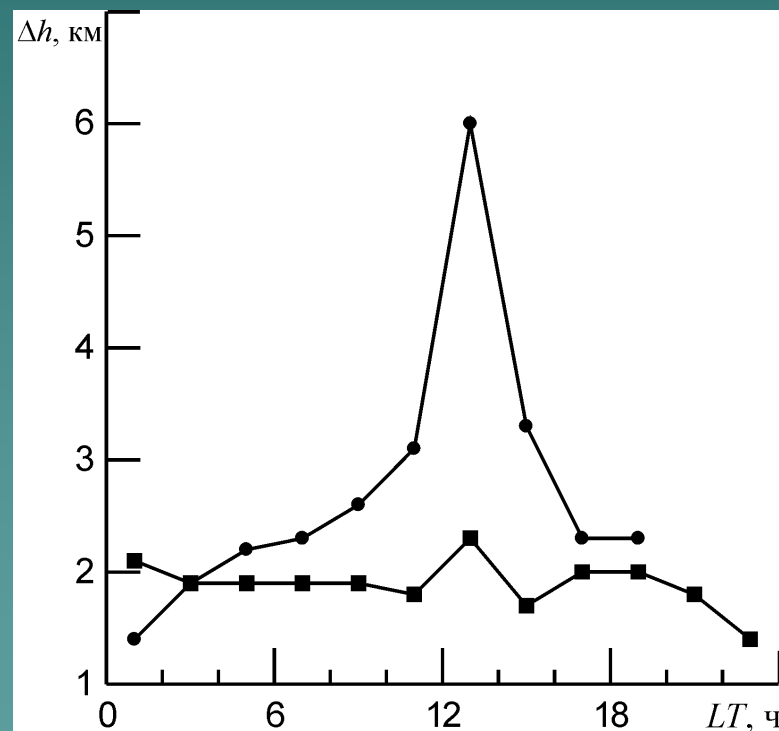
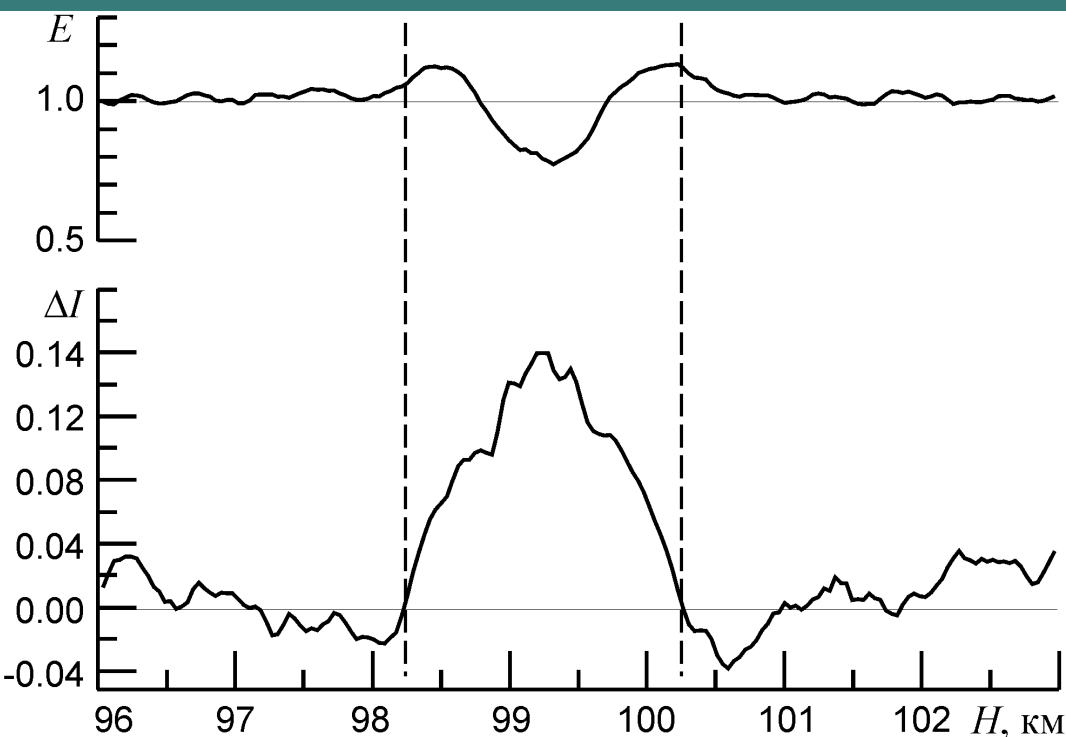
Примеры изменений амплитуды E в зависимости от высоты лучевой линии при $H > 90$ км (справа) и $H < 90$ км (слева)



Зависимости высоты верхней границы слоя h_{up} от местного времени в первом (1) и во втором (2) районах



Зависимость толщины слоя Δh от местного времени (справа). Точками и квадратами показаны значения Δh слоев на высотах 100-120 км и 90-100 км, соответственно. К оценке электронной концентрации E_s образований (слева). Приращение интегральной электронной концентрации выражено в единицах TECU.



