

# Экспериментально-расчётные методы прогнозирования характеристик КВ радиоканалов

*Дмитрий Евгеньевич Зачатейский*

*Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН  
(Омский филиал)*

# Ключевые моменты

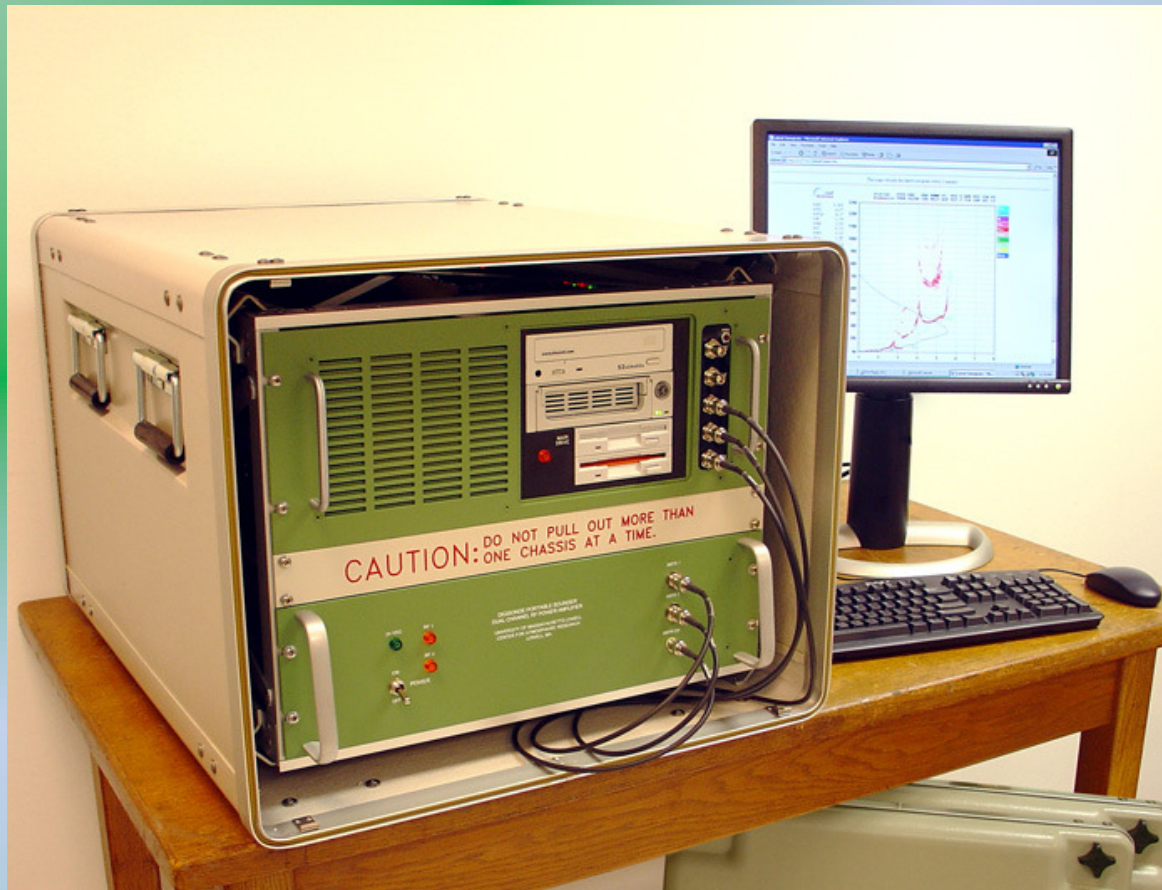
- Технические средства радиозондирования ионосферы Земли;
- Моделирование параметров радиолиний;
- Программные средства для решения расчётных задач;
- Экспериментально-расчётные методы.

# **Технические средства радиозондирования ионосферы Земли**

# Исторические корни

- 1932 г. – Под руководством М.А. Бонч-Бруевича проводятся первые ионосферные измерения методом радиоэхо.
- 1936 г. – Начала регулярную работу первая советская ионосферная станция при Томском университете.
- 1936 г. – Н.Д. Булатовым предложен панорамный метод снятия высотно-частотных характеристик. Этот метод применяется в настоящее время на всех современных ионосферных станциях.

# DPS-4



# IPS-71



# CADI

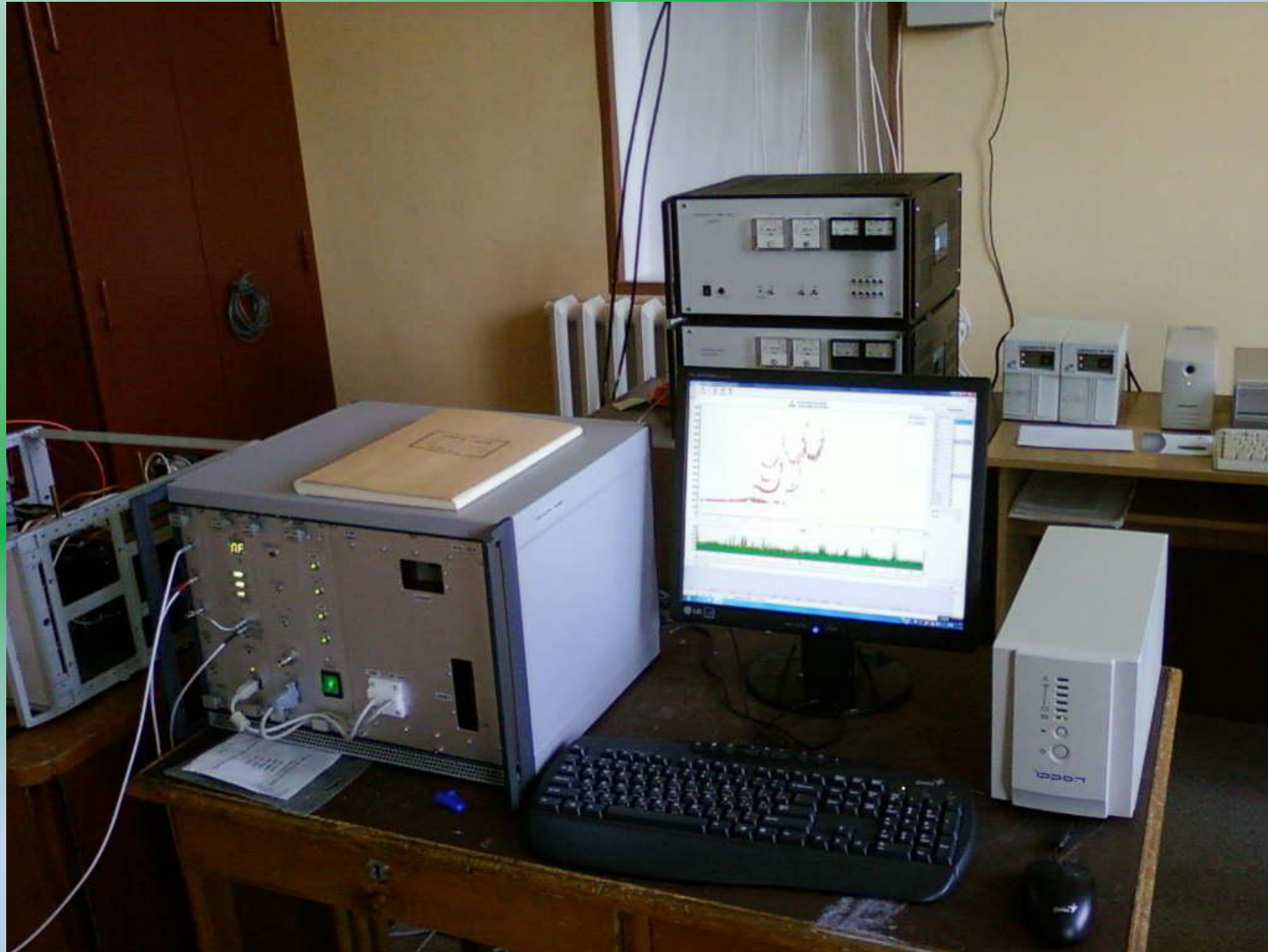


# Российские научные школы

- Москва (ИЗМИР АН, ИПГ, ИАА, МГУ);
- Иркутск (ИГУ, ИСЗФ СО РАН);
- Нижний Новгород;
- Томск (СФТИ);
- Ростов-на-Дону (ЮФУ);
- Алма-Ата (ИИ);
- Харьков (ИИ НАН Украины).
  
- НИИДАР, МарГТУ, Якутск, Хабаровск, Новосибирск.



