

Лекция «Принципы ГНСС-зондирования ионосферы»

Перевалова Наталья Петровна

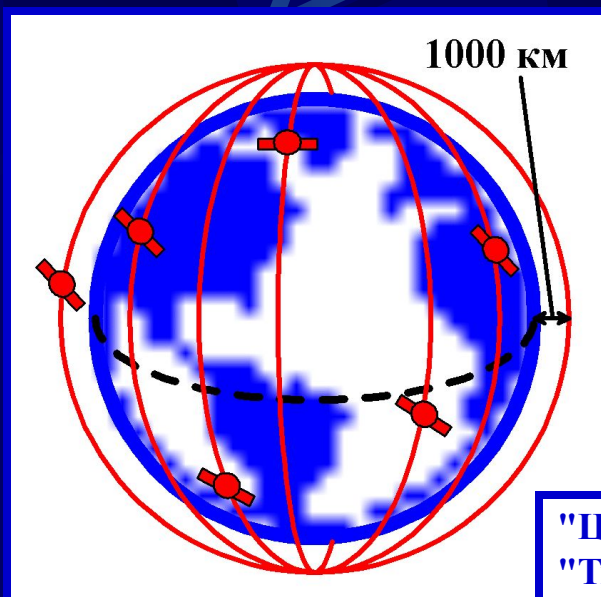
*Институт солнечно-земной физики СО РАН
Иркутск*



ИСЗФ СО РАН: <http://iszf.irk.ru>

Спутниковые Радионавигационные Системы

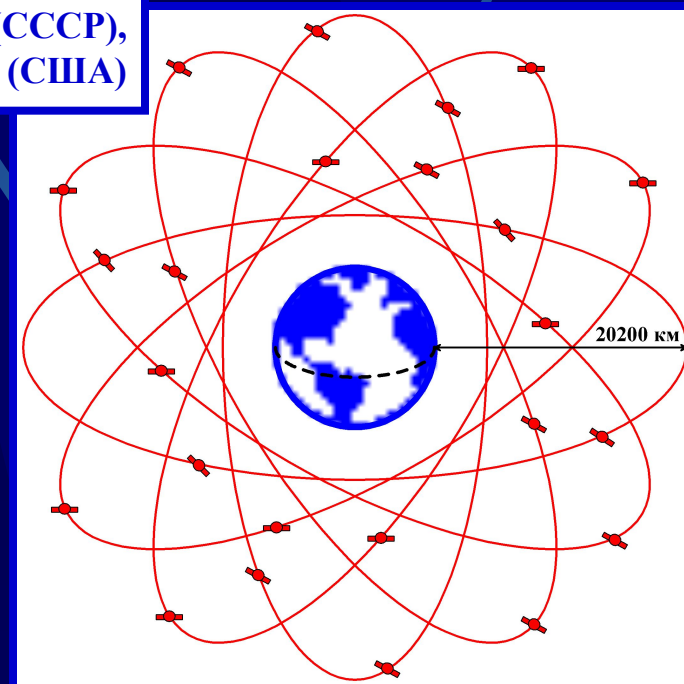
1-го поколения (низкоорбитальные)



"Цикада" (СССР),
"Transit" (США)

Высота орбит ИСЗ:	1000 км
Число орбит:	4-7
Число ИСЗ:	4-7
Период обращения ИСЗ:	100-105 мин
Перерыв между сеансами:	30-120 мин
Число определяемых координат:	2
Точность определения координат:	50-100 м

"ГЛОНАСС" (СССР),
"GPS" (США)



Высота орбит ИСЗ:	20000 км
Число орбит:	6 (GPS)
Число ИСЗ:	24
Период обращения ИСЗ:	12 час
Перерыв между сеансами:	0 мин
Число определяемых координат:	$3+t+V$
Точность определения координат:	1-100 м
в особом режиме:	0.005 м

Спутники GPS

Определение координат в системе GPS основано на точном измерении времени распространения сигнала от ИСЗ до приемника



Проблема синхронизации часов ИСЗ:

расхождение часов в 10 нс вызовет погрешность в определении координат до 10-15 м

Вес ИСЗ GPS: ~ 900 кг

Размер ИСЗ GPS: ~ 5 м

Аппаратура на борту ИСЗ GPS:

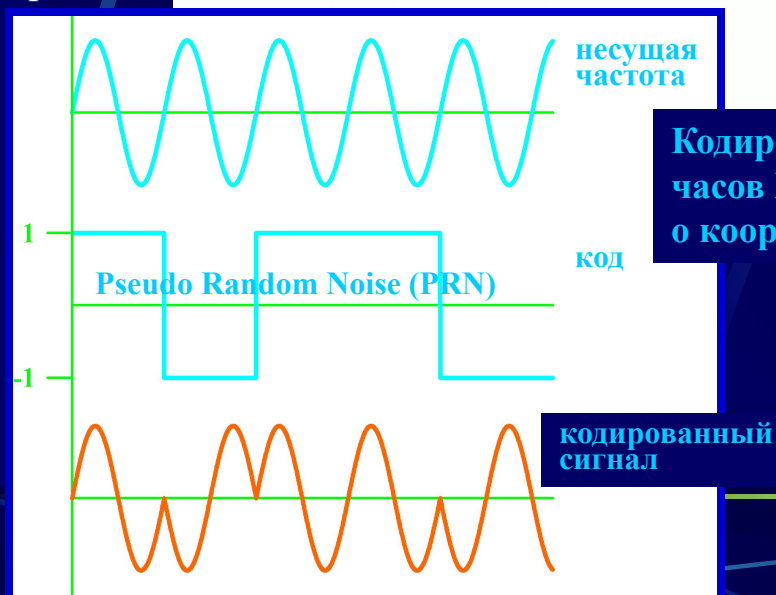
атомные часы

кодирующее устройство

передатчик $f_1 = 1.6$ ГГц (50 Вт)

передатчик $f_2 = 1.2$ ГГц (8 Вт)

Принцип



Кодирование позволяет регистрировать показания часов ИСЗ в приемнике GPS и передавать сведения о координатах ИСЗ

Типы кодов в GPS:

C/A – код свободного доступа

P – защищенный код

Y – закрытый код

Навигационное сообщение

Все о GPS: www.gps.ru



Приемники GPS

Приемник GPS производит обработку сигналов ИСЗ GPS и расчет координат

Важнейшие характеристики приемника GPS:

число одновременно наблюдаемых ИСЗ GPS (число каналов)
 число рабочих частот (одна или две)
 способ измерения (кодовый или фазовый)

Типы приемников GPS:

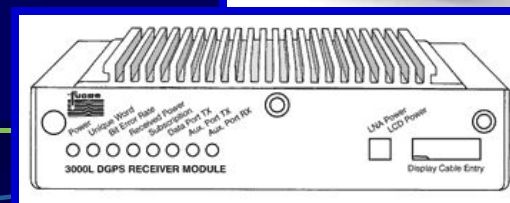
	Способ измерения	Точность определения координат
Одночастотный	Кодовый	50-100 м
	Фазовый	30-50 м
Двухчастотный	Кодовый	15-30 м
	Фазовый	1-10 м

Массовые модели приемников GPS – одночастотные, кодовые, 8...12-канальные

Популярные фирмы-производители GPS-приемников:

Garmin (США), Trimble (США),
 Topcon (США-Япония), Sokkia (Япония),
 Novatel (Канада), Leica (Швейцария),
 Magellan (США-Франция)

Цена приемника GPS: 8 \$ -10000 \$



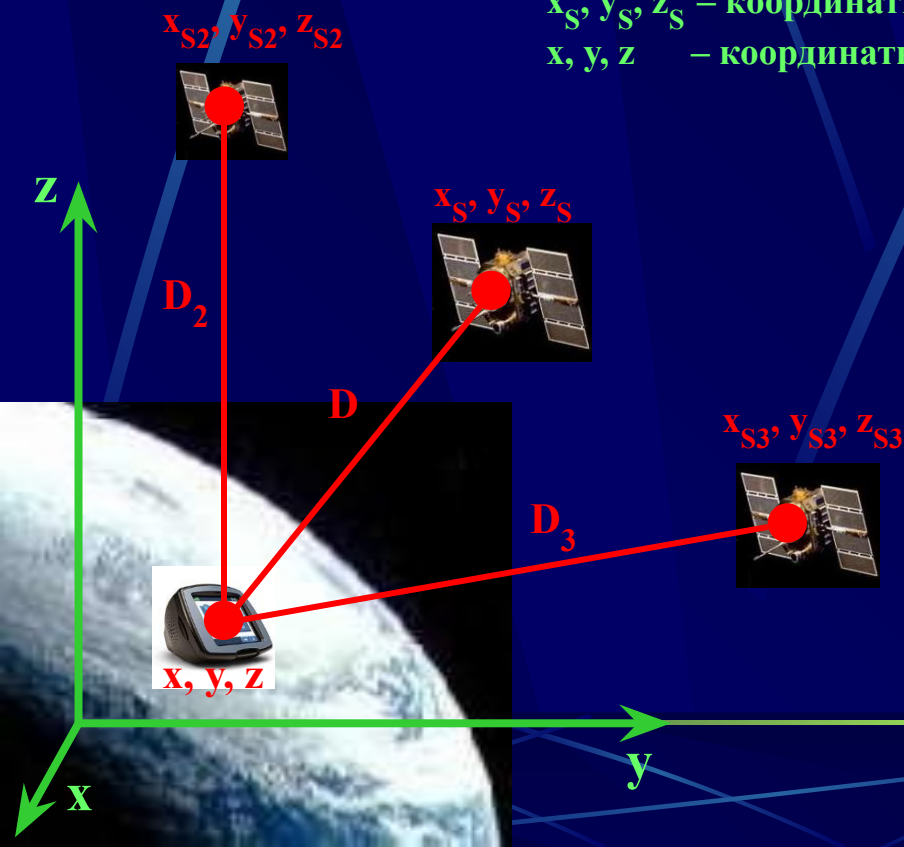
Как определяют координаты в GPS?

