



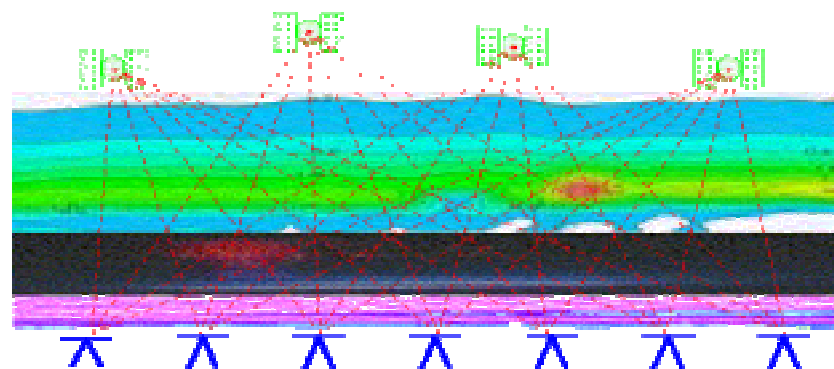
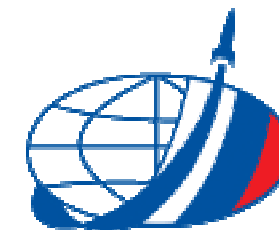
**Построение комбинированной
системы мониторинга ПЭС
ионосферы
над территорией России
по данным радиопросвечивания
сигналами навигационных систем
и аналитической модели NeQuick**

А. В. Новиков, А. А. Романов, А. А. Романов

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ**

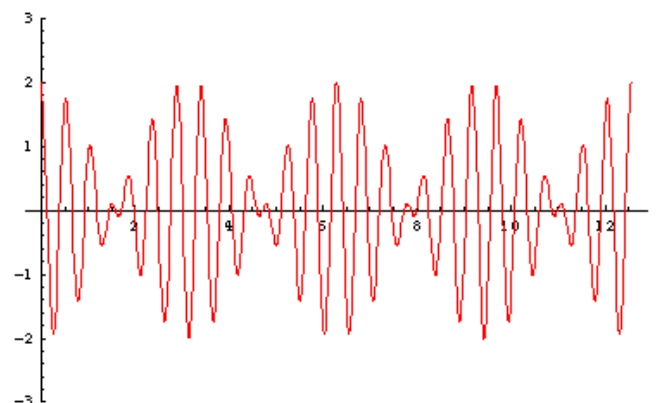
**«РОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ»**

**МОСКОВСКИЙ
ФИЗИКО – ТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ**



Ионосфера

Тропосфера



$$n_{\text{ion}} = 1 - \frac{C_X}{2} N_e \nu^{-2}$$

$$C_X = \frac{e^2}{4\pi^2 \epsilon_0 m_e} \approx 40.3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$$

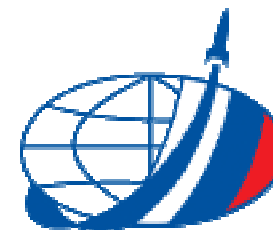
Постановка задачи

- Ионосфера
- Определение ПЭС
- Связь ПЭС и коэффициента преломления
- Мониторинг ПЭС
- ГНСС
- Структура сигнала
- Код и фаза
- Принцип просвечивания
- Сглаживание кодовых измерений фазовыми
- Томографии

