

II Всероссийская школа молодых учёных «Системный анализ
динамики природных процессов в российской Арктике»

08 июня 2022 года

Высокоширотная ионосфера и полярные сияния

Александр А. Чернышов

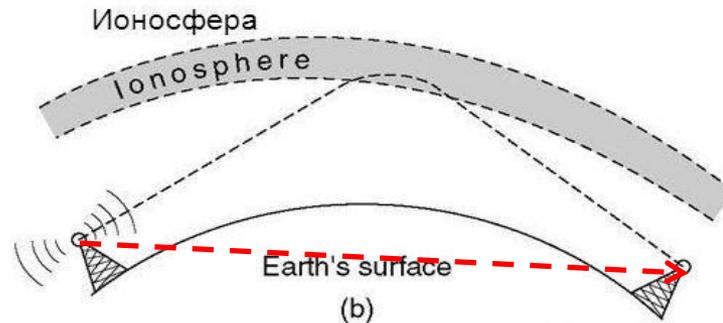
Институт космических исследований РАН

e-mail: achernyshov@iki.rssi.ru

История

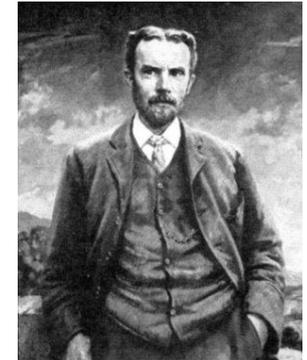


**Гульельмо
Маркони**



**Корнуолл
(Англия)**

**Ньюфаундленд
(Канада)**



**Оливер
Хевисайд**

Гаусс (Gauss), 1839 – деление магнитного поля Земли на внешнюю и внутреннюю составляющие по отношению к поверхности Земли.

Стюарт (Stewart), 1882 – вывод о существовании в атмосфере проводящей области, как он предполагал, на высоте ~ 70 км

После радиопередачи Маркони через Атлантический океан (1901 г.) вывод о наличие в небе отражающего слоя независимо сделали Кеннели (Kennelly), 1902, и Хэвисайд (Heaviside), 1902. Высоту отражения оценивали как ~ 80 км

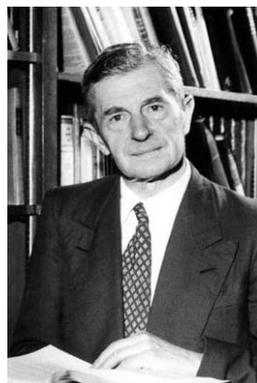
История

Прямое наблюдение слоя Кеннели-Хэвисайда (по анализу радиоотражений) произвёл Эпплтон (Appleton), 1925. Он назвал этот слой по одной из версии «слой E» (от Electric). Когда потом открыли слои выше и ниже слоя E, их назвали в алфавитном порядке – D, E, F

Теория деления ионосферы на слои принадлежит Чепмену (Chapman), 1931.



в 1947 году, Эдвард Эпплтон получил нобелевскую премию за изучение ионосферы



Сидни Чепмен



Виталий Лазаревич Гинзбург с учениками создал теорию распространения радиоволн в ионосфере

История

1926 году шотландский физик **Роберт Уотсон-Ватт** ввел термин **«ионосфера»** в письме, опубликованном только в 1969 году в журнале *Nature*:

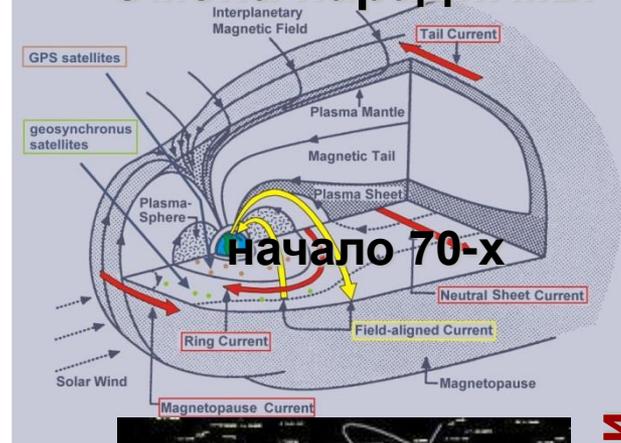
«We have in quite recent years seen the universal adoption of the term 'stratosphere'..and..the companion term 'troposphere'... The term 'ionosphere', for the region in which the main characteristic is large scale ionisation with considerable mean free paths, appears appropriate as an addition to this series.»



Долгое время считали, что сверху ионосфера бесструктурно сливается с межпланетной средой.

Всё изменилось в космическую эру, когда прямые спутниковые измерения выявили отчётливо разные «космические среды»: ионосферу, магнитосферу и солнечный ветер.

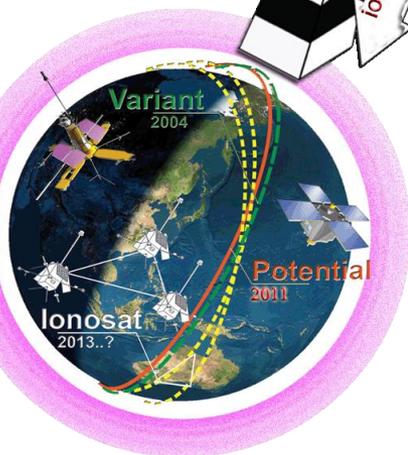
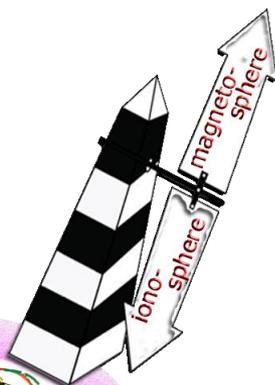
Смена парадигмы



до космической эры

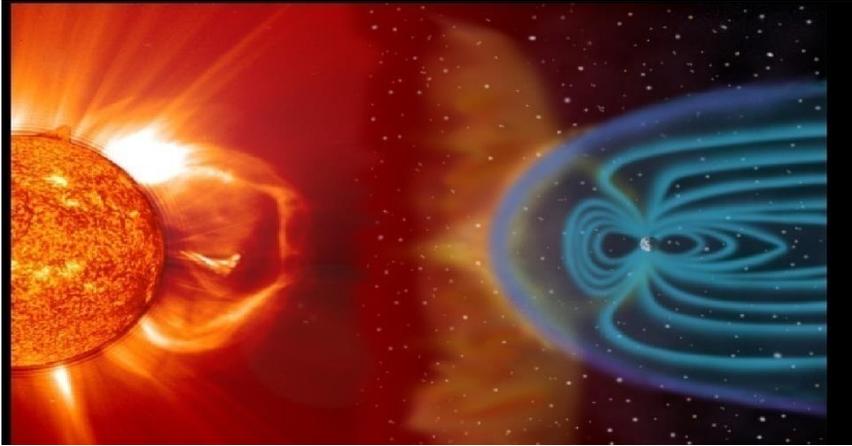
ось времени

Ионосфера – это область ионизированной атмосферы выше примерно 50-60 км, где плазма уже существенно влияет на распространение радиоволн.



Магнитное поле Земли и ионосфера

Магнитосфера Земли



Фундаментальная роль магнитного поля Земли в жизни цивилизации

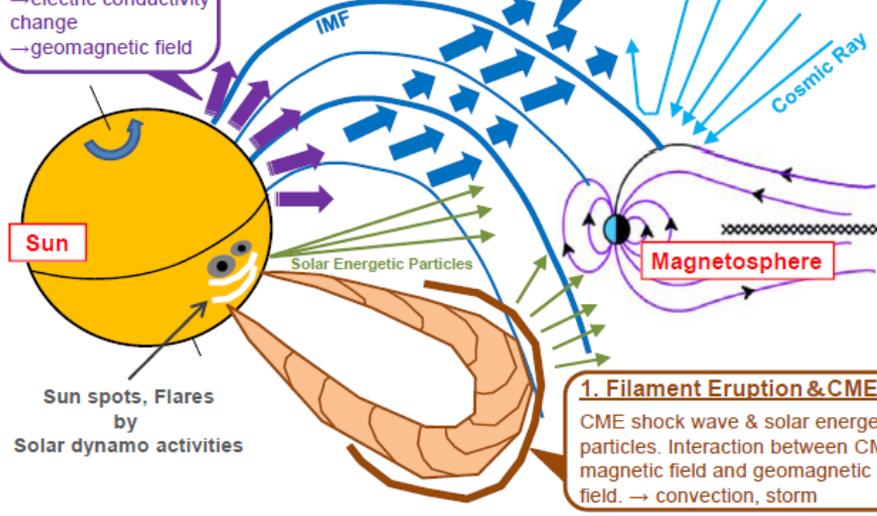
Three major elements of the solar activity to cause space weather change

3. Solar Radiation

UV, EUV, X-ray
→ionization and heating of ionosphere
→electric conductivity change
→geomagnetic field

2. Solar Wind

Interaction with IMF, CIR shock-wave
→electric field in the magnetosphere
→storm, substorm