$$\begin{cases} D = \sqrt{(x - x_S)^2 + (y - y_S)^2 + (z - z_S)^2} \\ D_2 = \sqrt{(x - x_{S2})^2 + (y - y_{S2})^2 + (z - z_{S2})^2} \\ D_3 = \sqrt{(x - x_{S3})^2 + (y - y_{S3})^2 + (z - z_{S3})^2} \end{cases}$$

D – расстояние между приемником и ИСЗ GPS (дальность)

x_S, y_S, z_S – координаты ИСЗ GPS

x, y, z – координаты приемника GPS



Измерения дальности:

а) по коду: $D = c \cdot \Delta t$

где c – скорость света,

Δt – время распространения сигнала
между ИСЗ и приемником

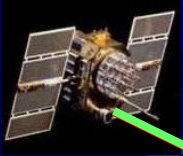
Δt – измеряется приемником GPS
с помощью кода сигнала GPS

б) по фазе: $D \approx \lambda \cdot \Delta \phi$

где λ – длина волны,

$\Delta \phi$ – набег фазы несущей частоты

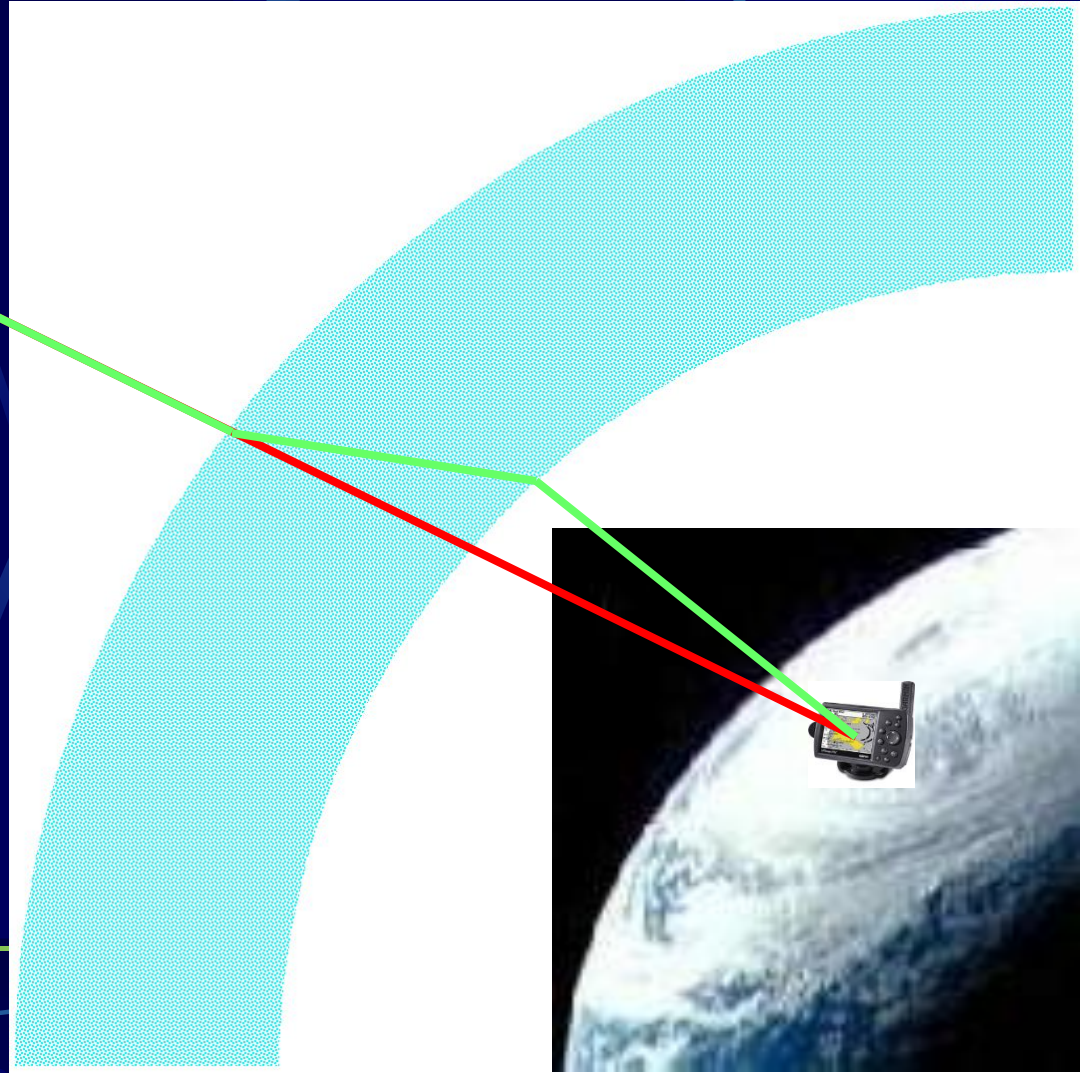
Ионосфера: вред и польза



Ионосфера – слой заряженных частиц на высотах 50-10000 км

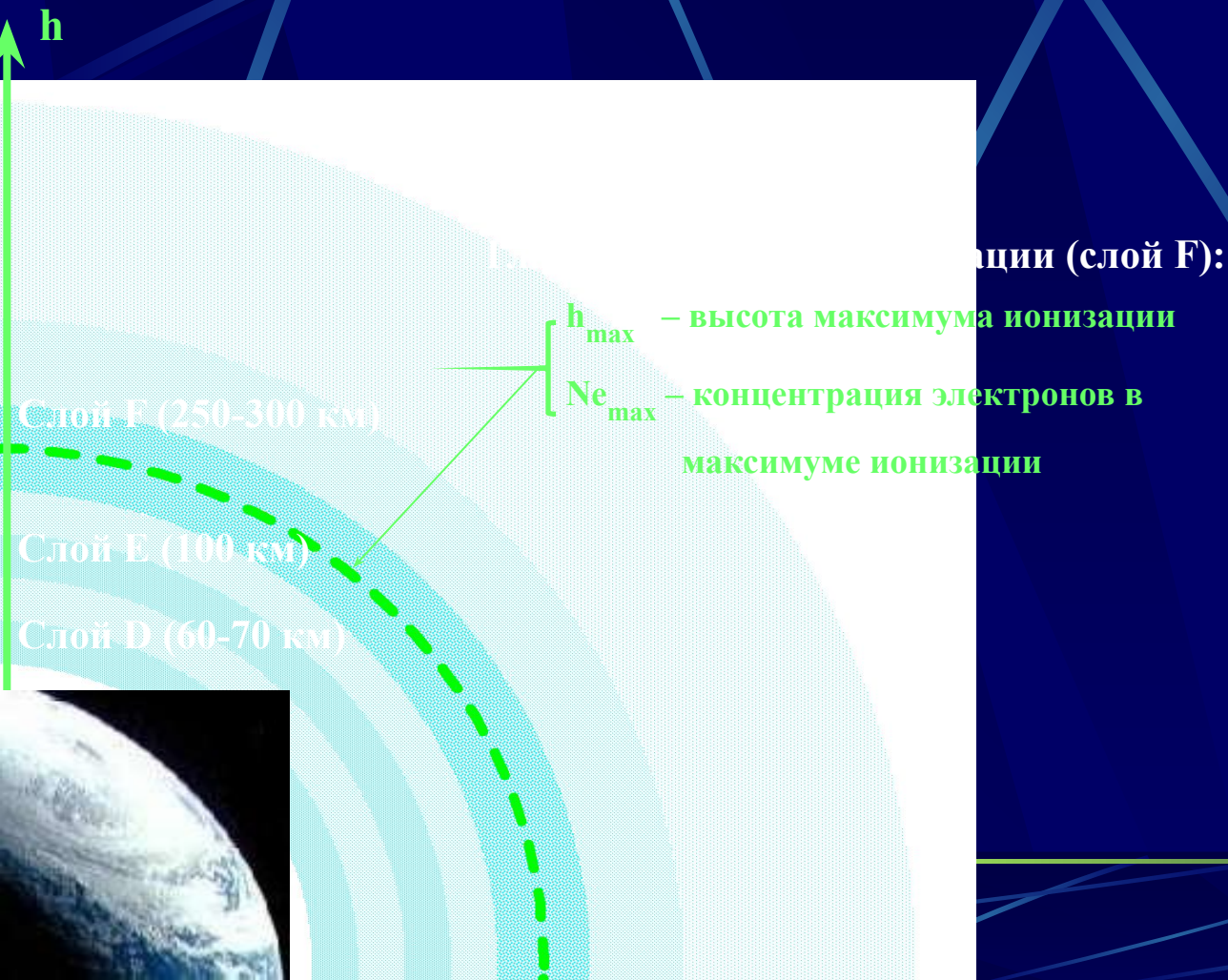
От состояния ионосферы зависят:

телевидение,
радиовещание,
спутниковая связь,
навигация,
локация,
полеты ИСЗ,
погода на Земле

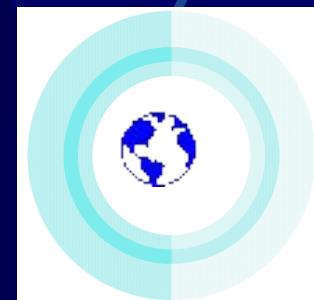


Характеристики ионосферы: N_e

N_e – концентрация электронов



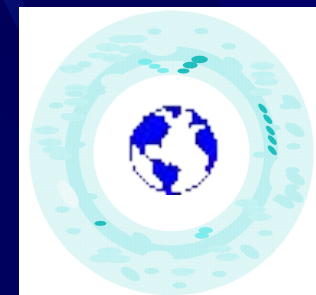
N_e днем > N_e ночью



N_e на экваторе > N_e на полюсе



Неоднородности N_e



Характеристики ионосферы: ПЭС

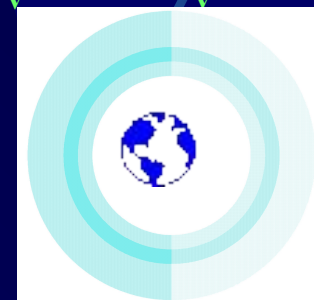
ПЭС – полное электронное содержание

$$I = \int_0^D Ne(r) dr \quad \text{– "наклонное" ПЭС}$$

"Вертикальное" ПЭС: $I_v = I \cdot \sin \theta_s$



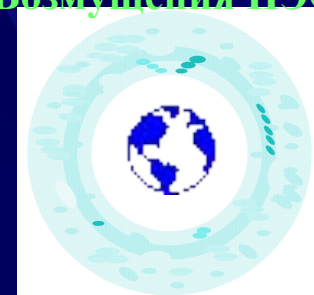
$Ne \text{ днем} > Ne \text{ ночью}$
 $I_v \text{ днем} > I_v \text{ ночью}$



$Ne \text{ на экваторе} > Ne \text{ на полюсе}$
 $I_v \text{ на экваторе} > I_v \text{ на полюсе}$

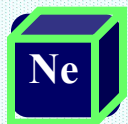


Неоднородности Ne
Возмущения ПЭС

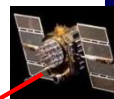


Единица измерения ПЭС:

1 TECU = 10^{16} электронов/м²
(Total Electron Content Unit)

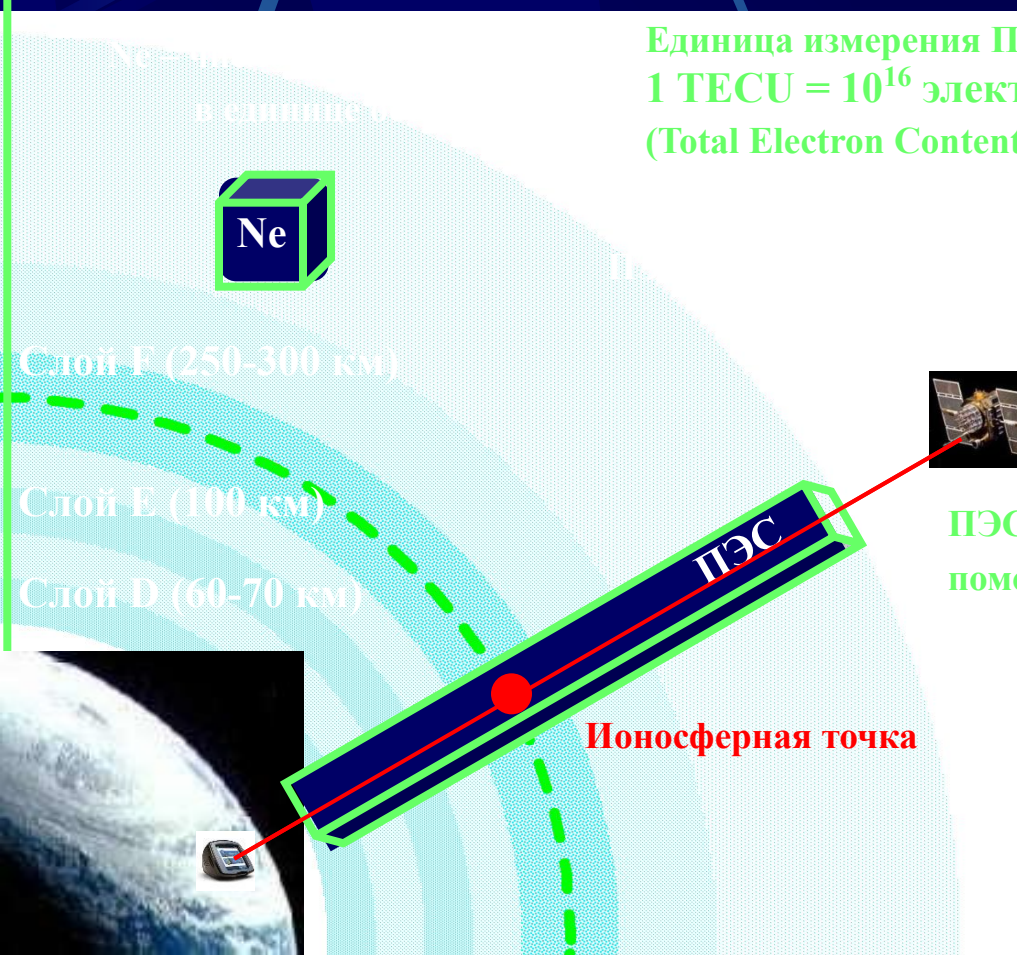


в столбе с
и сечением

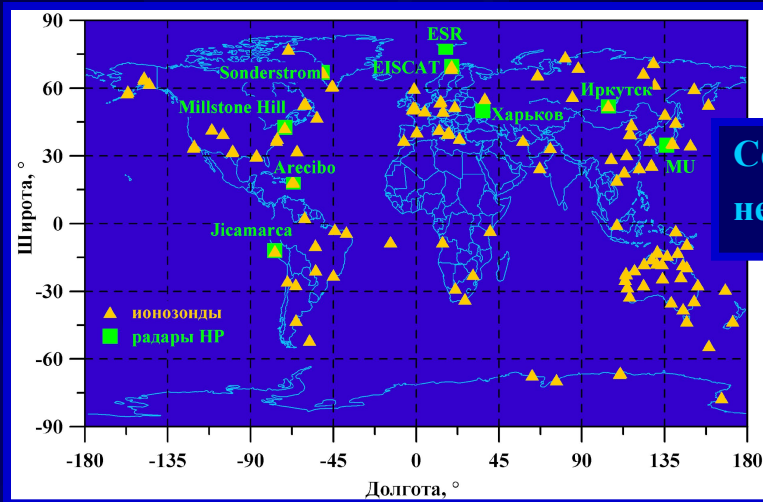


ПЭС можно измерять с
помощью сигналов GPS

h



Как исследуют ионосферу?



Сети ионозондов и радаров некогерентного рассеяния

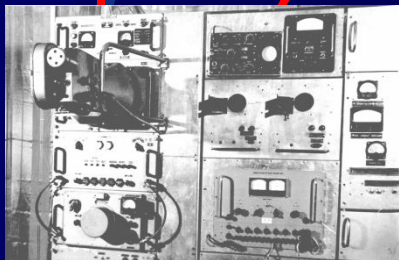


ионосфера

Другие виды измерений:
ракетные, оптические,
космического шума,
сигналы космических
радиоисточников

Определяют: h_{max} и Ne_{max}

Ионозонд, 1960 г.