Адаптивная модель ионосферы

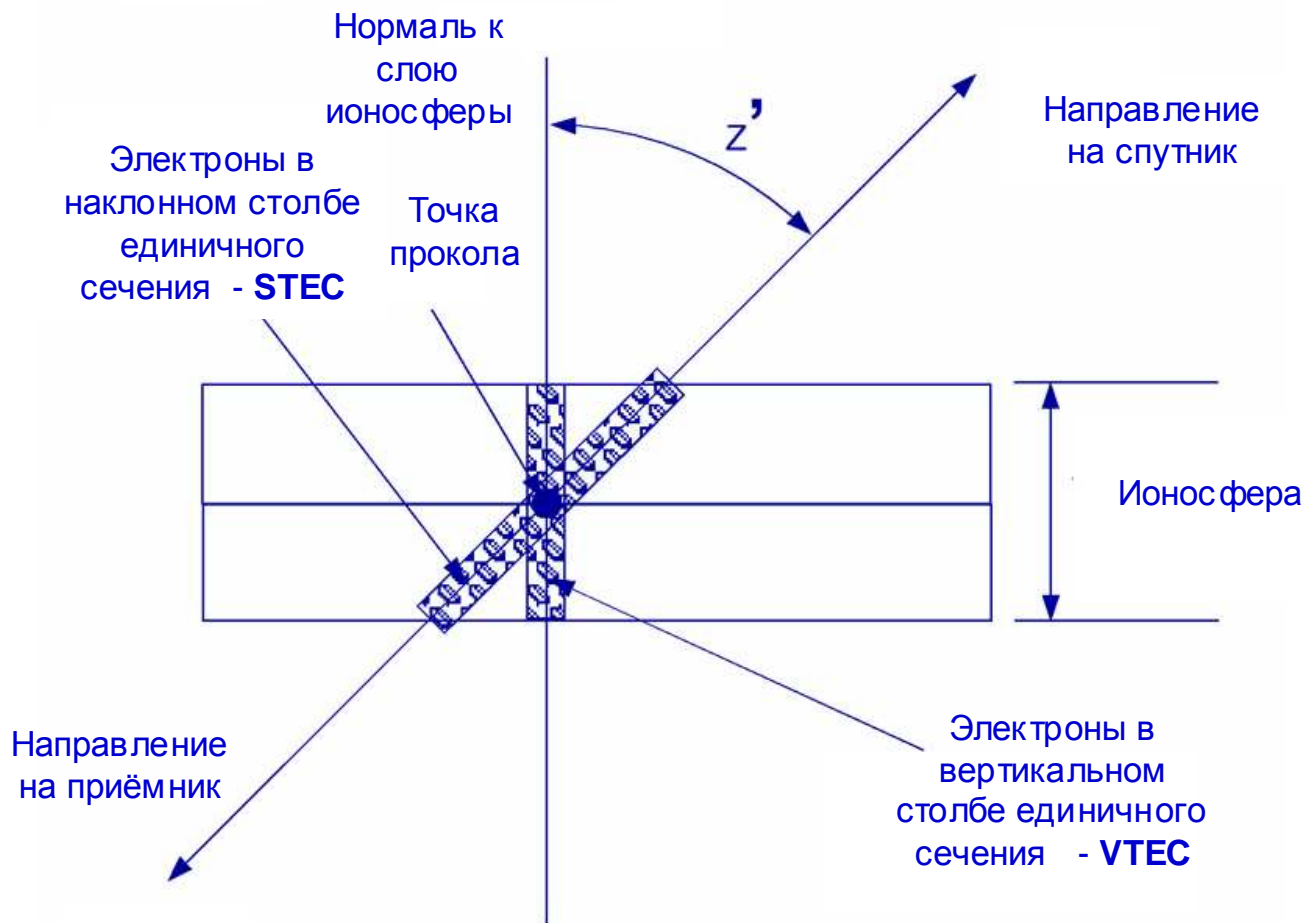
Некоторые результаты

Выводы



$$TEC = \int N_e(\rho) d\rho$$

$$TECU = 10^{16} \text{ м}^{-3}$$



Постановка задачи

Ионосфера

Определение ПЭС

Связь ПЭС и

коэффициента

преломления

Мониторинг ПЭС

ГНСС

Структура сигнала

Код и фаза

Принцип

просвечивания

Сглаживание кодовых

измерений

фазовыми

Томографии

Адаптивная

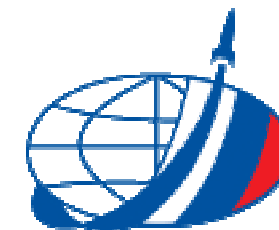
модель

ионосферы

Некоторые

результаты

Выводы



$$\rho' = \int n(\rho) d\rho$$

$$\rho' = \rho + \Delta\rho_{\text{trop}} + \Delta\rho_{\text{ion}}$$

$$\Delta\rho_{\text{trop}} = \int (n_{\text{trop}}(\rho) - 1) d\rho$$

$$\Delta\rho_{\text{ion}} = \mp \frac{C_X}{2} E \nu^{-2}$$

$$n_{\text{trop}} = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{P_w}{T^2}$$

$$E = \int N_e(\rho) d\rho$$

Постановка задачи

Ионосфера

Определение ПЭС

Связь ПЭС и коэффициента преломления

Мониторинг ПЭС

ГНСС

Структура сигнала

Код и фаза

Принцип просвечивания

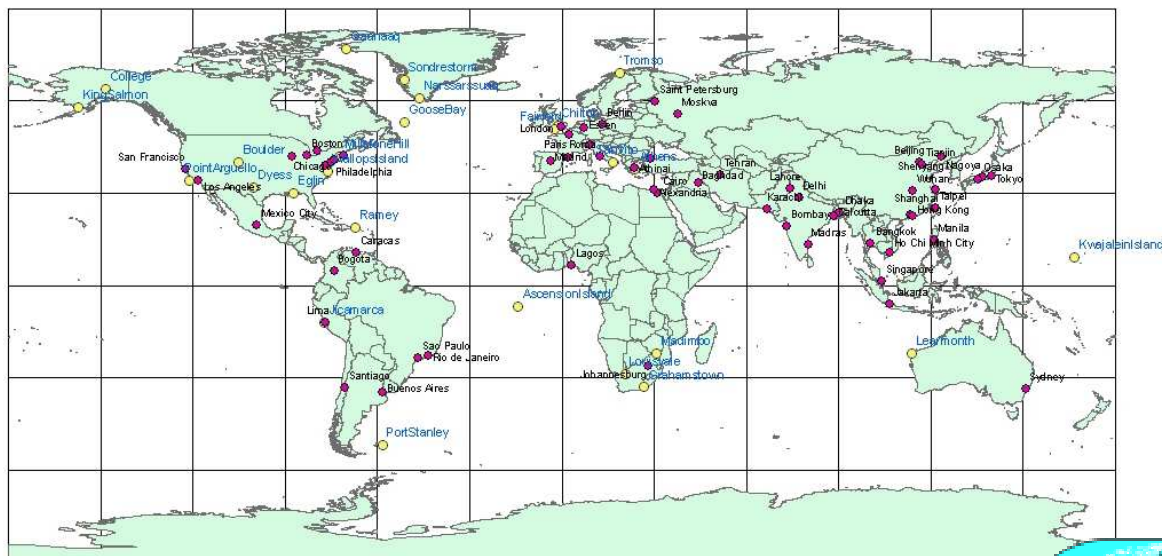
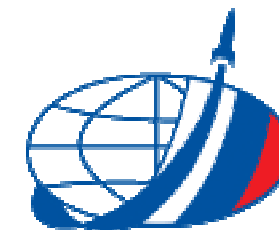
Сглаживание кодовых измерений фазовыми

Томографии

Адаптивная модель ионосферы

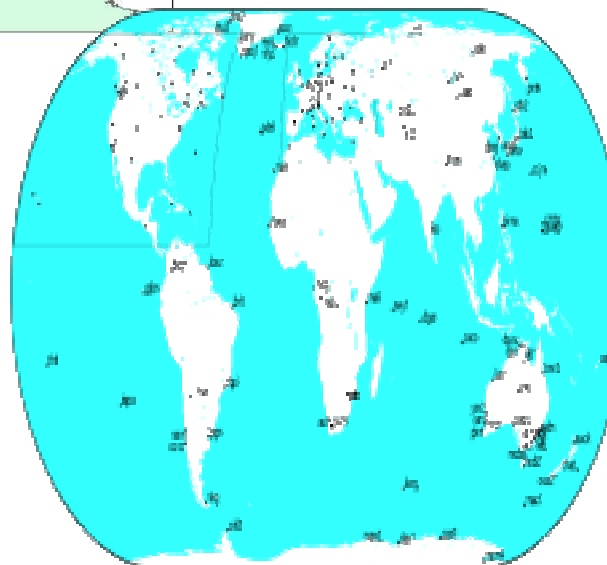
Некоторые результаты

Выводы



● Ионозонды
 ■ Крупные населённые пункты

Международная сеть IGS



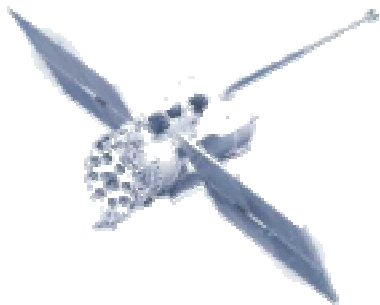
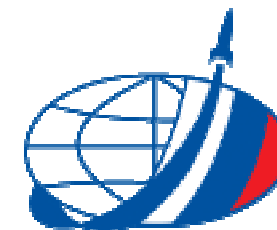
Постановка задачи
 Ионосфера
 Определение ПЭС
 Связь ПЭС и коэффициента преломления
 Мониторинг ПЭС
 ГИСС
 Структура сигнала
 Код и фаза
 Принцип просвечивания
 Сглаживание кодовых измерений фазовыми
 Томографии

Адаптивная модель ионосферы

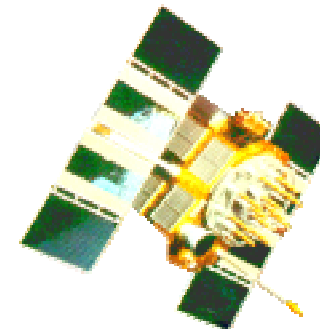
Некоторые результаты

Выводы

Характеристики современных глобальных навигационных спутниковых систем



Высота орбиты	
19100 км	20000 км
Наклонение орбиты	
64,8°	55°
Номинальная численность группировки	
24	24
Число плоскостей	
3	6
Распределение спутников в плоскости	
равномерное	неравномерное
Период обращения КА	
11 ч 15 мин	½ астрономических суток