Число наблюдений плазменных структур в интервале 90-120 км (строка 5); % наблюдений Es (строка 6); число структур A,B, D (строка 7); число структур C, F (строка 8); число структур A с интерференцией (строка 9); число структур с верхней границей >100 км (строка 10); число структур с верхней границей между 89 и 100 км (строка 11).

Таблица 2. Статистика активности Es образований при $h > 90$ км

1	2		3		4		5		7		7		8
2	2007		2008		2009		2010		2011		2012		
3	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
4	442	452	422	410	425	372	328	302	260	271	202	171	4057
5	358	368	336	314	371	284	280	235	228	219	179	151	3323
6	81	81	80	76	87	76	85	78	88	81	89	88	82
7	146	167	226	111	217	125	176	123	135	82	92	62	1662
8	212	201	110	203	154	159	104	90	89	137	60	90	1609
9	14	17	21	10	19	15	15	16	21	14	16	17	195
10	243	226	199	181	251	150	201	137	172	122	120	96	2098
11	115	142	137	133	120	134	79	98	56	97	59	55	1225

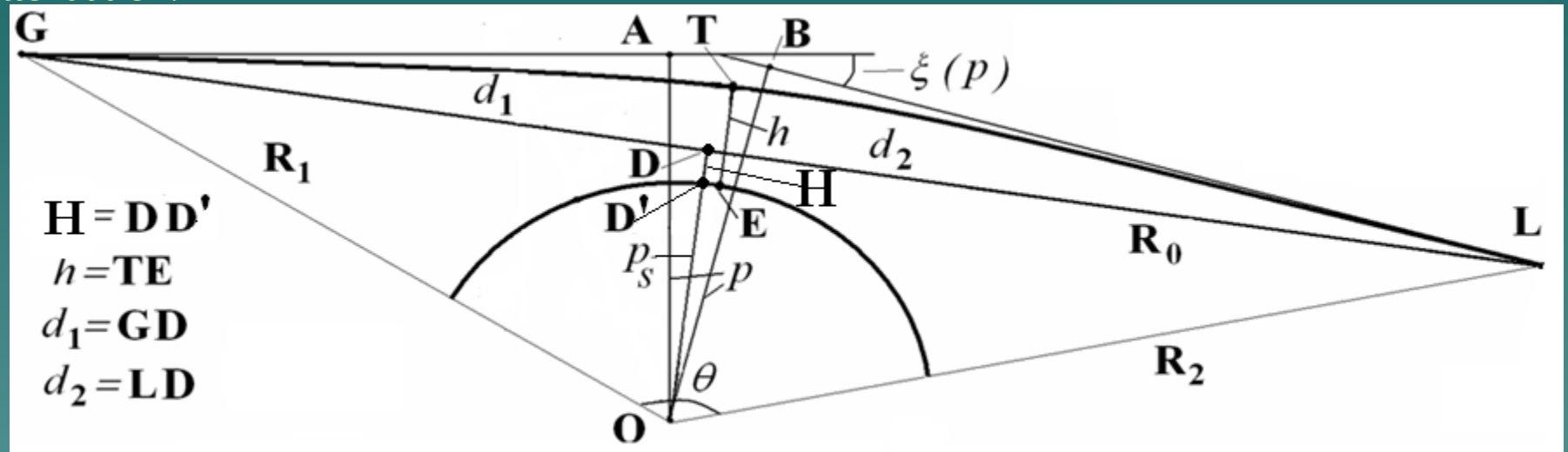
Число наблюдений плазменных структур для высотных интервалов $\Delta h = \Delta H = 5$ км.

Таблица 1. Статистика наблюдений плазменных структур для пятикилометровых интервалов минимальной высоты лучевой линии H и высоты h для $H < 90$ км.

Интервалы высот ΔH или Δh , км	Число структур в районе 1 для H	Число структур в районе 2 для H	Сумма числа структур в двух районах для H	Вероятное число структур для $h < 90$ км
1	2	3	4	5
40÷45	36	62	98	0
45÷50	49	56	102	0
50÷55	43	74	116	16
55÷60	62	55	117	17
60÷65	57	67	124	24
65÷70	66	67	133	33
70÷75	74	64	138	38
75÷80	76	76	152	52
80÷85	94	74	168	68
85÷90	151	133	284	184

Connection between the amplitude and eikonal in RO measurements (Liou and Pavelyev, GRL, 2006; Pavelyev et al., JGR, 2007, Pavelyev