Определяют: Ne , Te , Ti , V



Определяют: ПЭС

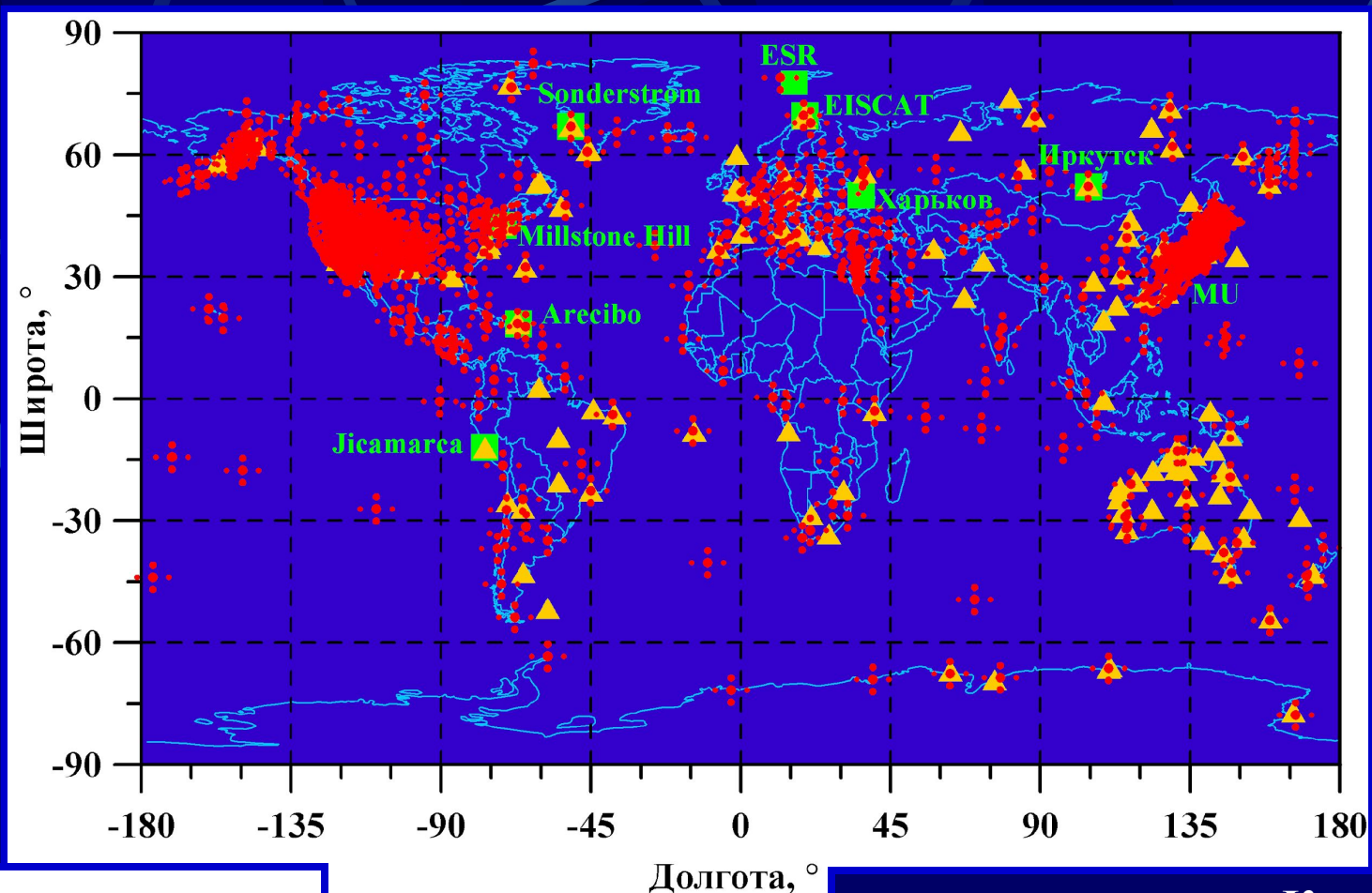


Ионозонд, 2008 г.



Иркутский радар
некогерентного рассеяния

Мировая сеть приемников GPS



- ▲ ионозонды
- радары ИР
- станции GPS

Количество:
Радаров ИР – 9
Ионозондов – 133
Станций GPS – 3000
Лучей "приемник-ИСЗ GPS" > 15000

GPS в исследованиях ионосферы

Построение
глобальных карт
ПЭС

Регистрация ионосферных
возмущений

(солнечные вспышки и затмения,
магнитные бури, землетрясения,
ураганы, запуски ИСЗ и т.д.)

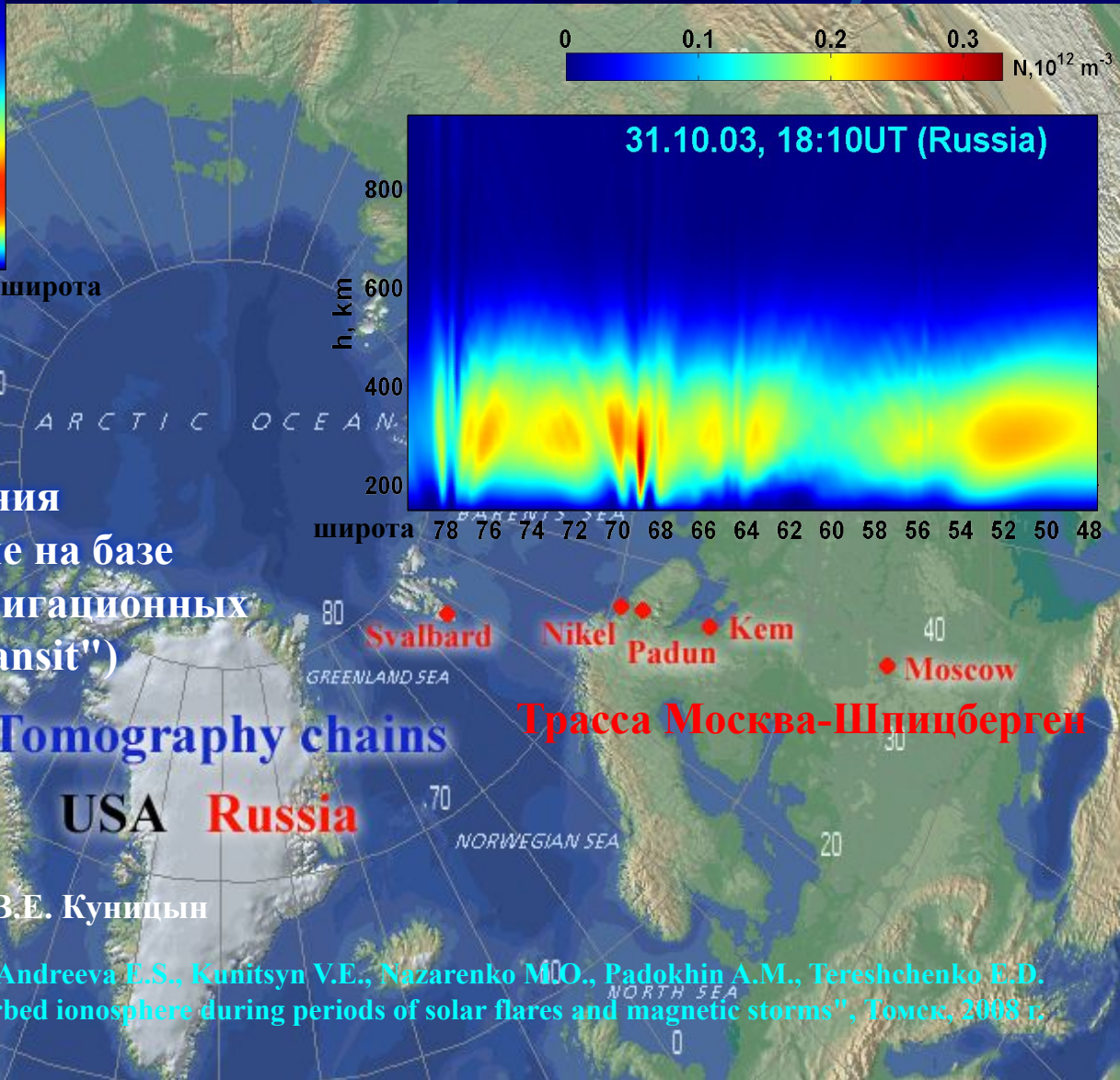
Руководитель группы
д.ф.-м.н., профессор,
Э.Л. Афраимович

GPS-
томография
ионосферы

Группа GPS-мониторинга,
ИСЗФ СО РАН, 2001 г.