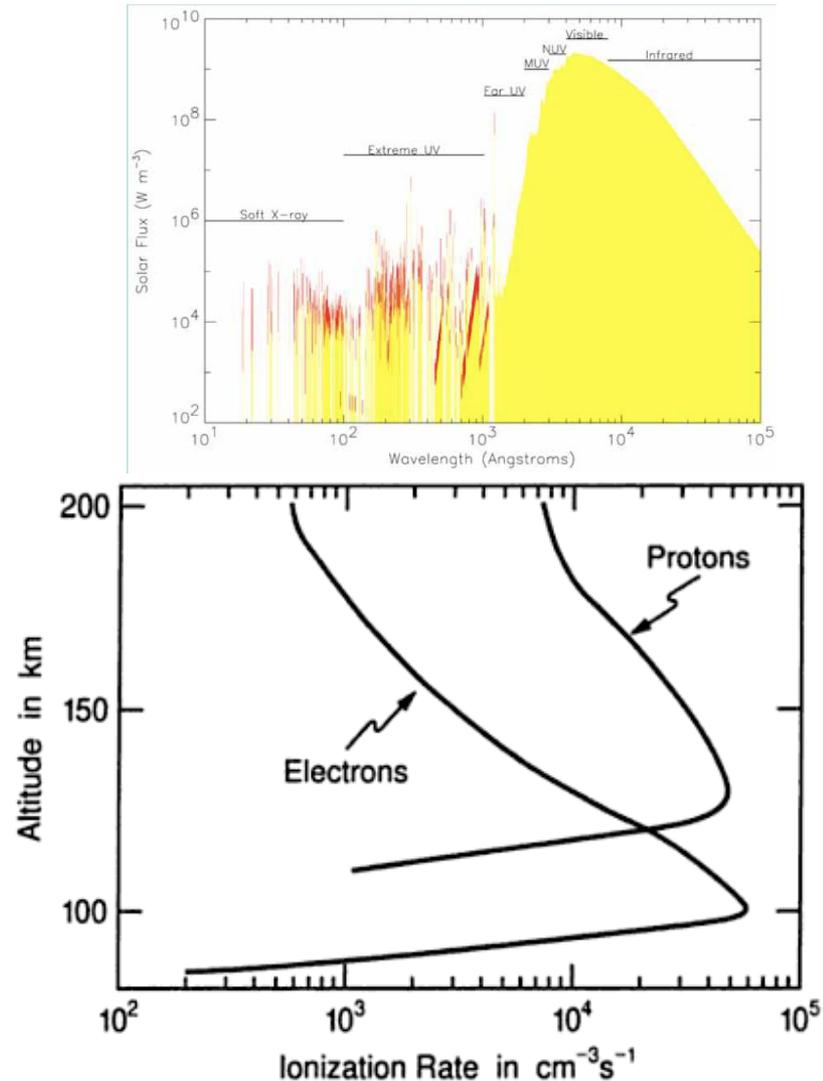
Ионосфера Земли связана с процессами на Солнце, в атмосфере и в магнитосфере

Формирование ионосферы?

Фотоионизация происходит под действием электромагнитного излучения главным образом с длиной волны $\lambda < 0,134$ мкм, т. е. за счет ультрафиолетового и рентгеновского излучения Солнца.

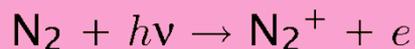
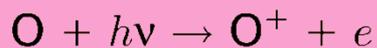
Ударная ионизация возникает при столкновении корпускулярных частиц молекулами или атомами газа. Ударная ионизация, обусловленная влиянием постоянного магнитного поля Земли, вносит значительный вклад в основном в полярных областях.

- а. Фотоионизация
- б. Ударная ионизация



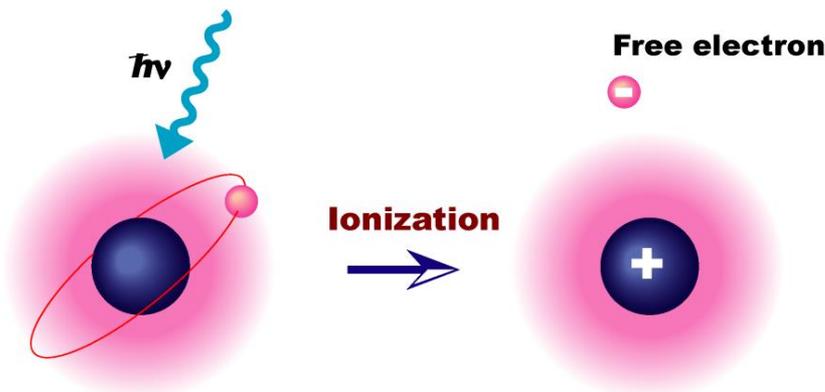
Образование ионосферы и внутренние процессы

Production of ion – electron pair



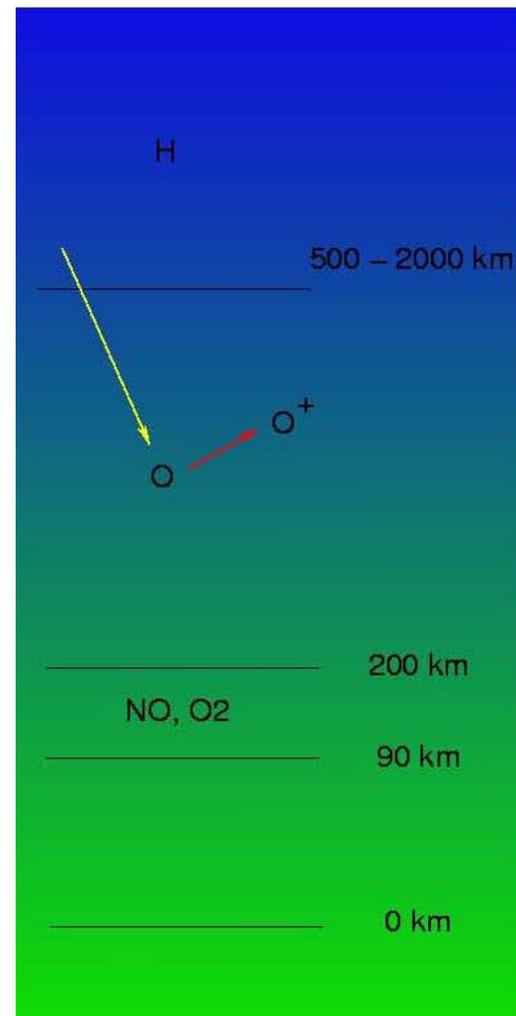
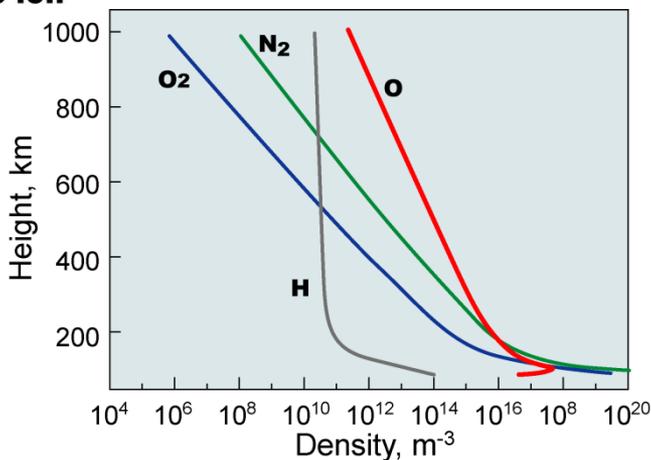
**Photoionization
(Ion production)**

Solar EUV flux



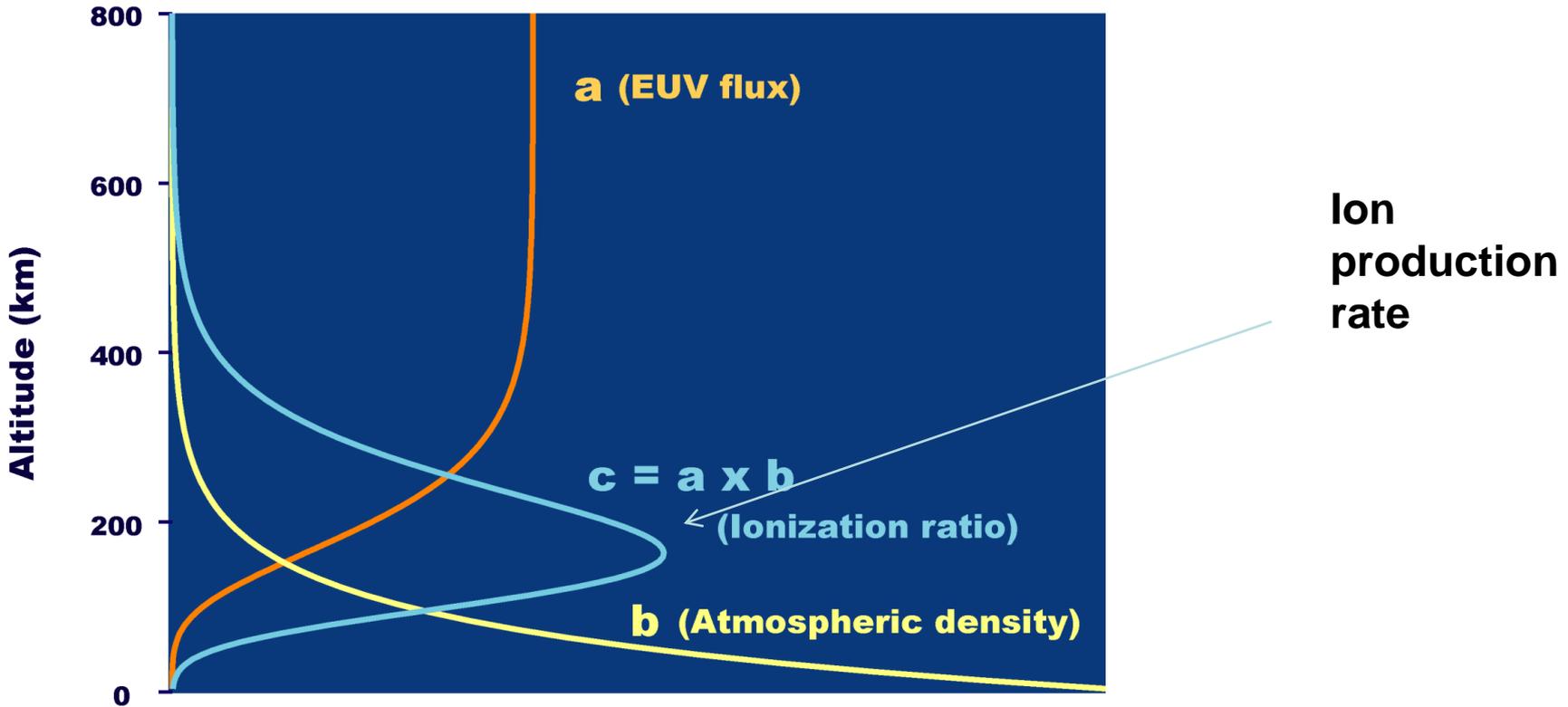
Atomic oxygen

Positive ion



Ионосфера

Ion Production by Solar EUV

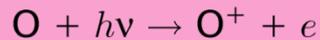


Ионосфера создается взаимодействием ионизирующего солнечного УФ-излучения и атмосферы Земли. Образуется слой плазмы на высоте 70-1500 км.

