

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

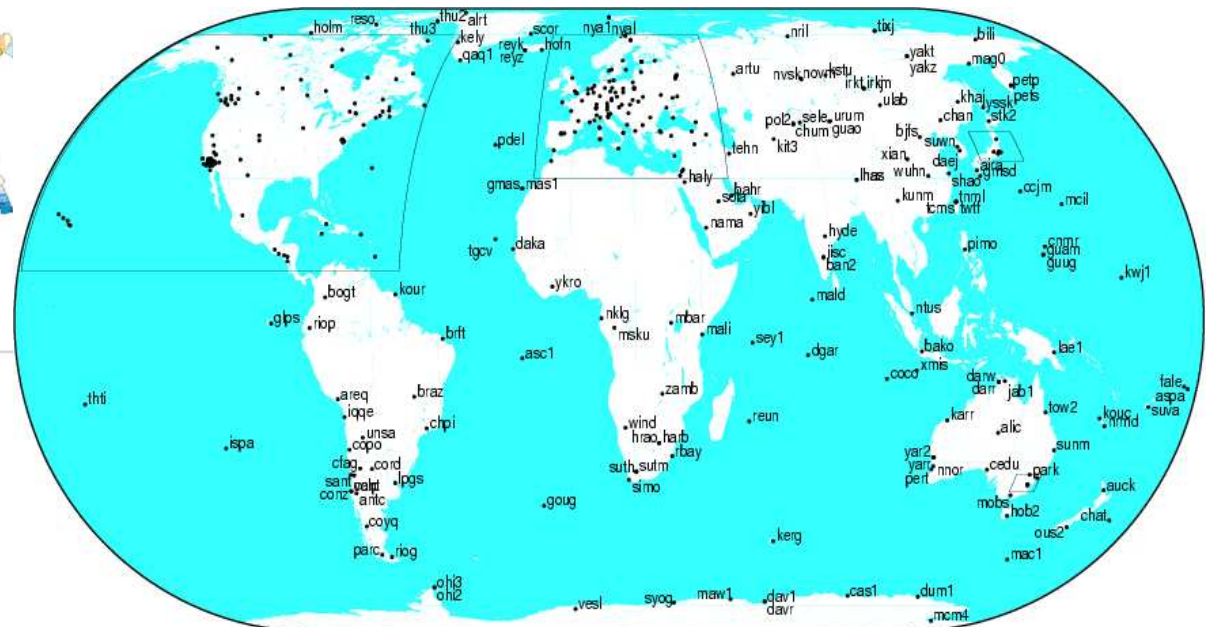
**Смирнов В.М., Смирнова Е.В.,
Скобелкин В.Н., Тынянкин С.И.**

*Институт радиотехники и электроники
им. В.А.Котельникова РАН
ЗАО «БЛИКС»*

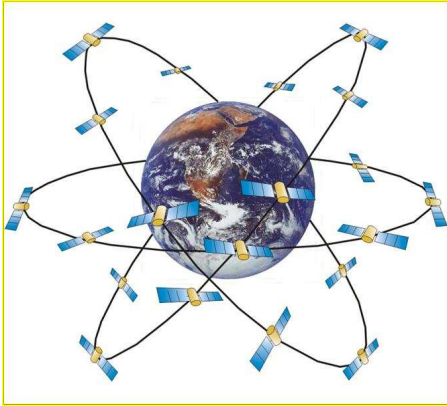
vsmirnov@ire.rssi.ru

Преимущества использования глобальных навигационных систем для мониторинга ионосферы Земли:

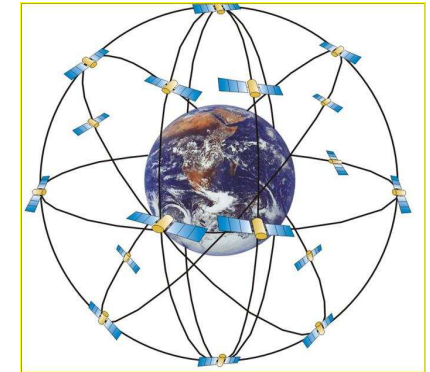
-
- Diagram illustrating the layers of the Earth's atmosphere and the orbits of various satellites:
- GPS** (Global Positioning System) satellites orbit at $H = 20000 \text{ км}$.
 - LEO** (Low Earth Orbit) satellites orbit at $H = 1336 \text{ км}$.
 - Other satellites orbit at $H_{\text{max}} = 300 \text{ км}$ and $H_{\text{min}} = 60 \text{ км}$.
 - The atmosphere layers shown are **Ионосфера** (Ionosphere) and **Плазмосфера** (Plasmosphere).
 - The Earth's surface is labeled **Земля** (Earth).
 - A yellow lightning bolt labeled **Ne** is shown within the Ionosphere.



Мониторинг ионосферы Земли на основе глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS



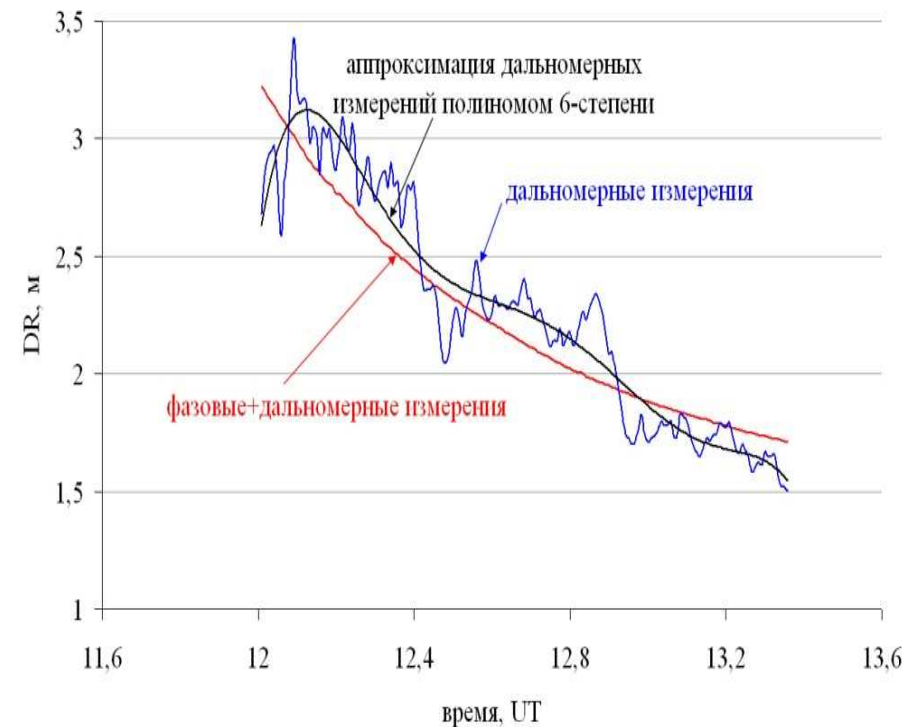
ГЛОНАСС	ХАРАКТЕРИСТИКИ	GPS
3	КОЛИЧЕСТВО ПЛОСКОСТЕЙ	6
8	КОЛИЧЕСТВО СПУТНИКОВ В ПЛОСКОСТИ	4
19100 км	ВЫСОТА ОРБИТЫ	20200 км
64,8+-0,3	НАКЛОНЕНИЕ ОРБИТЫ, ГРАД	55 (63)
11 ч 15,7 мин.	ПЕРИОД ОБРАЩЕНИЯ	11 ч 56,9 мин.
1602,56 — 1615,5 1246,44 — 1256,5	НАВИГАЦИОННЫЕ ЧАСТОТЫ, МГЦ: L1 /L2	1575,42 1227,6



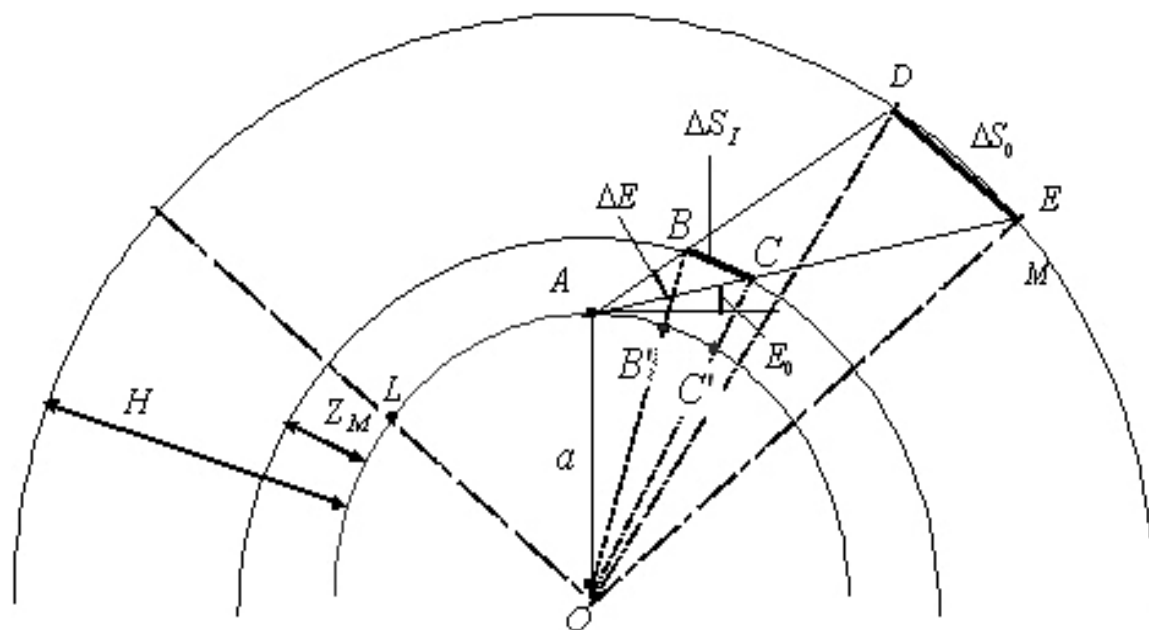
**интегральная электронная концентрация по
данным
двухчастотных измерений фазы и дальности**

$$TEC(t) = 1,81 \cdot 10^{16} \{ [\lambda_2 \hat{O}_{L_2}(t) - \lambda_1 \hat{O}_{L_1}(t)] + [\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2] + \delta R_\varphi \}$$