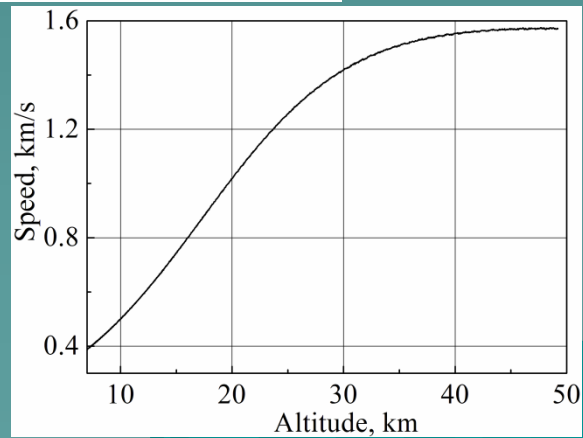
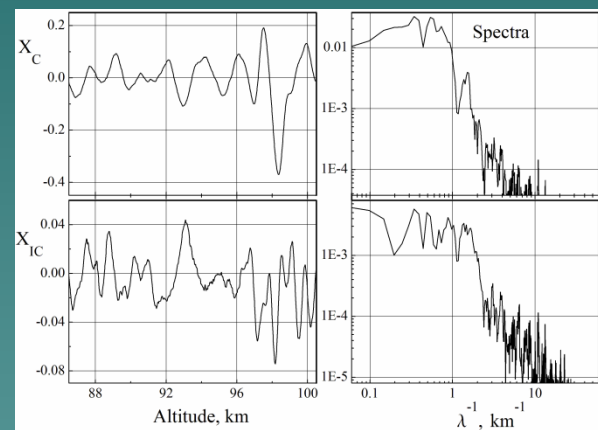
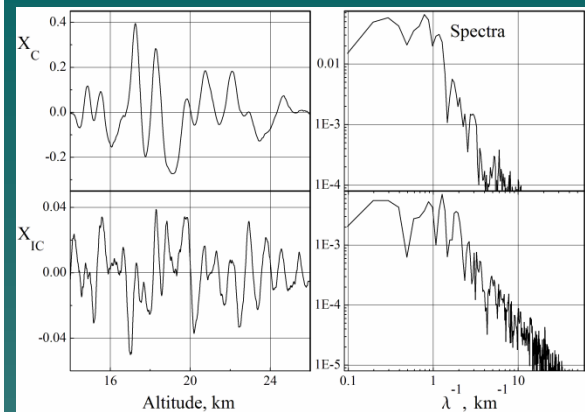
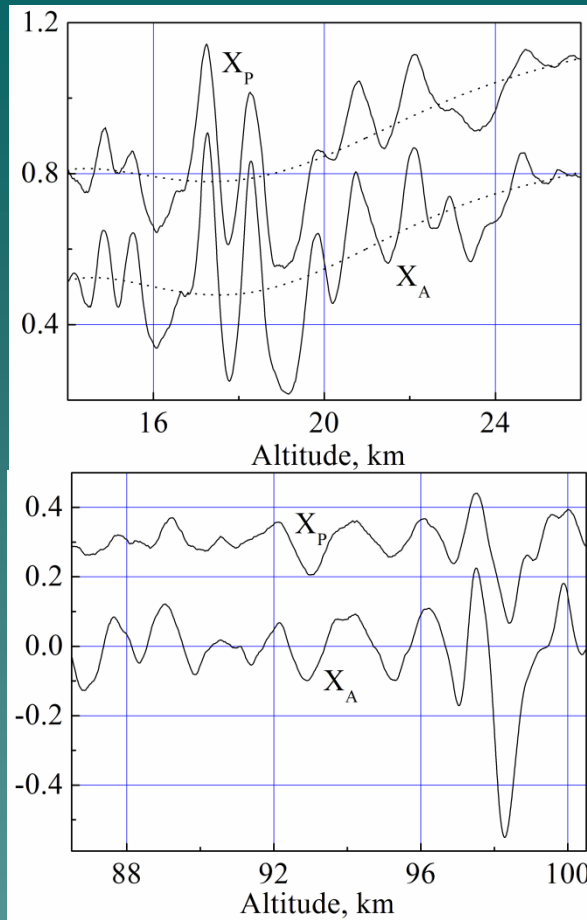
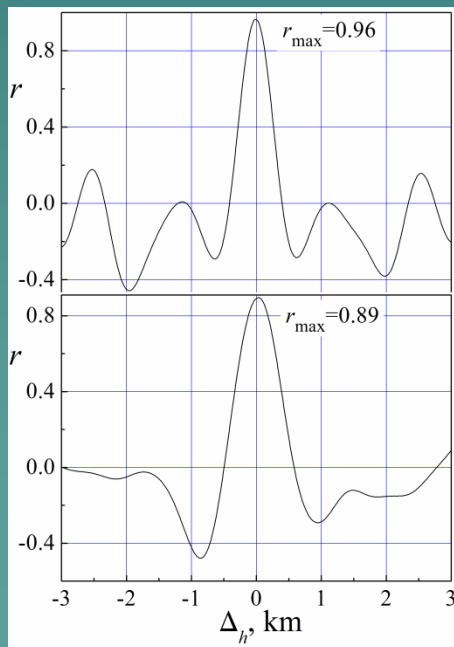
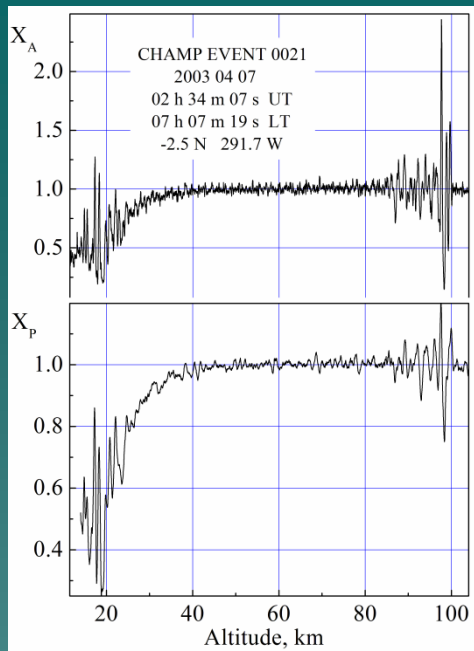
et al, AMT 2012). The eikonal acceleration has the same importance for RO data analysis as the Doppler frequency. It allows one to recalculate the phase data to the refractive attenuation.