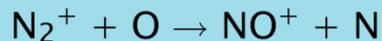
Таблица основных химических процессов

Квазинейтральность
концентрация ионов =
электронной
концентрации

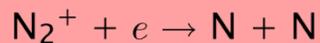
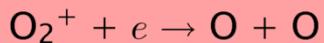
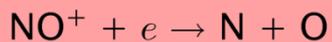
Major Ion Reactions in the F-region



**Photoionization
(ion production)**

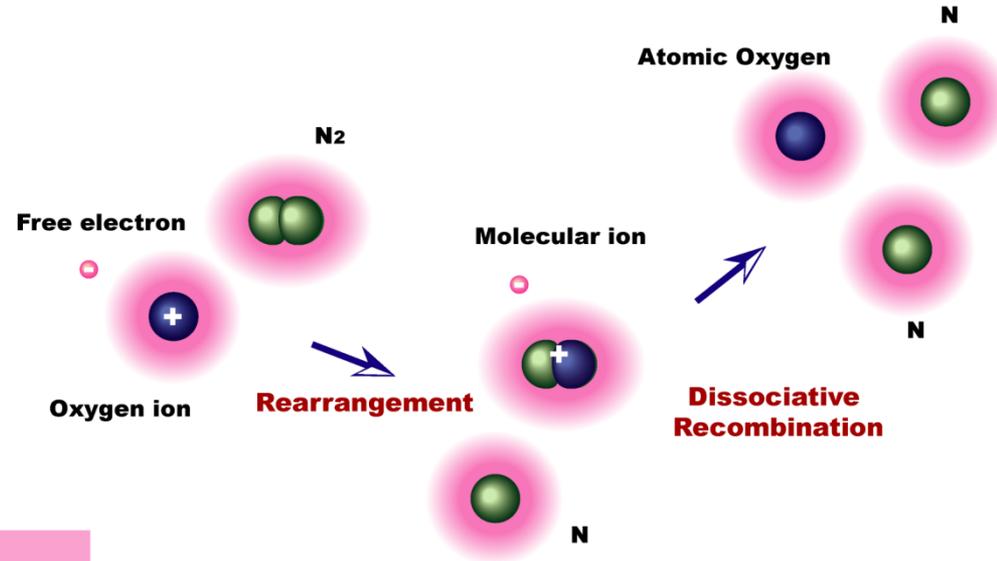


Rearrangement collision

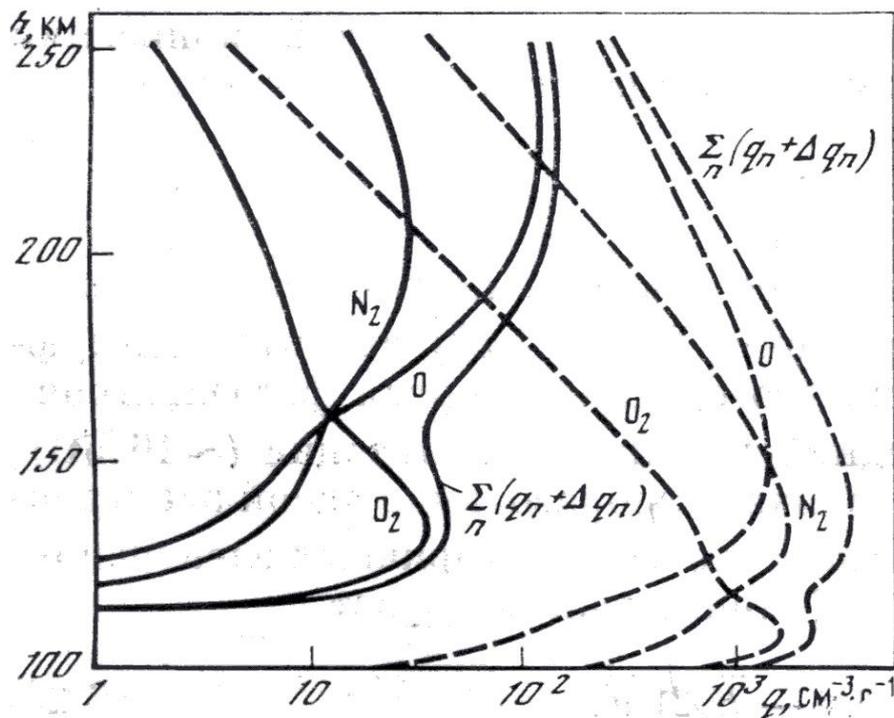


**Dissociative recombination
(ion loss)**

Ionospheric Loss Process



Если бы атмосфера состояла из единственного сорта газа, а солнечное излучение было бы монохроматическим, то функция ионизации (вертикальное распределение темпа ионизации) повторяло бы слой Чепмена для поглощённой солнечной энергии



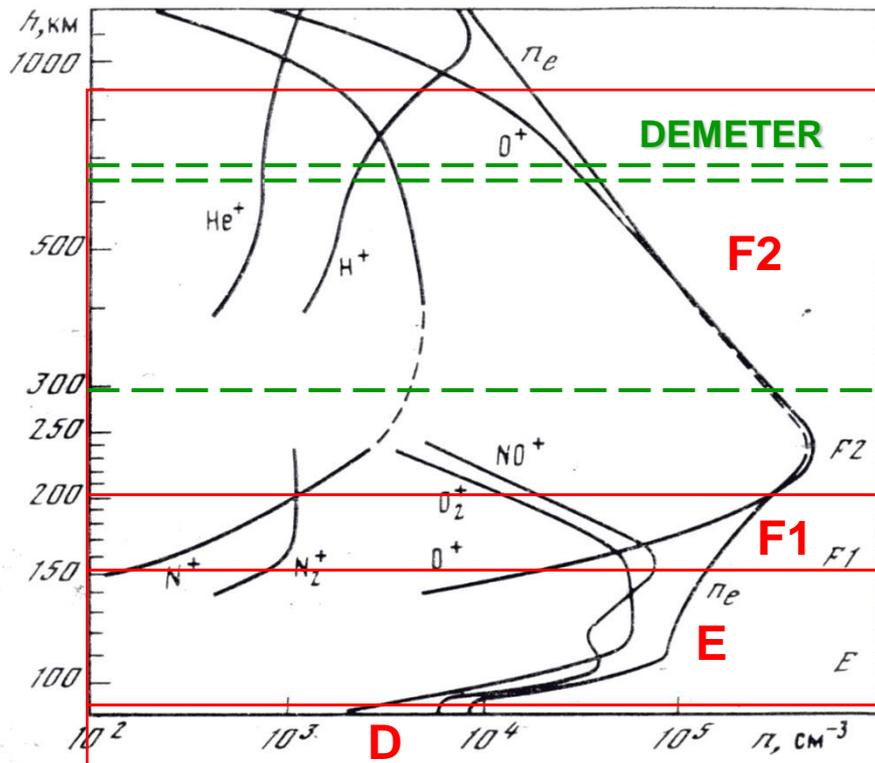
минимум солнечной
активности

На самом деле функция ионизации представляет собой суперпозицию индивидуальных (парциальных) слоёв Чепмена для всех частот падающего излучения и всех сортов ионизируемых частиц.

В результате выделяются локальные максимумы темпа ионизации:
от O_2 , от $\text{O} + \text{N}_2$

Морфологическая структура ионосферы

4 основные области ионосферы связаны с различными управляющими процессами. Эти процессы (а не простая дифференциация по высоте) лежат в основе деления ионосферы на области D, E, F1, F2 и на других



D-область. 50-90 км. $n_e \sim 10^2 - 10^4 \text{ см}^{-3}$
Управляющий процесс: β - рекомбинация.
Сложный ионный состав, ниже 75 км концентрация отрицательных ионов превышает концентрацию электронов.