Сайт Группы GPS-мониторинга:
<http://rp.iszf.irk.ru/gps>



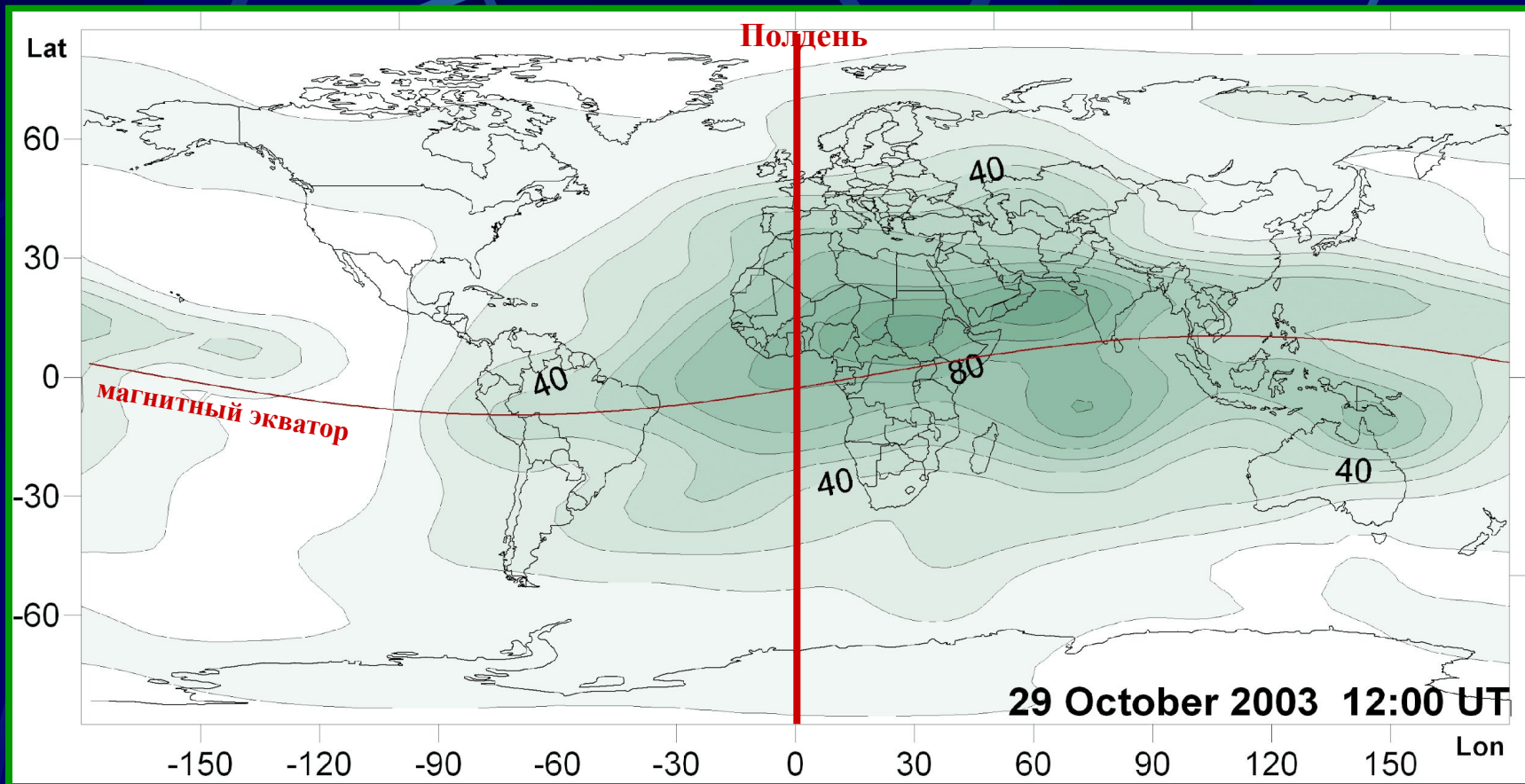


Radio Tomography chains

Исследовательская группа МГУ,
руководитель д.ф.м.-н., профессор В.Е. Куницын

Слайд из доклада: Andreeva E.S., Kunitsyn V.E., Nazarenko M.O., Padokhin A.M., Tereshchenko E.D.
"The structure of disturbed ionosphere during periods of solar flares and magnetic storms", Томск, 2008 г.

Глобальные карты ПЭС



Сколько электронов в ионосфере ?



ГЭС – глобальное электронное содержание

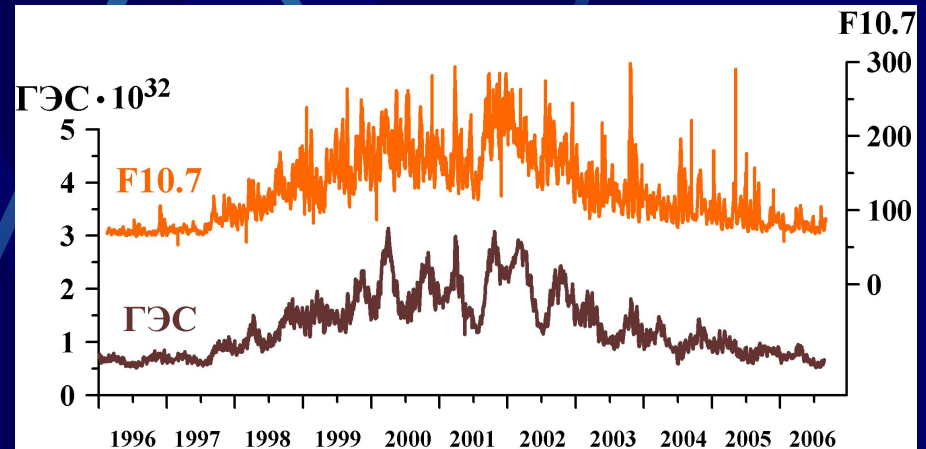
ГЭС – полное число электронов в околоземном космическом пространстве (ОКП)

ГЭС $\approx 10^{32}$ электронов



орбита GPS GPS

Индексы солнечной активности: W, F10.7 и др.
Индексы геомагнитной активности: Dst, Kp, Ap и др.
Индекс состояния ОКП: ГЭС



Динамика ГЭС в течение 23-го цикла солнечной активности

Применение ГЭС:

- характеристика состояния ОКП и космической погоды
- восстановление параметров солнечного излучения по данным ионосферных измерений
- тестирование моделей ионосферы

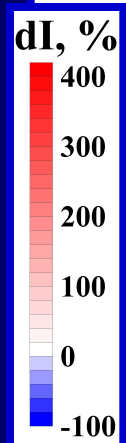
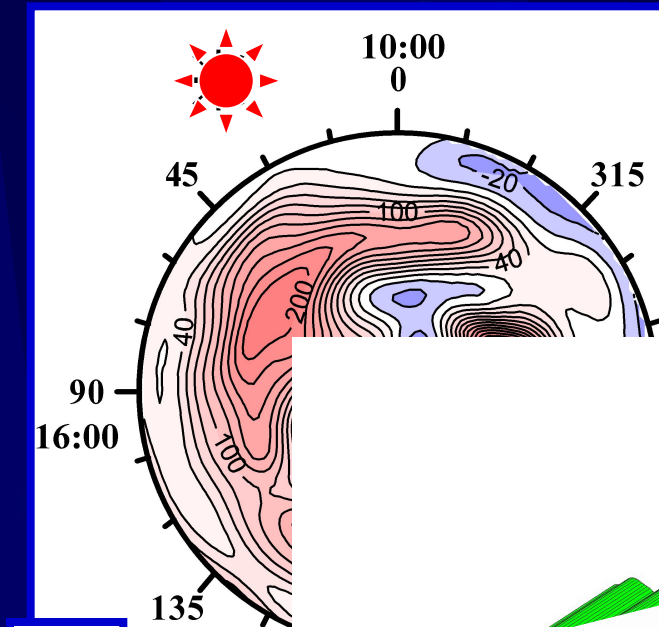
Регистрация ионосферных возмущений