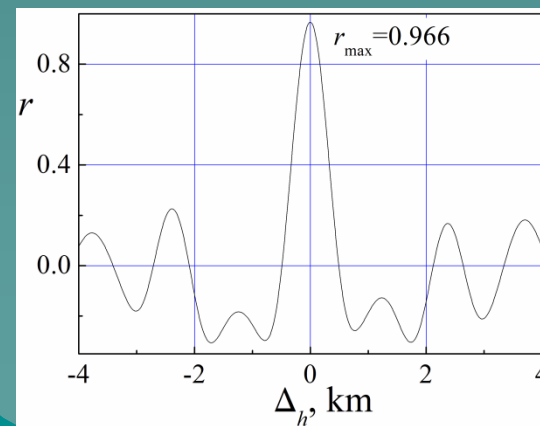
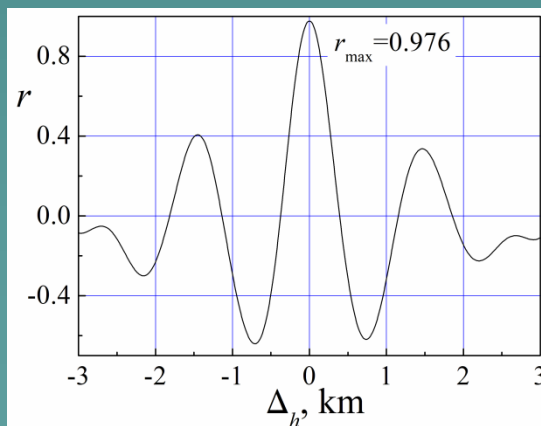
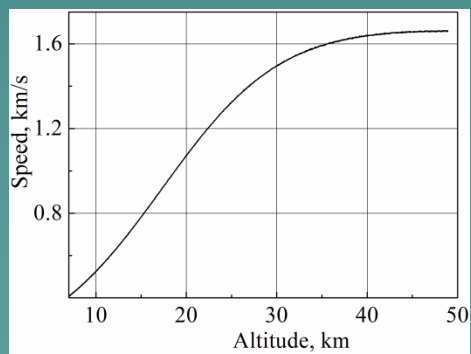
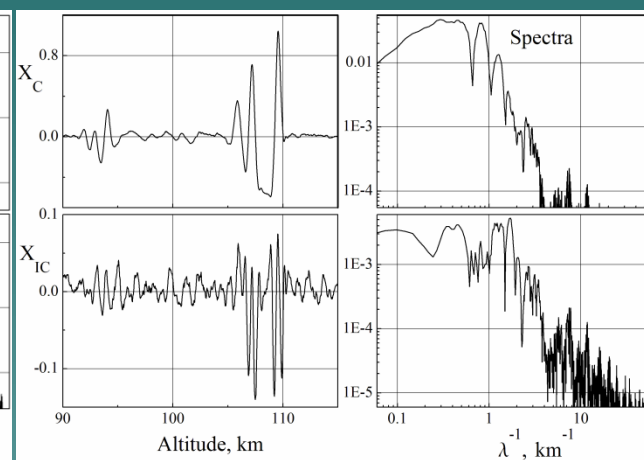
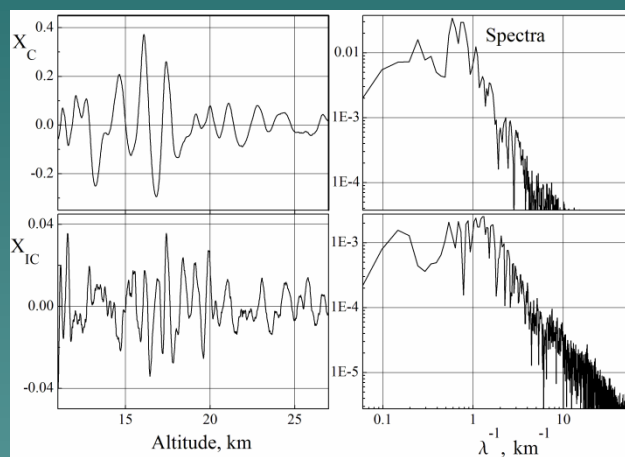
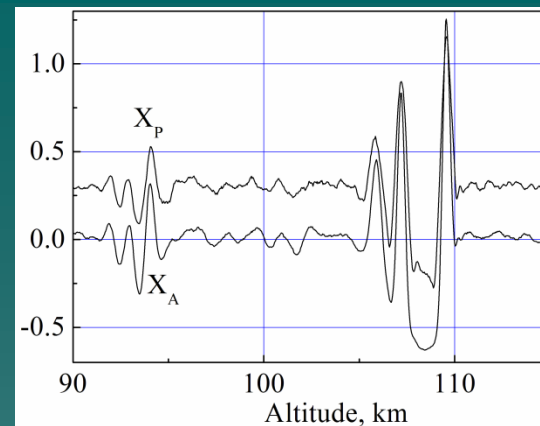
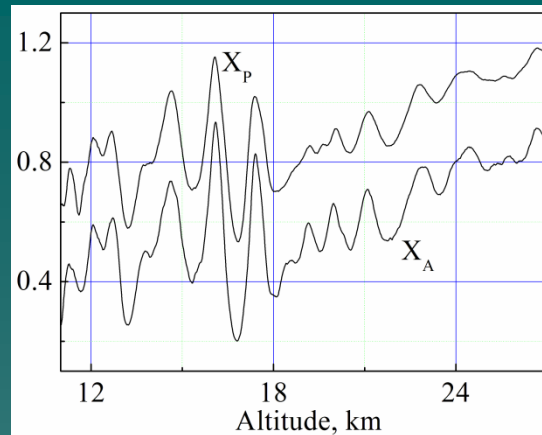
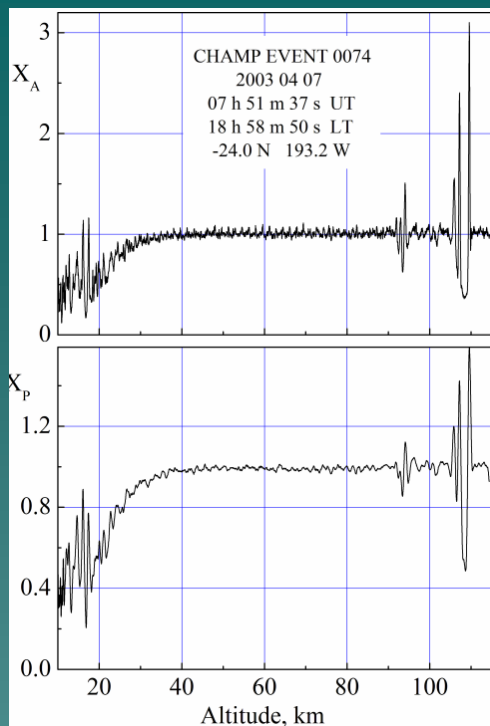