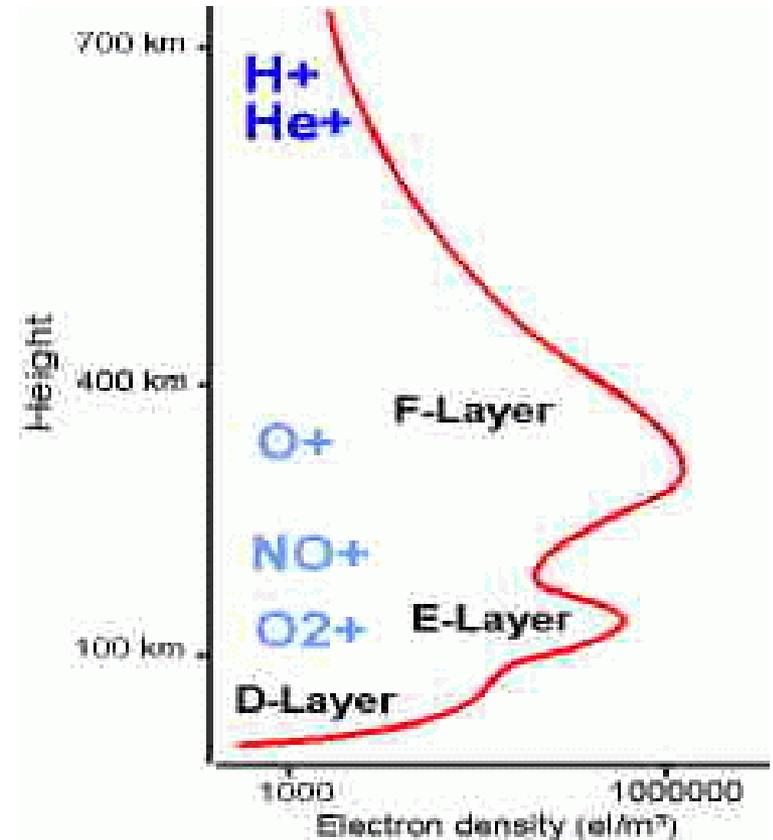
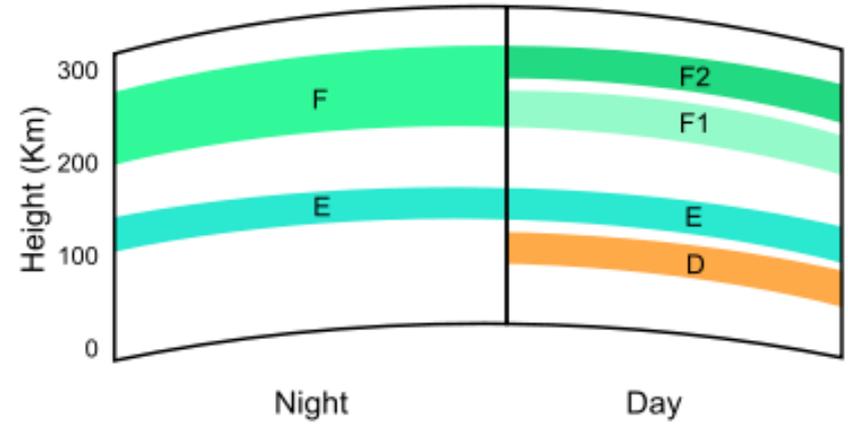
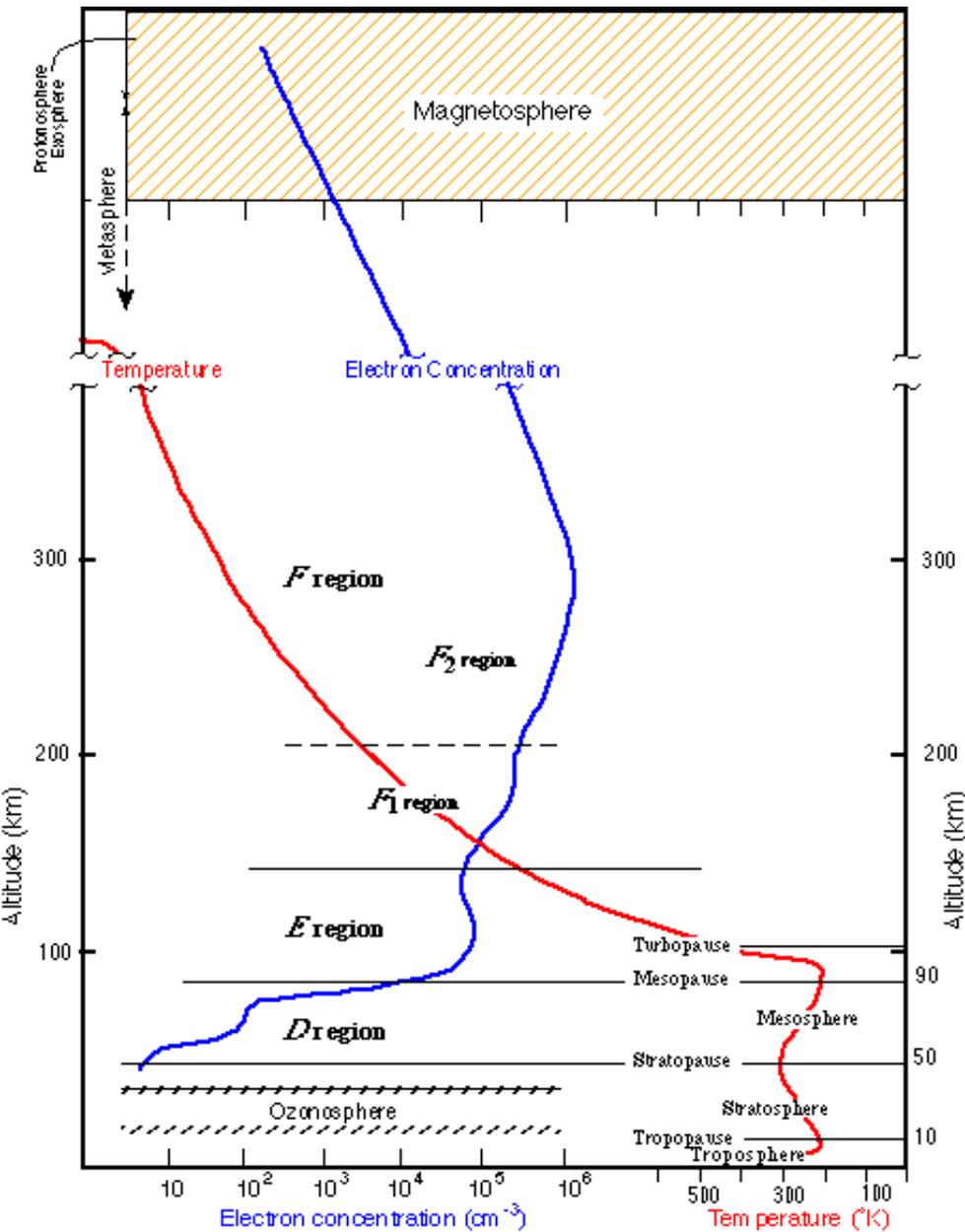
E-область. 90-140 км. $n_e \sim 10^5 \text{ см}^{-3}$
Управляющий процесс: α - рекомбинация.
Основные нейтралы O_2 , N_2 . Основные ионы O_2^+ , NO^+ .

F-область. тах концентрация $n_e \sim 10^6 \text{ см}^{-3}$
F1-слой 140-200 км. Управляющий процесс: β - рекомбинация. Основной O^+ .

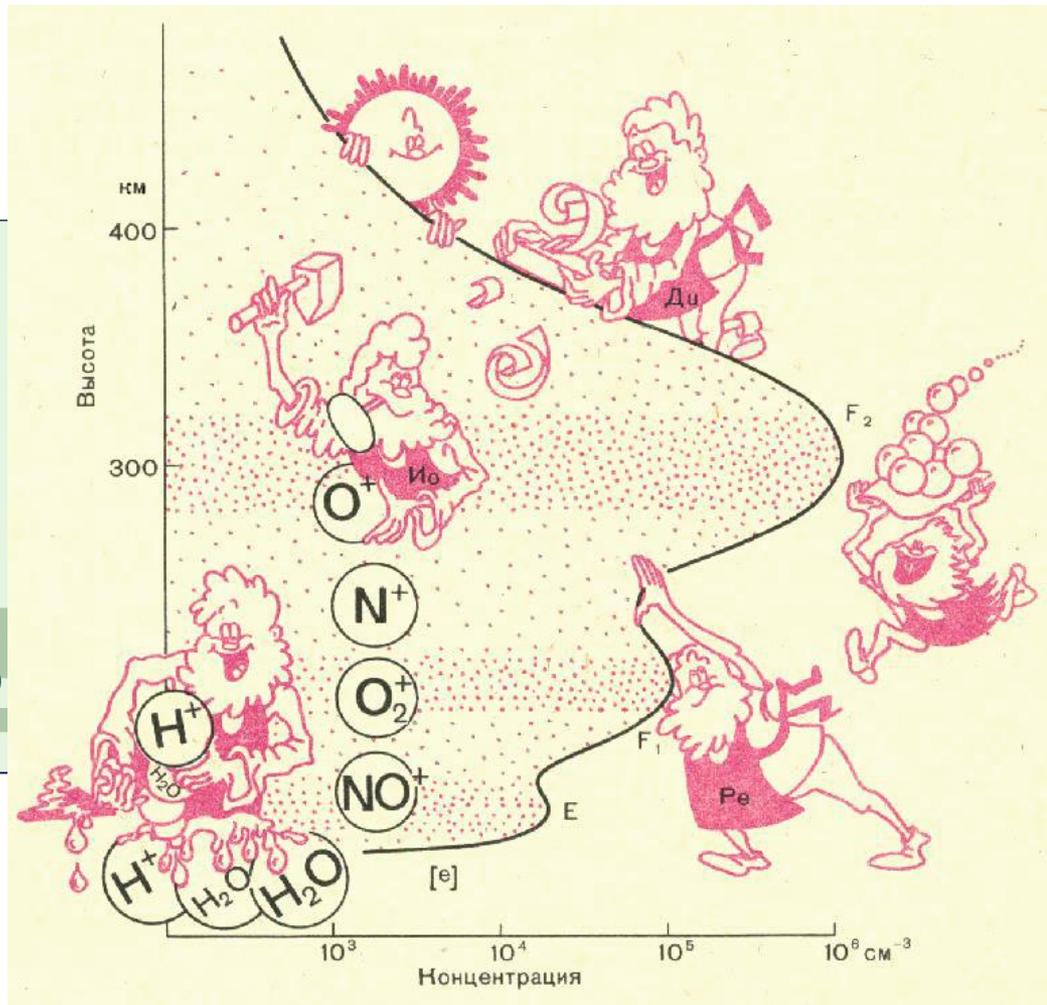
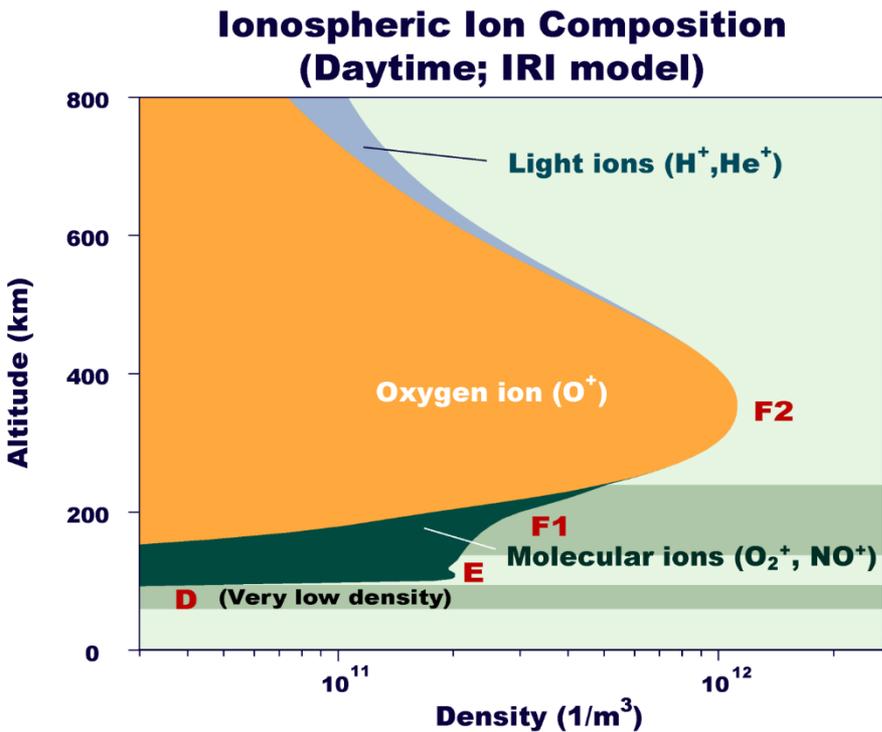
F2-область. 200-600 км. Область главного максимума в распределении электронной концентрации по высоте. Управляющий процесс: диффузионное (не рекомбинационное!) равновесие. Основной ион O^+ .