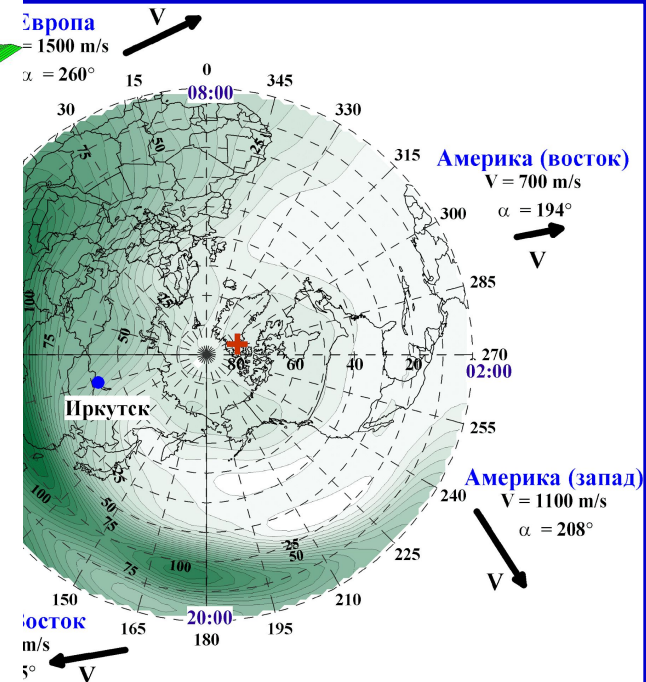
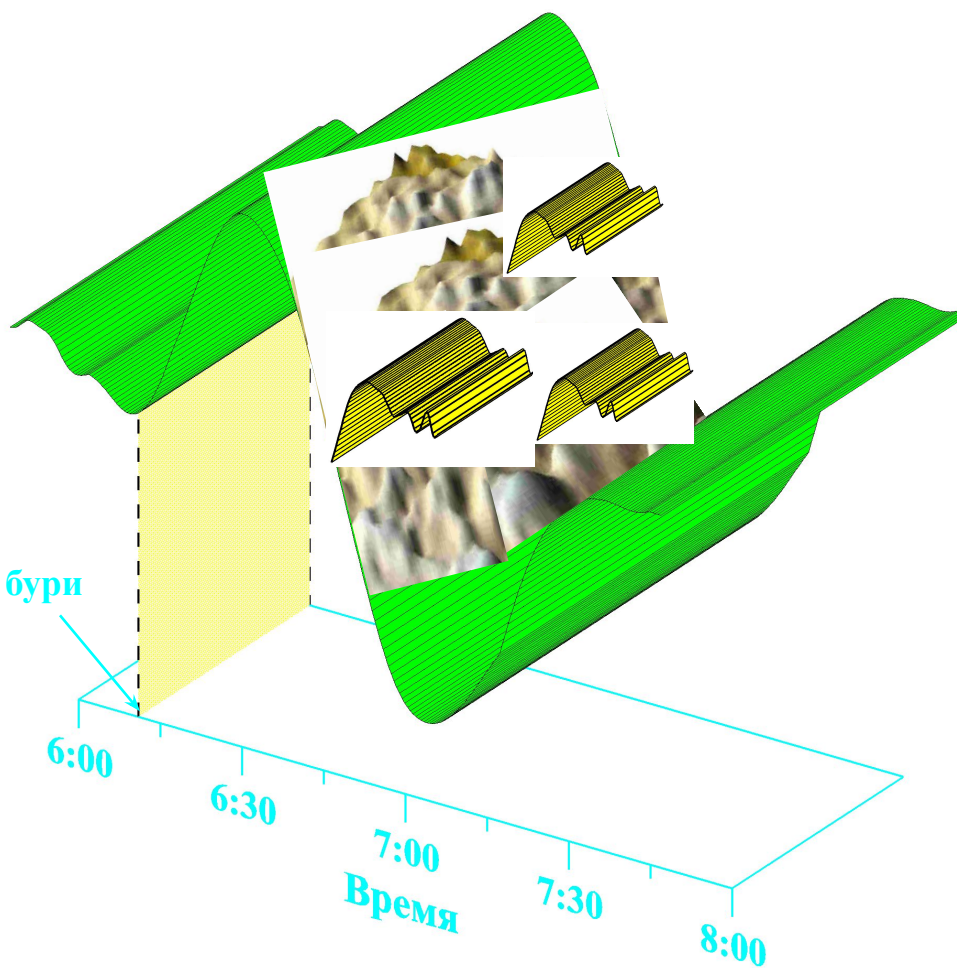
Программный комплекс GLOBDET для регистрации ионосферных возмущений



Отклик ионосферы на магнитные бури

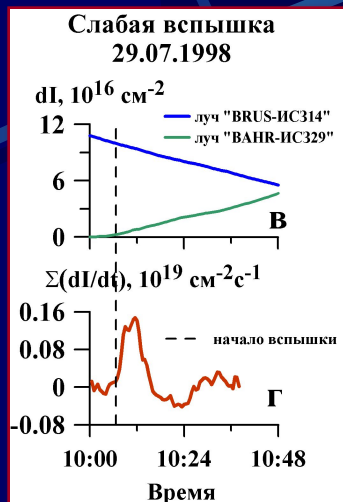
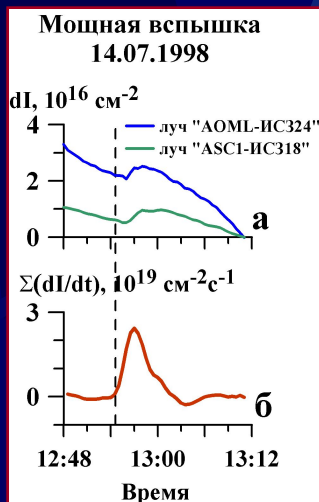