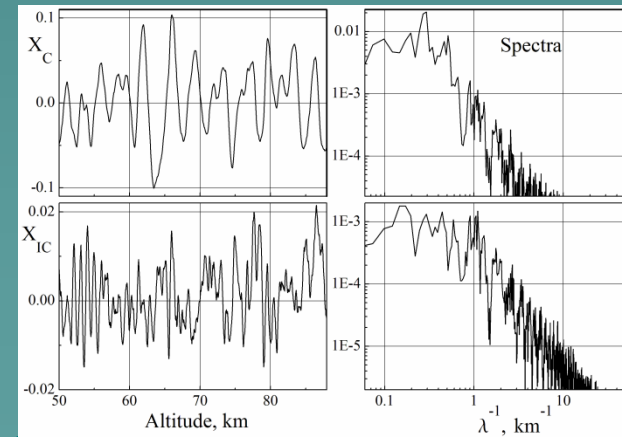
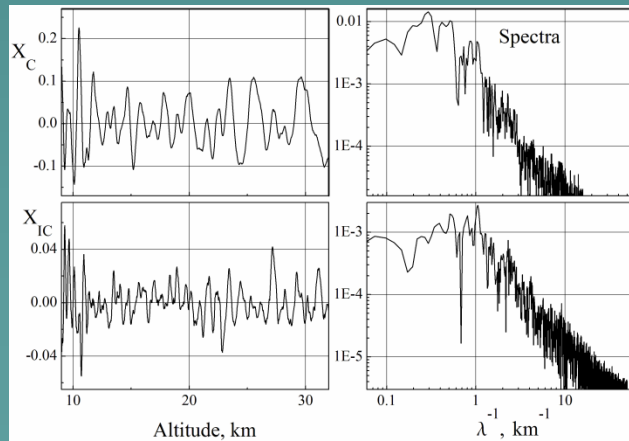
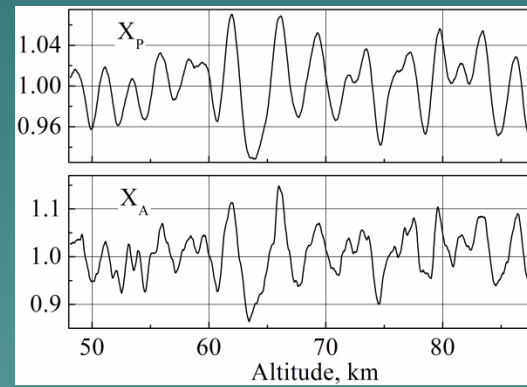
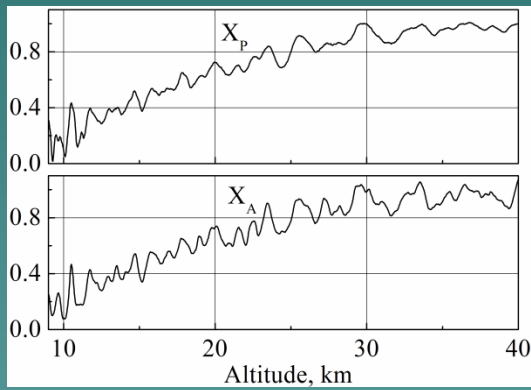
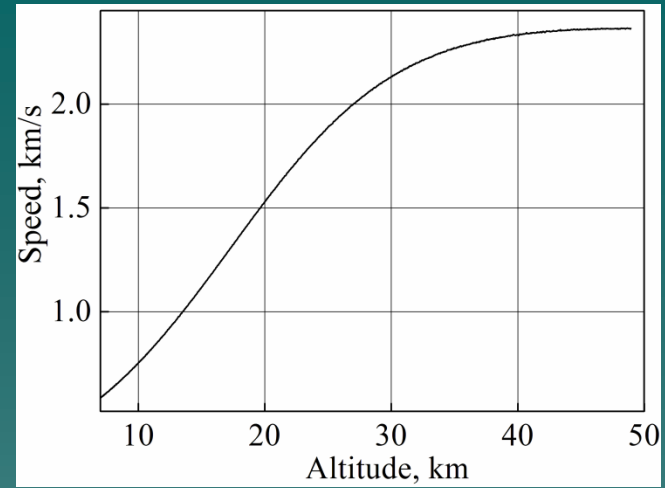
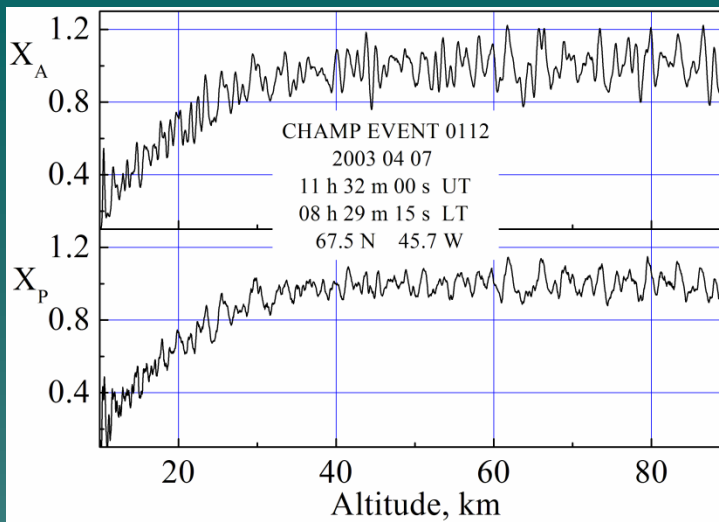
$$1 - X_p(t) = ma, a = d^2\Phi/dt^2 = \lambda dF/dt, \Phi = \int n dl \text{ (along ray GTL)} - R_0,$$