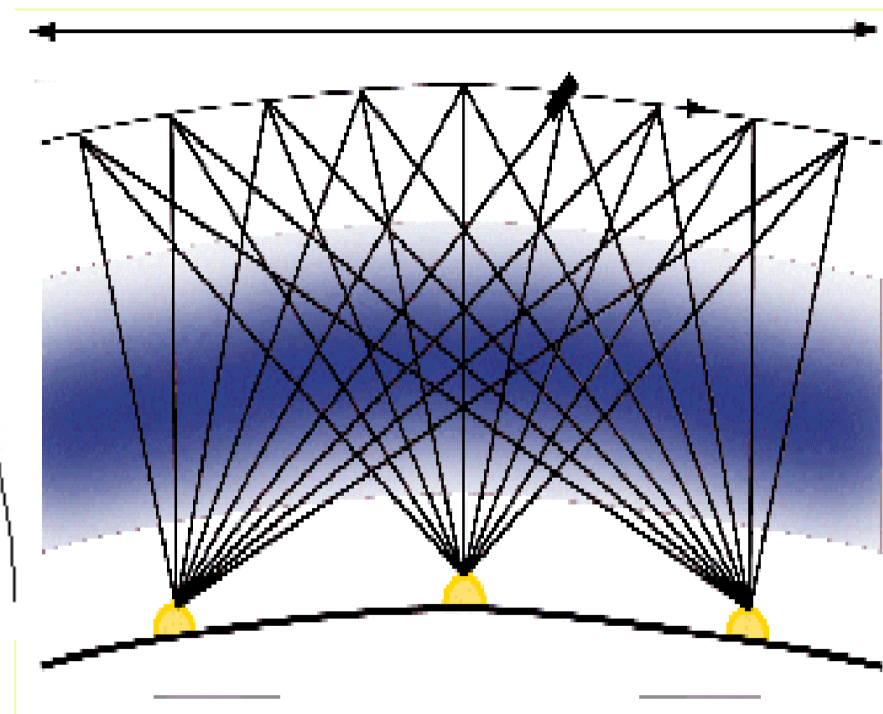
$$TEC(t) = 9,52 \cdot 10^{16} \{ [PR_{L_2}(t) - PR_{L_1}(t)] + \delta R_k \},$$



Геометрия метода радиопросвечивания



**локальная сферически слоистая
модель ионосферы**



**Таблица 1. Геометрические масштабы при радиопросвечивании ионосферы
(интервал наблюдения $T=600/30$ секунд)**

Е, град	10	30	50	70	90
ΔE , град	5,8/0,29	6,3/0,31	6,8/0,34	7,1/0,35	7,2/0,36
BC, км	282/16,8	96/5,4	53/2,9	40/2,1	38/1,9
B'C', км	268/16,1	92/5,2	51/2,7	39/2,0	36/1,8
AC', км	1096	467	237	104	0

Функциональные связи параметров зондирующих сигналов и среды их распространения

5

$$\Psi(\omega_i) = \int_{(L)} n(\omega_i, r) dl = R_p = R + \Delta R_T + \Delta R_I(\omega_i),$$

$$\Delta R(\vartheta_o) = \int_a^r \frac{n^2(r) r dr}{[n^2(r) r^2 - n_o^2 a^2 \sin^2 \vartheta]^{1/2}} - R_{\tilde{a}}(\vartheta)$$

$$n(\omega_i, r) = 1 + N_T(r) + N_I(\omega_i, r),$$

$$\Delta R_T = \int_{(L)} N_T(r) dl, \quad \Delta R_I(\omega_i, r) = \int_{(L)} N_I(\omega_i, r) dl,$$

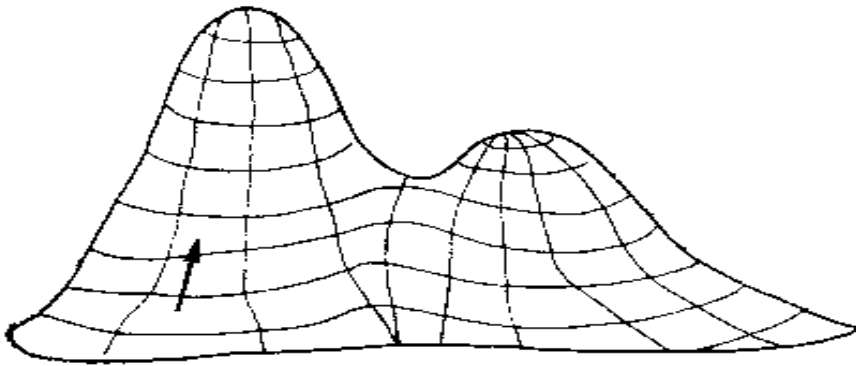
$$\int_{z_1}^{z_2} N(z) \frac{(a+z) dz}{[(a+z)^2 - a^2 \sin^2 \vartheta]^{1/2}} = 2,475 \cdot 10^{-8} \frac{f_1^2}{k} [\Delta R(f_1, f_2) - \delta],$$

полное электронное содержание (ПЭС или ТЕС) ионосферы

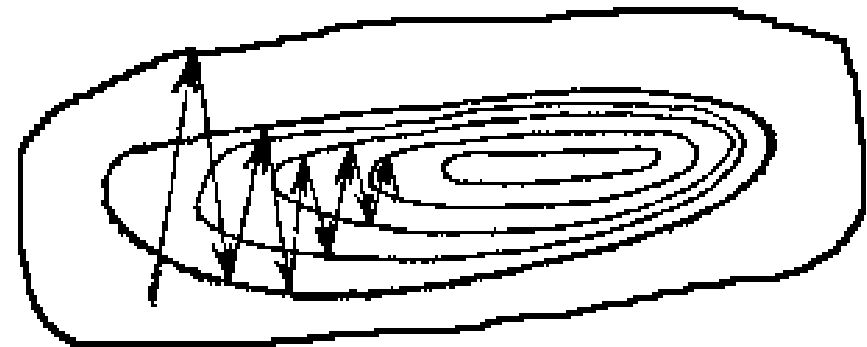
$$TEC = \int_L N(l) dl = 2,475 \cdot 10^{-8} \frac{f_1^2}{k} [\Delta R(f_1, f_2) - \delta]$$

Геометрическая интерпретация метода

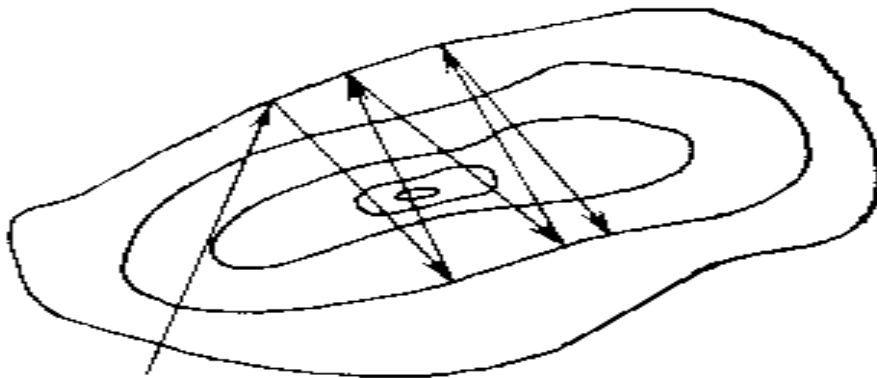
**условное представление задачи
поиска экстремума**



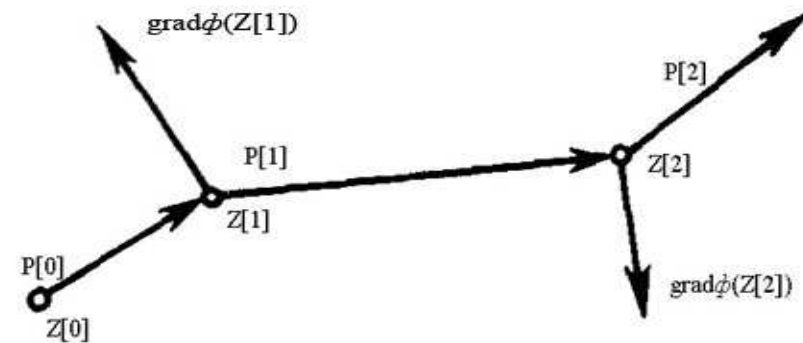
**структура метода градиентного
поиска при использовании дробления
шага**



**структура метода градиентного
поиска с постоянным шагом
приращения**



**структура метода сопряженных
градиентов**



$\Phi(\varphi_\delta) \leq \delta^2$ - условие минимизации функционала

конечномерная аппроксимация $\Phi(\varphi) = \|A\varphi - U_\delta\|^2 \longrightarrow \phi(z)$

квадратичная функция $\phi(z) = \langle z, Bz \rangle + \langle C, z \rangle + D$

элементы минимизирующей последовательности $\varphi_{i+1} = \varphi_i - \alpha_i p_i$

$p_i = -\text{grad } \phi(z_i) + \beta_i p_{i-1}$ - направление градиента функции