Постановка задачи

Ионосфера

Определение ПЭС

Связь ПЭС и коэффициента преломления

Мониторинг ПЭС

ГНСС

Структура сигнала

Код и фаза

Принцип просвечивания

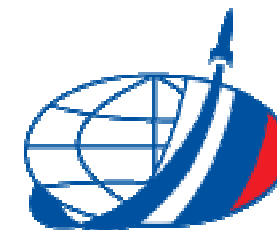
Сглаживание кодовых измерений фазовыми

Томографии

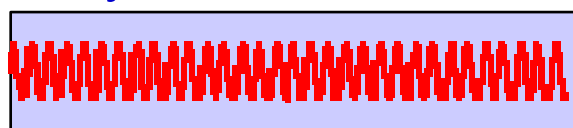
Адаптивная модель ионосферы

Некоторые результаты

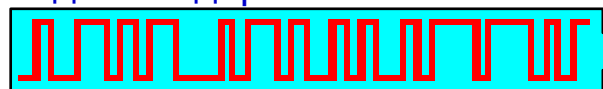
Выводы



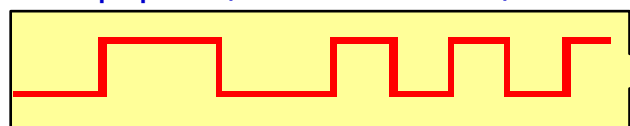
Несущая L1



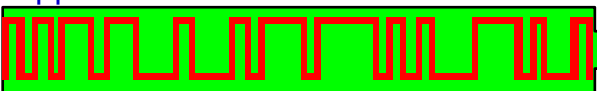
Псевдослучайная последовательность кода стандартной точности



Информационное сообщение



Псевдослучайная последовательность кода высокой точности



Несущая L2



Перемножитель



Сумматор по модулю 2



Сигнал L1

Сигнал L2

Постановка задачи

Ионосфера
 Определение ПЭС
 Связь ПЭС и коэффициента преломления
 Мониторинг ПЭС
 ГИСС

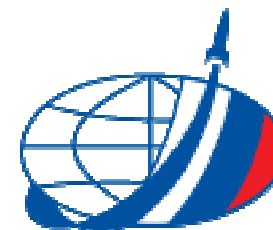
Структура сигнала

Код и фаза
 Принцип просвечивания
 Сглаживание кодовых измерений фазовыми
 Томографии

Адаптивная модель ионосферы

Некоторые результаты

Выводы



$$P_i^k = c(t_i - t^k) = c\tau_i^k$$

$$\tau_i^k = t_i - t^k$$

$$P_i^k = \rho_i^k + c(\Delta t_i - \Delta t^k) + \Delta\rho_{i,\text{trop}}^k + \Delta\rho_{i,\text{ion}}^k + c(b^k + b_i) + \epsilon$$

$$L_i^k = \rho_i^k + c(\Delta t_i - \Delta t^k) + \Delta\rho_{i,\text{trop}}^k - \Delta\rho_{i,\text{ion}}^k + \lambda B_i^k + \epsilon$$

Обозначим: $\rho_i^k + c(\Delta t_i - \Delta t^k) + \Delta\rho_{i,\text{trop}}^k = \rho'_i$

$$L_{i,1}^k = \rho'_i - I_i^k + \lambda_1 B_{i,1}^k$$

$$L_{i,2}^k = \rho'_i - \xi I_i^k + \lambda_2 B_{i,2}^k$$

$$P_{i,1}^k = \rho'_i + I_i^k + c(b^{k,1} + b_{i,1})$$

$$P_{i,2}^k = \rho'_i + \xi I_i^k + c(b^{k,2} + b_{i,2})$$

Постановка задачи

Ионосфера

Определение ПЭС

Связь ПЭС и коэффициента преломления

Мониторинг ПЭС

ГНСС

Структура сигнала

Код и фаза

Принцип просвечивания

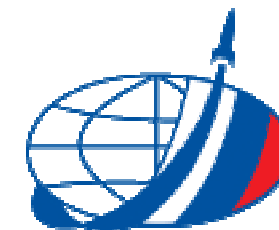
Сглаживание кодовых измерений фазовыми

Томографии

Адаптивная модель ионосферы

Некоторые результаты

Выводы



$$L_4 = L_1 - L_2$$

$$L_{i,4}^k = -\xi_4 I_i^k + B_{i,4}^k$$

$$P_{i,4}^k = +\xi_4 I_i^k + c(\Delta b^k + \Delta b_i)$$

$$\xi_4 = 1 - \xi$$

$$B_{i,4}^k = \lambda_1 B_{i,1}^k - \lambda_2 B_{i,2}^k$$

$$\Delta b^k = b^{k,1} - b^{k,2}$$

$$\Delta b_i = b_{i,1} - b_{i,2}$$

Постановка задачи

Ионосфера

Определение ПЭС

Связь ПЭС и коэффициента преломления

Мониторинг ПЭС

ГНСС

Структура сигнала

Код и фаза

Принцип просвечивания

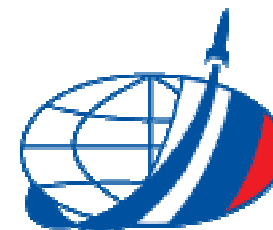
Сглаживание кодовых измерений фазовыми

Томографии

Адаптивная модель ионосферы

Некоторые результаты

Выводы



Постановка задачи

*Ионосфера
Определение ПЭС
Связь ПЭС и коэффициента преломления
Мониторинг ПЭС
ГНСС*