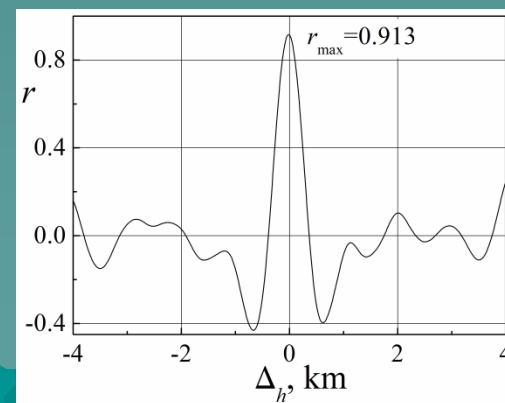
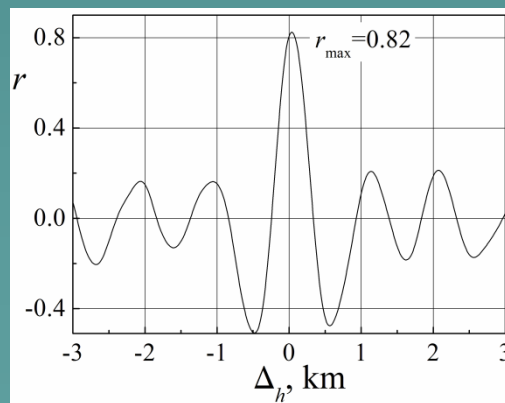
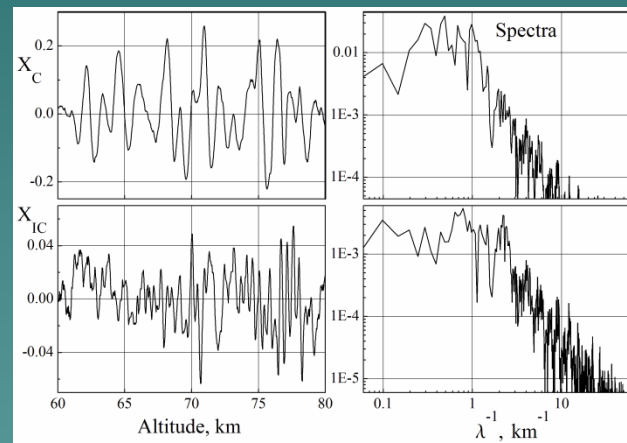
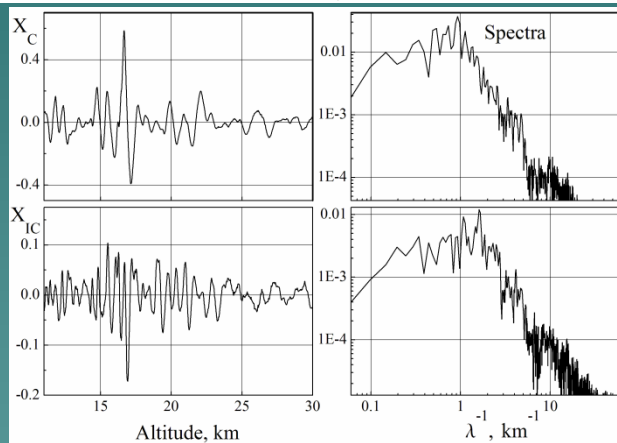
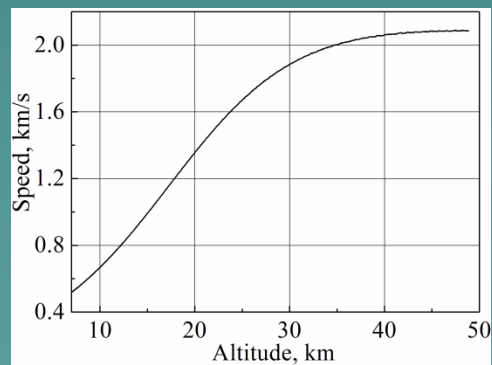