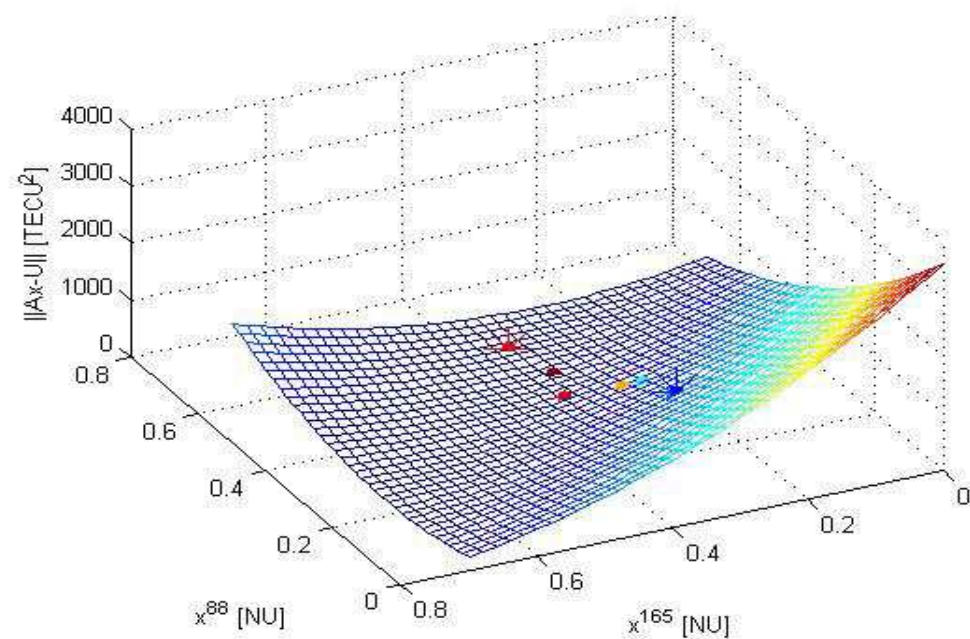
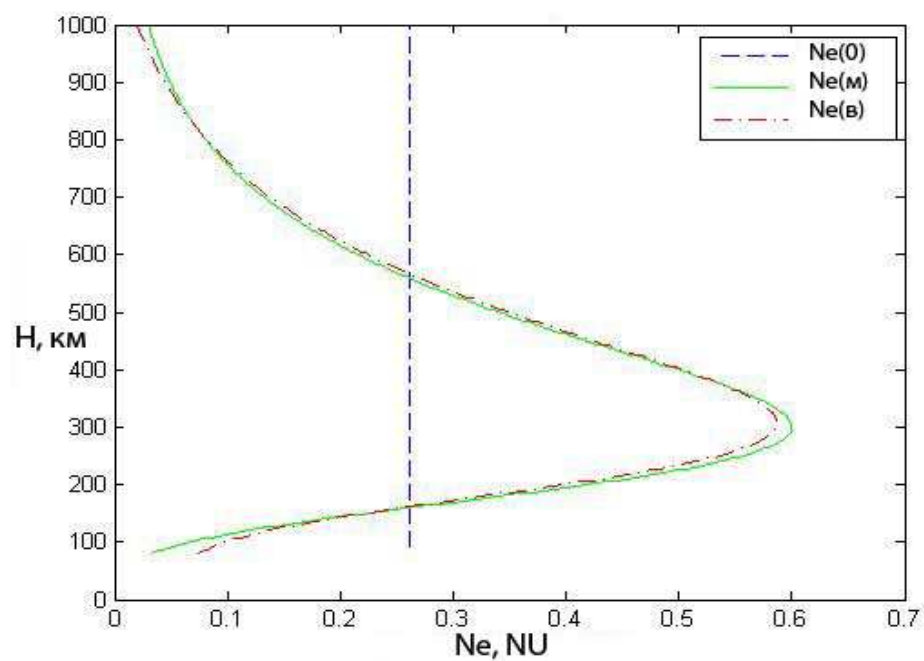
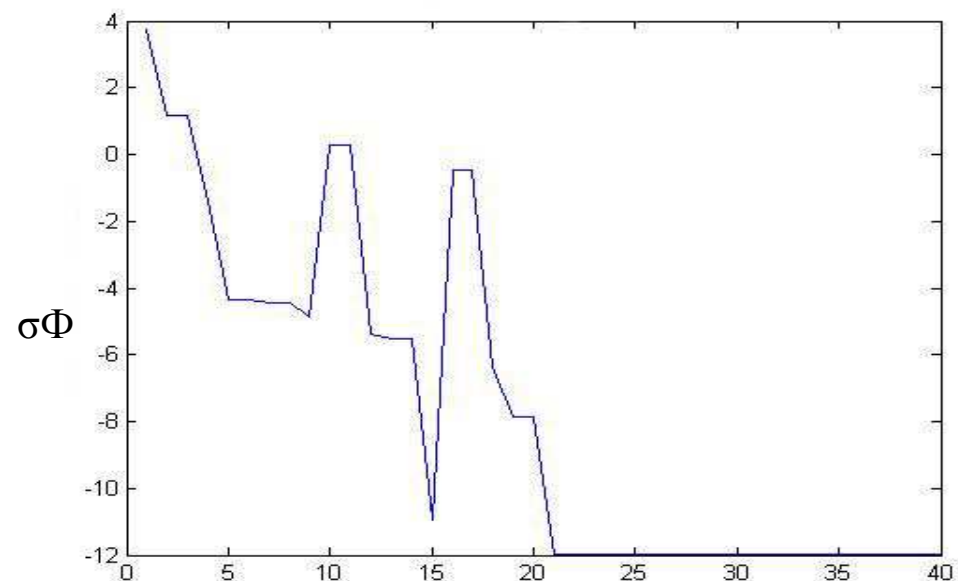
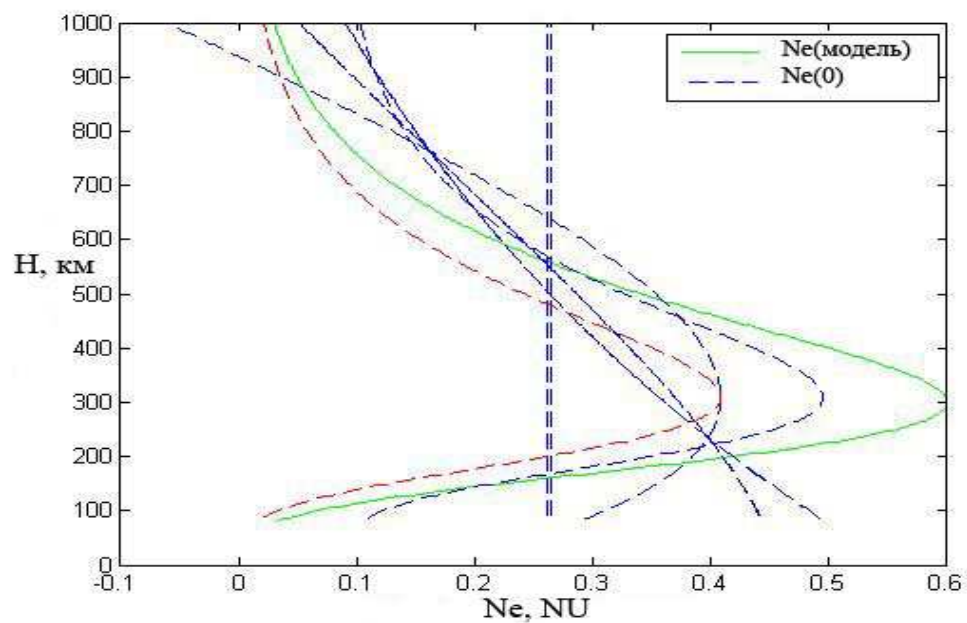
$$p_o = -\text{grad } \phi(z_o) \quad \beta_i = \frac{\|\text{grad } \phi(z_i)\|^2}{\|\text{grad } \phi(z_{i-1})\|^2}$$

$$\alpha_i = \frac{1}{2} \frac{\langle \text{grad } \phi(z_i), p_i \rangle}{\langle B_i p_i, p_i \rangle} \quad - \quad \text{величина оптимального шага вдоль направления градиента}$$

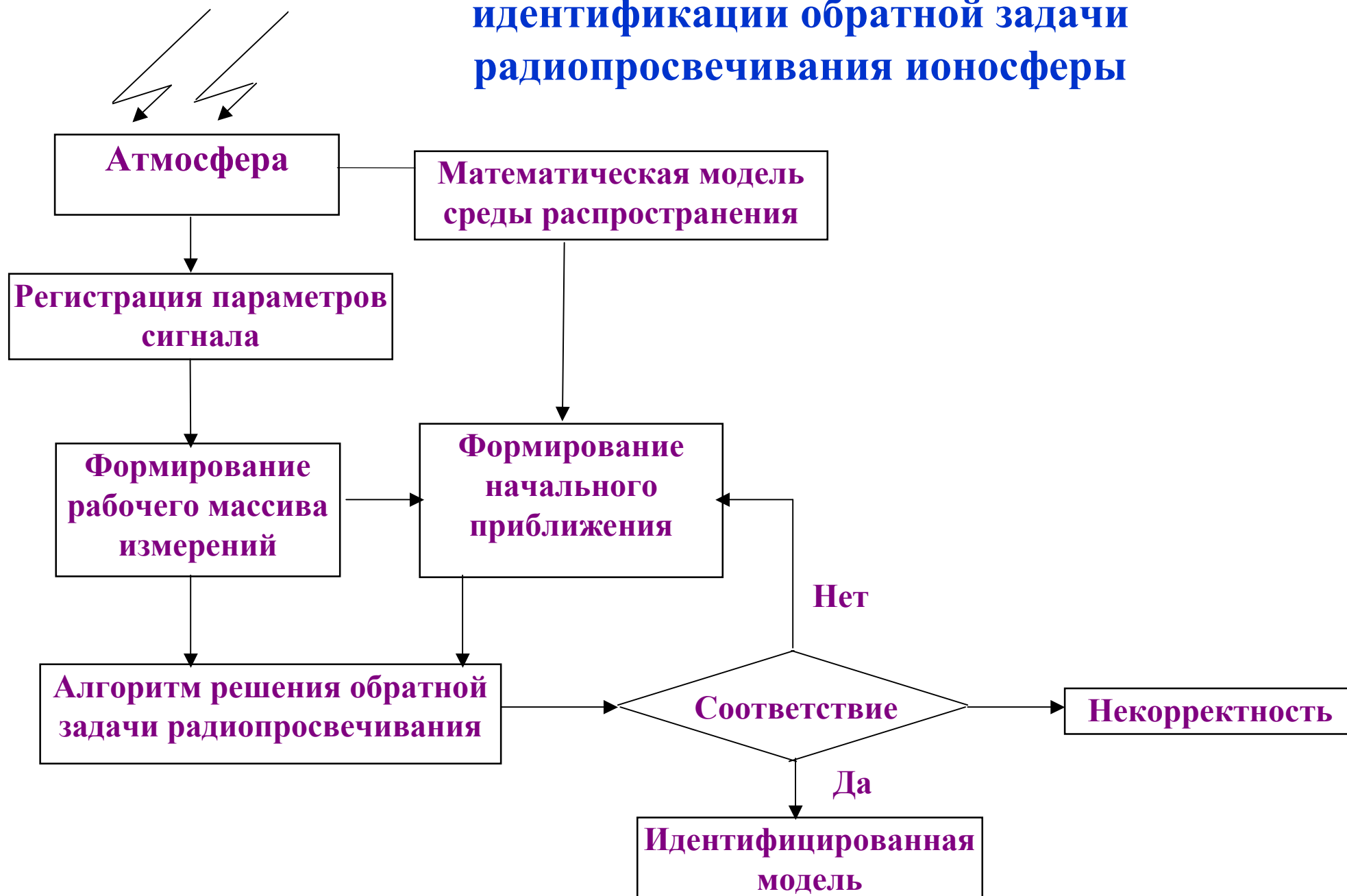
Z_o - нулевое приближение решения задачи