Выше 600 км ионосферу часто называют внешней (topside) ионосферой.

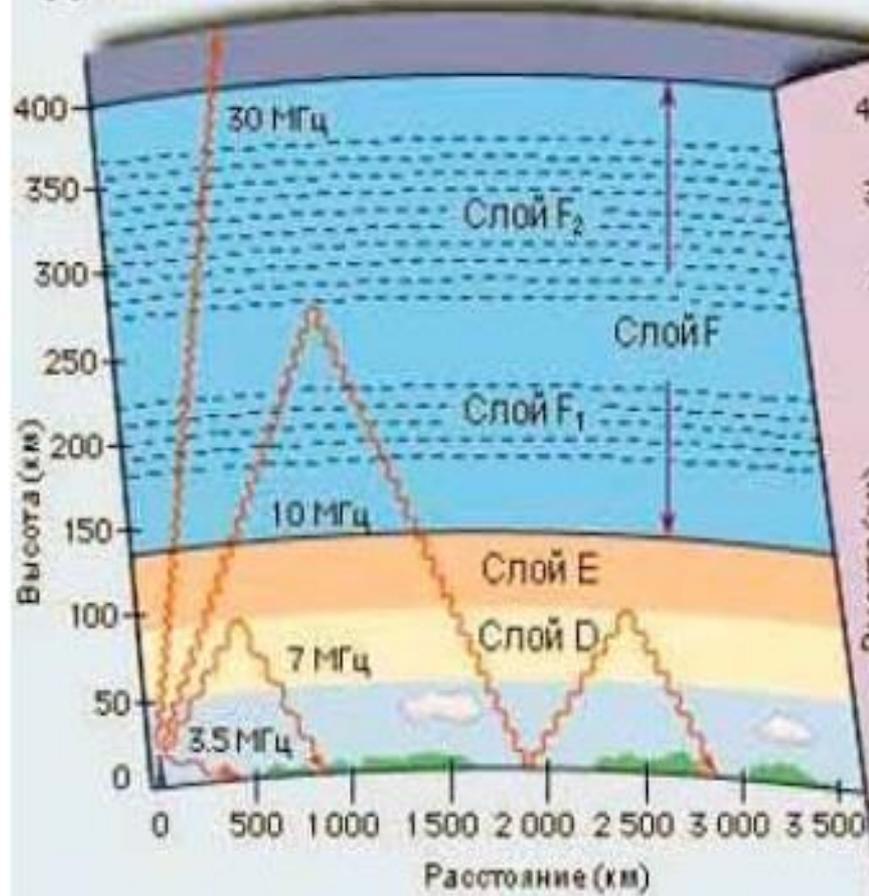
Структура ионосферы – слои



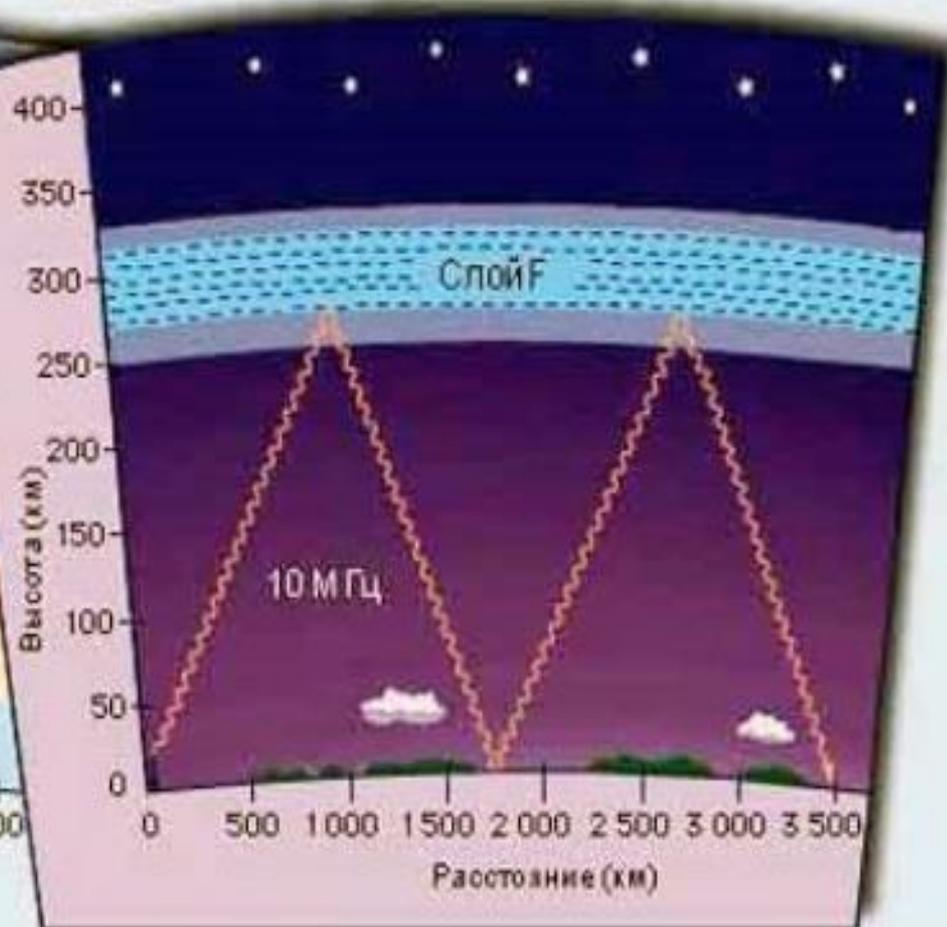
Ионосфера



День



Ночь



Прикладные аспекты



Ионосфера

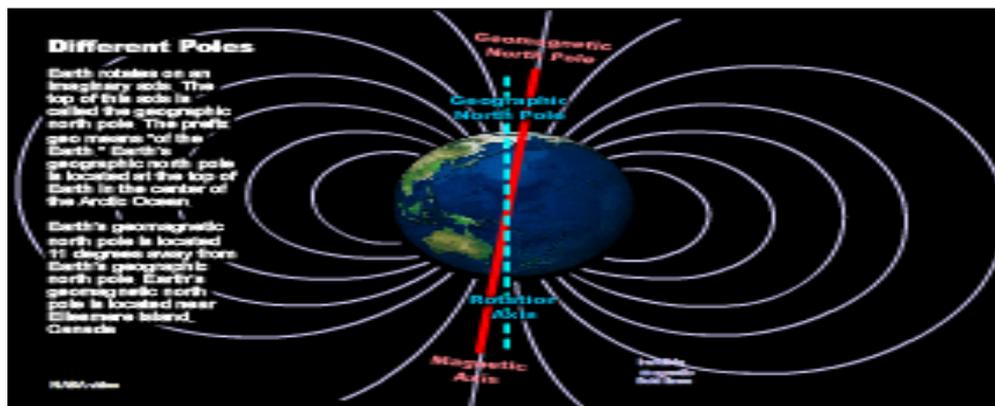
Высокоширотная

Среднеширотная

Экваториальная

Для среднеширотной ионосферы существует модель IRI.

Экваториальная и высокоширотная ионосфера наиболее нестационарные и неоднородные области, что приводит, в частности, к увеличению погрешностей при использовании навигационных систем GPS/ГЛОНАСС.



Задачи. Неоднородности естественного происхождения

Задачи

Высокоширотная
ионосфера

Экваториальная
ионосфера

Среднеширотная
ионосфера

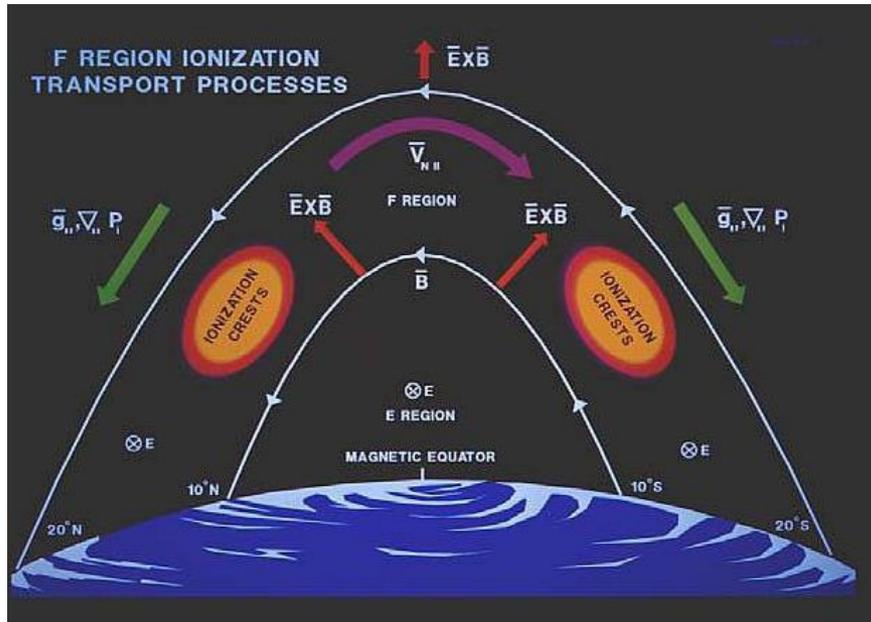
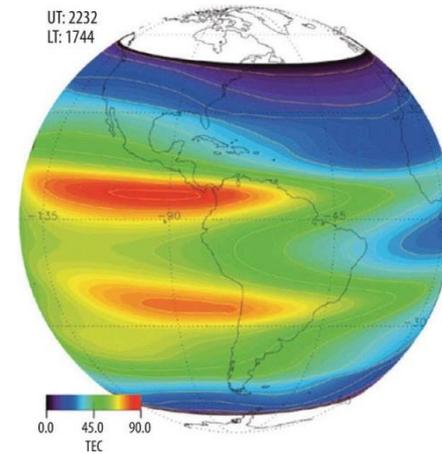
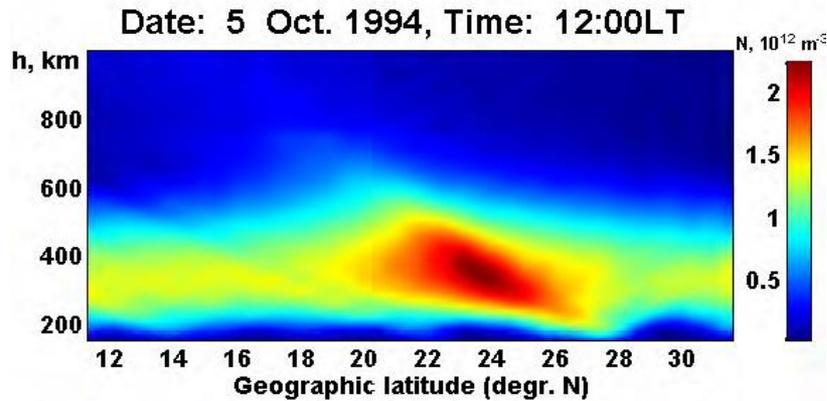
- Неоднородная структура полярной границы
- Авроральная область
- Поляризационный джет
- Касп
- Полярная шапка

- Бабл (пузырь) в экваториальной части ионосферы
- Экваториальная аномалия
- Экваториальный электроджет

- Неоднородность среднеширотной ионосферы. Балдж и его свойства

Экваториальная ионосфера.