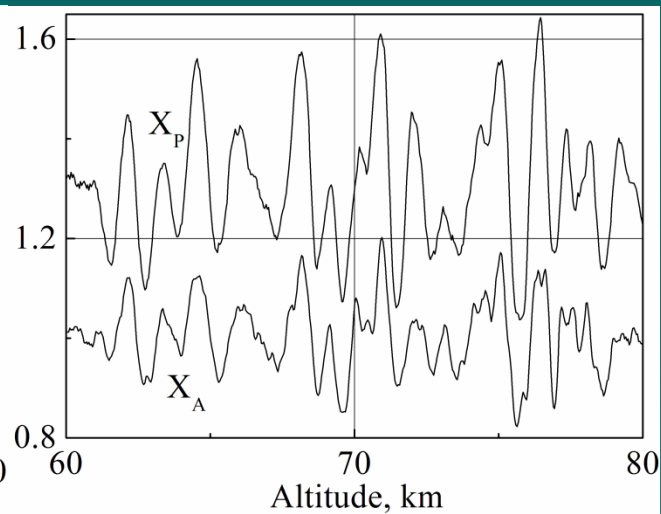
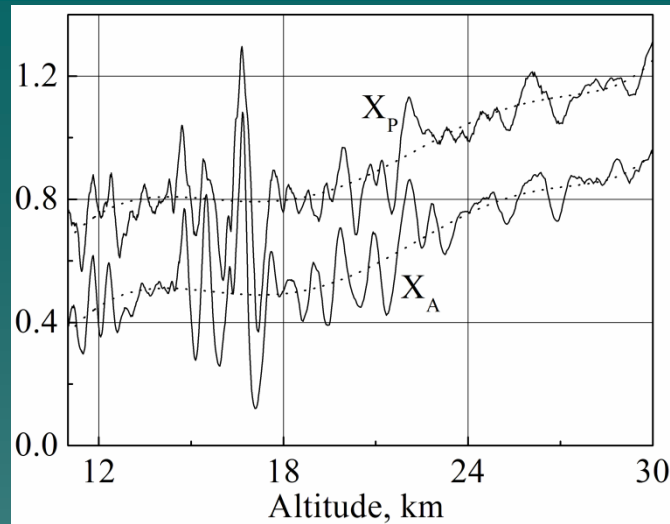
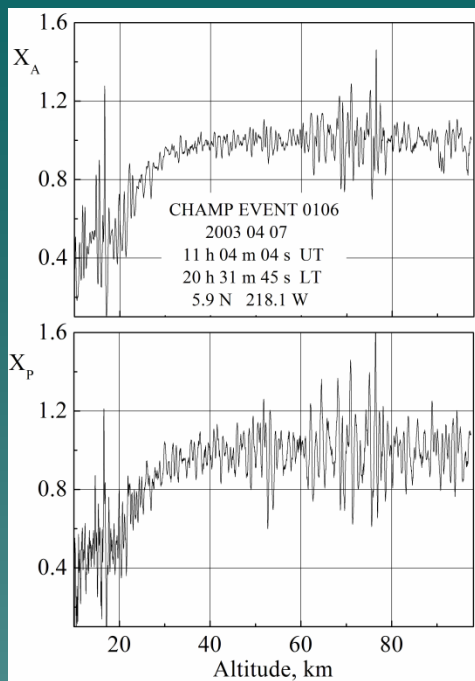
$X_p(t)$ - refractive attenuation, Φ - eikonal (phase path excess)