Начало бури



Ионосферные эффекты

солнечных вспышек

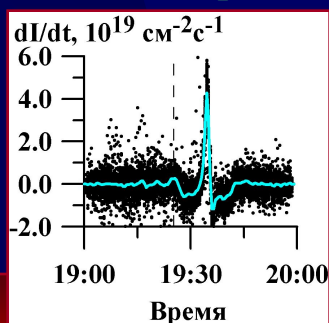


и солнечных затмений

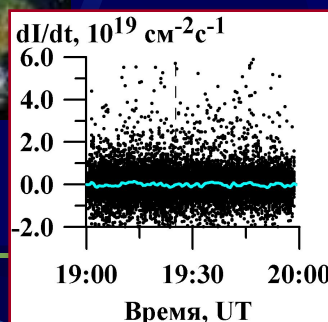


19.03.1997 Иркутск
11.08.1999 Европа
21.06.2001 Африка
29.03.2006 Средняя Азия

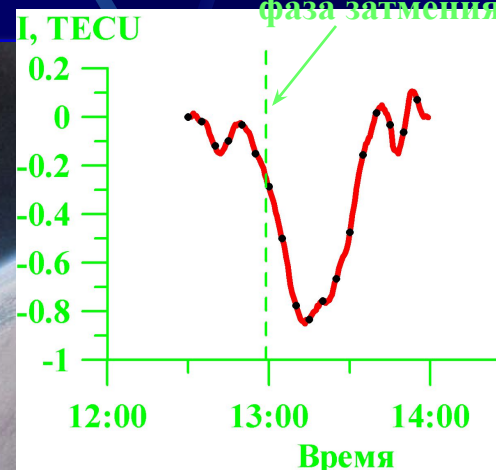
Дневная сторона



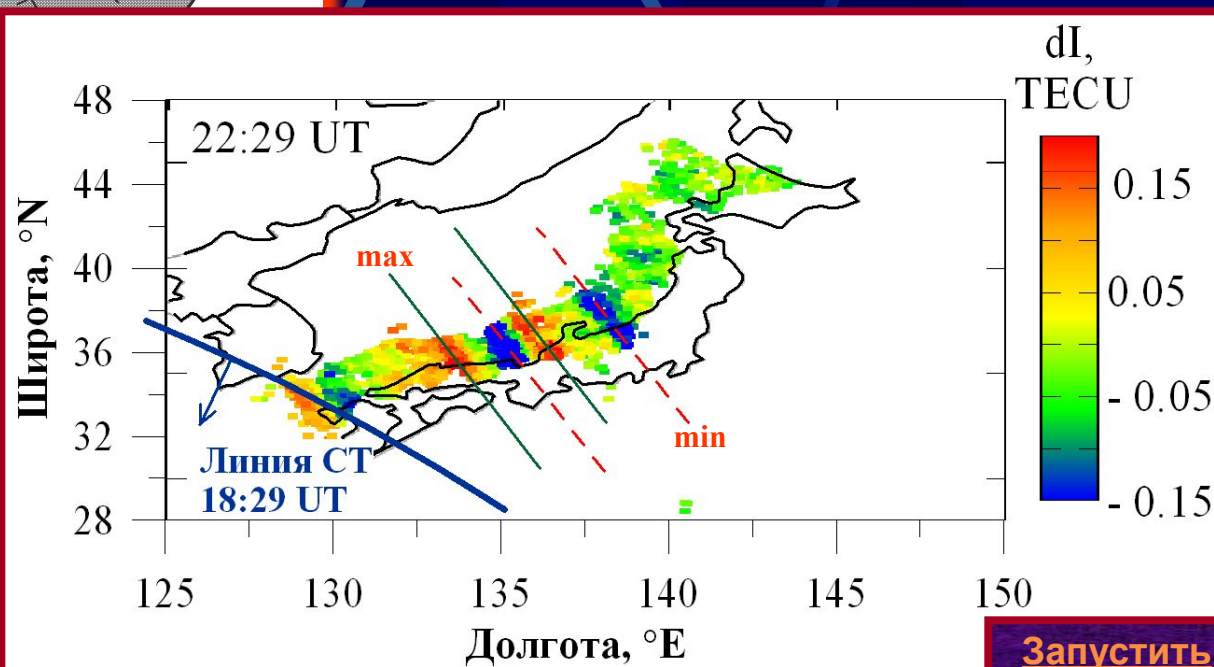
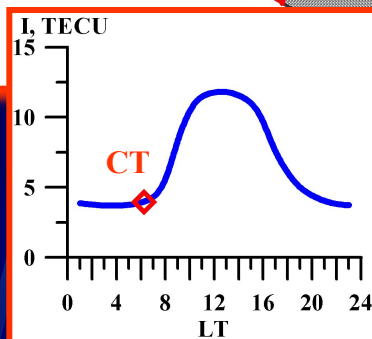
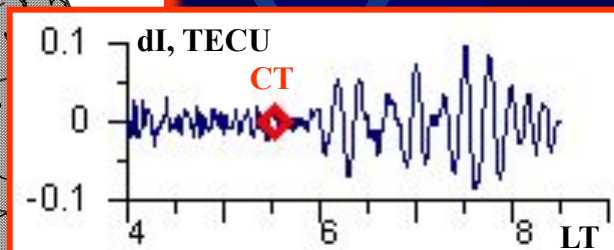
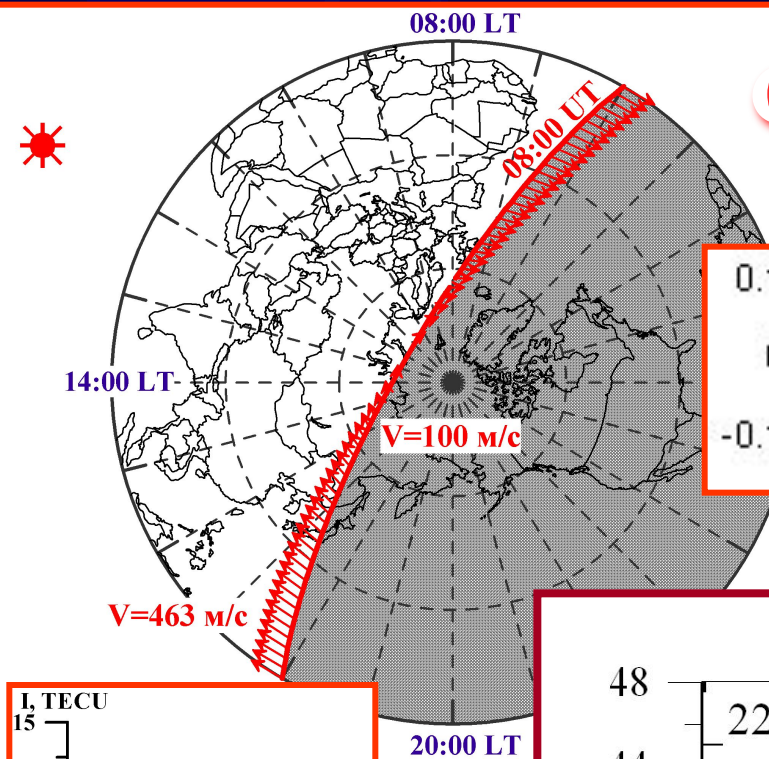
Ночная сторона



Максимальная фаза затмения



Солнечный терминатор



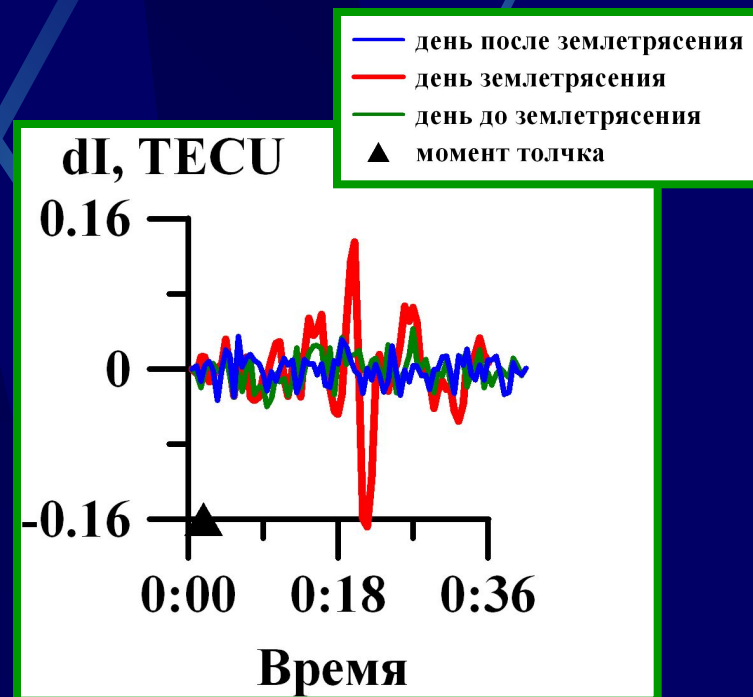
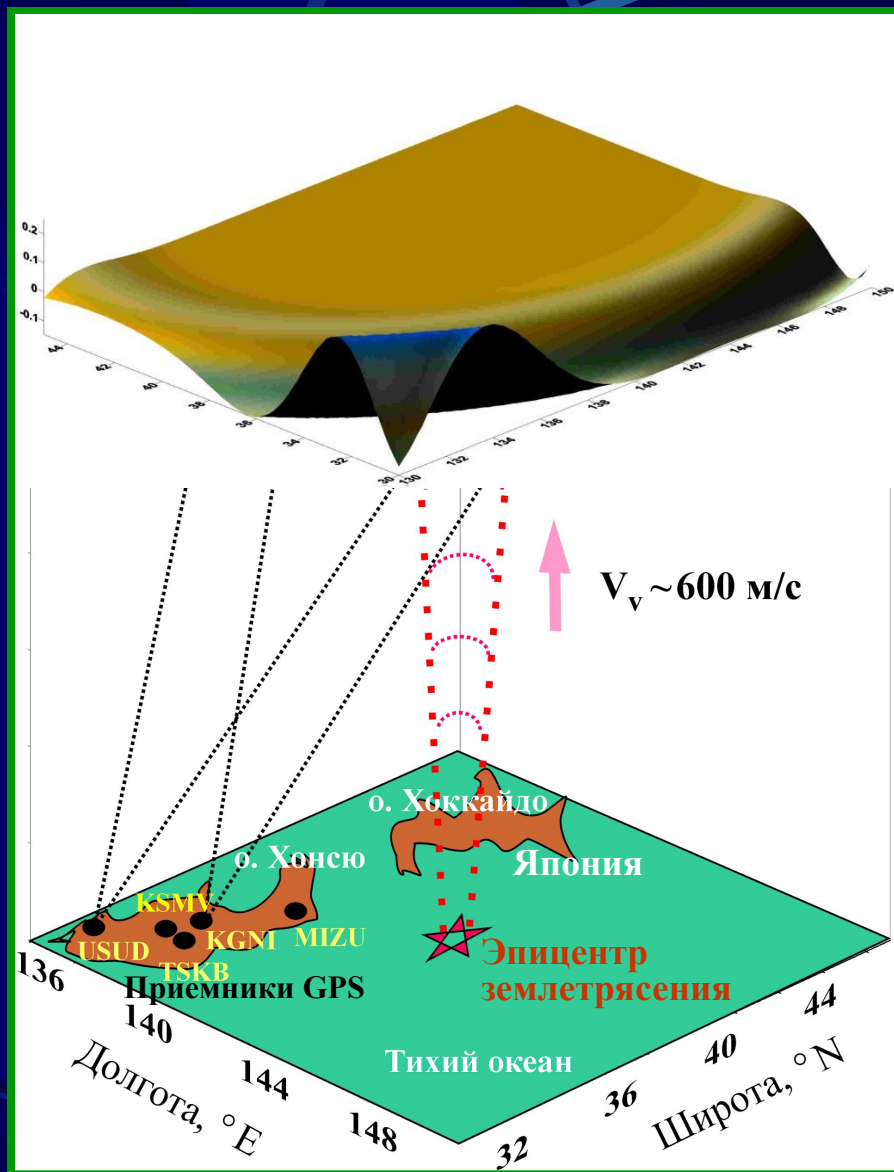
LT – местное время
UT – Гринвичское время