# Парус-А



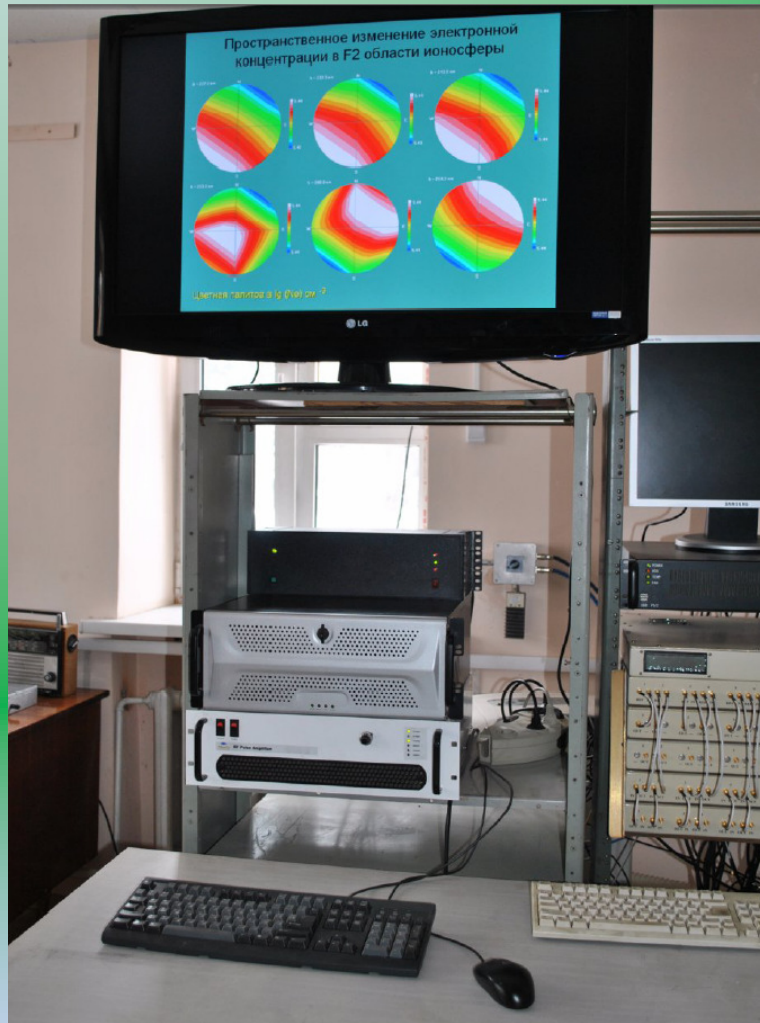
# Вектор



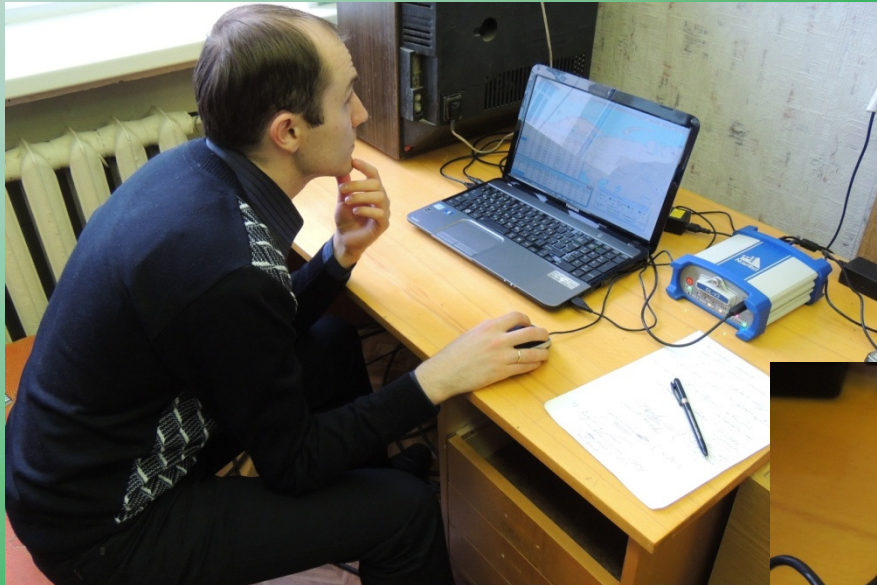
# МИЦАР-К



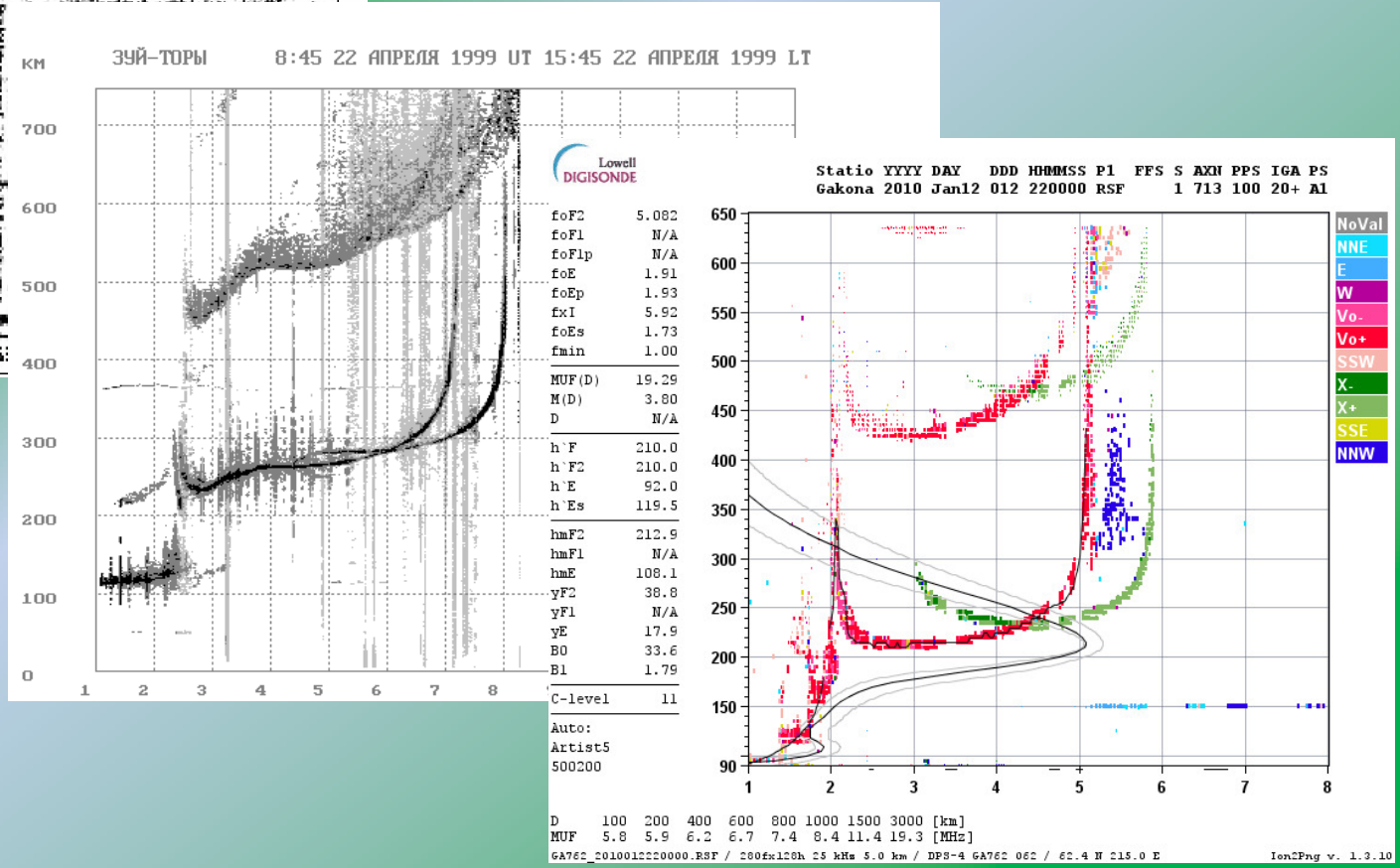
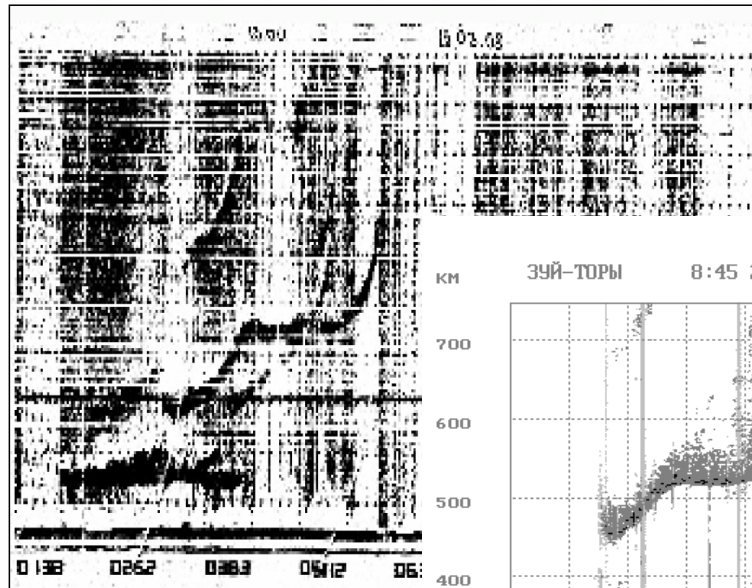
# ТОМИОН



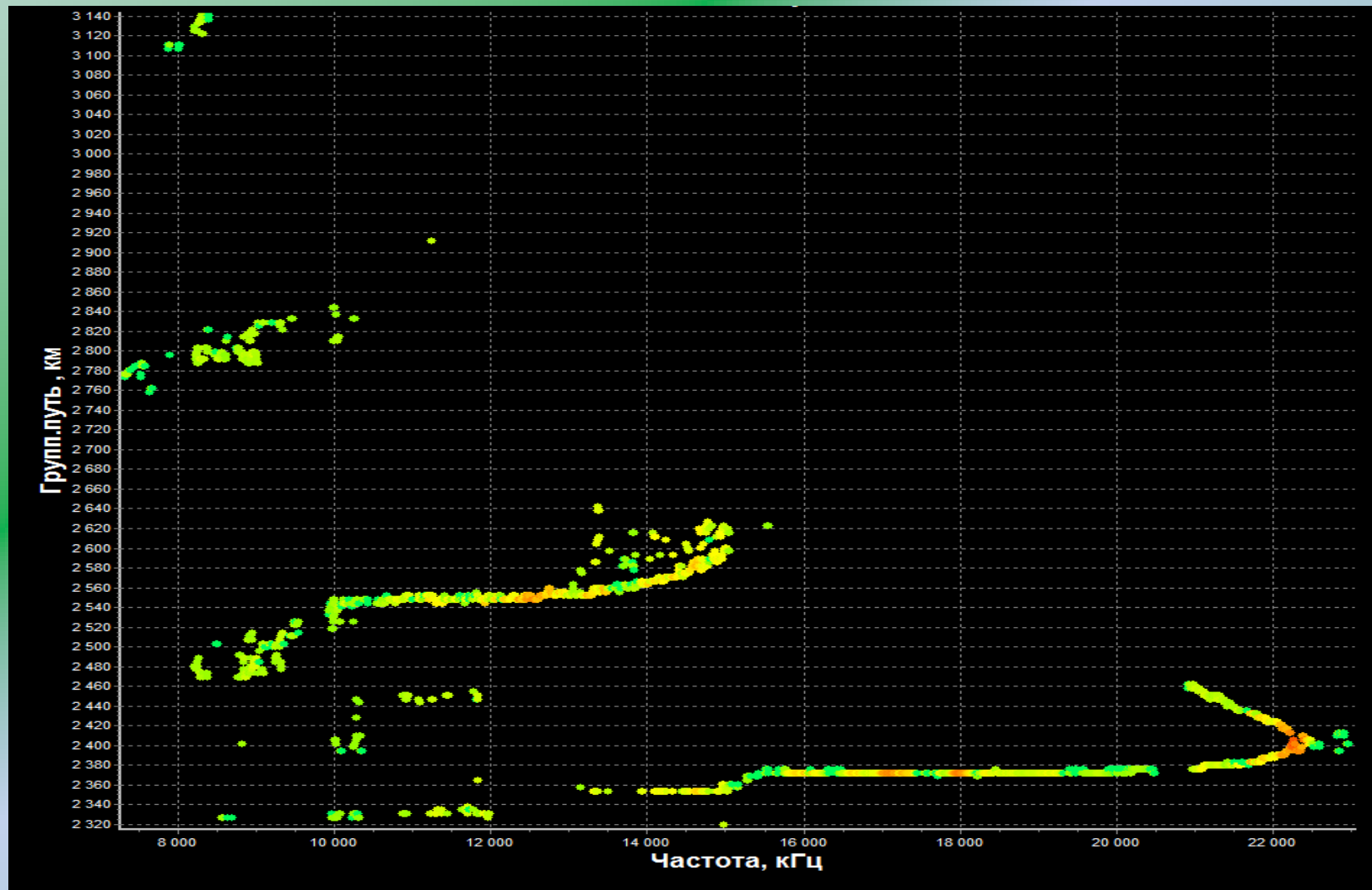
# АПК-МПЧ



# Результаты измерений



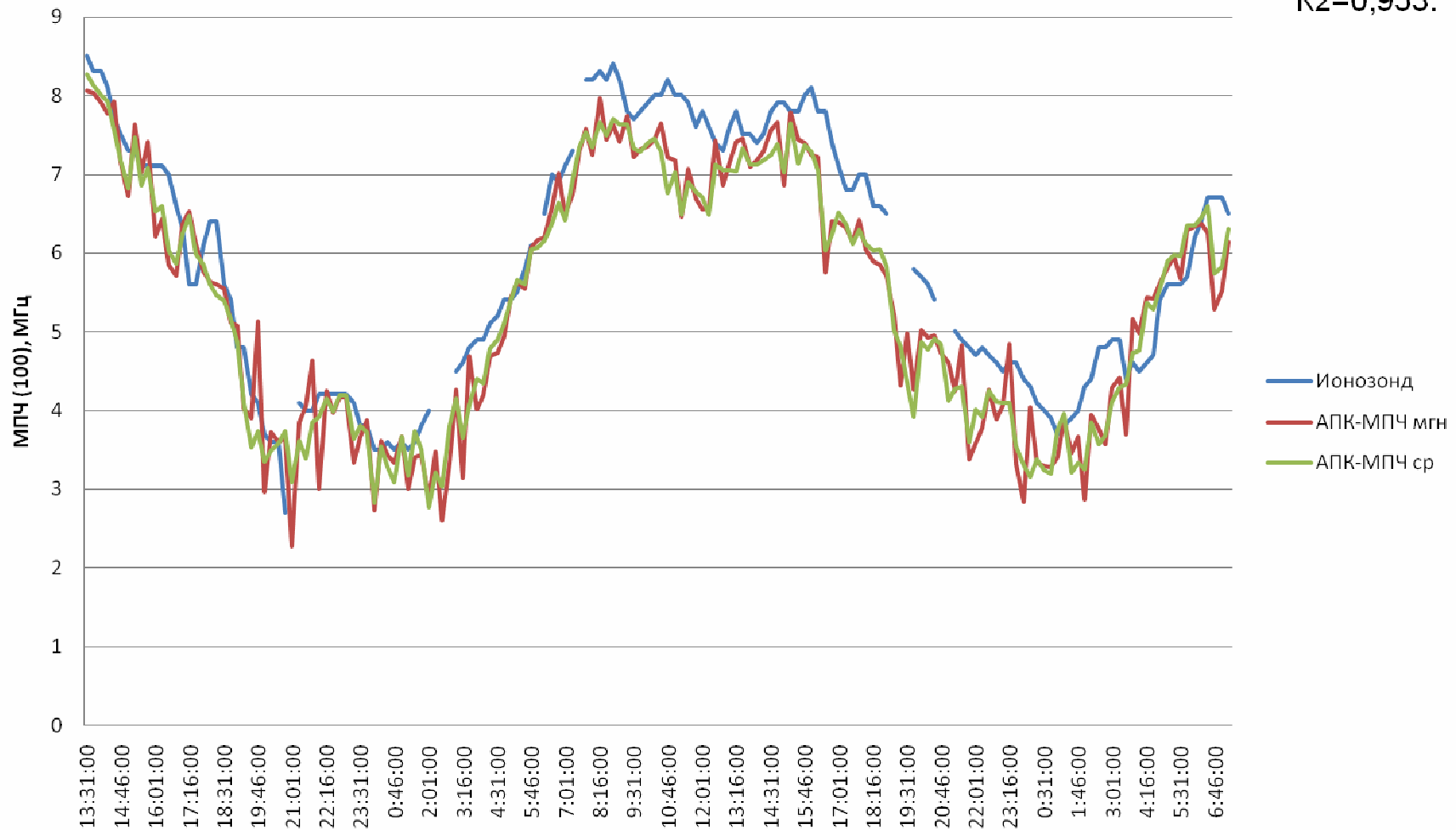
# Результаты измерений



# Измерения различными методами

Динамика МПЧ для радиолинии дальностью 100 км

$K1=0,937$ ;  
 $K2=0,953$ .





# **Моделирование параметров радиолиний**

# Модель IRI

- Rawer, K., D. Bilitza, and S. Ramakrishnan, *International Reference Ionosphere*, International Union of Radio Science (URSI), Brussels, Belgium, 1978;
- Последняя версия IRI-2011 (ноябрь 2011 г);
- Аprobация многочисленными группами исследователей (IRI News);
- Периодические уточнения по мере получения новых экспериментальных данных.