*Структура сигнала
Код и фаза
Принцип просвечивания*

*Сглаживание кодовых измерений фазовыми
Томографии*

Адаптивная модель ионосферы

Некоторые результаты

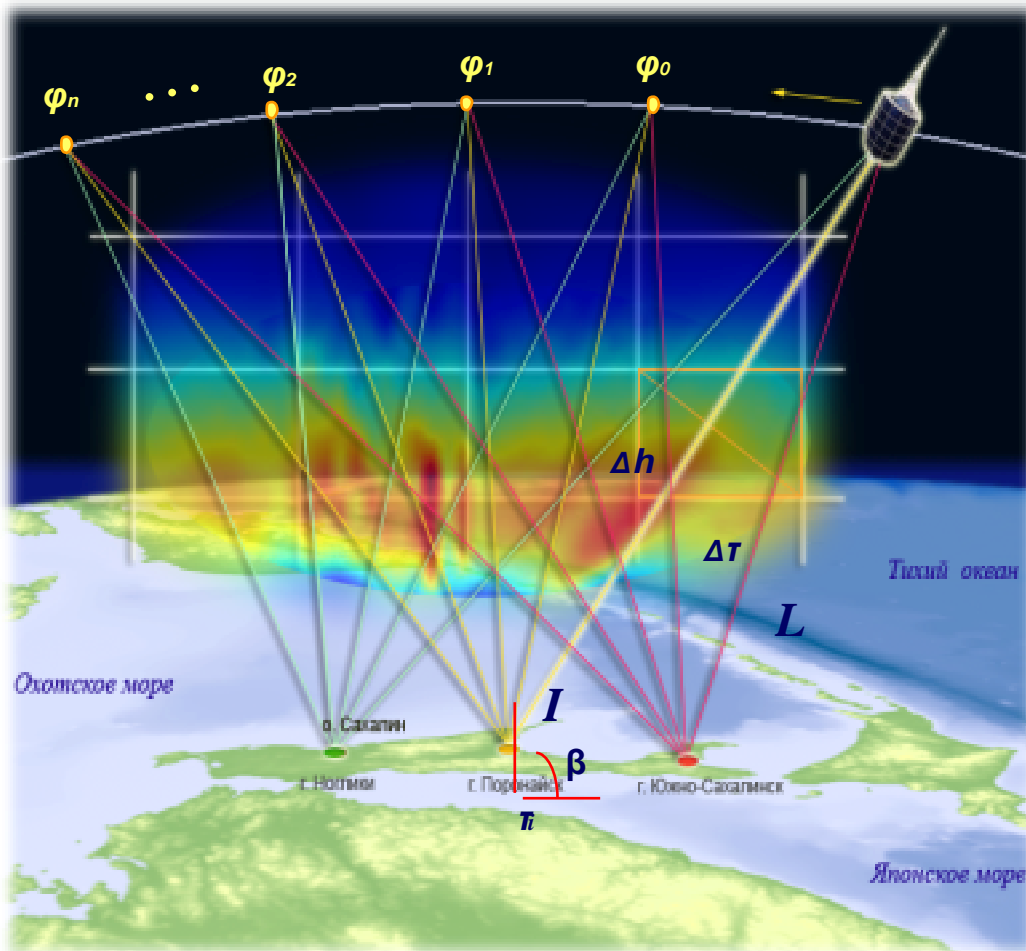
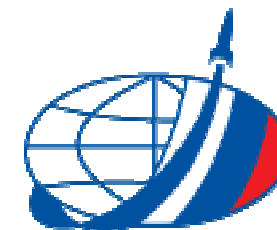
Выводы

$$\tilde{P}_{i,1}^k(t) = \bar{P}_{i,1}^k + \Delta L_{i,1}^k(t) + 2 \frac{\nu_2^2}{\nu_1^2 - \nu_2^2} (\Delta L_{i,1}^k(t) - \Delta L_{i,2}^k(t))$$

$$\tilde{P}_{i,2}^k(t) = \bar{P}_{i,2}^k + \Delta L_{i,2}^k(t) + 2 \frac{\nu_1^2}{\nu_1^2 - \nu_2^2} (\Delta L_{i,1}^k(t) - \Delta L_{i,2}^k(t))$$

$$\Delta L_{i,1}^k(t) = L_{i,1}^k(t) - \bar{L}_{i,1}^k$$

$$\Delta L_{i,2}^k(t) = L_{i,2}^k(t) - \bar{L}_{i,2}^k$$



Основные соотношения:

Постановка задачи

$$\varphi = I = \lambda r_e \int N(h, \tau) dh$$

$$I(\beta, \tau_i) = \int_0^h \frac{F(h, \tau)(R+h)}{\sqrt{R^2 \sin^2 \beta + 2Rh + h^2}} dh$$

Решение обратной задачи

Формирование системы линейных алгебраических уравнений

$$A_{JM} F_M = D_J,$$

$$D_J = \frac{\Delta J}{\Delta \beta} \quad A_{JM} = \frac{\Delta N_M}{\Delta \beta}$$

Итерационный метод решения системы уравнений ART

$$f^{k+1} = f^k + \frac{d_i - \langle d, f^k \rangle}{\langle d, d \rangle} d$$

Постановка задачи

Ионосфера
 Определение ПЭС
 Связь ПЭС и коэффициента преломления
 Мониторинг ПЭС
 ГИСС

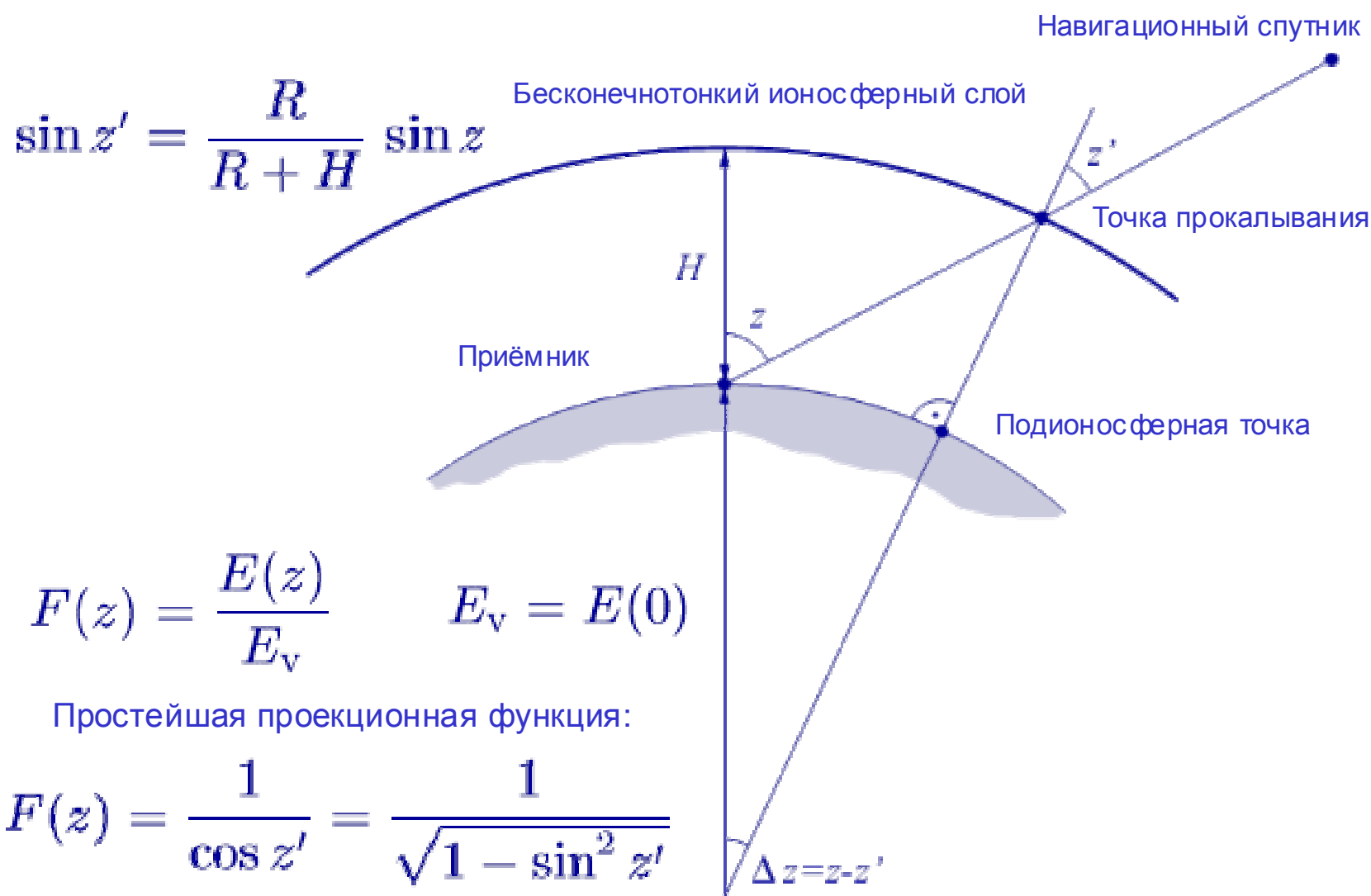
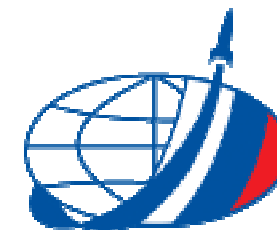
Структура сигнала
 Код и фаза
 Принцип просвечивания