$$F = \lambda^{-1} d\Phi/dt$$
 - Doppler shift, a - eikonal acceleration, λ - wave length
$$m = d_1 d_2 / R_0 (dp_s / dt)^{-2}, \quad X = A^2 / A_0^2, \quad A^2, A_0^2 - \text{intensities of radio waves in the medium and in free space}$$
$$X = X_p(t)\Gamma(t), \Gamma(t) - \text{the total absorption along the ray } GTL$$







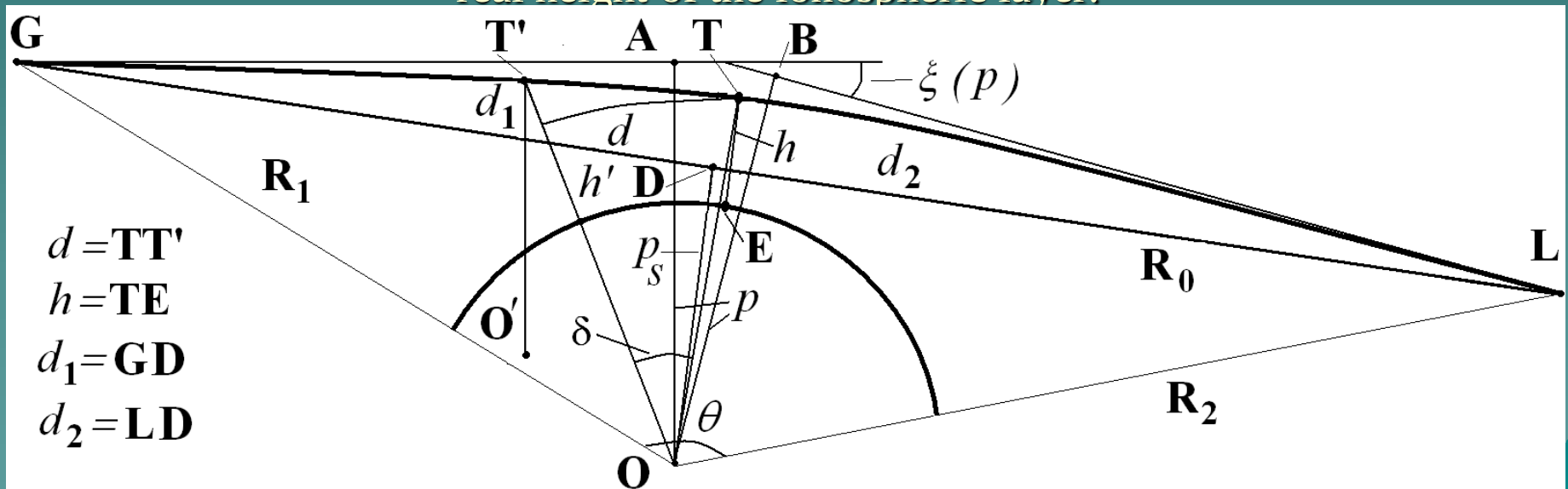


Principle of locality states

(if the total absorption is absent)

$$X(t) = X_p(t, T').$$

The refractive attenuation $X(t)$ found from the RO intensity data is equal to the refractivity attenuation found from the phase data X_p . In contrast to the refractive attenuation $X(t)$ and eikonal acceleration a the refractive attenuation X_p does depend on the location of the tangent point T' . This allows one (i) to find the displacement d of the point T' relative to the ray perigee T ; (ii) to find real height of the ionospheric layer.



$$d = d_2(A_a - A_p)/A_p$$

where A_a, A_p are amplitudes of variations of $1-X, 1-X_p(t)$

Conclusion

The eikonal acceleration has the same importance as the Doppler frequency in RO experiments. Advantages of the eikonal acceleration/intensity technique of RO data analysis are:

- (1) a possibility to separate the layered structure and turbulence contributions to RO signal
- (2) a possibility to estimate the absorption in the atmosphere by dividing the refraction attenuations found from amplitude and phase data
- (3) a possibility to locate the layered structures in the atmosphere with accuracy in the distance from the standard position of the tangent point of about ± 100 km;
- (4) a possibility to establish the ionospheric or atmospheric origin of the amplitude and phase variations of RO signal.
- (5) a possibility to estimate horizontal gradients in the lower ionosphere

The work is supported by Russian Fund of Basic Research, grant No. 13-02-00526-a and Program 22 of Presidium RAS

Thank you for your attention!