Результаты работы метода сопряженных градиентов

8

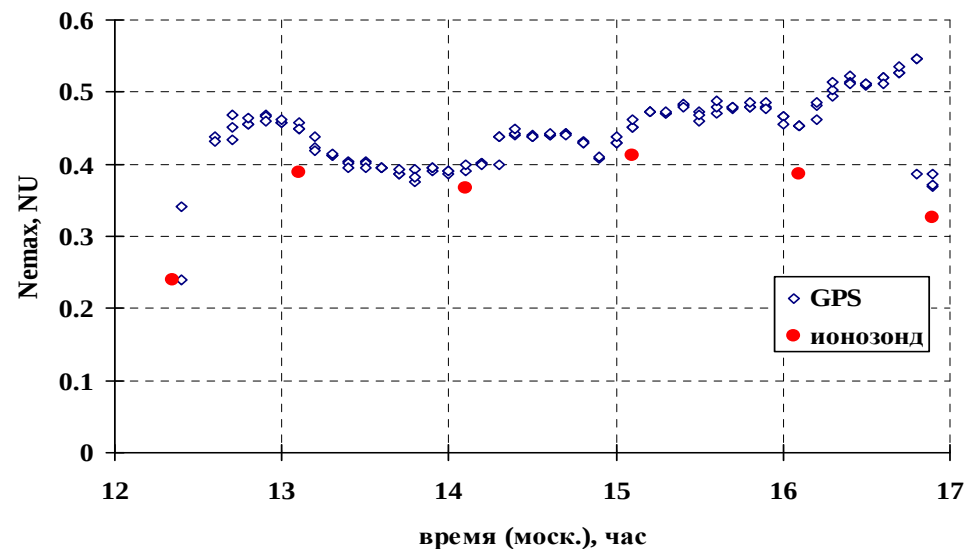
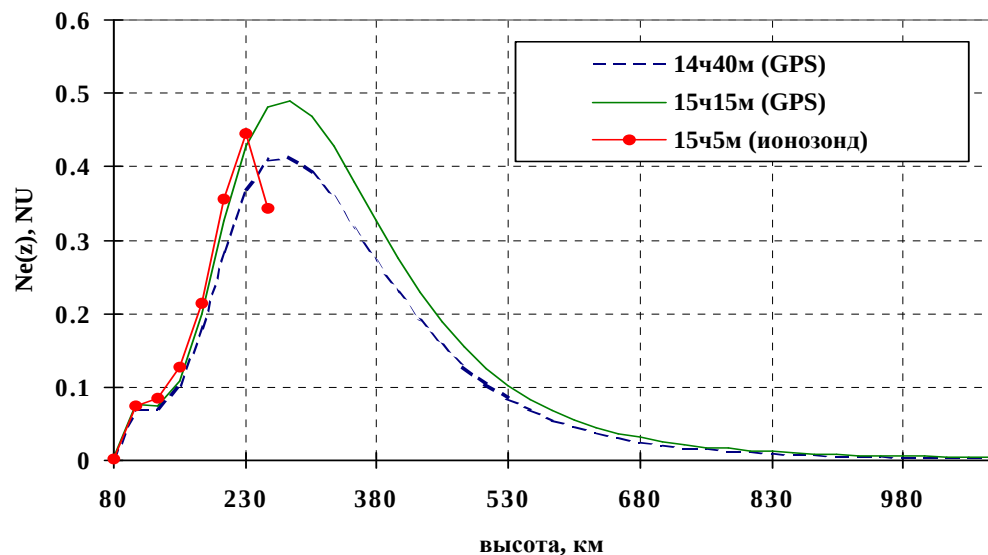


Блок-схема структурной и параметрической идентификации обратной задачи радиопросвечивания ионосферы

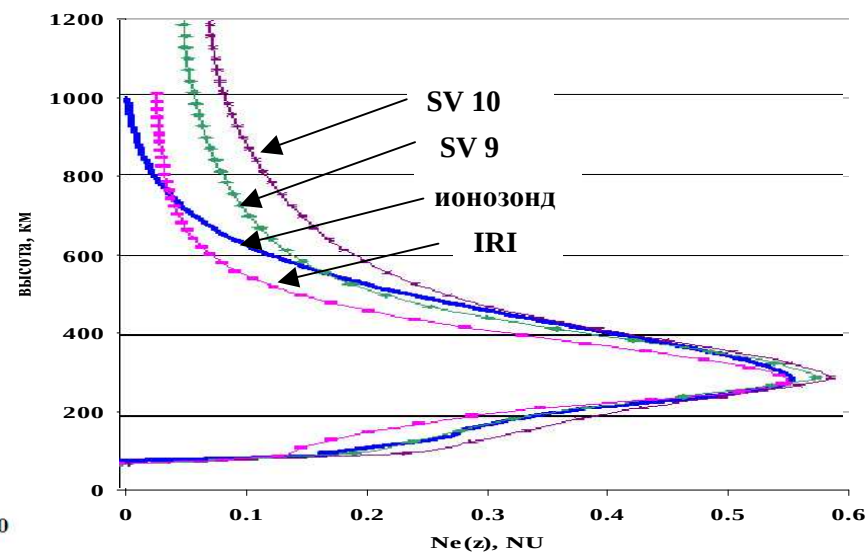
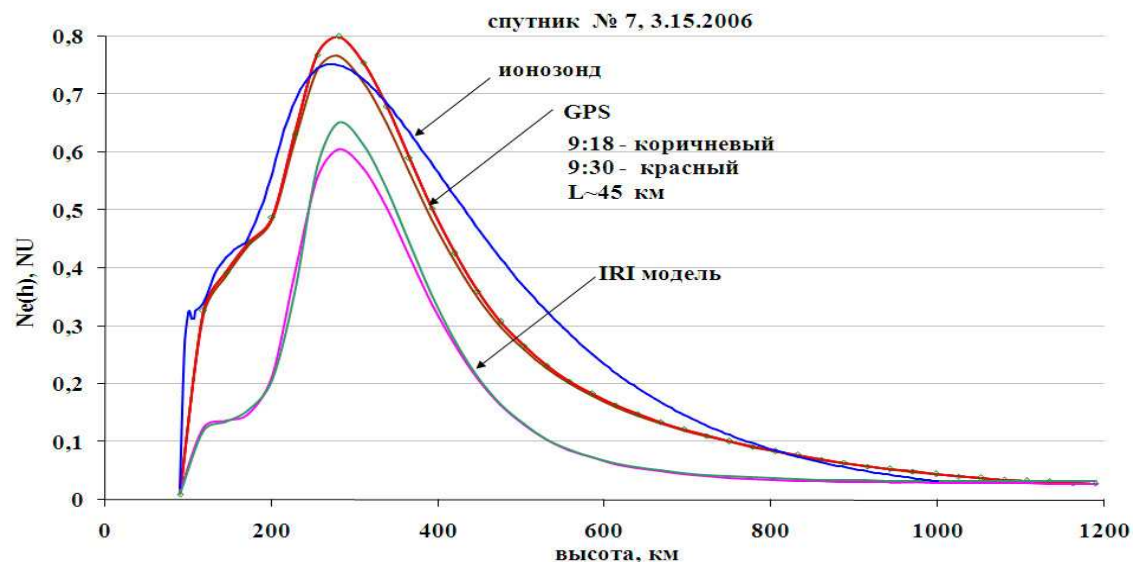


Сравнение результатов восстановления по наблюдениям спутника GPS с данными ионозонда (ИЗМИРАН)

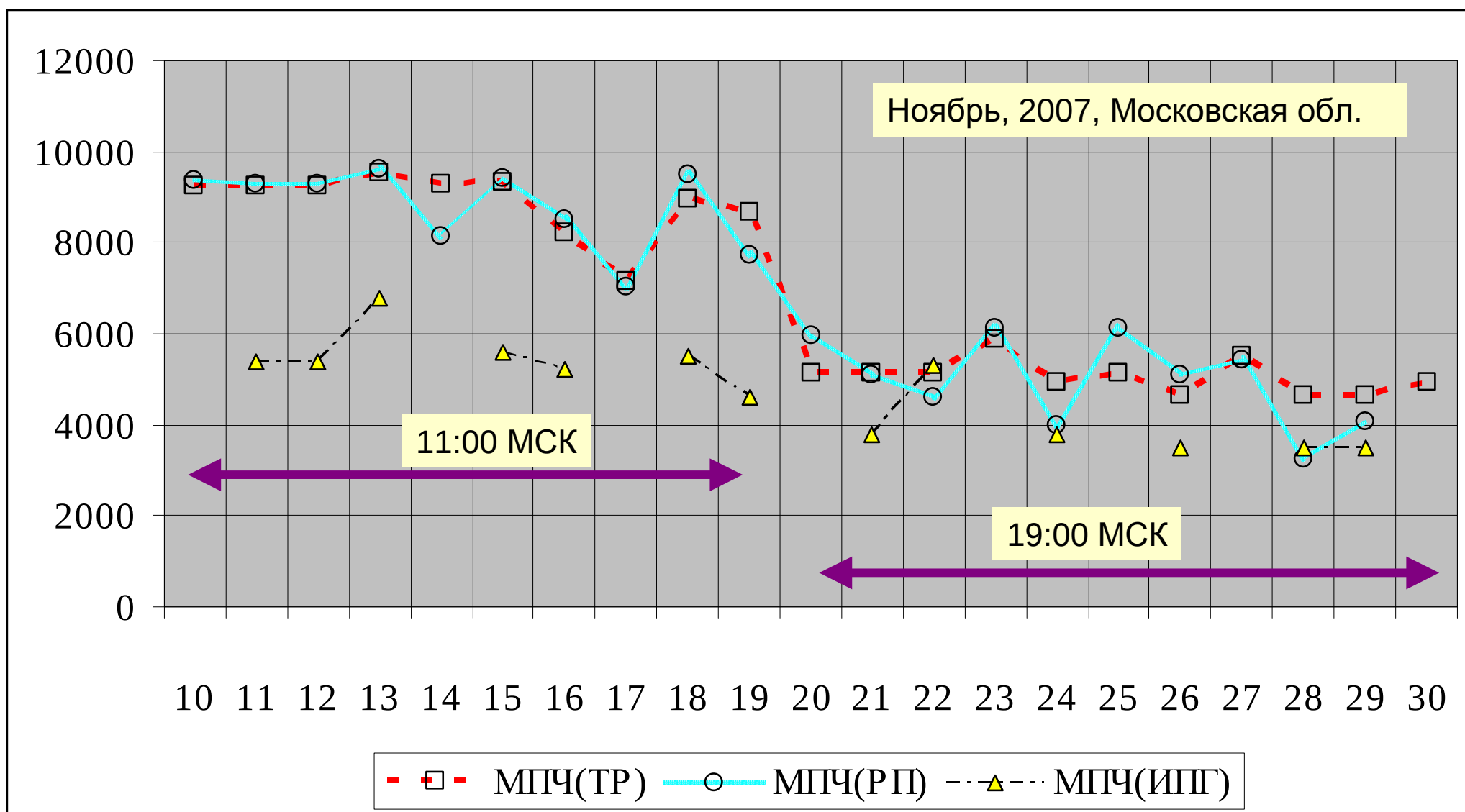
10



Сравнение результатов восстановления по наблюдениям спутников GPS с данными ионозонда (Grahamstown, ЮАР)



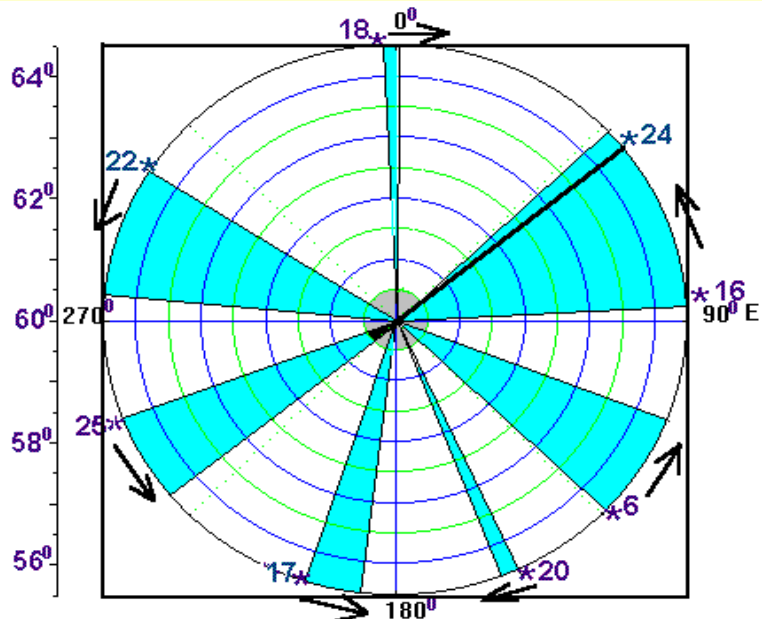
Применение метода радиопросвечивания для прогноза МПЧ в интересах КВ-связи