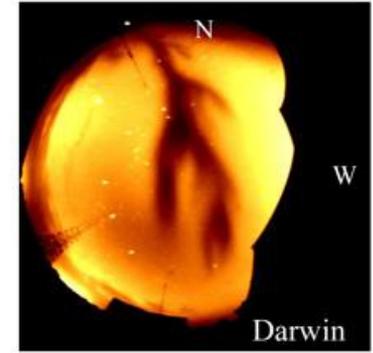
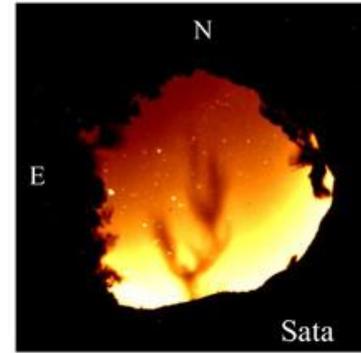
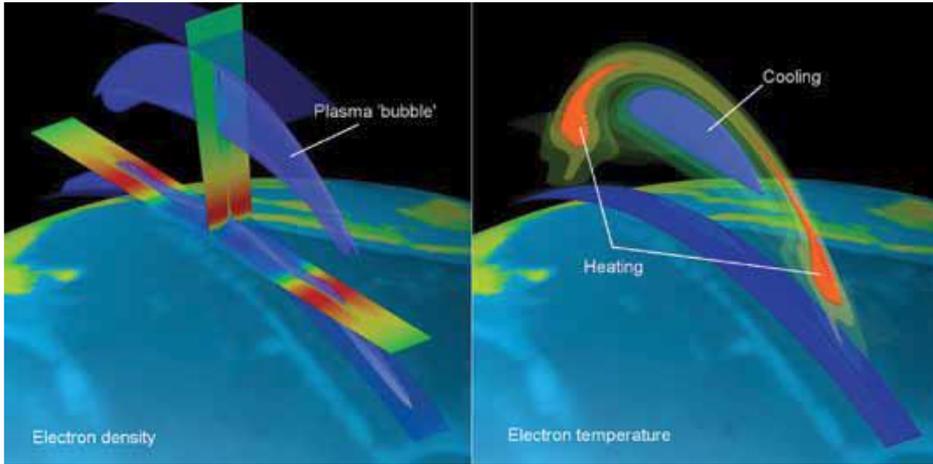
Экваториальная аномалия



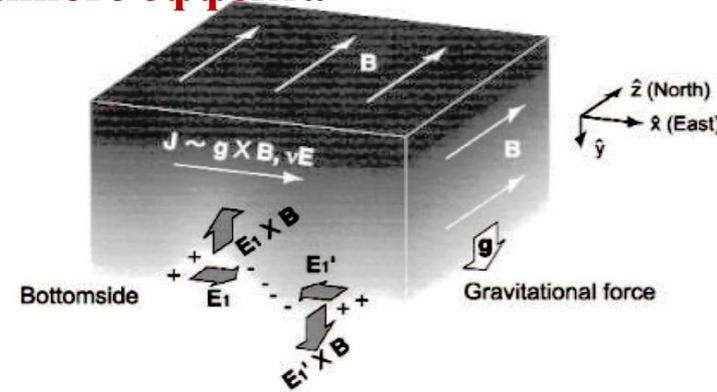
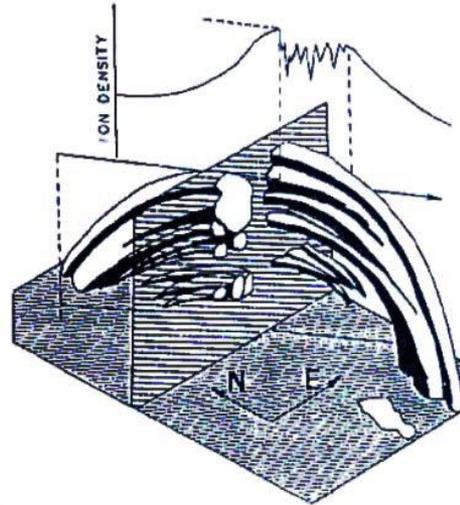
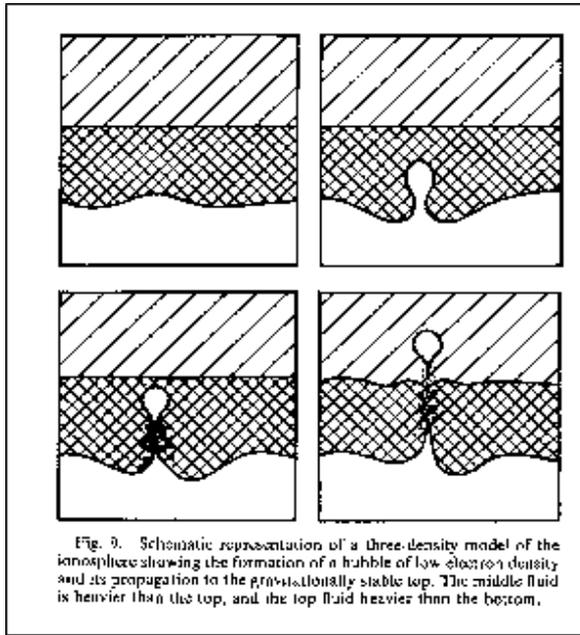
В экваториальной области могут наблюдаться высокие значения электронной плотности. Совокупный эффект высокого уровня излучения от Солнца и электрического и магнитного полей Земли приводит к росту и движению электронов вдоль горизонтальных линий магнитного поля. В экваториальной области ионосферы днем по обе стороны от геомагнитного экватора на широтах 10-20 градусов образуются максимумы ионизации. Это явление известно как **экваториальная аномалия**.

Экваториальная ионосфера: плазменный пузырь

Уменьшение плотности плазмы в
экваториальной ионосфере



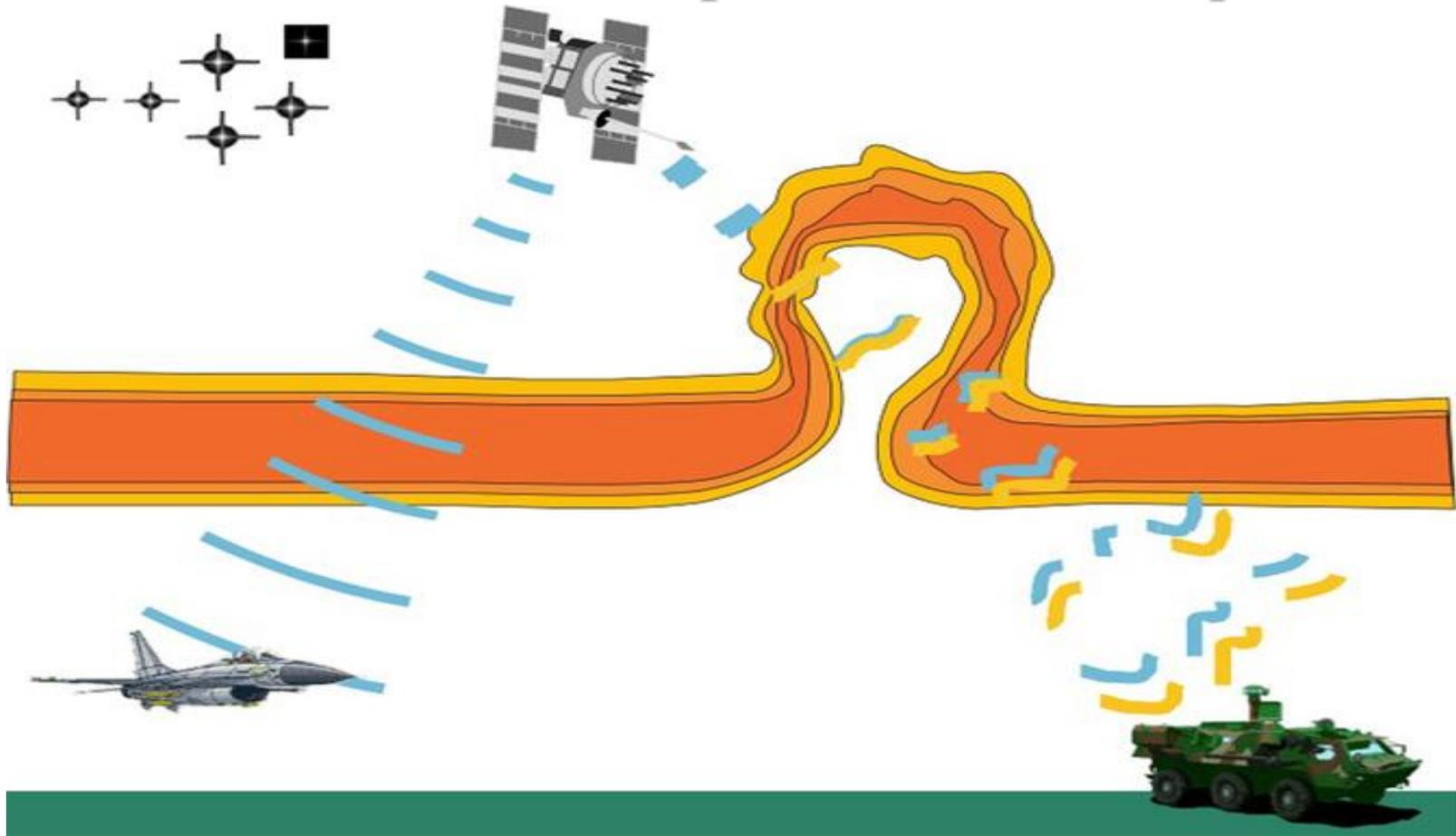
Неустойчивость Релея-Тейлора
как возможное объяснение
данного эффекта