# Модель IRI

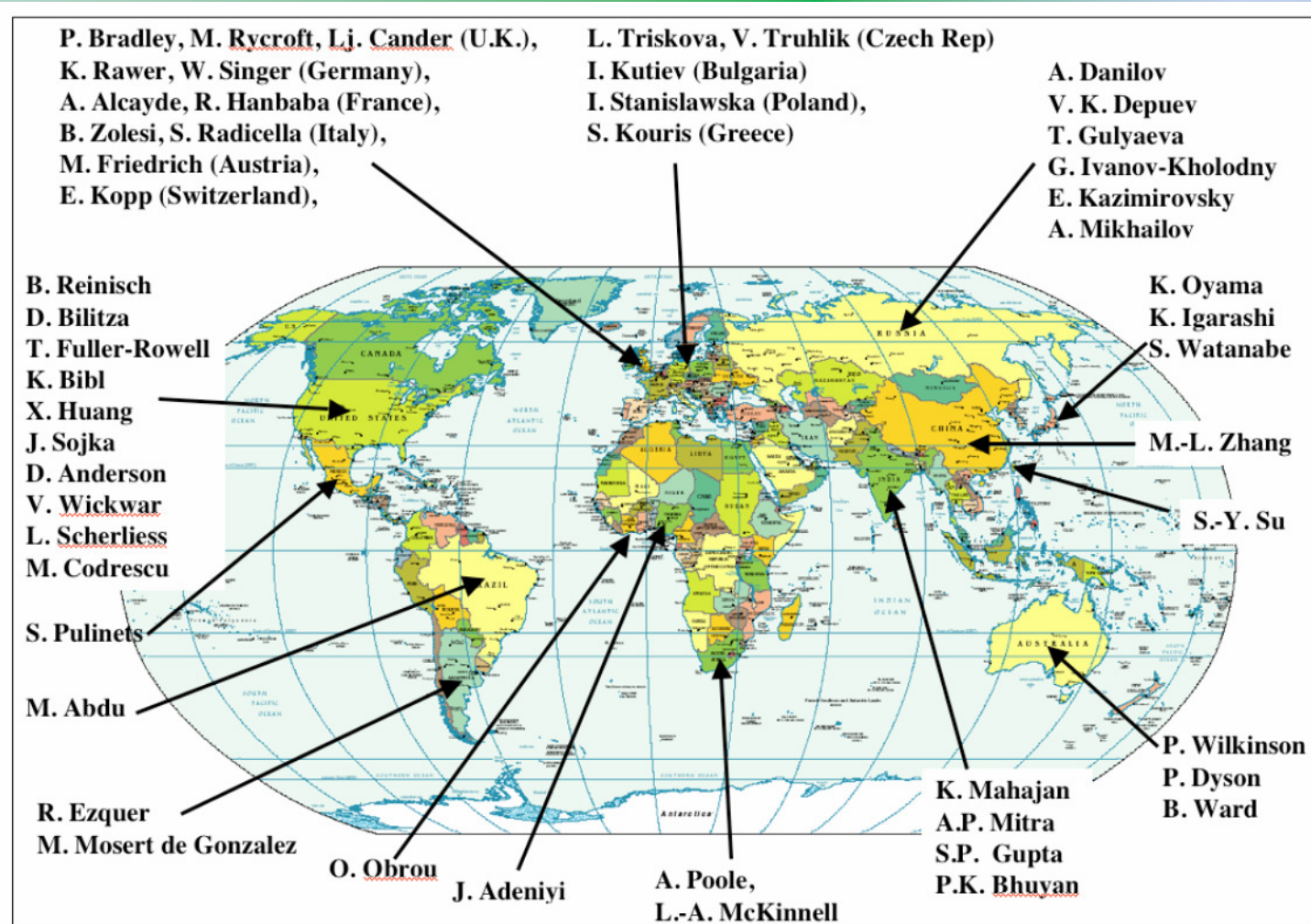


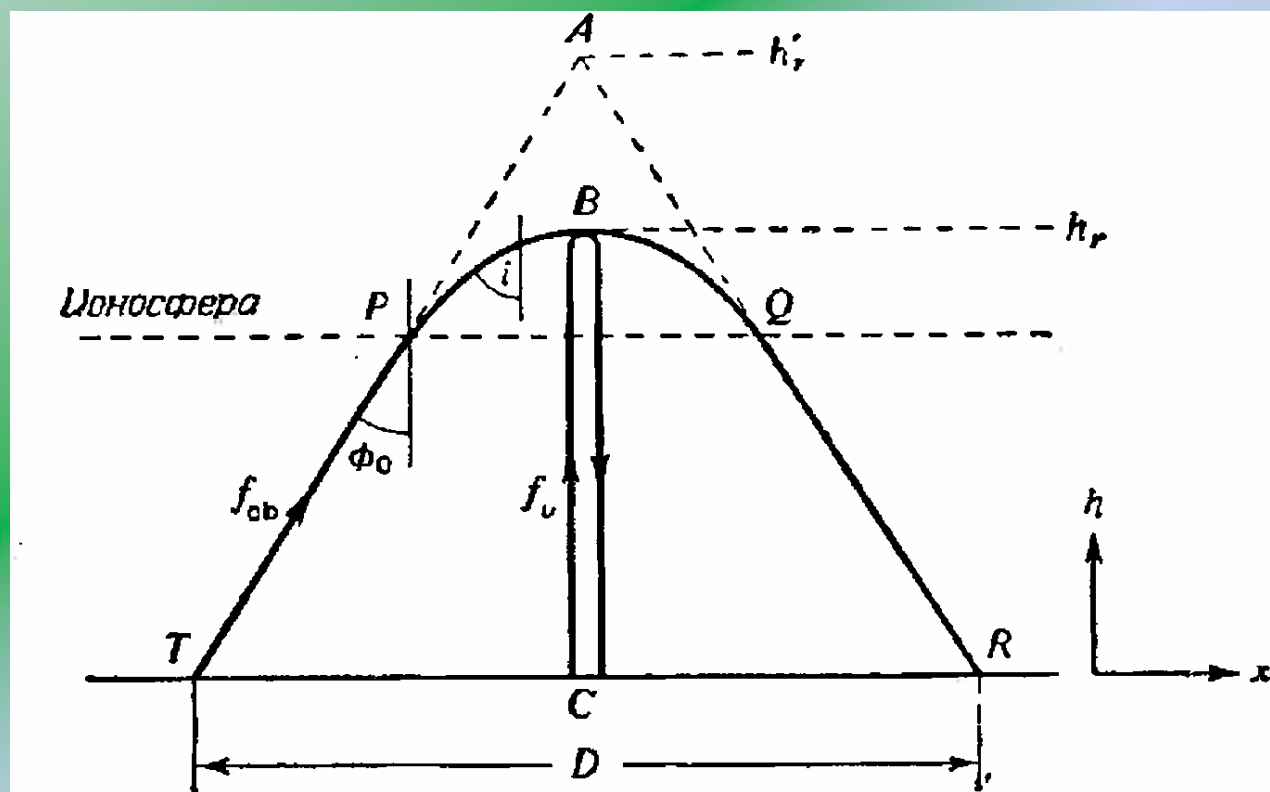
Figure 1: Global distribution of IRI Working Group members.



# Модели ионосферы

- Справочная модель ионосферы (СМИ) (ИЗМИРАН, ГОСТ 25645.113-84 «Ионосфера Земли. Термины и определения», ГОСТ 25645.164-89 «Ионосфера Земли. Модель глобального распределения концентрации, температуры и частоты соударения электронов», ГОСТ Р 25645.158-94 «Ионосфера Земли верхняя. Модель распределения концентрации электронов в плоскости геомагнитного экватора»);
- Модель ионосферы СиБИЗМИР СО СССР (ИСЗФ СО РАН);
- Модель распределения критических частот А. Васениной.

# Теорема Мартина



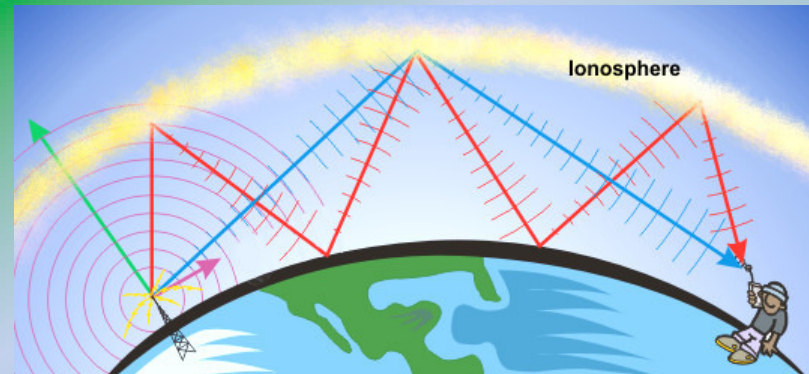
Действующая высота отражения при наклонном падении на слой равна действующей высоте отражения эквивалентной вертикальной волны.

# Методики, основанные на теореме Мартина

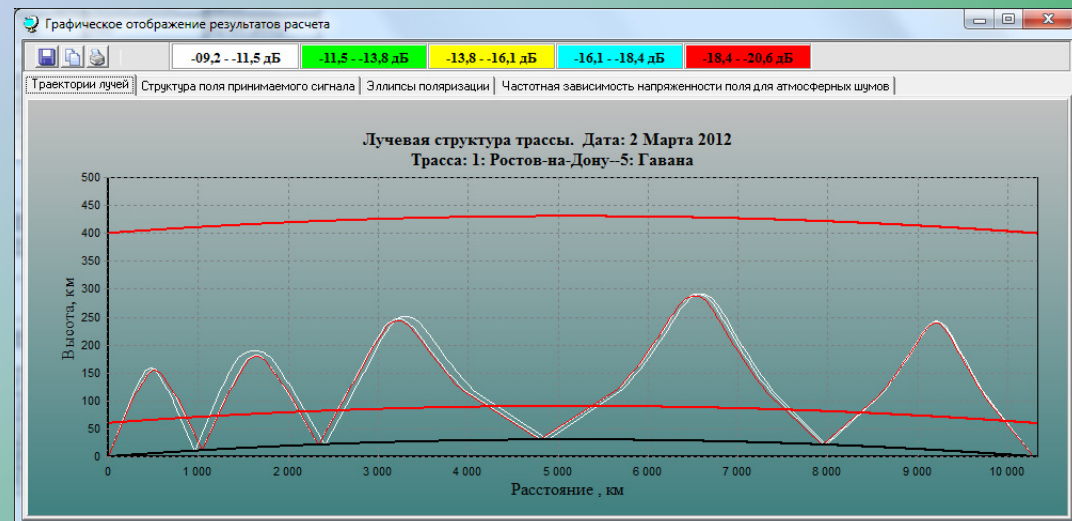
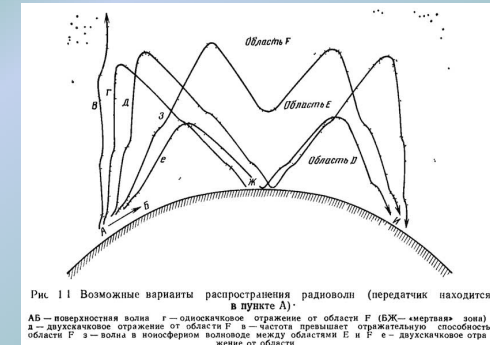
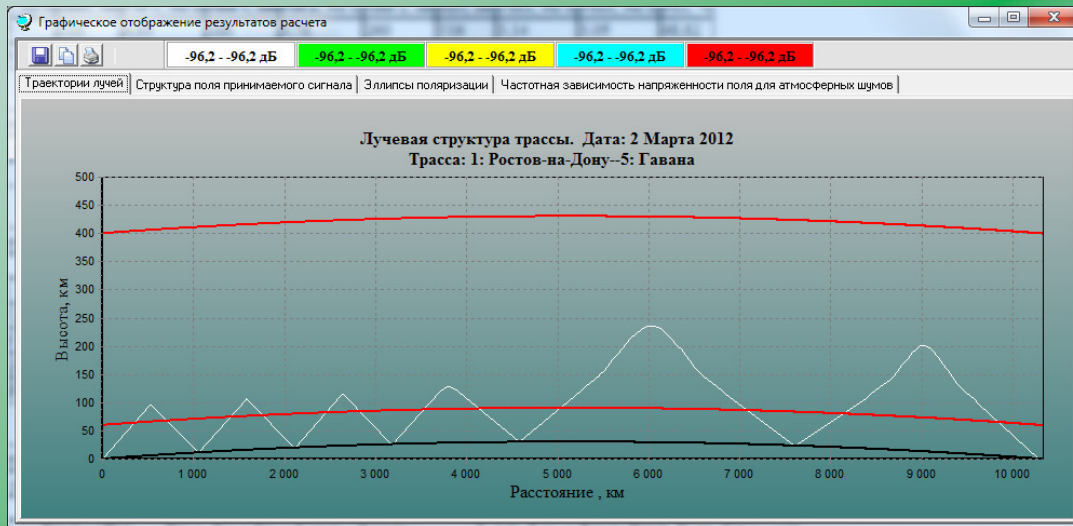
- ICERAC

Суть методики:

- Вычислить координаты точек отражения,
- Определить по модели ионосферы действующие высоты (высоты отражения),
- Построить «треугольную» трассу.
- Считать характеристики исходя из этой конфигурации радиолинии.



# Методики, предусматривающие построение «реальной» траектории





# Методики, предусматривающие построение «реальной» траектории

Суть методики:

- Построить все возможные пути распространения радиоволны путём перебора углов и решения двухточечной задачи;
- Считать характеристики для каждого из построенных таким образом радиолучей.

# Методики, предусматривающие построение «реальной» траектории

Вычислительные сложности:

$$\frac{d\varphi}{dP'} = \frac{1}{r \cdot \sin\theta} k_\varphi;$$

$$\frac{d\theta}{dP'} = \frac{1}{r} k_\theta;$$

$$\frac{dr}{dP'} = k_r;$$

$$\frac{dk_\varphi}{dP'} = \frac{1}{r \cdot \sin\theta} \left\{ \frac{1}{2} \frac{\partial \mu^2}{\partial \varphi} - k_\varphi \sin\theta \frac{dr}{dP'} - r k_\varphi \cos\theta \frac{d\theta}{dP'} \right\};$$

$$\frac{dk_\theta}{dP'} = \frac{1}{r} \left\{ \frac{1}{2} \frac{\partial \mu^2}{\partial \theta} - k_\theta \frac{dr}{dP'} + r k_\varphi \cos\theta \frac{d\varphi}{dP'} \right\};$$

$$\frac{dk_r}{dP'} = \frac{1}{2} \frac{\partial \mu^2}{\partial r} + k_\theta \frac{d\theta}{dP'} + k_\varphi \sin\theta \frac{d\varphi}{dP'};$$

$$\frac{d\delta f}{dP'} = -\frac{f}{2c} \frac{d\mu^2}{dt};$$

$$\frac{dP}{dP'} = \mu^2.$$

# Методы расчёта характеристик ИРРВ

- Метод Смита;
- Метод нормальных волн;
- Метод адиабатического инварианта;
- Метод рефракционного интеграла;
- Метод обобщённого закона Снеллиуса;
- Метод характеристик.