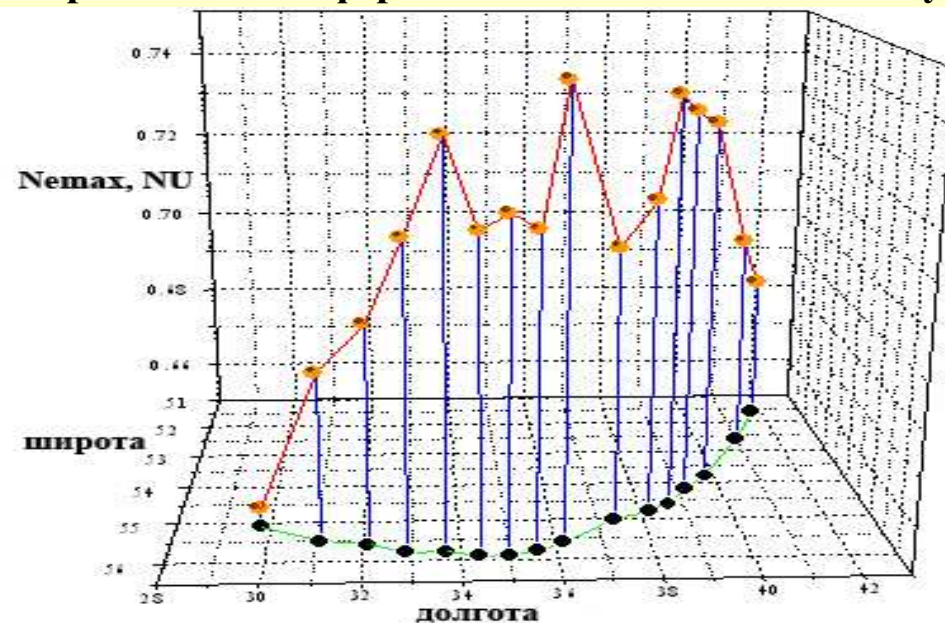
Реконструкция пространственно-временной структуры ионосферы

12

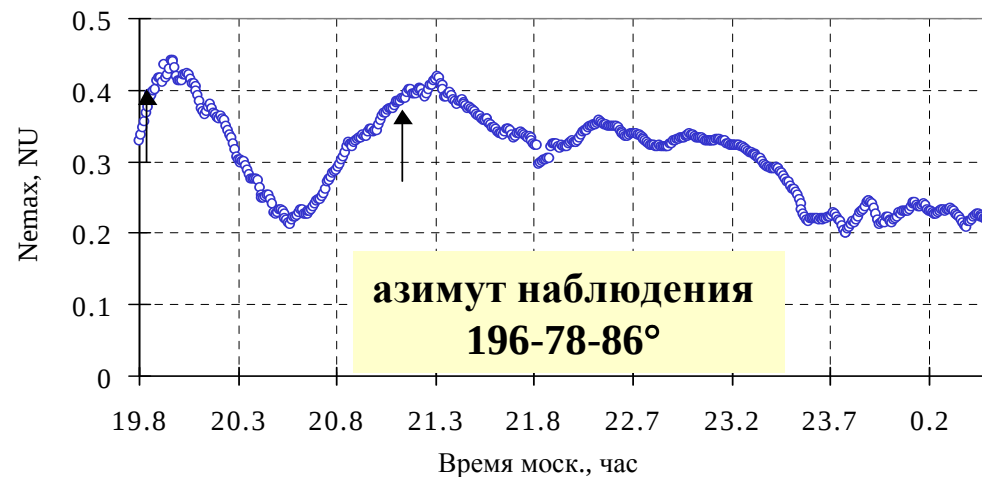
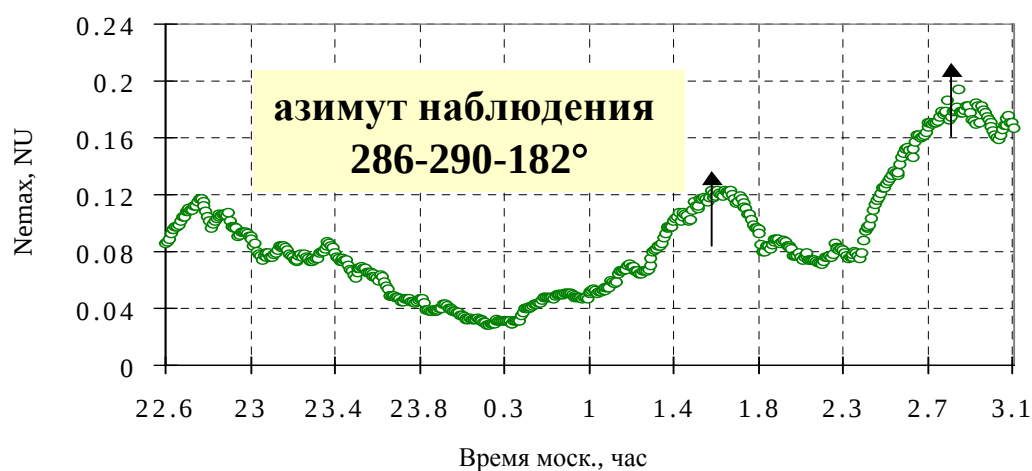
Зоны видимости КА при проведении измерений с одного пункта наблюдения



Значение максимума электронной концентрации и траектория подионосферной точки для одного из спутников



Вариации максимума электронной концентрации ионосферы, полученные по наблюдениям двух спутников для пересекающихся азимутальных направлений

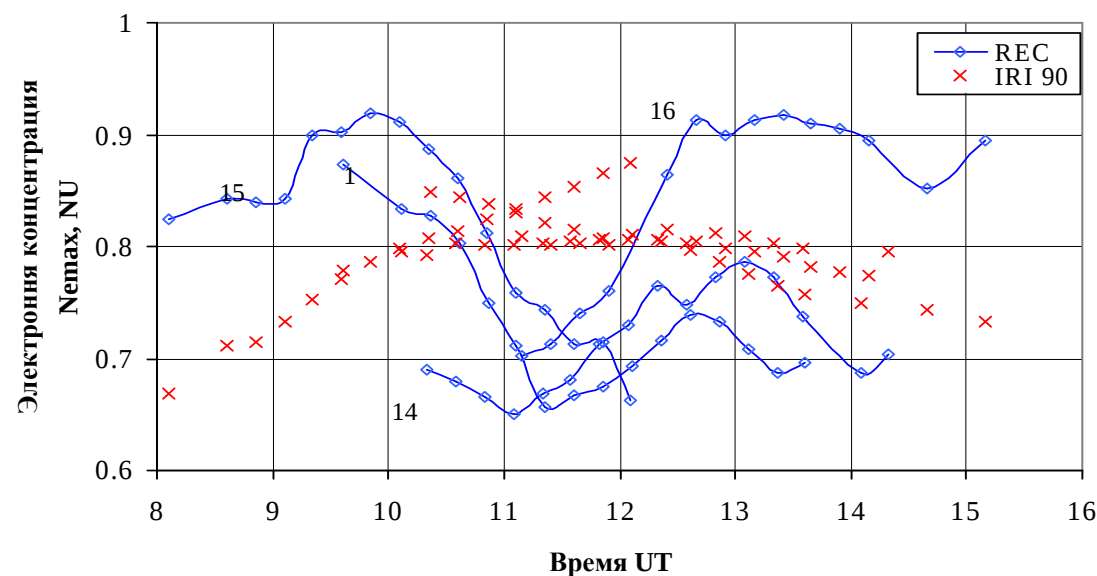
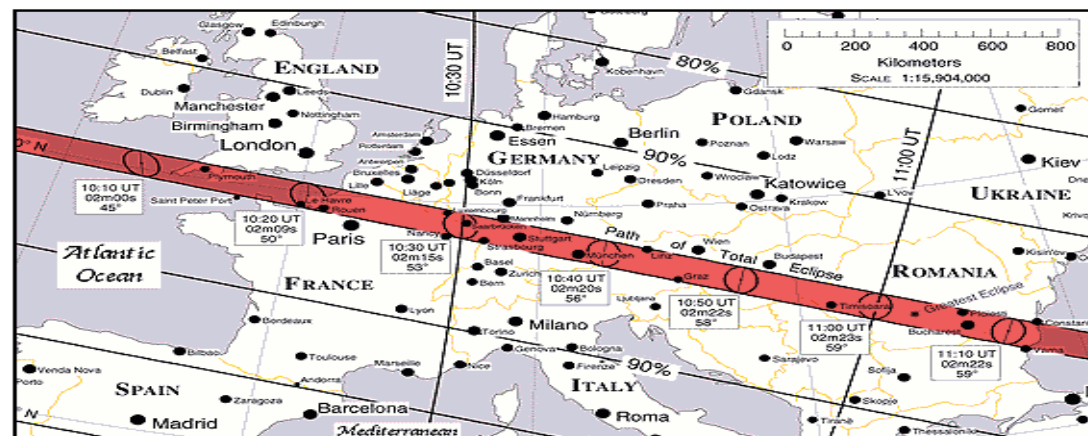
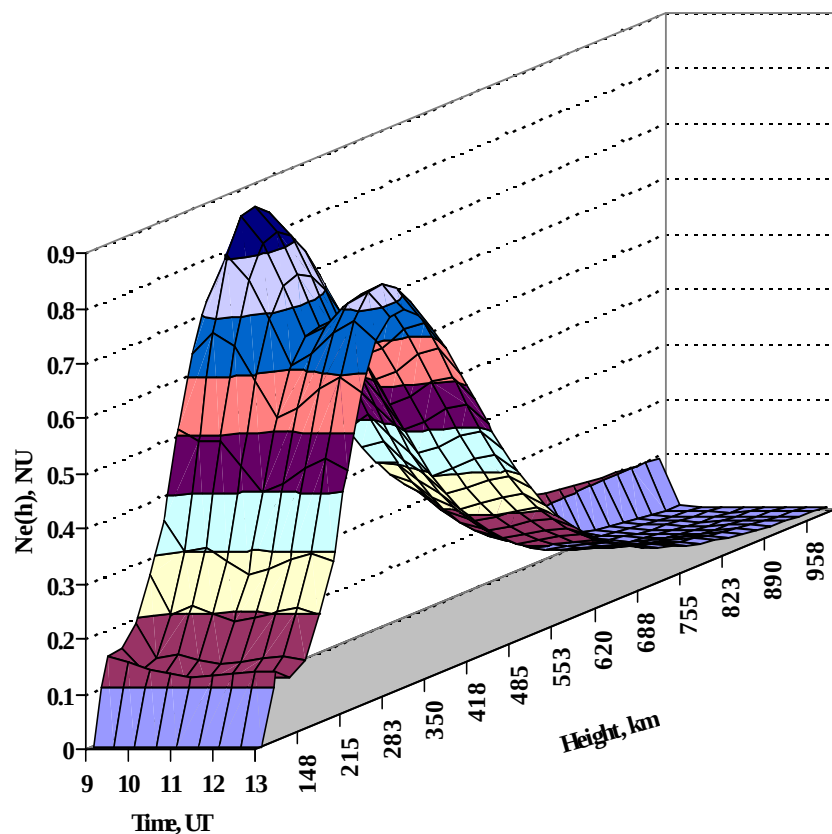