Woodman, La Hoz, 1976

Баблы (пузыри) плотности плазмы имеют характерную структуру, развиваются вдоль магнитной силовой линии

Влияние неоднородностей. Плазменный пузырь. Анаконда - военная операция США в Афганистане



[Kelly et al., 2014] показано влияние ионосферных неоднородностей на продолжительную потерю функционирования наземной связи между войсковыми подразделениями во время военной операции Анаконда (4 марта 2002 г.), которая привела к потерям техники и человеческим жертвам

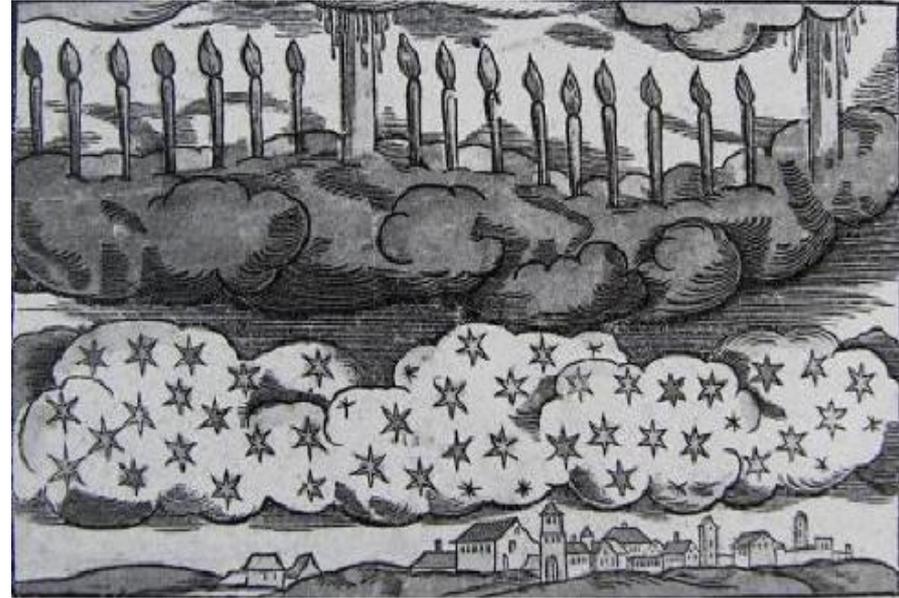
Высокоширотная ионосфера

Авроральная ионосфера

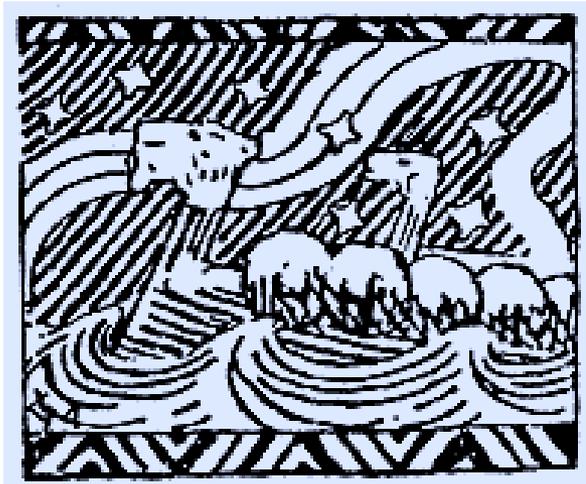


Полярные сияния – самое красивое природное явление

Мифологический период



Аврора над Нюрнбергом (Nürnberg) в Германии, 1591.



Норвежский корабль, авроральная дуга и созвездие «Большая медведица».

Мифология



Число документированных наблюдений,
200 Р.Х.-1500 А.Д.:

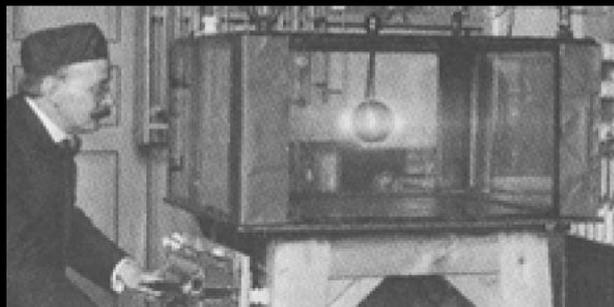
Европа ~ 300, Китай ~ 400

Связь с электричеством

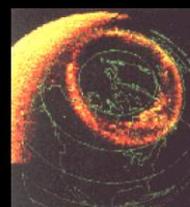
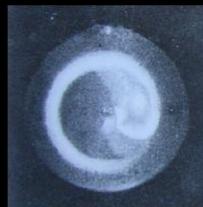
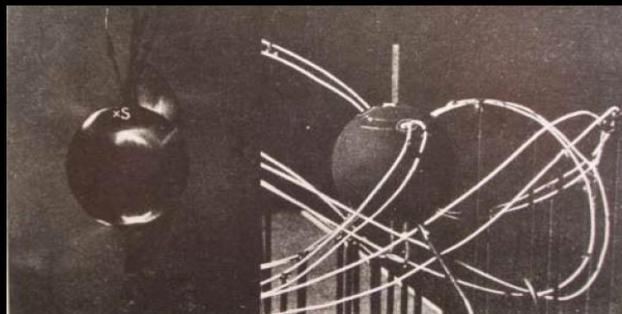
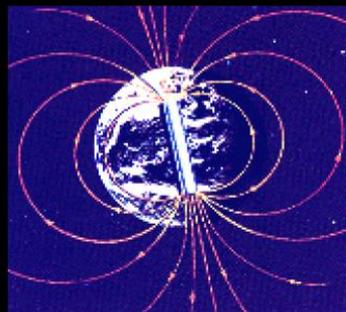
Михаил Ломоносов (1743) считал, что полярные сияния образуются «движением эфира», что в современной терминологии означает движение электрических зарядов.



Выдающиеся норвежцы: Штормер и Биркеланд

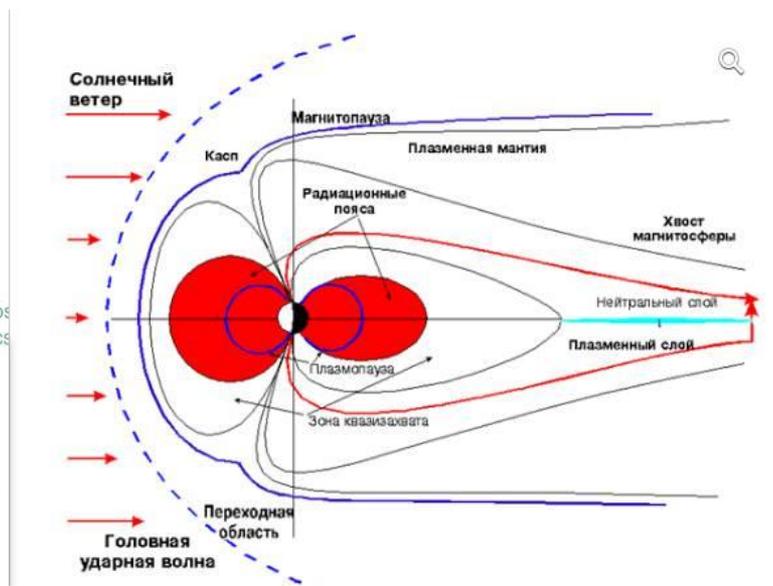
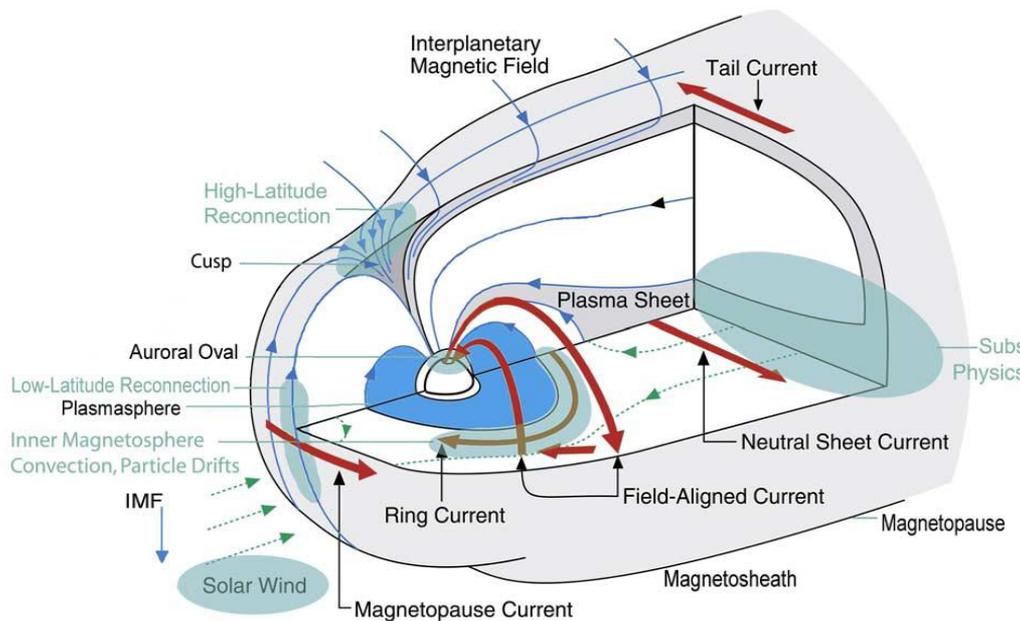
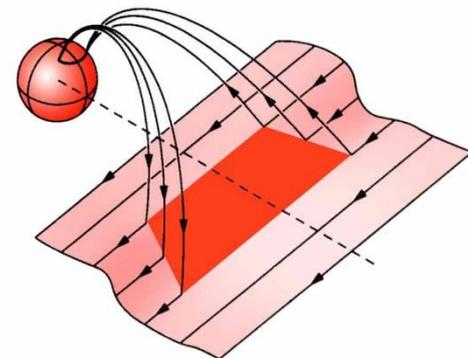
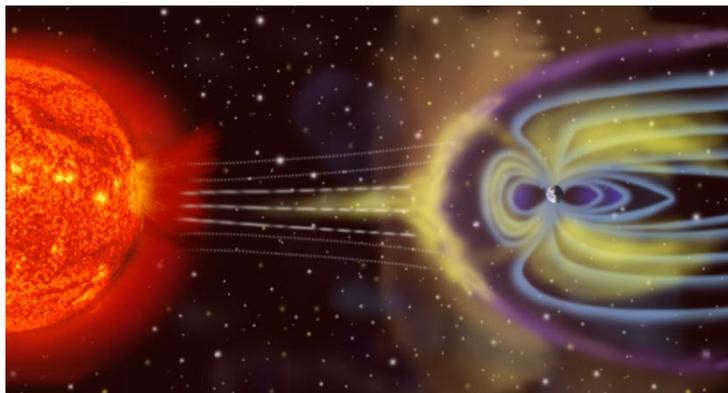