Сглаживание кодовых измерений
 фазовыми
 Томография

Адаптивная модель ионосферы

Некоторые результаты

Выводы



Постановка задачи

Адаптивная модель ионосферы

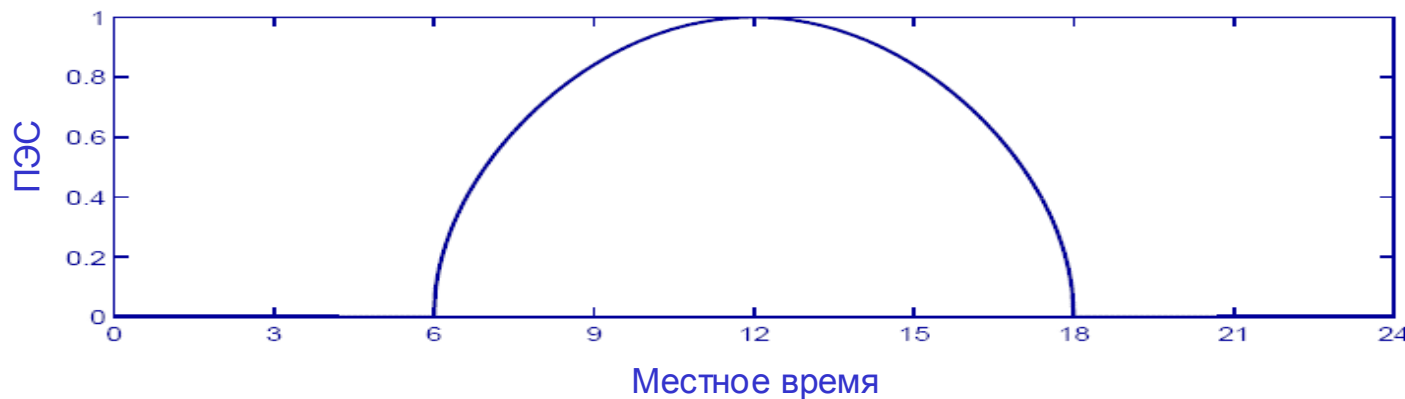
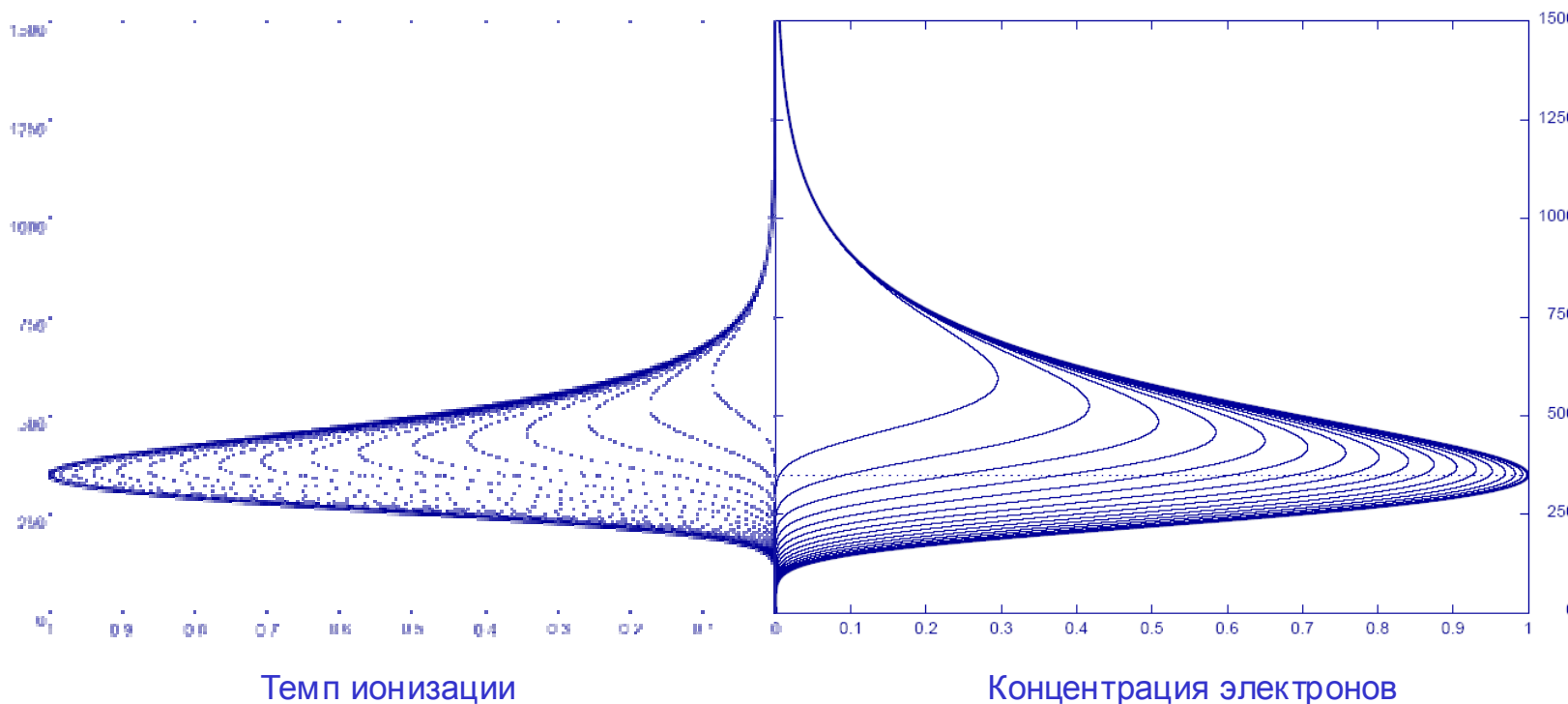
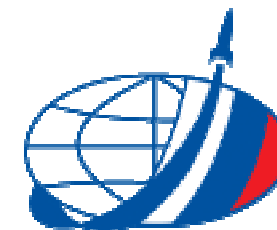
Модель бесконечнотонкого слоя