***Наибольшее распространение получили  
методы геометрической оптики***

# **Программные средства для решения расчётных задач**

# HF Prop

Initial data

Your station position:      Distant station position:  
Set date:                      Set solar details:

Thursday March 25 2010

Mon	Tue	Wed	Thu	Fri	Sat	Sun
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31	Today			

Month: 3      Year: 2010

Initial data

Your station position:      Distant station position:  
Set date:                      Set solar details:

Solar Flux:

Boulder K index:

Note:  
Solar flux and K index data is available from standard stations via broadcast minutes page.

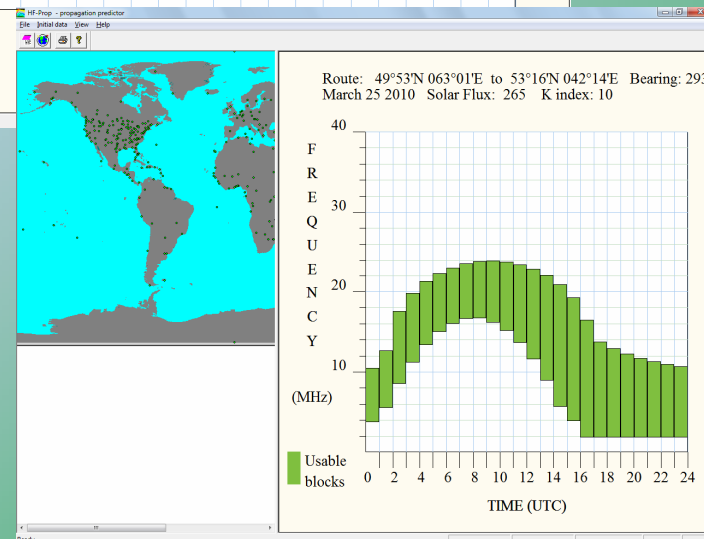
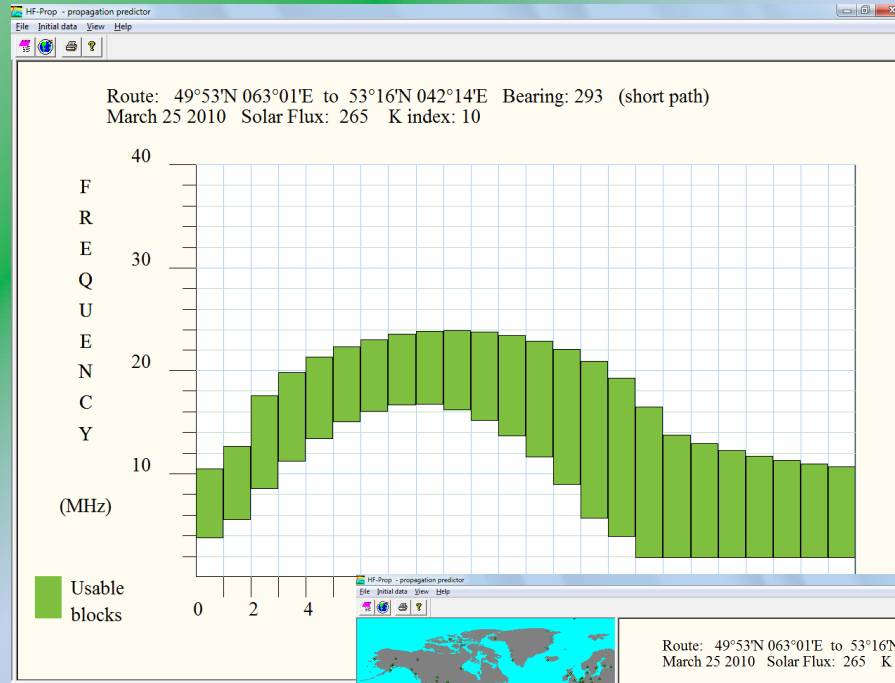
Initial data

Set date:                      Set solar details:  
Your station position:      Distant station position:

Latitude:  
Degrees:  Minutes:   North  South

Longitude:  
Degrees:  Minutes:   East  West



# DX ToolBox

**Current Conditions**

File Edit Windows

UTC: 1318

Solar Flux: 83 SSN: -  Play Alert Sound

A-Index: 5

K-Index: 2 at 1200 UTC

Space weather: Past 24 Hours: Next 24 Hours:

Geomagnetic storms: None None

Solar radiation storms: None None

Radio blackouts: None None

GOES 14

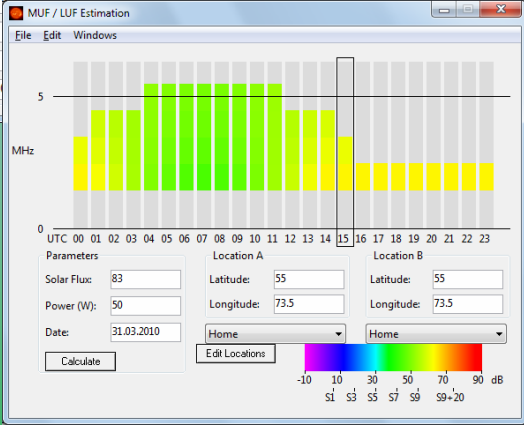
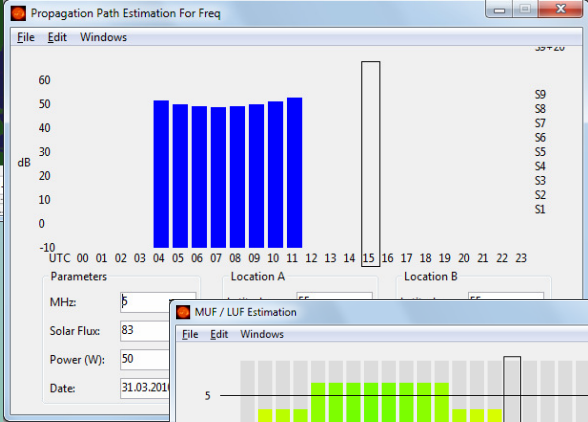
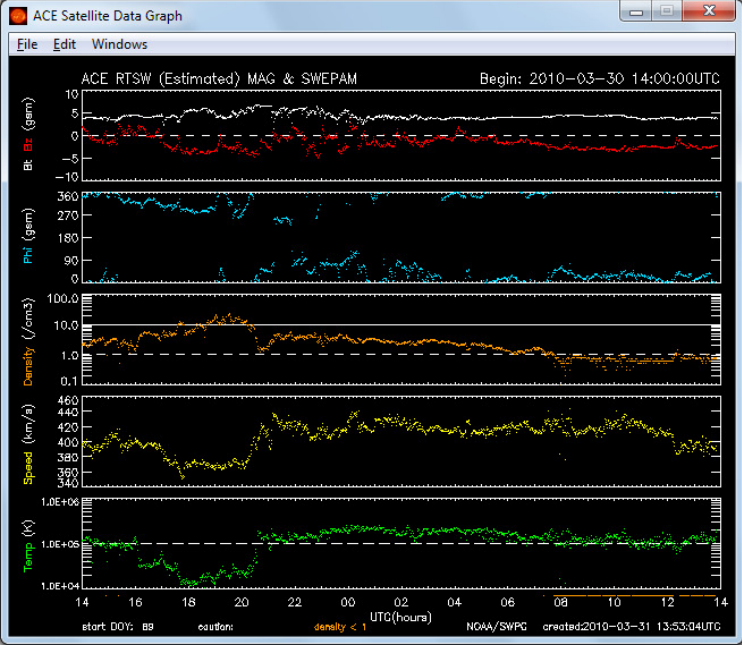
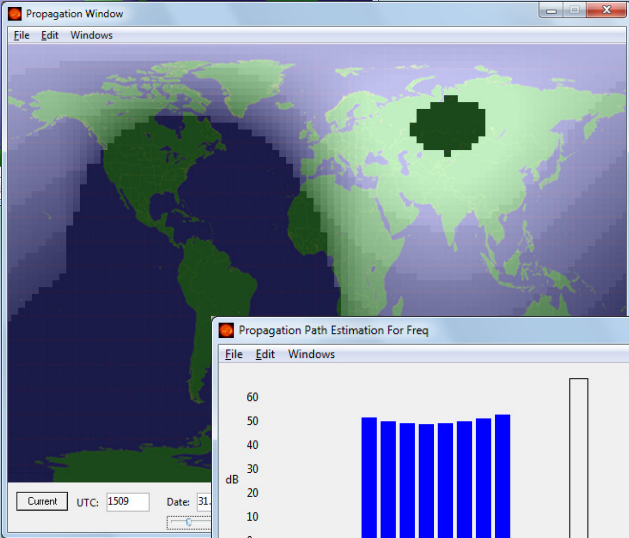
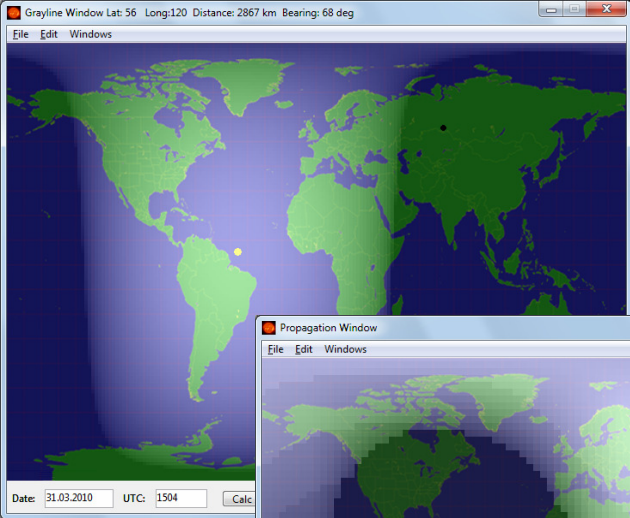
Current: 1316 AS0

Begin: -

Max: -

End: -

Magnetic: Bz 2.3 By 0.9 Bz -3 Bt 3.9 nT Lat: 50.3 Long: 21.3 deg



# Propagation Wizard (PropWiz)

Antenna Diagram Editor Rel. 1.1

File Print Edit Configure ?

HL471 (15m mast) File HL471\_15.ADG

Frequency	Name	HL471 (15m mast)	File	HL471_15.ADG			
Elev	6	7	10	15	20	25	30
GW	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99
0	-99	-10	-10	-10	-10	-10	-10
5	-99	-10	0	5	7	10	10
10	-99	-5	6	10	12	12	12
15	-99	-2	8	12	12	10	10
20	-99	1	10	12	10	6	6
25	-99	3	10	10	6	6	11
30	-99	4	10	7	6	10	12
35	-99	4	10	2	7	11	6
40	-99	5	8	2	10	9	6
45	-99	5	6	4	11	5	8
50	-99	6	4	7	10	4	10
55	-99	6	2	9	8	5	10
60	-99	6	0	10	5	7	5
65	-99	6	-2	10	0	8	0
70	-99	6	-4	10	-10	8	-4
80	-99	6	-10	8	-4	6	-4
90	-99	5	-10	7	-2	4	2

GW -99 -99 -99 -99 -99 -99 -99 -99

Add Elevation Del Elevation Add Frequency

ROHDE & SCHWARZ Propagation Wizard 1.7

File Print Stations View Programs ?

**Add Del Exch Load Save**

**Transmitter**

Tx Station Name: **Omsk**

Latitude: **55 00 N** Longitude: **73 24 E**

Tx Antenna Type: **HD420/421 long.**

Tx Power: **1000** W

Time Deviation: **5** h

Min. Takeoff: **3** °

Antenna Diagram: **3** °

TxAzimuth: **287.0** °

**Receiver**

Rx Station Name: **Moscow (Moskva)**

Latitude: **55 45 N** Longitude: **37 30 E**

Rx Antenna Type: **HD420/421 long.**

Noise Figure: **10** dB

Rx Noise Environment: **Quiet Rural**

Time Deviation: **3** h

RxAzimuth: **77.1** °

**Common Data**

Month: **3** Year: **2010**

Sunspot Number: **83** Distance: **2244** km

Ground Characteristic: **Dry Ground (Sand)**

Modulation: **CW (150 Hz)**

S/N-Margins: Set 1: **10** dB Set 2: **5** dB

Availability: **24** h

Min. Takeoff: F2-Mode: **10** ° E-Mode: **8** °

Min. Hops: **1**

f [MHz]