Метод радиопросвечивания ионосферы как средство контроля состояния ионосферы Земли в период возникновения гелиофизических явлений

13

Мониторинг ионосферной изменчивости методом радиопросвечивания в период
гелиофизических возмущений и импульсных воздействий

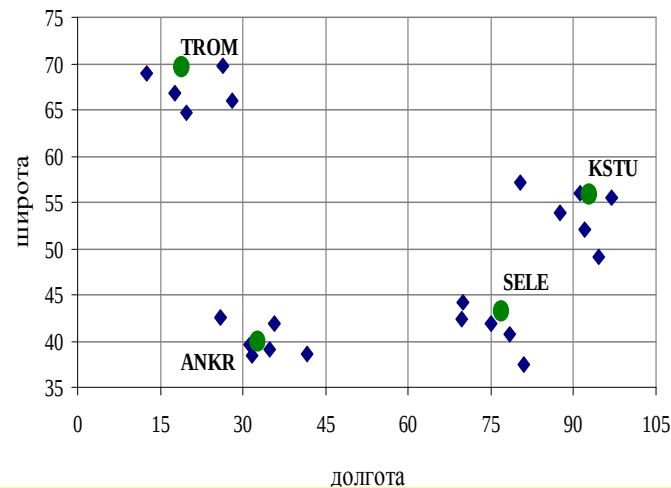
Ионосферные эффекты в период
солнечного затмения



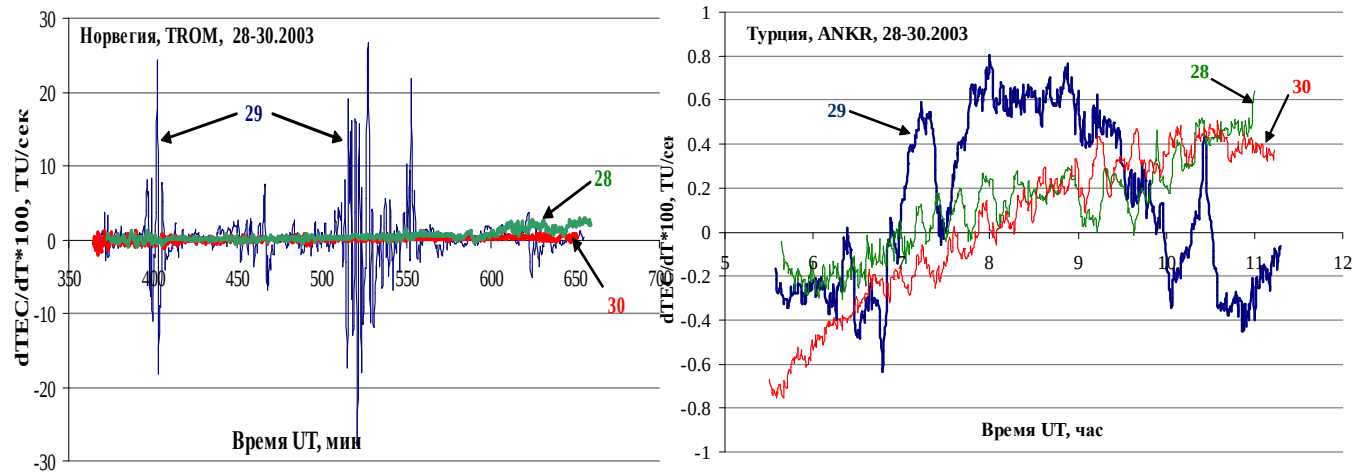
Реакция ионосферы на воздействие мощной солнечной вспышки по данным спутников системы GPS

14

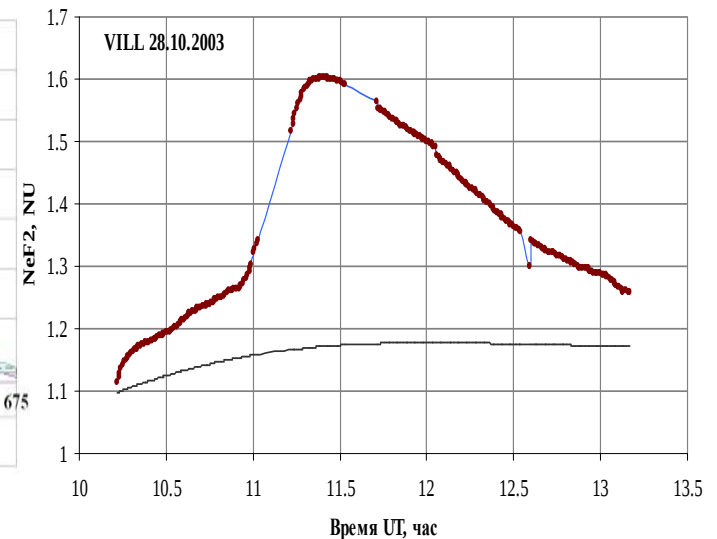
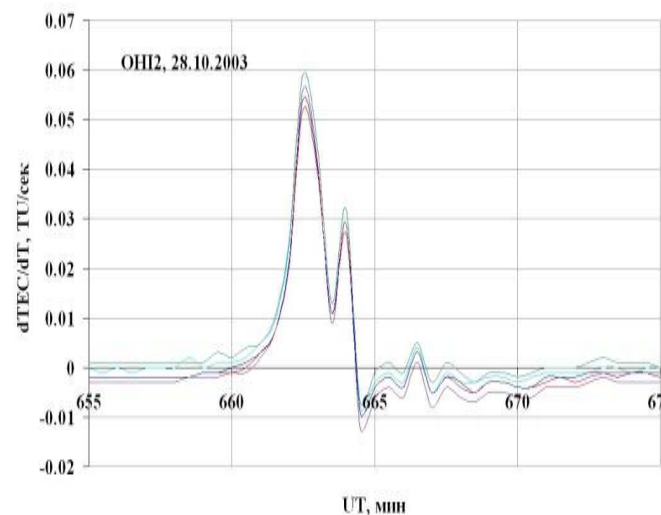
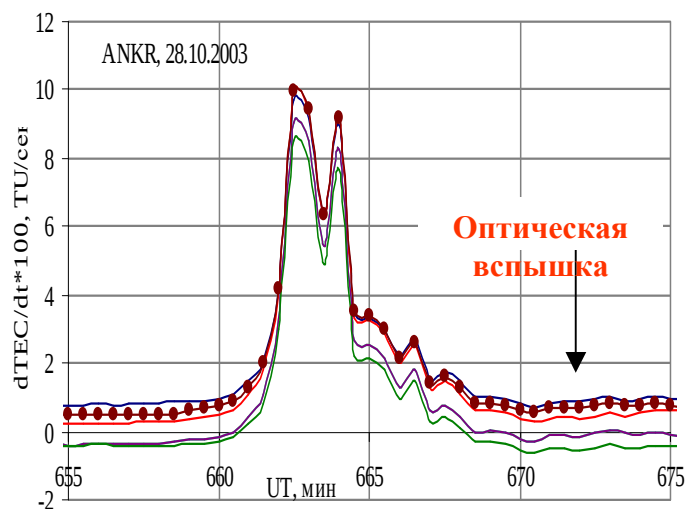
Геометрия расположения станций наблюдения



Скорость изменения полного электронного содержания в период 28-30 октября для полярной (TROM) и среднеширотной (ANKR) ионосферы



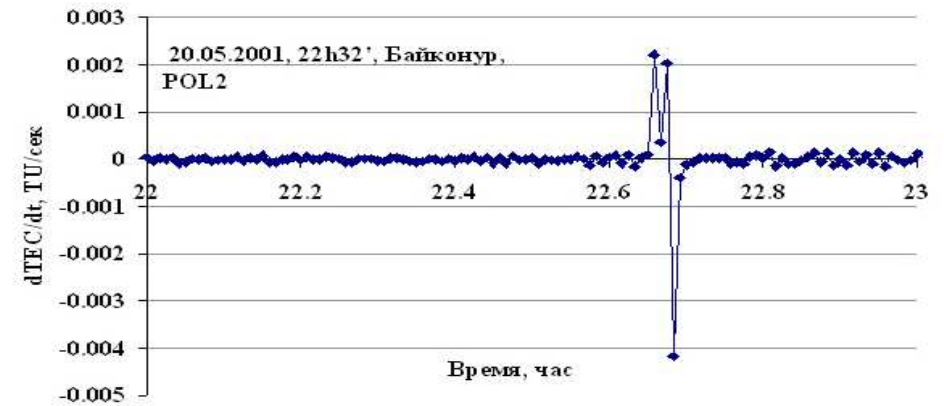
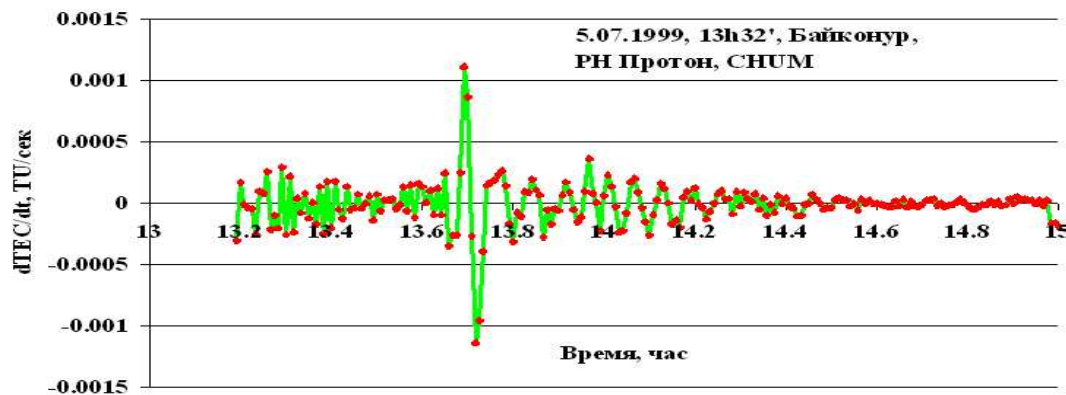
Реакция ионосферы на прямой геомагнитный эффект солнечной вспышки в зависимости от географического расположения станций наблюдений