Простейшая модель
Входные параметры
Солнечно-магнитные координаты

Корректируемая модель

Некоторые результаты

Выводы



Постановка задачи

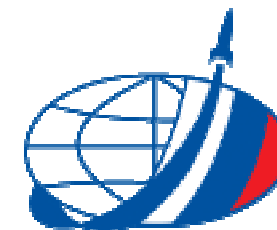
Адаптивная модель ионосферы

Модель бесконечнотонкого слоя

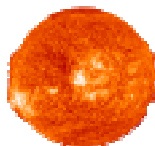
Простейшая модель
Входные параметры
Солнечно-магнитные координаты
Корректируемая модель

Некоторые результаты

Выводы



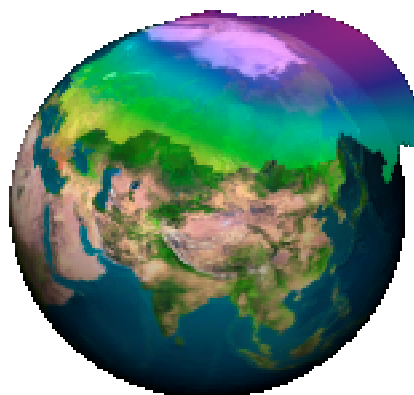
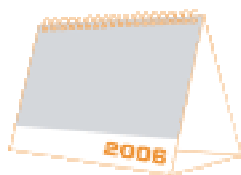
Солнечная активность



Местное время



Дата



Данные многолетних наблюдений
классическими методами

**Постановка
задачи**

**Адаптивная
модель
ионосферы**

*Модель
бесконечнотонкого
слоя*

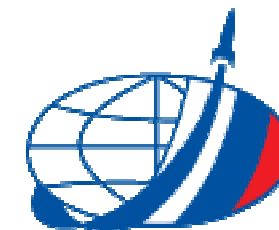
Простейшая модель

Входные параметры
Солнечно- магнитные
координаты

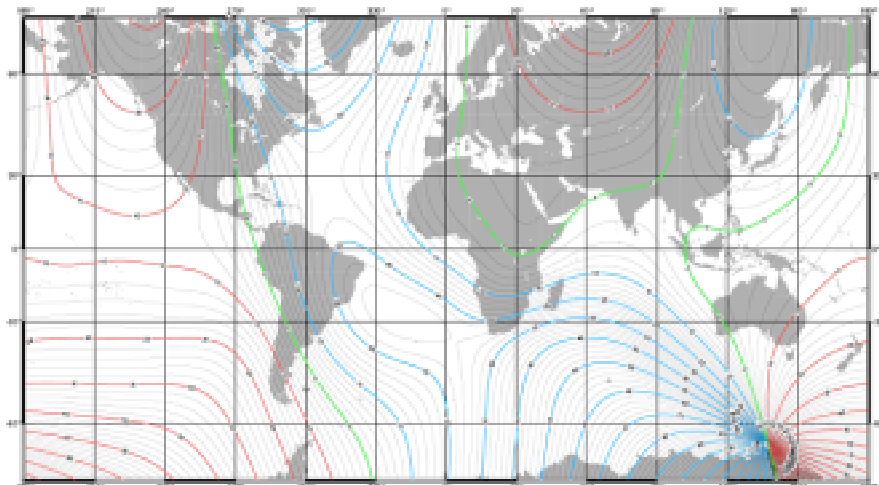
Корректируемая
модель

**Некоторые
результаты**

Выводы

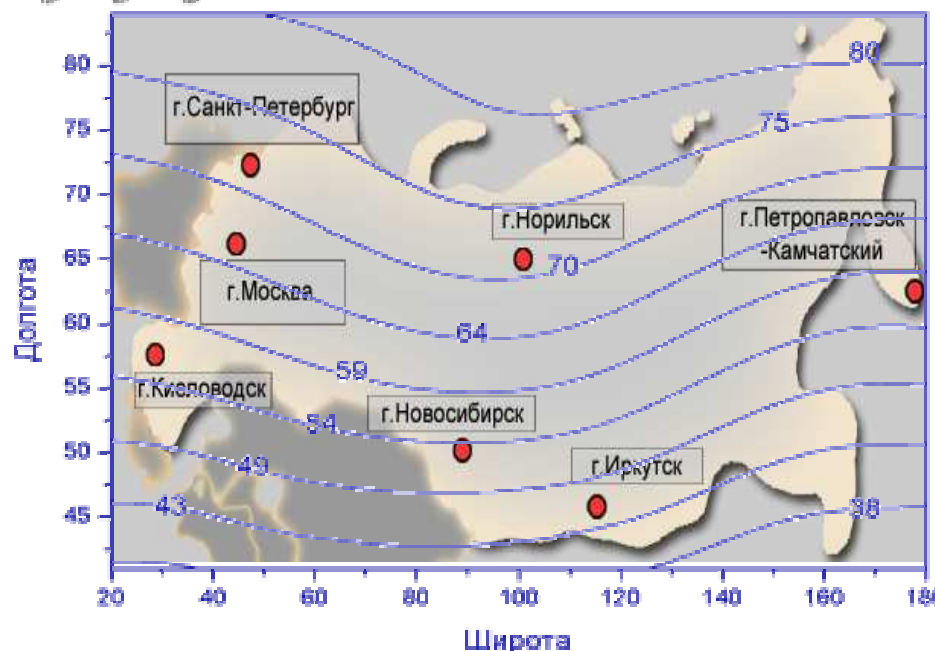


US/UK World Magnetic Model -- Epoch 2005.0
Main Field Declination (D)



US/UK World Magnetic Model
Epoch 2005.0
Main Field Declination (D)