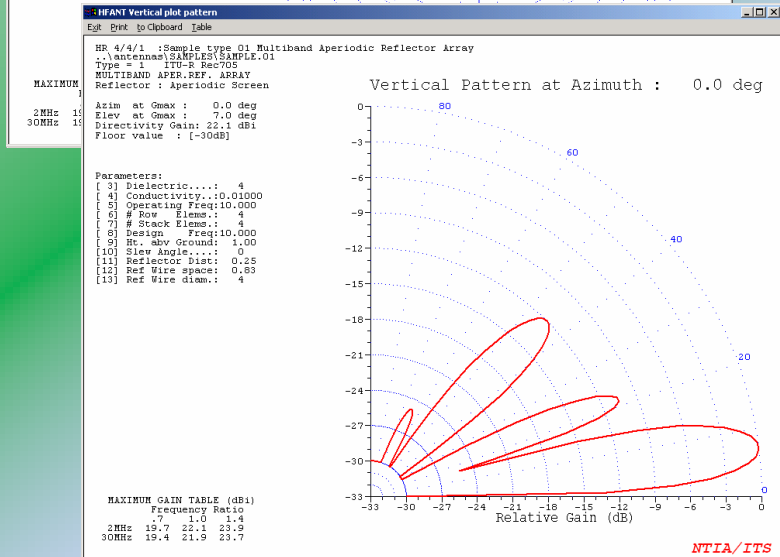
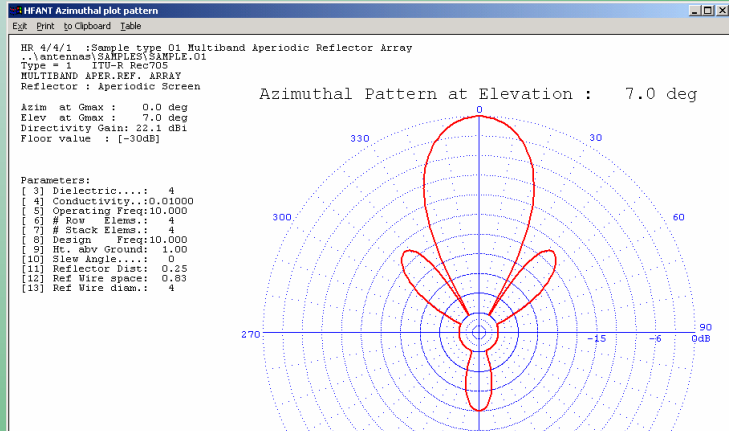
— 5 dB S/N Margin — 10 dB S/N Margin — MUF

UTC 0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24

Tx 5 7 9 11 13 15 17 19 21 23 1 3 5

Rx 3 5 7 9 11 13 15 17 19 21 23 1 3

# ICEPAC



ICEPAC INVERSE Area Coverage data input

File Run Abort Save to: Help

Layers: Grid Countries Zones Cities MainBeam Contours  
 Black Blue Ignore Ignore Red Black with shading

Parameters: MUF ANGLE DELAY Contours

Grid: 0=Great Circle Size= 31 x 31

Coefficients: URSI 88 (Australian) Method 21 = Forced LONG path model

Receiver: 55.00N 73.40E OMSK

Plot Center: 55.00N 73.40E OMSK  
 X-range=-3000.0km to 6000.0km Y-range=-3000.0km to 4000.0km

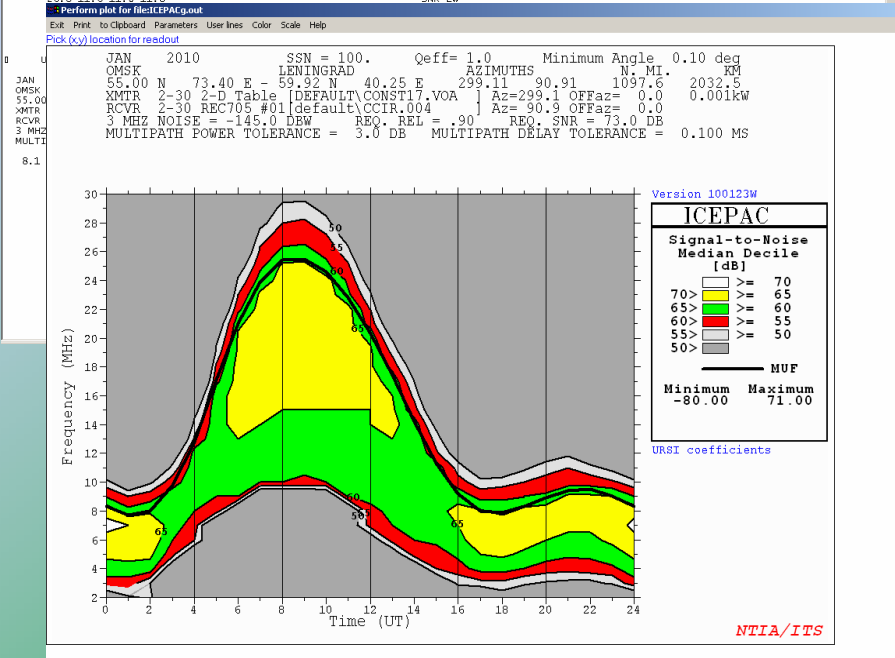
Groups: Month, Day = 6.00 7.00  
 SSN = 100 90  
 Qindex = 0.00 0.00  
 Time UT = 18 19

icepac.out - Блокнот

URSI Coefficients METHOD 30 ICEPAC version 100123W PAGE 1

JAN 2010 SSN = 100. Qeff= 1.0 Minimum Angle 0.10 deg  
 OMSK LENINGRAD AZIMUTHS N, MI, KM  
 55.00 N 73.40 E = 59.92 N 40.25 E 299.11 90.91 1097.6 2032.5  
 XMTR 2-30 2-D Table [DEFAULT\CONST17.VOA ] Az=299.1 OFFaz= 0.0 0.001kW  
 RCVR 2-30 REC705 #01[default\CCIR.004 ] Az= 90.9 OFFaz= 0.0  
 3 MHz NOISE = -145.0 dBW REQ. REL = .90 REQ. SNR = 73.0 dB  
 MULTIPATH POWER TOLERANCE = 3.0 DB MULTIPATH DELAY TOLERANCE = 0.100 MS

FREQ	MODE	ANGLE	DELAY	V WHITE	MURDAY	LOSS	DBI	S DEW	N DEW	SNR	RPMWG	REL	MPROB	S PRB	STG LW	SIG UP	SNR LW
7.1	24.2	5.0	10.0	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1F2	1E5	1F2	1F2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13.7	1.3	10.9	9.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7.3	6.9	7.2	7.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
345	110	289	261	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.50	0.93	1.00	0.97	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
108	134	99	98	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-18	9	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-105	-128	-99	-98	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-170	-151	-159	-164	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
65	23	60	66	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	61	24	19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.21	0.00	0.02	0.12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.00	0.00	0.00	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.13	0.01	0.09	0.10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25.0	6.4	5.4	6.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12.4	3.9	3.4	5.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26.8	11.6	11.0	11.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

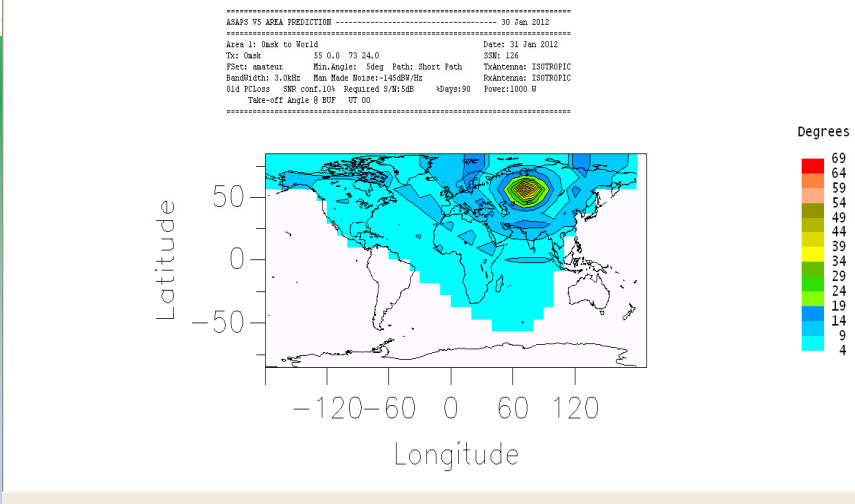
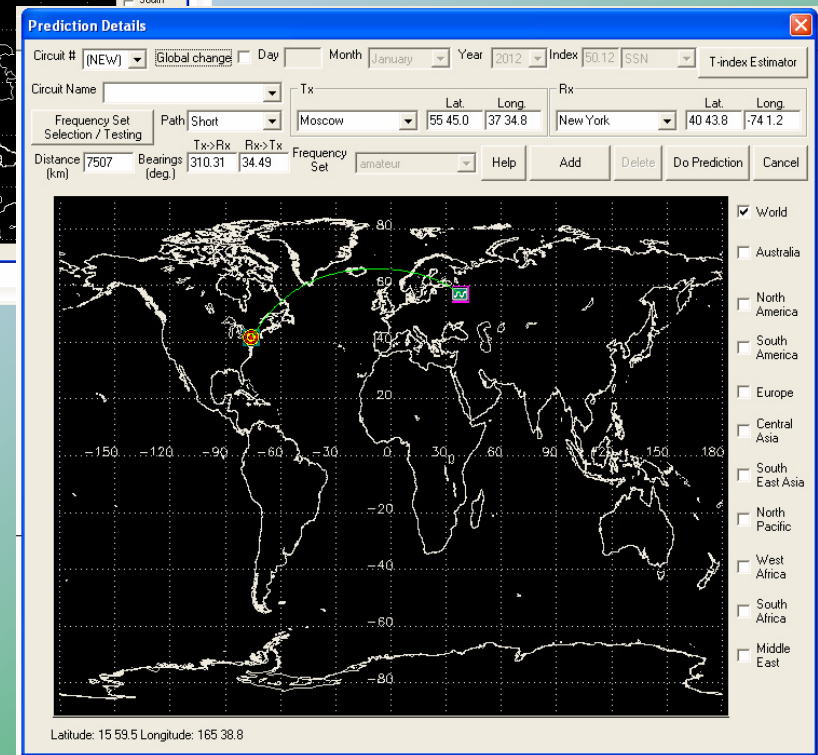
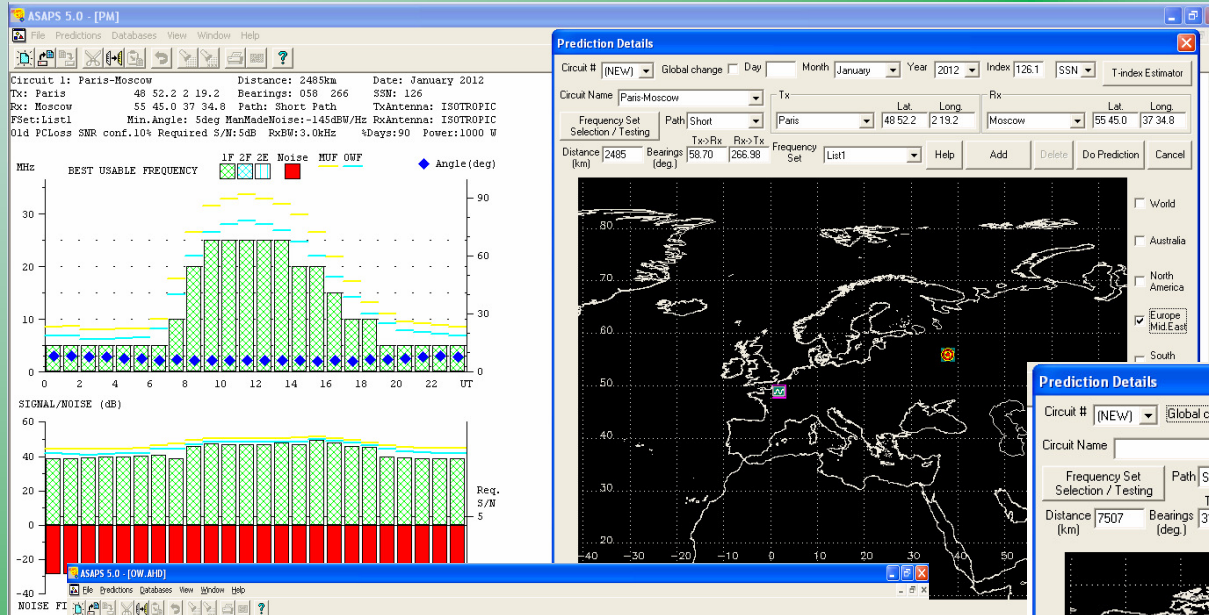




# Клоны ICERAC

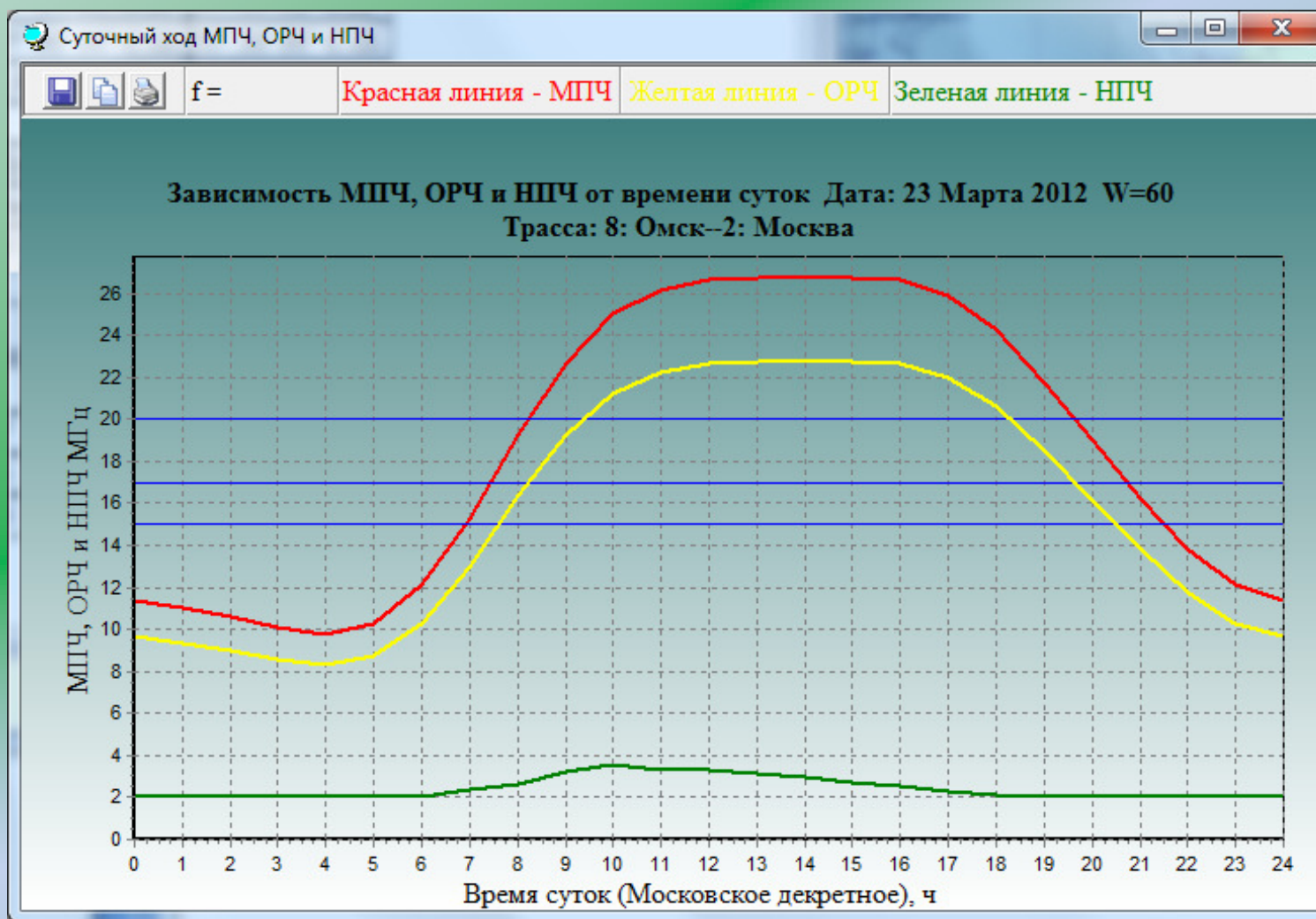
- GeoAlert,
- Extreme Wizard,
- WinCAP Wizard,
- Ham CAP,
- MultiProp,
- ACE-HF Pro,
- HFWin32,
- DXLab,
- IONPAC,
- IONPRED,
- PropMan-2000