СТ – солнечный терминатор

[Запустить ролик](#)

Отклик ионосферы на землетрясения

Землетрясение 29 сентября 2003 г. в Японии



Поведение ПЭС во время землетрясения

$$1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ электронов/м}^2$$

Ионосферные эффекты при запусках ракет

Запуски с космодромов:

Байконур (Казахстан)

KSC (США)

Kodiak (США)

Jiuquan (Китай)

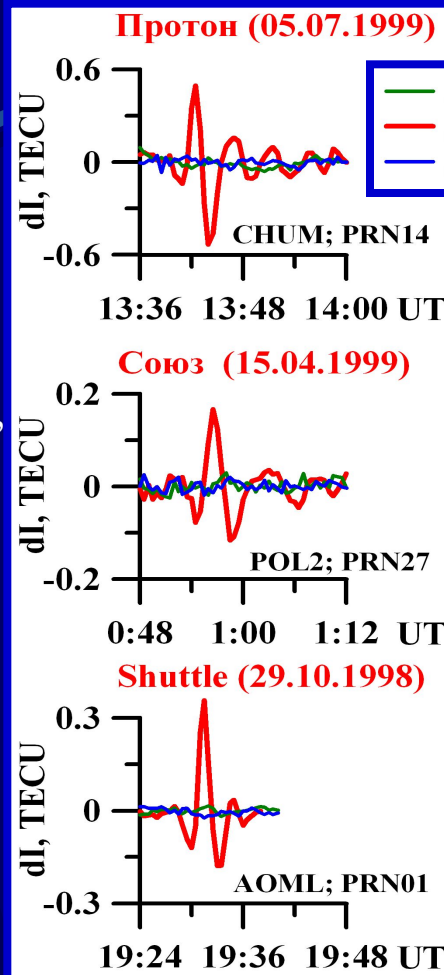
Запуски ракет:

"Протон", "Союз",

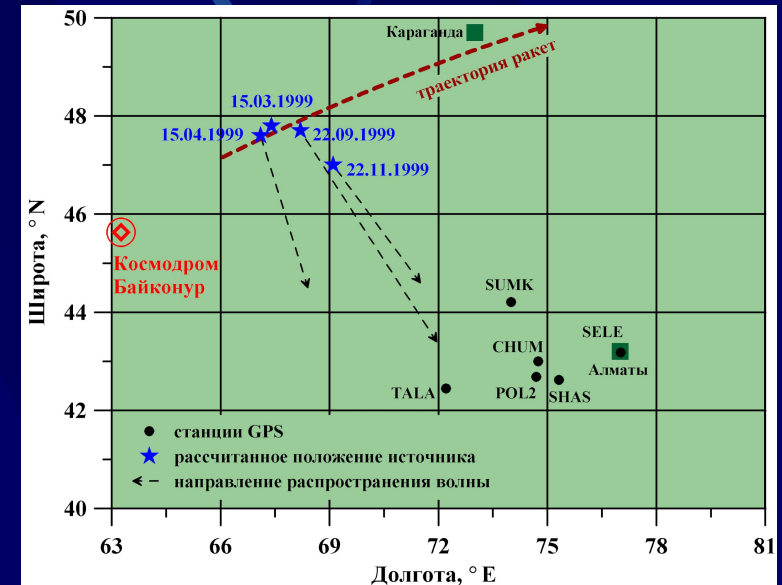
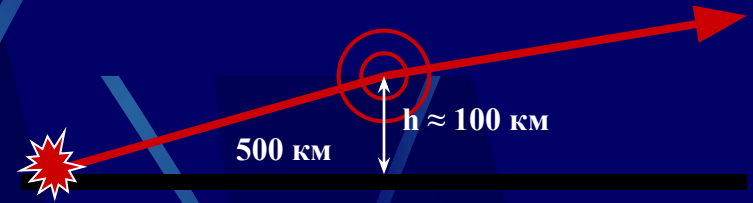
"Днепр", "Зенит",

"Space Shuttle", "Athena",

"Shenzhou"



Поведение ПЭС во время запусков ракет



Геометрия измерений при запусках ракет "Союз" с космодрома Байконур

Сбои измерений GPS

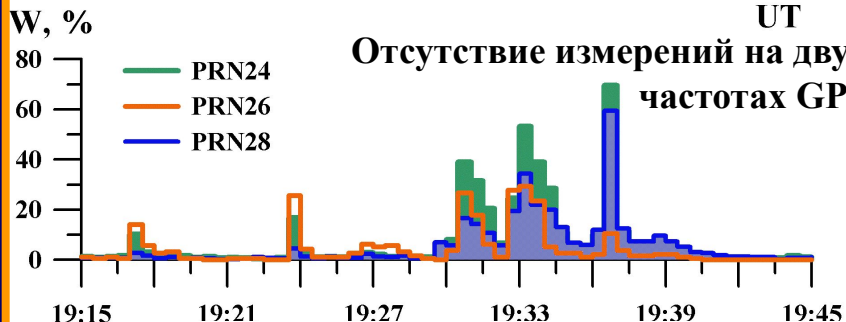
Сбой – отсутствие измерений на одной или двух рабочих частотах GPS

Вспышка 6 декабря 2006 г.

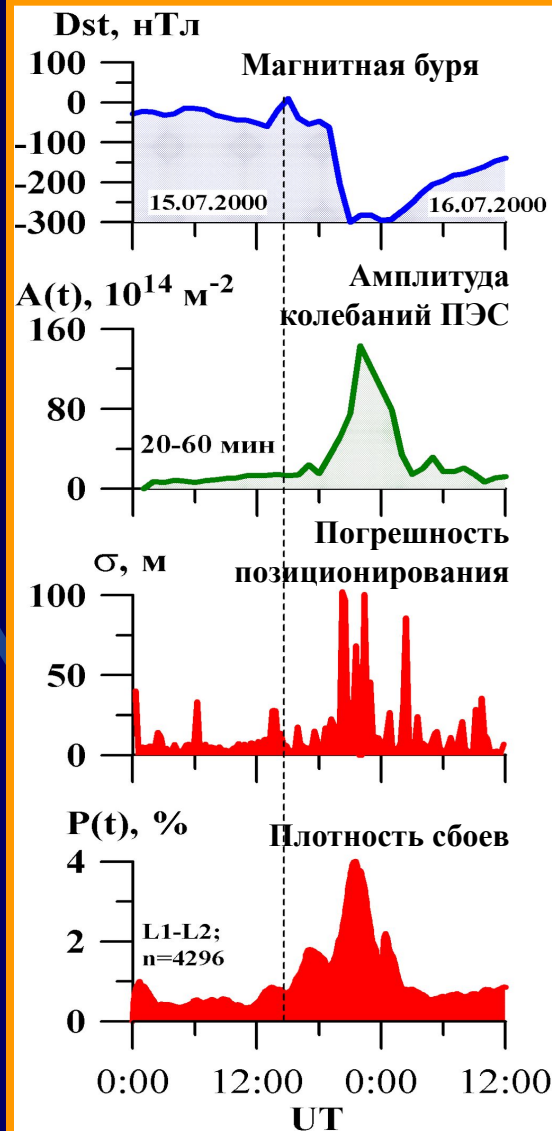
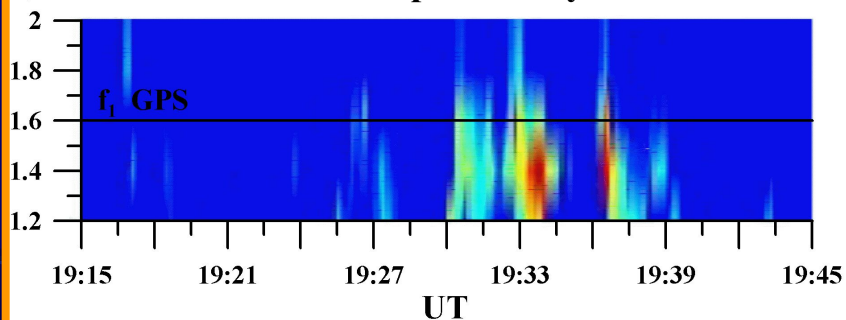
Плотность фазовых сбоев GPS



Отсутствие измерений на двух частотах GPS



Интенсивность радиоизлучения Солнца



Плотность сбоев – количество сбоев, усредненное по всем станциям и спутникам GPS

GPS открыла новую эру в дистанционной диагностике ионосферы.

Создана возможность для организации глобального непрерывного контроля за состоянием ОКП с высоким пространственно-временным разрешением, а также для прогноза космической погоды.



К новым открытиям!
Группа GPS-мониторинга, 2008 г.
<http://rp.iszf.irk.ru/gps>

Спасибо за внимание!

ИСЗФ СО РАН: <http://iszf.irk.ru>