$$\operatorname{tg}(\mu) = \frac{\operatorname{dip}}{\cos(\varphi)}$$



Постановка задачи

Адаптивная модель ионосферы

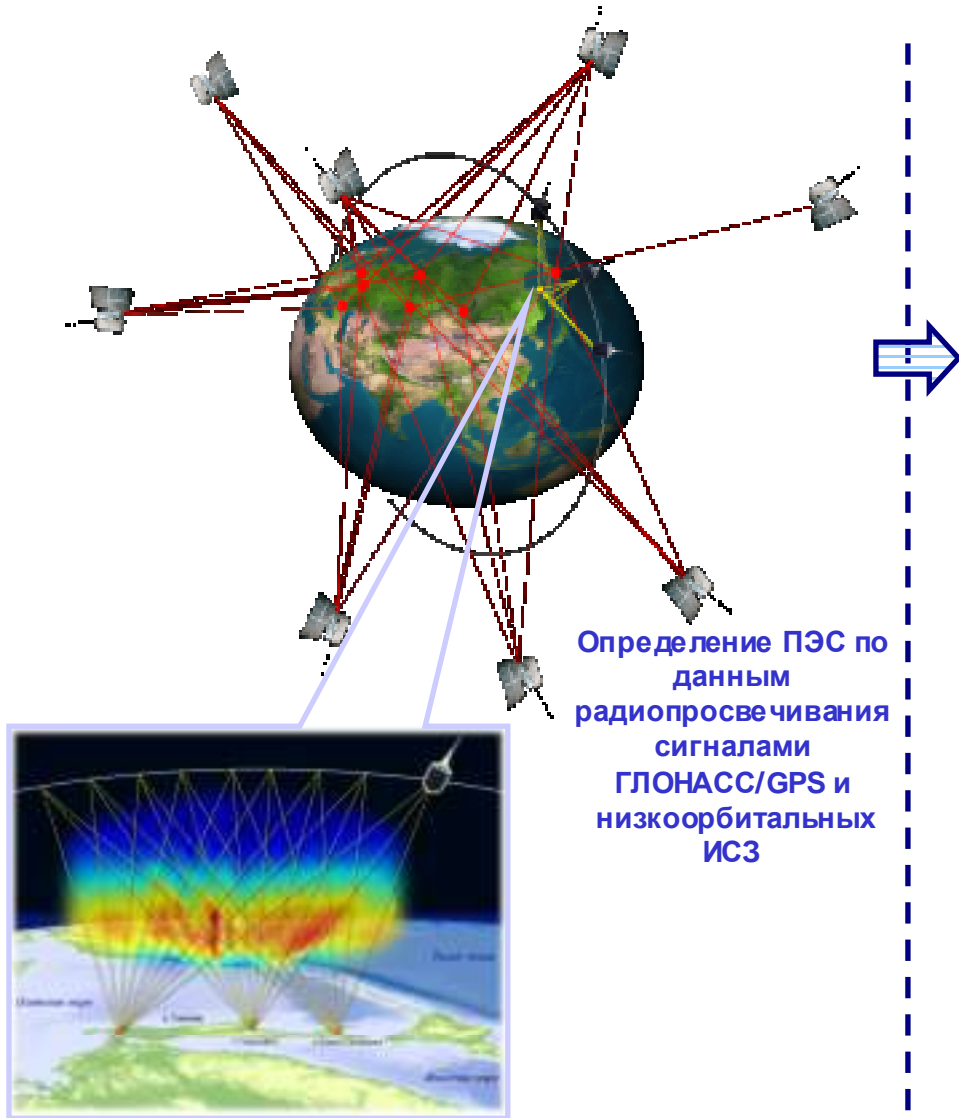
Модель бесконечнотонкого слоя

Простейшая модель входных параметров

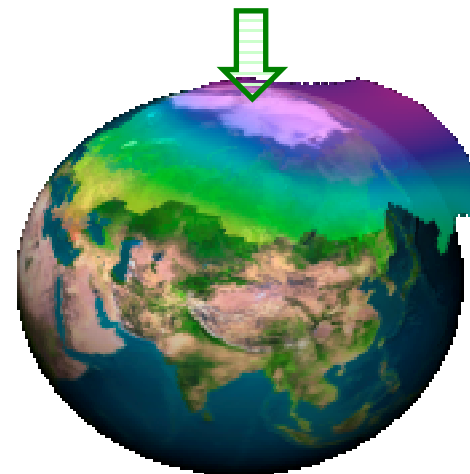
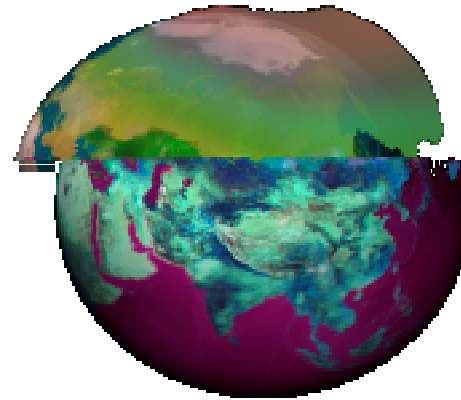
Солнечно-магнитные координаты
Корректируемая модель

Некоторые результаты

Выводы



Распределение уровня ионизации ионосферы



Вычисление ПЭС с помощью модели NeQuick

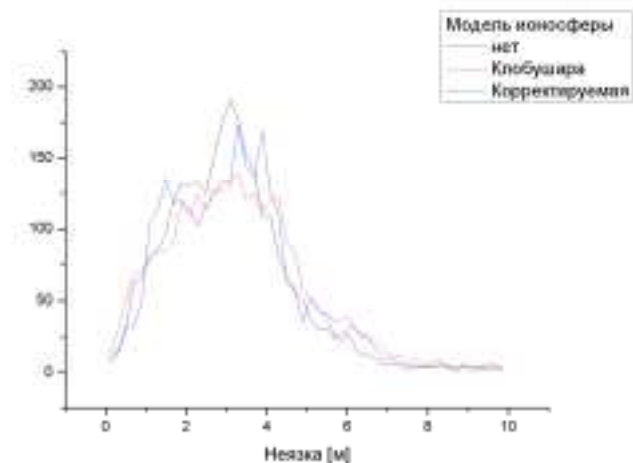
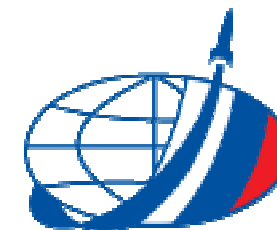
Постановка задачи

Адаптивная модель ионосферы

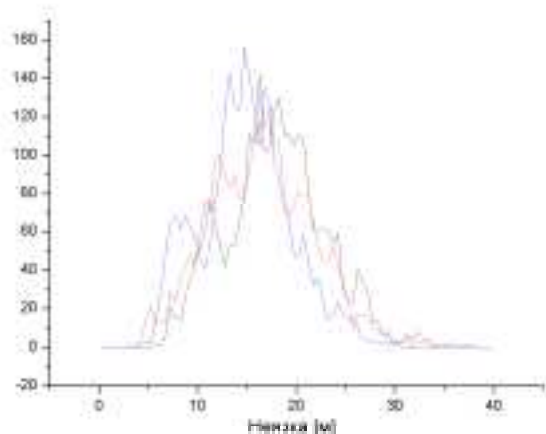
Модель бесконечнотонкого слоя
Простейшая модель
Входные параметры
Солнечно-магнитные координаты
 Корректируемая модель

Некоторые результаты

Выводы

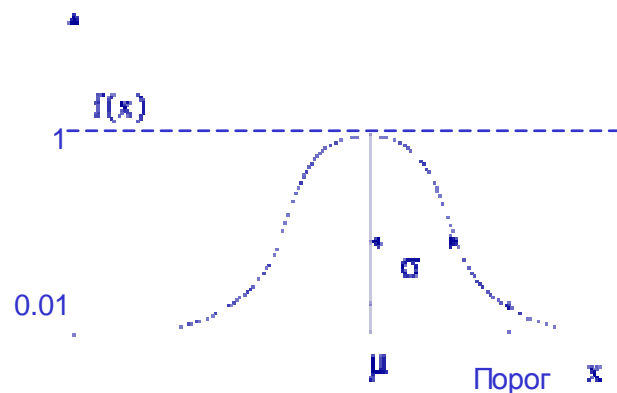


Вид распределения невязок в плане



Вид распределения невязок в объёме

* Статистика за сутки по станции Иркутск на 1.08.2006



Критерии оценки:

- Невязка среднего и истинной позиции
- Пороговое значение

Постановка задачи

Адаптивная модель ионосферы

Некоторые результаты

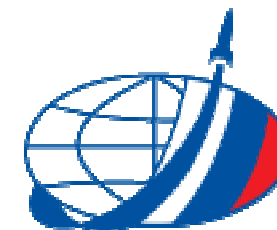
Критерии оценки

Невязка

Пороговые значения

Удалённая коррекция

Выводы



Дата	Модель	Иркутск	Новосибирск	Норильск	Кисловодск	Геомагнитная обстановка
1.08.2006	нет	17.5564	18.6045	19.0788	15.855	Незначительное волнение
	Клобушар	15.9305	16.874	17.1949	14.0427	
	Мод. NeQuick	14.4833	15.687	16.5644	13.1064	
7.08.2006	нет	16.0389	18.6906	16.926	17.2647	Буря
	Клобушар	14.5412	17.2477	15.1445	15.8864	
	Мод. NeQuick	12.7553	15.0352	14.6502	13.3114	
13.08.2006	нет		18.4587	22.3527	15.3542	Спокойно
	Клобушар		17.1843	21.6584	13.6932	
	Мод. NeQuick		15.6499	19.6232	12.3919	
19.08.2006	нет		16.7515		16.8323	Резкое изменение
	Клобушар		15.4495		15.1181	
	Мод. NeQuick		13.8846		13.598	

Постановка задачи

Адаптивная модель ионосферы

Некоторые результаты

Критерии оценки

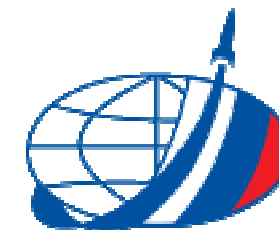
Невязка

Пороговые значения

Удалённая коррекция

Выводы

Модель Клобушара устраняет ~ 10 % невязки; адаптивная модель > 15 %



Дата	Модель	Иркутск	Новосибирск	Норильск	Кисловодск	Геомагнитная обстановка
1.08.2006	нет	31.9826	31.3524	34.1559	29.5715	Незначительное волнение
	Клобушар	29.2401	30.7563	33.2143	28.8919	
	Мод. NeQuick	26.1173	26.2497	30.7879	26.5834	
7.08.2006	нет	28.3467	31.2315	32.2877	30.5251	Буря
	Клобушар	27.7193	29.9365	32.2877	29.6233	
	Мод. NeQuick	23.7328	25.5918	28.7142	27.0015	
13.08.2006	нет		30.1962	38.4883	28.6181	Спокойно
	Клобушар		29.3214	35.7764	27.7718	
	Мод. NeQuick		27.2151	35.1345	25.6745	
19.08.2006	нет		26.5383		29.6882	Резкое изменение
	Клобушар		26.5383		28.2051	
	Мод. NeQuick		23.6096		27.2055	

Постановка задачи

Адаптивная модель ионосферы

Некоторые результаты

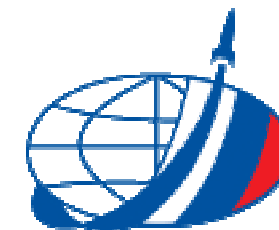
Критерии оценки

Невязка

Пороговые значения
Удалённая коррекция

Выводы

Адаптивная модель превосходит модель Клобушара, смещая пороговое значение к нулю не менее чем на 10%



Дата	Модель	Новосибирск	Кисловодск	Геомагнитная обстановка
1.08.2006	нет	31.3524	29.5715	Незначительное волнение
	Клобушар	30.7563	28.8919	
	Мод. NeQuick	27.5716	26.3168	
7.08.2006	нет	31.4086	31.1018	Буря
	Клобушар	30.1544	30.6139	
	Мод. NeQuick	26.0558	26.0706	
13.08.2006	нет	30.6543	30.4162	Спокойно
	Клобушар	29.3448	28.7138	
	Мод. NeQuick	27.5953	26.9458	
19.08.2006	нет	30.0822	28.11	Резкое изменение
	Клобушар	28.9353	26.4746	
	Мод. NeQuick	26.0814	25.129	

Постановка задачи

Адаптивная модель ионосферы

Некоторые результаты

Критерии оценки

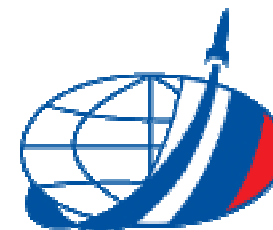
Невязка

Пороговые значения

Удалённая коррекция

Выводы

Адаптивная модель при использовании данных удаленной станции, с близким числом Ровера, уступает той же модели, использующей местные данные, однако, значительно превосходит модель Клобушара



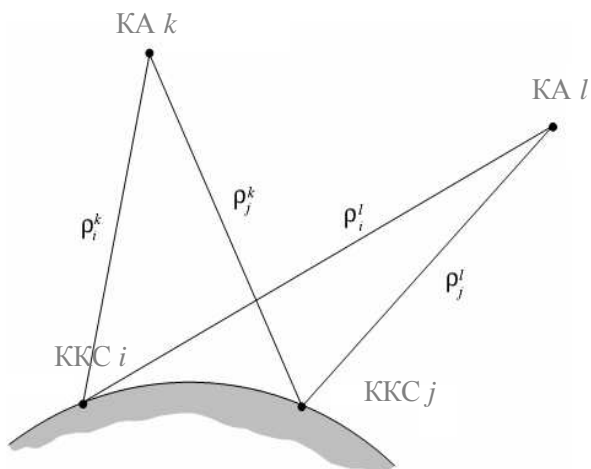
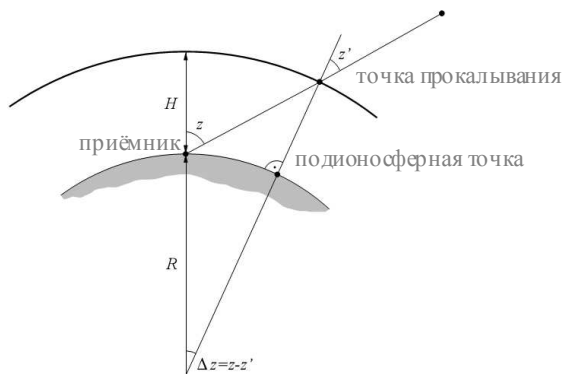
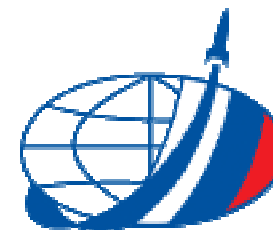
*Постановка
задачи*

*Адаптивная
модель
ионосферы*

*Некоторые
результаты*

Выводы

- + Разработана и реализована методика определения межчастотных сдвигов на КА и ККС.
- + Создана адаптивная модель ионосферы на базе модели NeQuick
- + Предложены критерии оценки адекватности ионосферных моделей, не требующие дополнительных источников данных
- + Показана целесообразность использования созданной модели для ионосферной коррекции в создаваемой системе функциональных дополнений ГЛОНАСС



- + Тройные разности исключают фазовые неоднозначности и систематические ошибки
- Возможно определение только относительного ПЭС
- Необходимо разложение по каким-либо базисным функциям и хорошее первое приближение

Постановка задачи

Адаптивная модель ионосферы

Некоторые результаты

Выводы