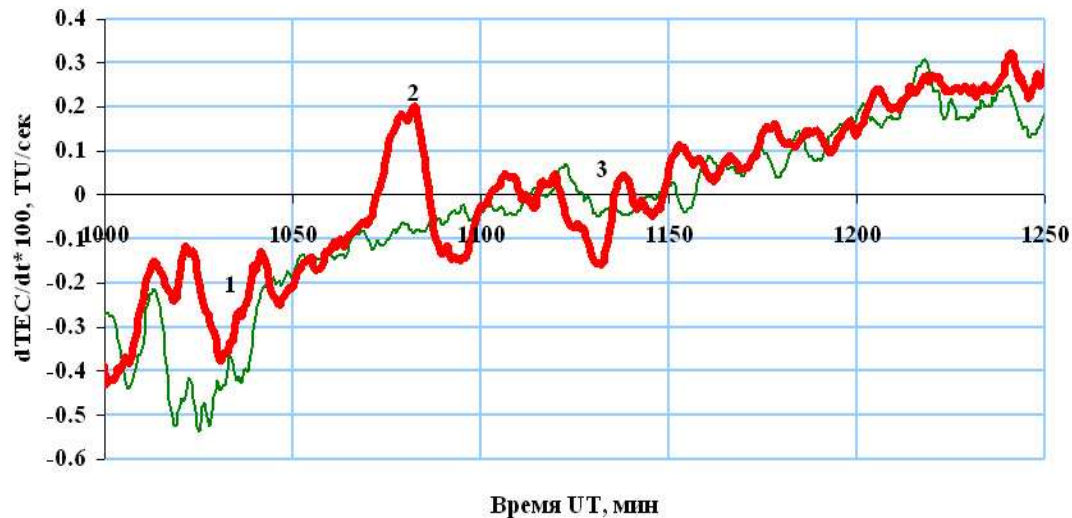
Мониторинг ионосферной изменчивости при импульсных воздействиях

15

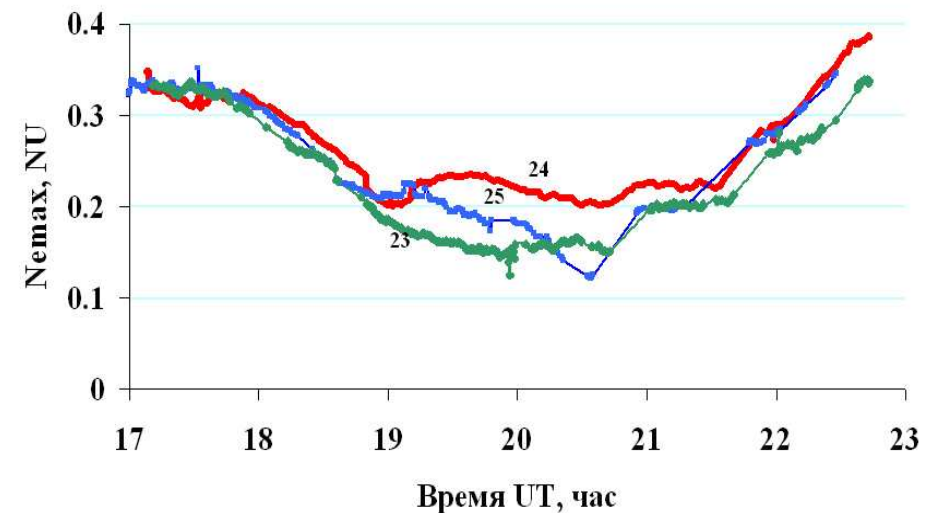
Ионосферный отклик на запуск ракет с космодрома Байконур и взрыв метеорита в атмосфере



Скорость изменения полного электронного содержания

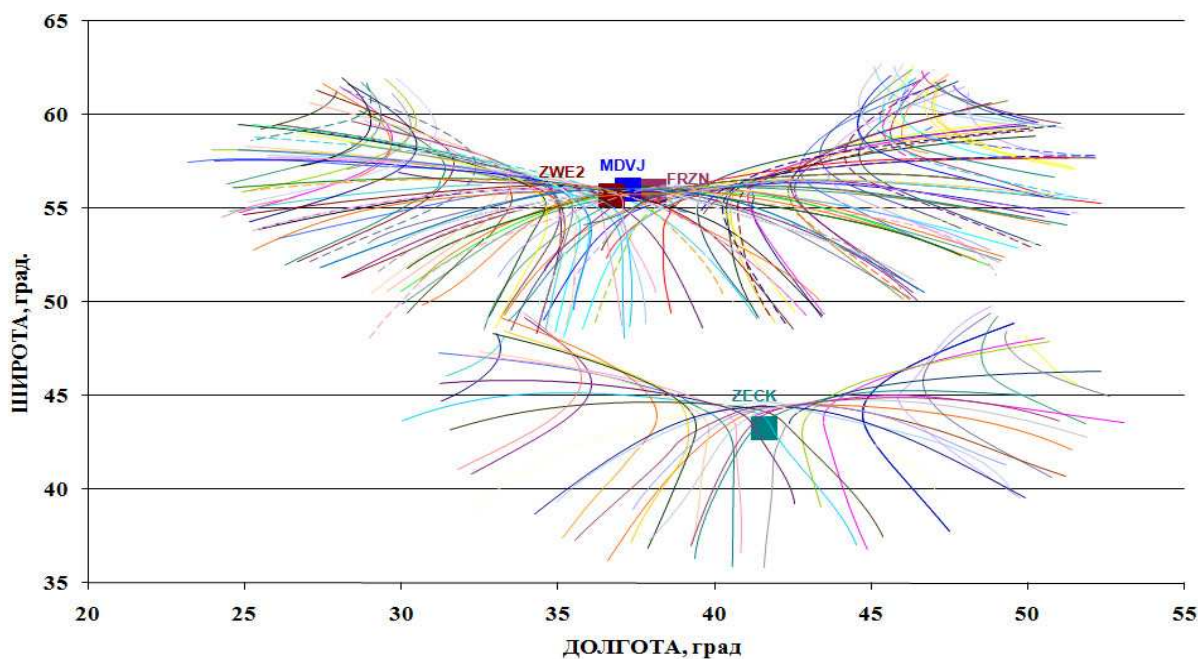
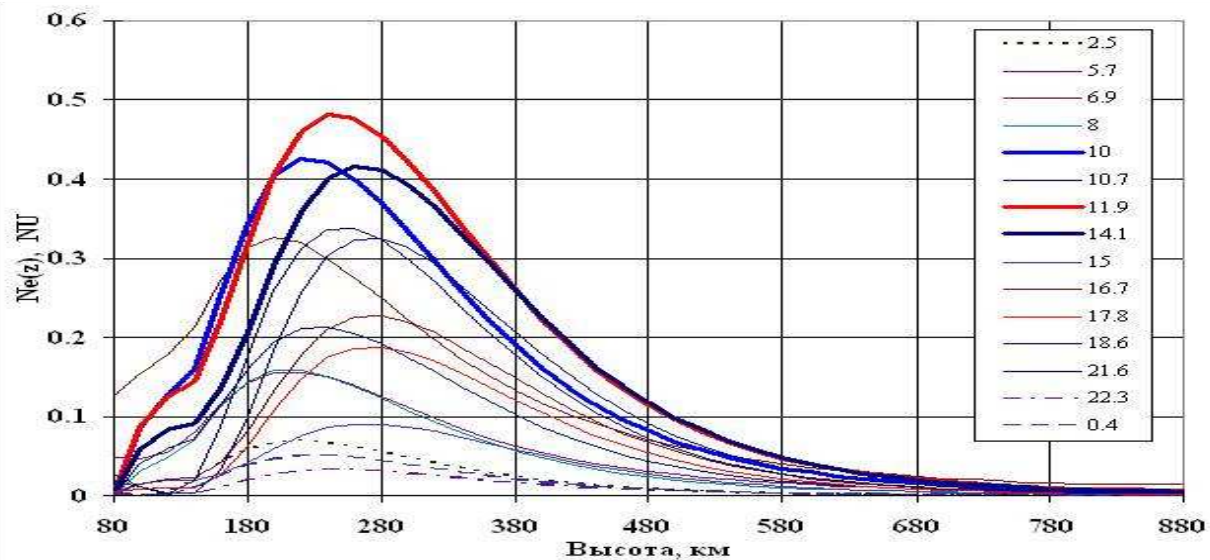


Изменение максимума электронной концентрации

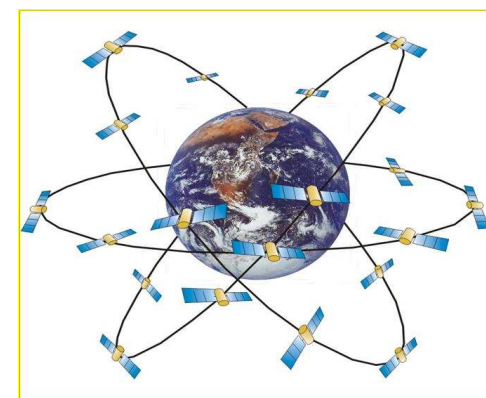
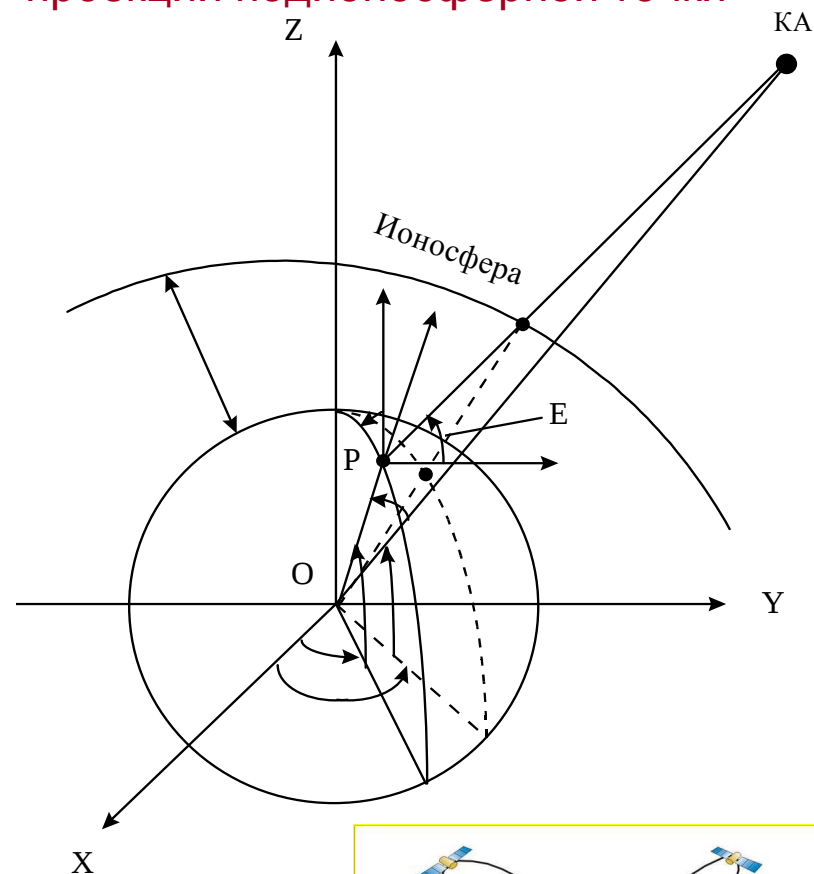