# ASAPS

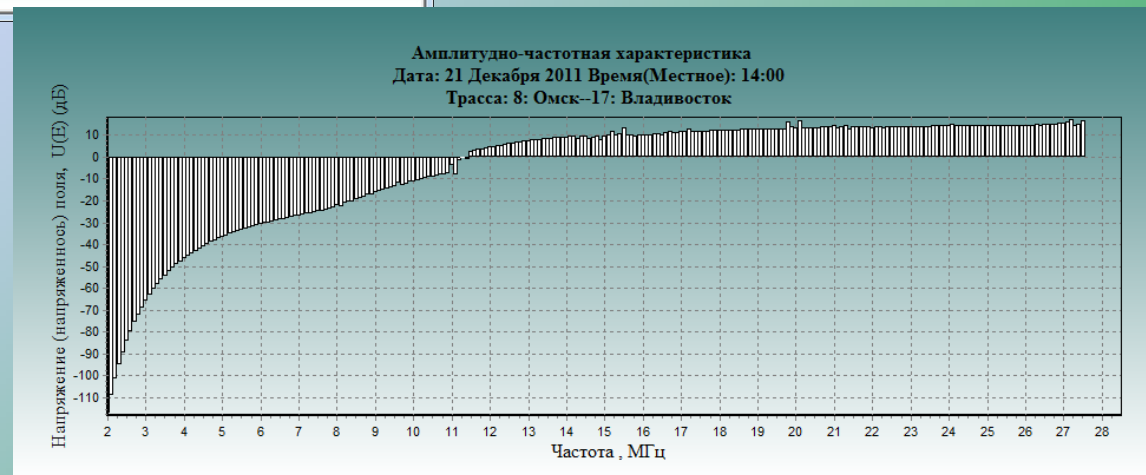
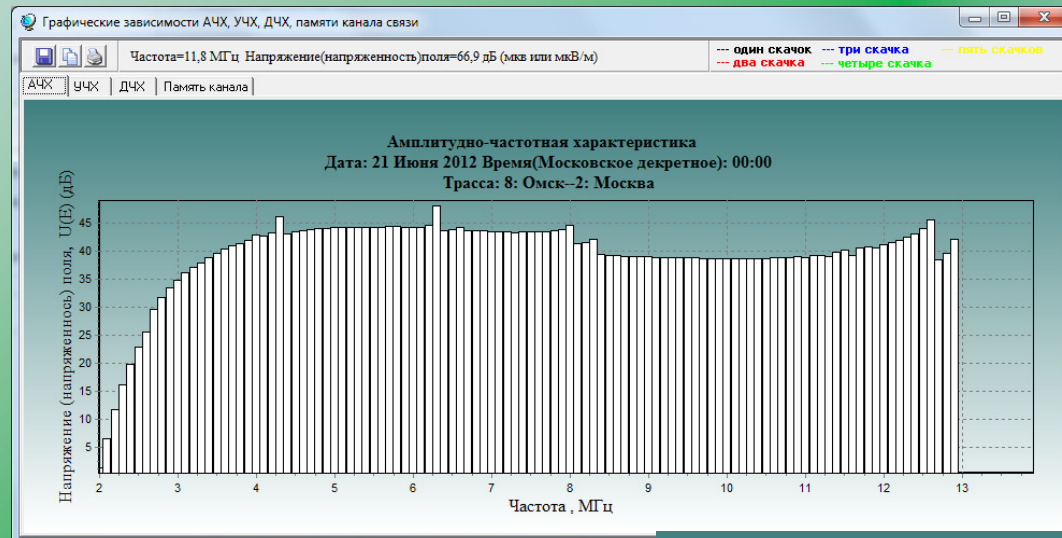




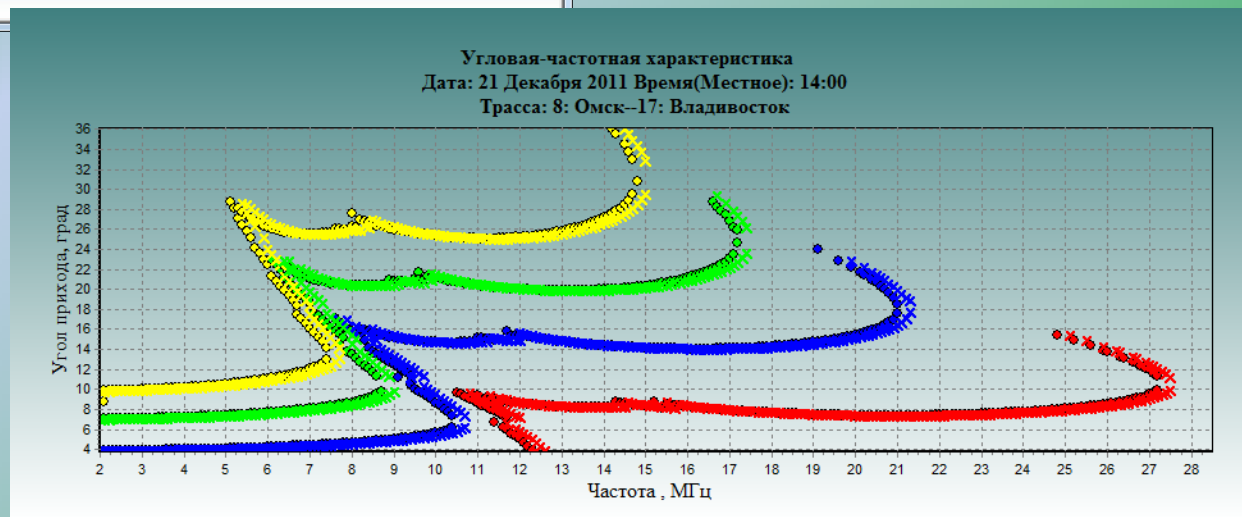
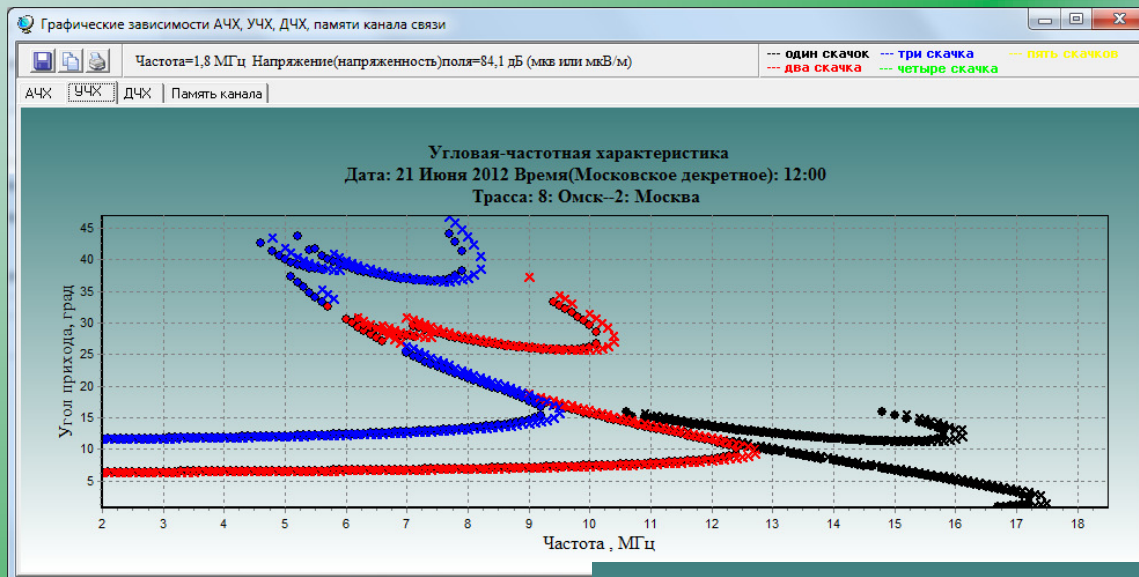
# «Трасса»



# «Трасса»

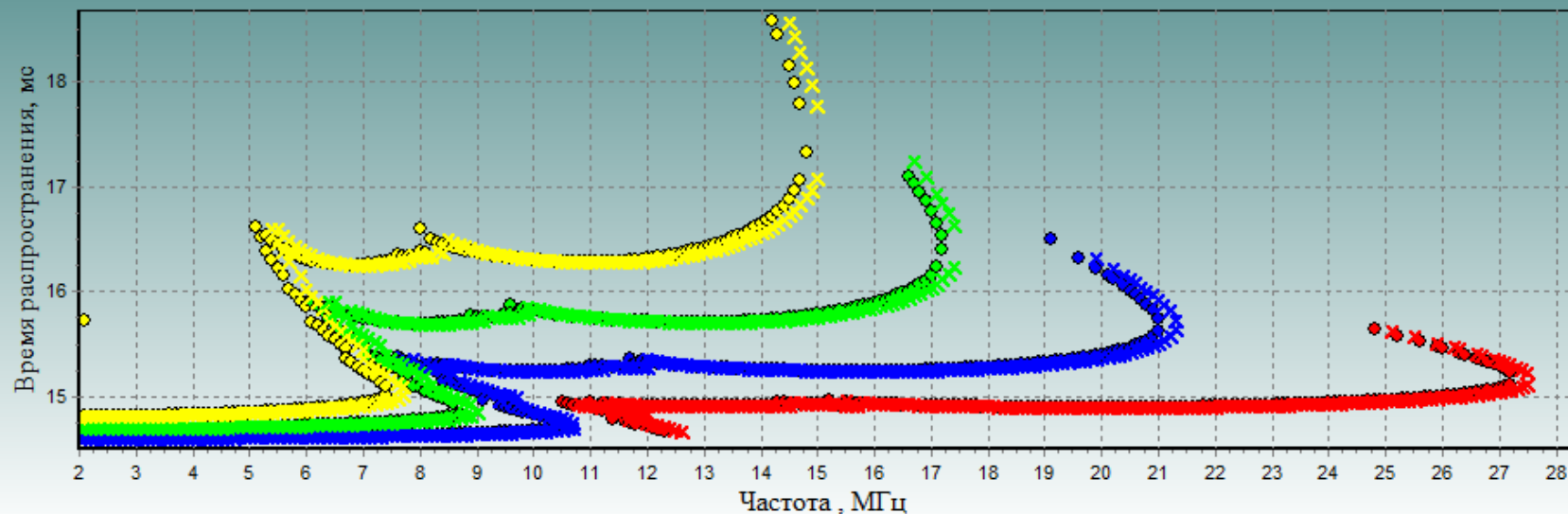


# «Трасса»



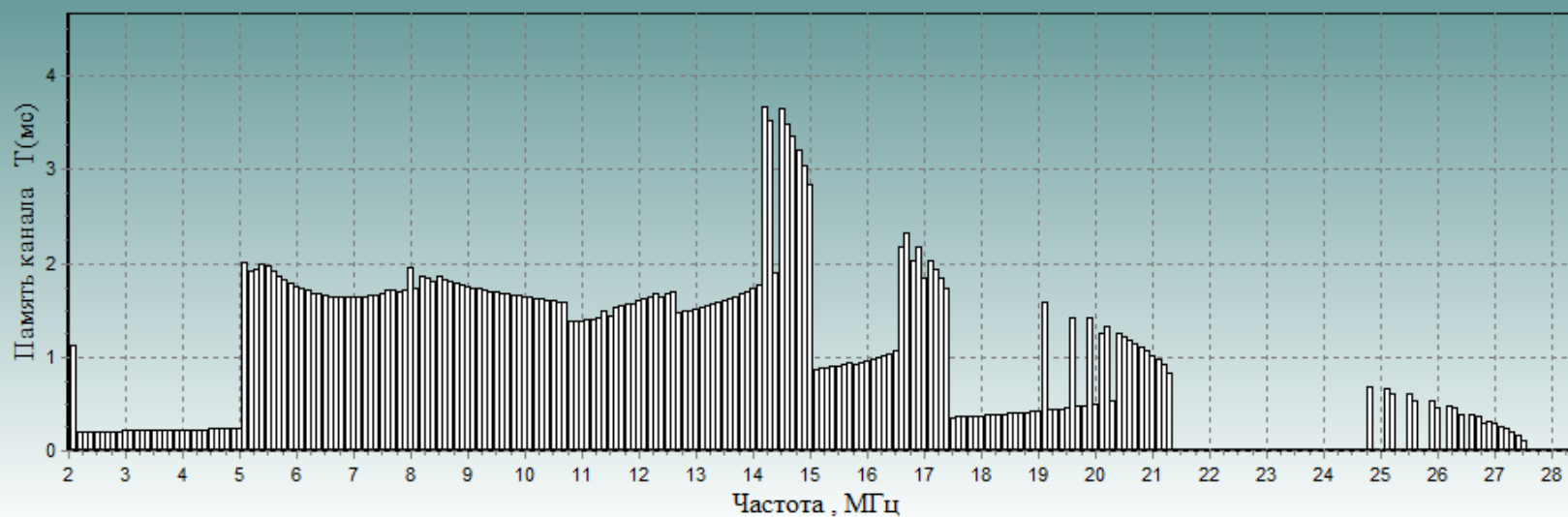
# «Трасса»