Реконструкция пространственно-временной структуры ионосферы 16

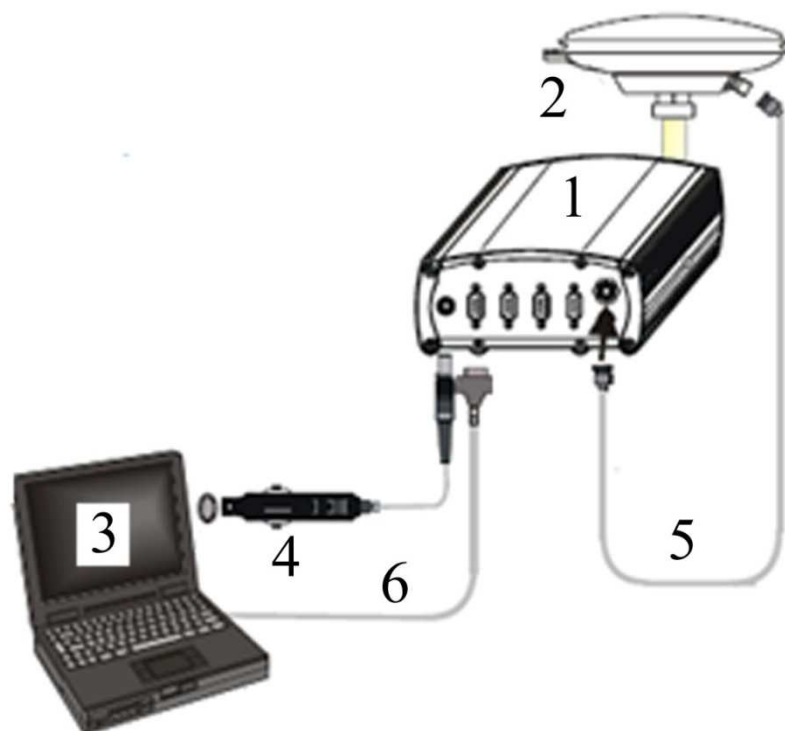
Профили электронной концентрации, полученные в течение суток по наблюдениям с одного пункта



Определение географических координат проекции подионосферной точки

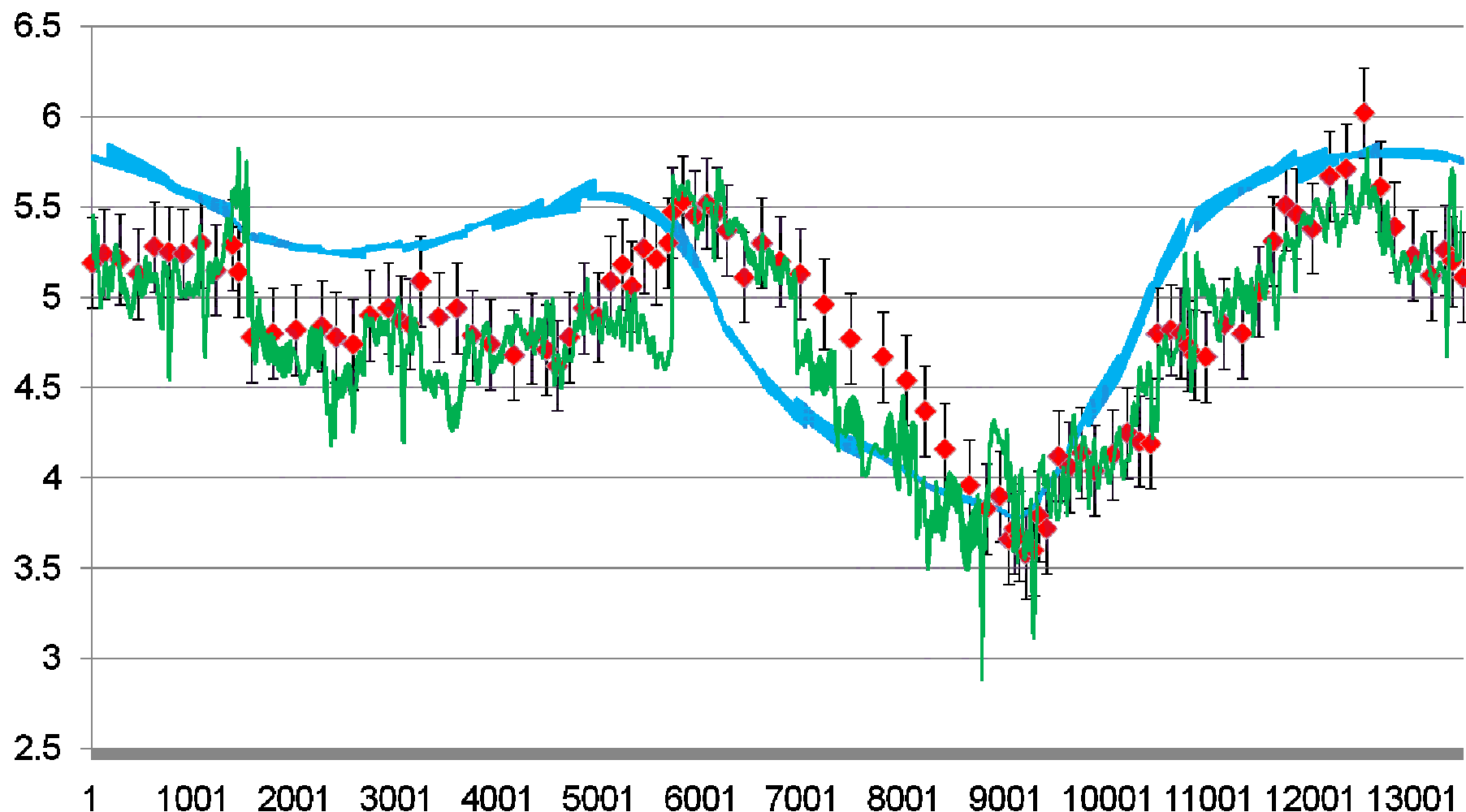


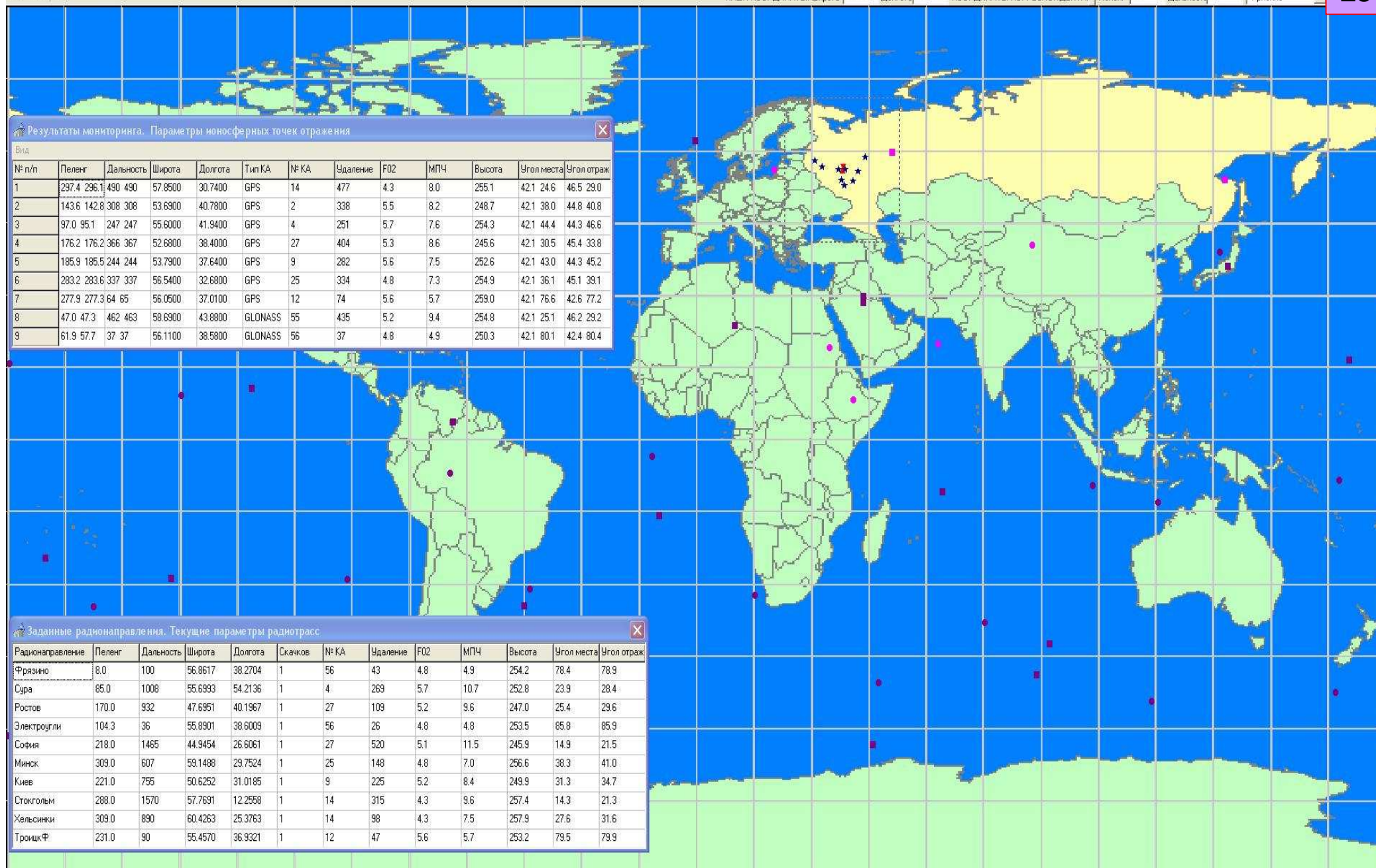
Стенд ионосферного обеспечения



1 – навигационный приемник, 2 – антенна, 3-компьютер, 4-адаптер питания, 5-антенный кабель, 6-интерфейсный кабель

Сравнение результатов работы ионозонда вертикального зондирования с данными радиопросвечивания и моделью IRI





СПАСИБО!