Дистанционно-частотная характеристика  
Дата: 21 Декабря 2011 Время(Местное): 14:00  
Трасса: 8: Омск–17: Владивосток



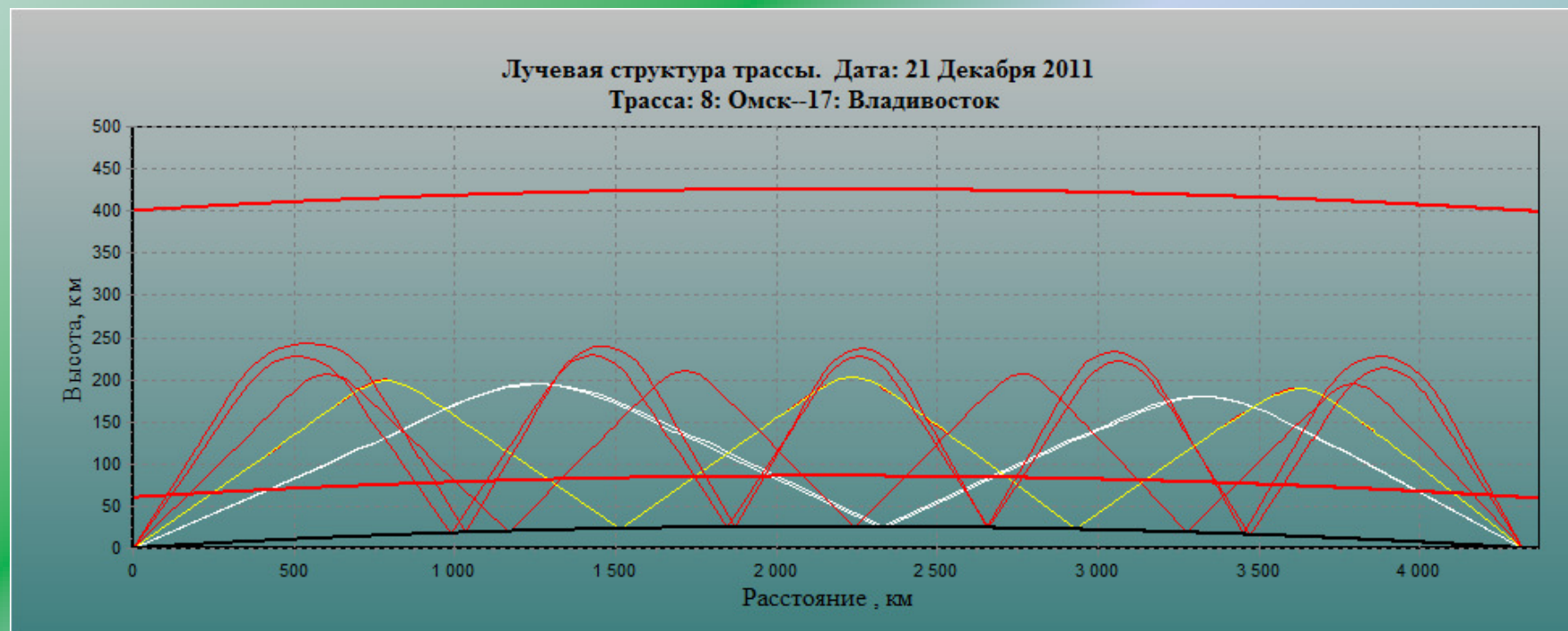
# «Трасса»

Частотная зависимость памяти канала  
Дата: 21 Декабря 2011 Время(Местное): 14:00  
Трасса: 8: Омск--17: Владивосток

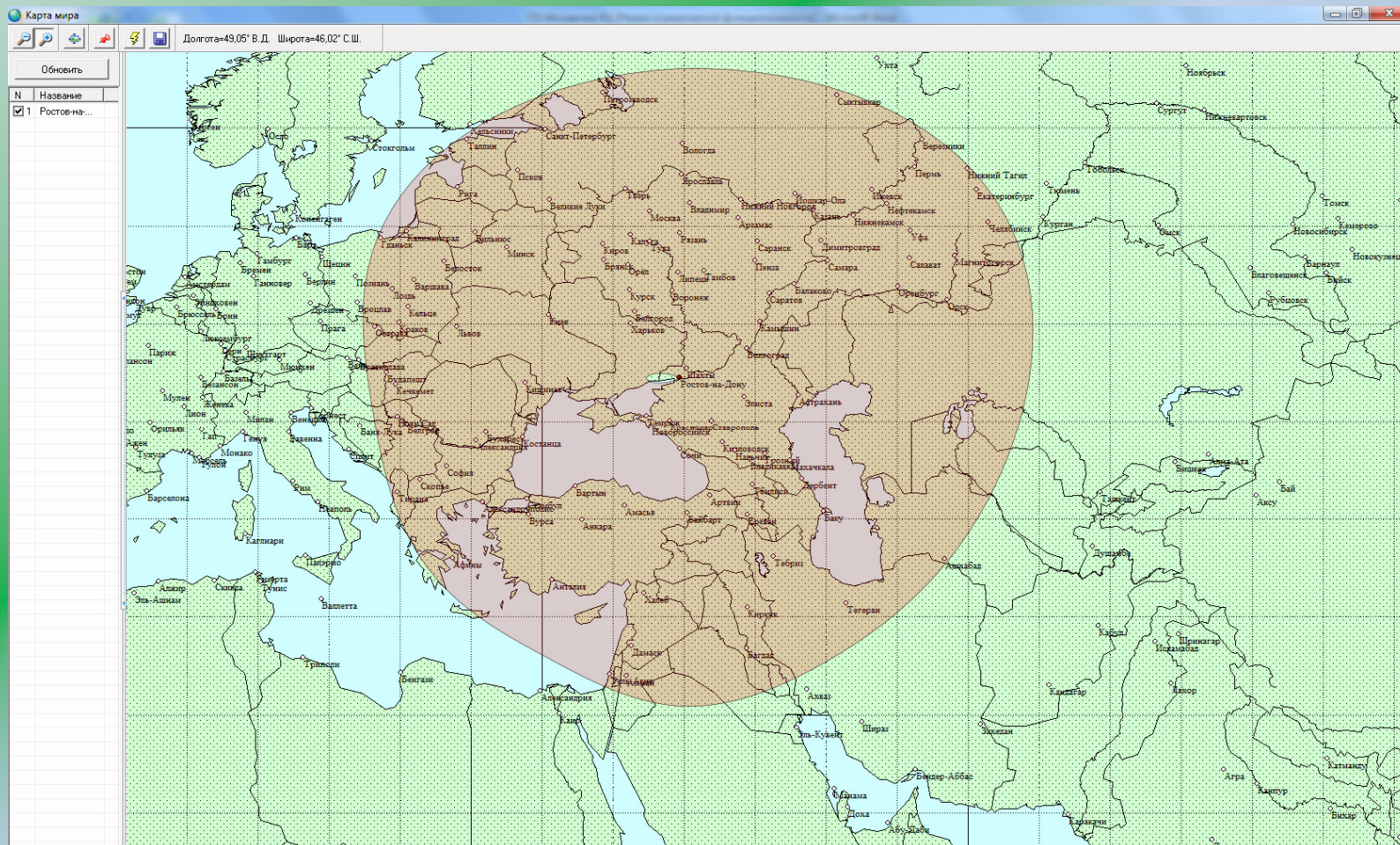




# «Трасса»



# «Трасса»



# «Трасса»

Программа расчета траекторных и энергетических характеристик радиоканалов диапазона 2-30 МГц

Время расчета (ч.мм) 14:00 Рабочая частота (МГц) 15

Графическое отображение результатов расчета

Параметры среды распространения (модель IRI) | Время (Местное) 14:00

Трасса, км	FoD, МГц	FoE, МГц	HmE, км	FoF1, МГц	HmF1, км	FoF2, МГц	HmF2, км	HEs, км	FoEs, МГц	FbEs, МГц	PEs, %
0,00	0,27	3,27	110	3,96	202	9,03					
2904,64	0,23	2,96	110	4,19	188	9,96					

Время (Московское декретное) 13:38 | МПЧ 28,4

F, МГц	Мода	Тип луча	d1, град	d2, град	Ls, дБ	Lr, дБ	T, мс	U(E), дБ	U(Ush(E)u), дБ	G1, дБи	G2, дБи	L0, дБ	Lr, дБ	M	PSI, град
8,00	EE	0	4,1	4,1	64,9	24,1	9,8	6,3	44,1	0	0	17,6	8,8	0,76	-12,4
8,00	F1F1	0	22,7	21,9	71,3	33,8	10,8	2,7	40,5	0	0	8,6	5,3	0,87	-14,4
8,00	EE	x	4,1	4,1	64,9	28,2	9,8	3,8	41,6	0	0	17,5	7,3	-0,76	77,6
8,00	F2F2F2	0	29,1	30,2	72,0	32,6	11,5	0,6	38,4	0	0	8	8,5	0,9	-16

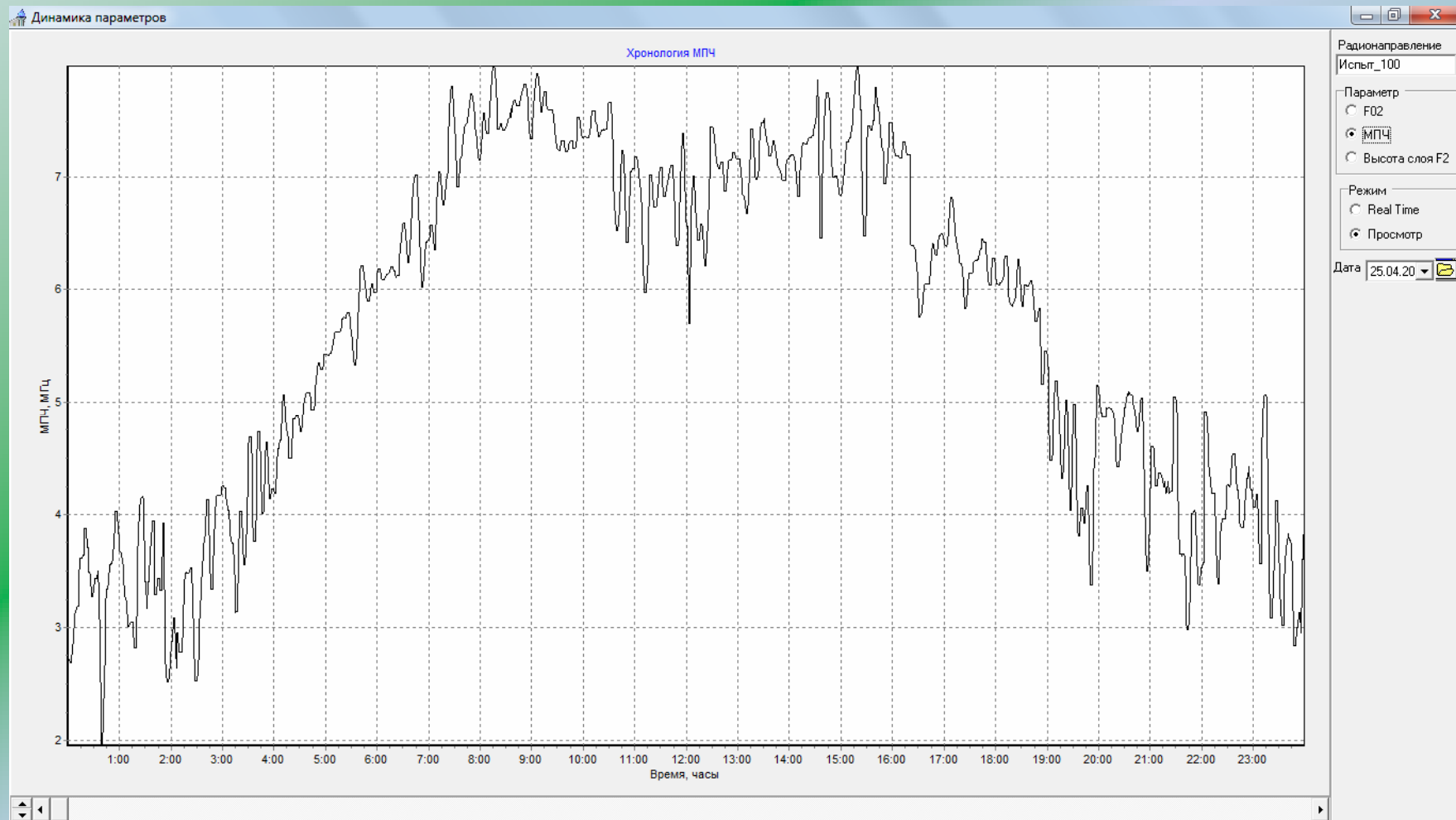
Число слов: 207 | Русский (Россия)

# **Экспериментально-расчётные методы**

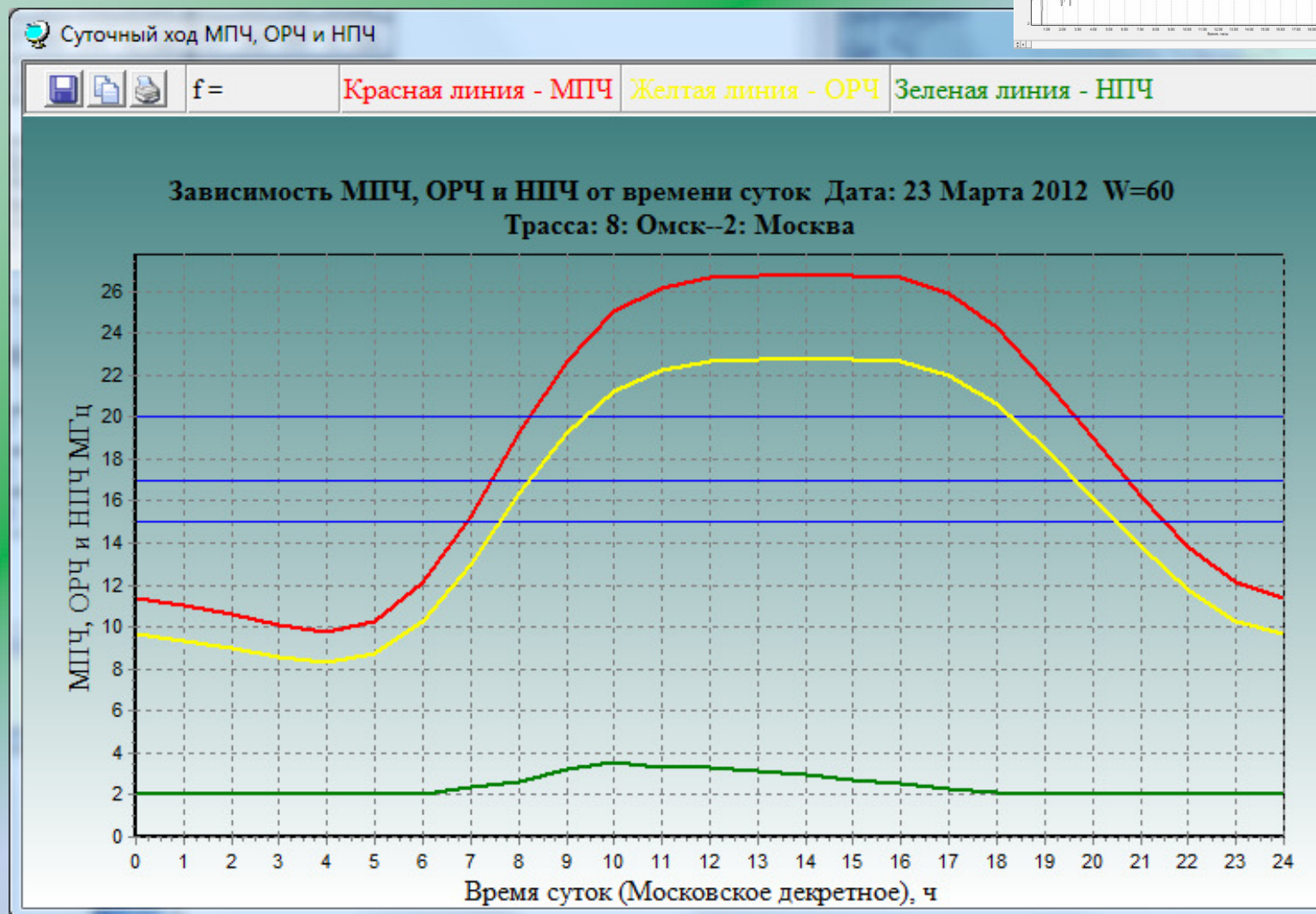
# Где измерять?



# Как часто?



# Насколько точно?



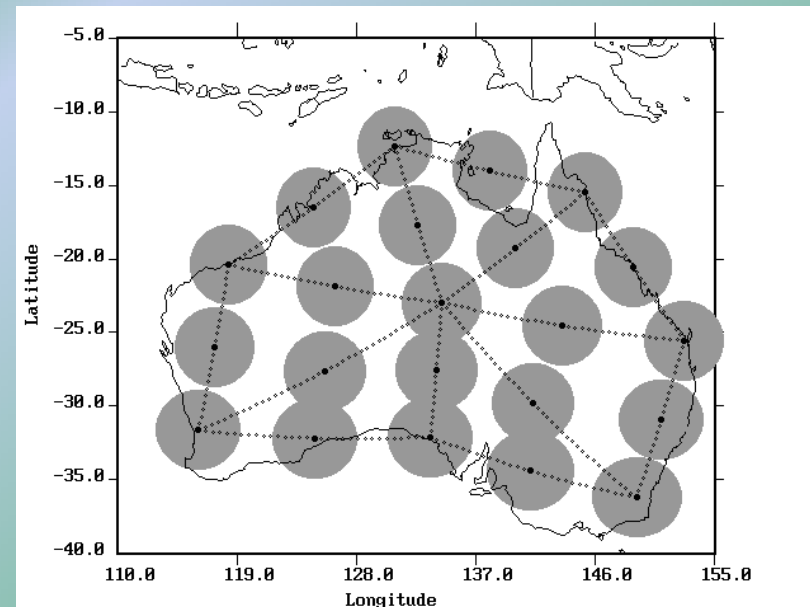
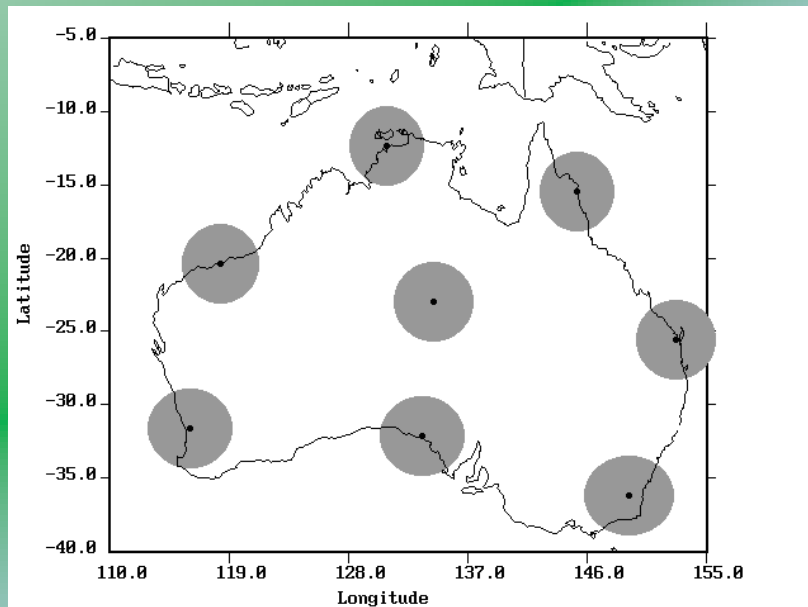
# Как определить входные параметры расчёта?

- Индекс солнечной активности.
- Возмущённость магнитного поля.
- Характеристики антенны (состояние подстилающей поверхности).



# Известный алгоритм решения

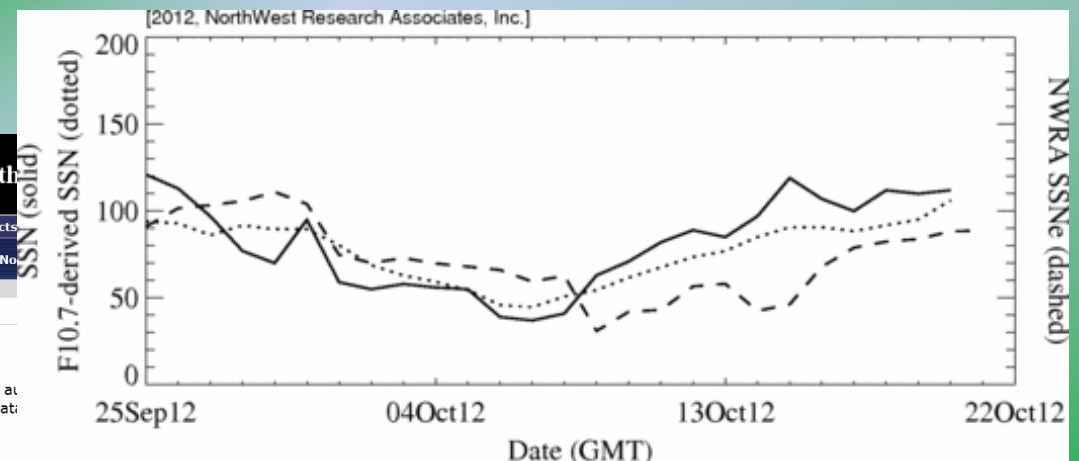
## 1. Создать сеть измерительных станций



# Известный алгоритм решения

## 2. Опубликовать в сети входной параметр для прогностической программы

The screenshot shows the website of the Australian Government Bureau of Meteorology, specifically the Radio and Space Weather section. The page is titled "HF Systems" and includes a navigation menu with options like "Home", "Space Weather", "Satellite", "Geophysical", "Solar", "HF Systems", and "Products". The main content area is titled "Real Time T Indices" and provides information about the T index, including a forecast for SOL: Moderate and MAG: No. The page also features a sidebar with links to various resources like HAP Charts, Ionogram Viewer, and LAMP Charts. At the bottom, there is a footer with links for "About IPS", "Feedback", "Contact Us", "Site Help", "Site News", "Careers", "Site Map", "Site search", "Acknowledgments", and "Subscribe".



Below is real time T index information based on several hours of actual data during disturbances. A value of 999 indicates that no autoscaled data is available.  
(last updated 21 Oct 2012 07:20 UT)

REAL TIME T INDICES FOR AUSTRALIAN REGION  
AUTO SCALED DATA IS USED TO PRODUCE THESE INDICES  
21 10 12 07 UT  
Northern Equatorial Australian Region T index: 87  
Northern Australian Region T index: 100  
Southern Australian Region T index: 137  
Australian Region T index: 114

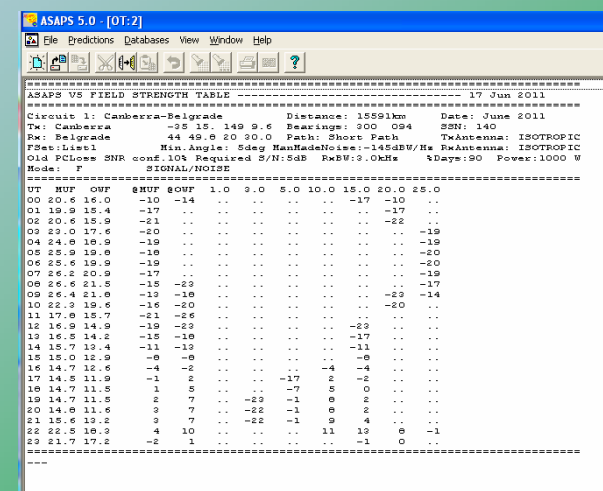
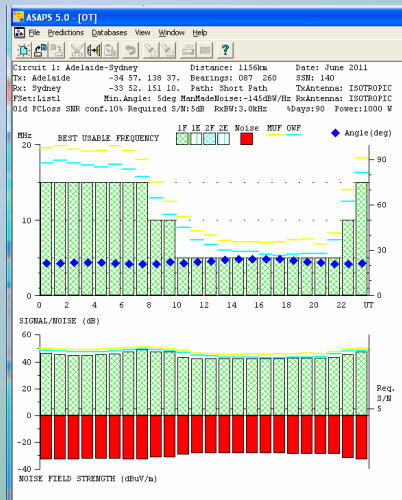
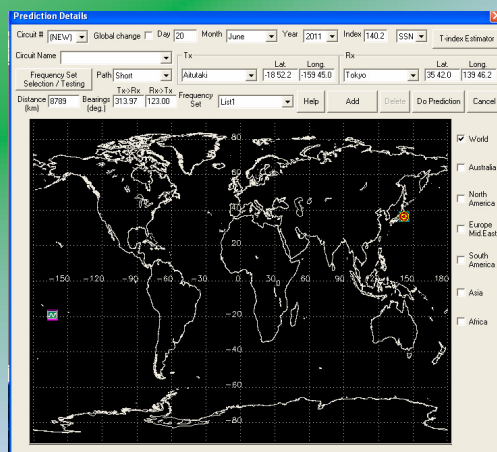
REAL TIME T INDEX FOR NEW ZEALAND REGION  
AUTO SCALED DATA IS USED TO PRODUCE THESE INDICES  
New Zealand Region T index: 103

REAL TIME T INDEX FOR ANTARCTIC REGION  
AUTO SCALED DATA IS USED TO PRODUCE THESE INDICES  
Antarctic Region T index: 114

▲ Top

# Известный алгоритм решения

3. Считать параметры радиолиний (краткосрочный и оперативный прогноз) по алгоритмам, ориентированным на использование этого входного параметра (ионосферного индекса).



# А если этого нет?

- Системе связи необходима аппаратура для зондирования.
- Необходимо программное обеспечение, позволяющее по результатам зондирования определять ионосферный индекс для «своего» региона.
- Необходима программа, «помогающая» оператору прогнозировать требуемые параметры радиолиний.

**Если это направление  
радиофизических исследований  
и радиотехники Вам интересно  
– приглашаем к сотрудничеству**