К.Биркеланд и его установка «террелла»

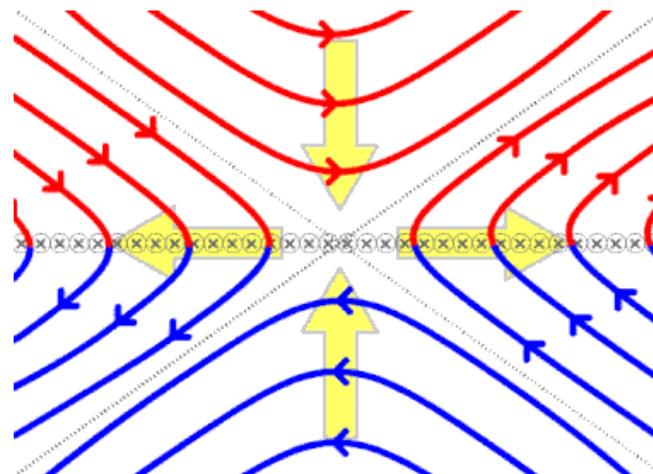
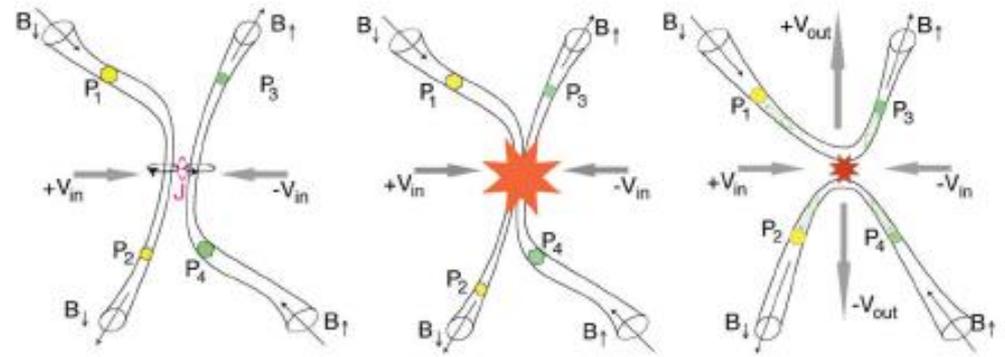
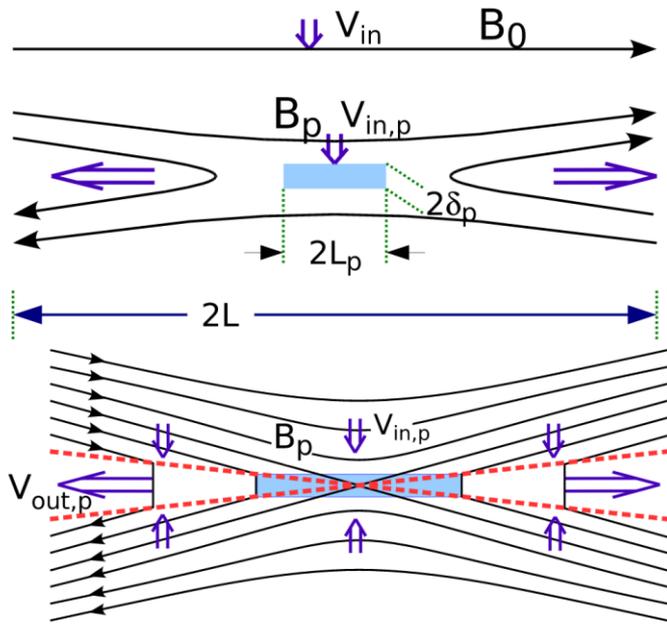


Штормеровские траектории заряженных частиц

Солнце – основной источник частиц и энергии



Магнитное пересоединение



«Высота» полярных сияний

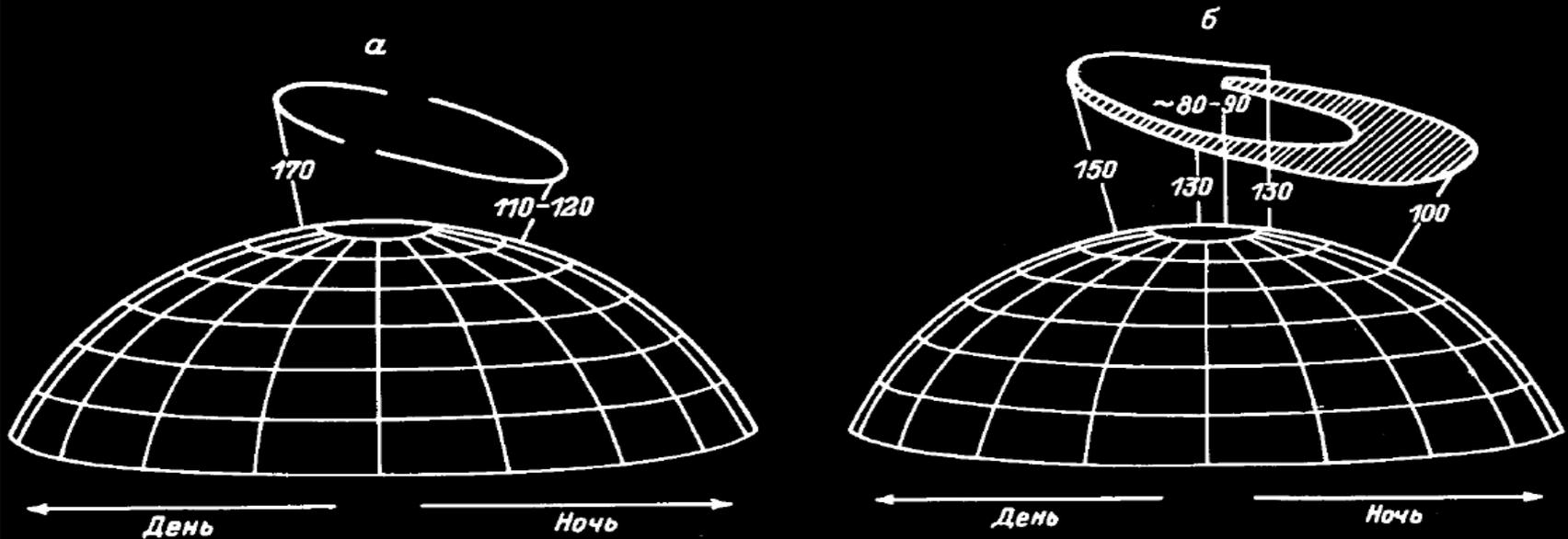
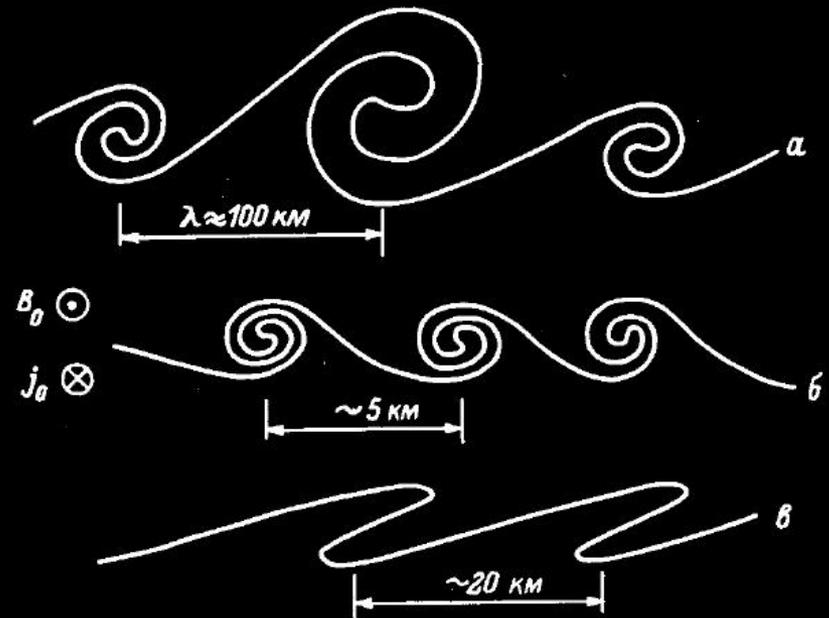


Схема расположения овала сияний над полярной шапкой для спокойных (а) и возмущенных (б) условий [Старков, 1974].

Классификация Дэвиса и Халлиана

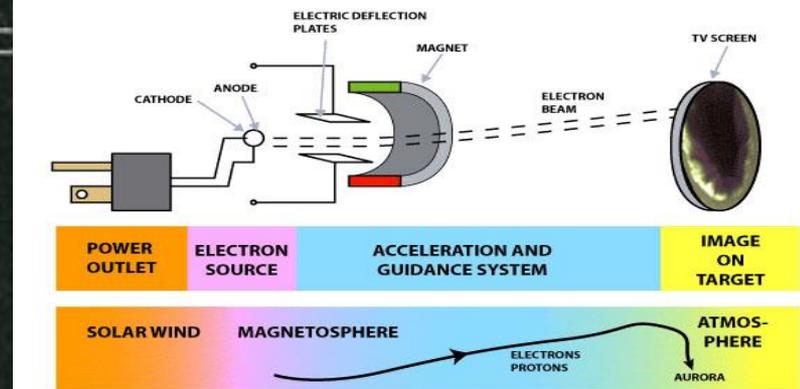
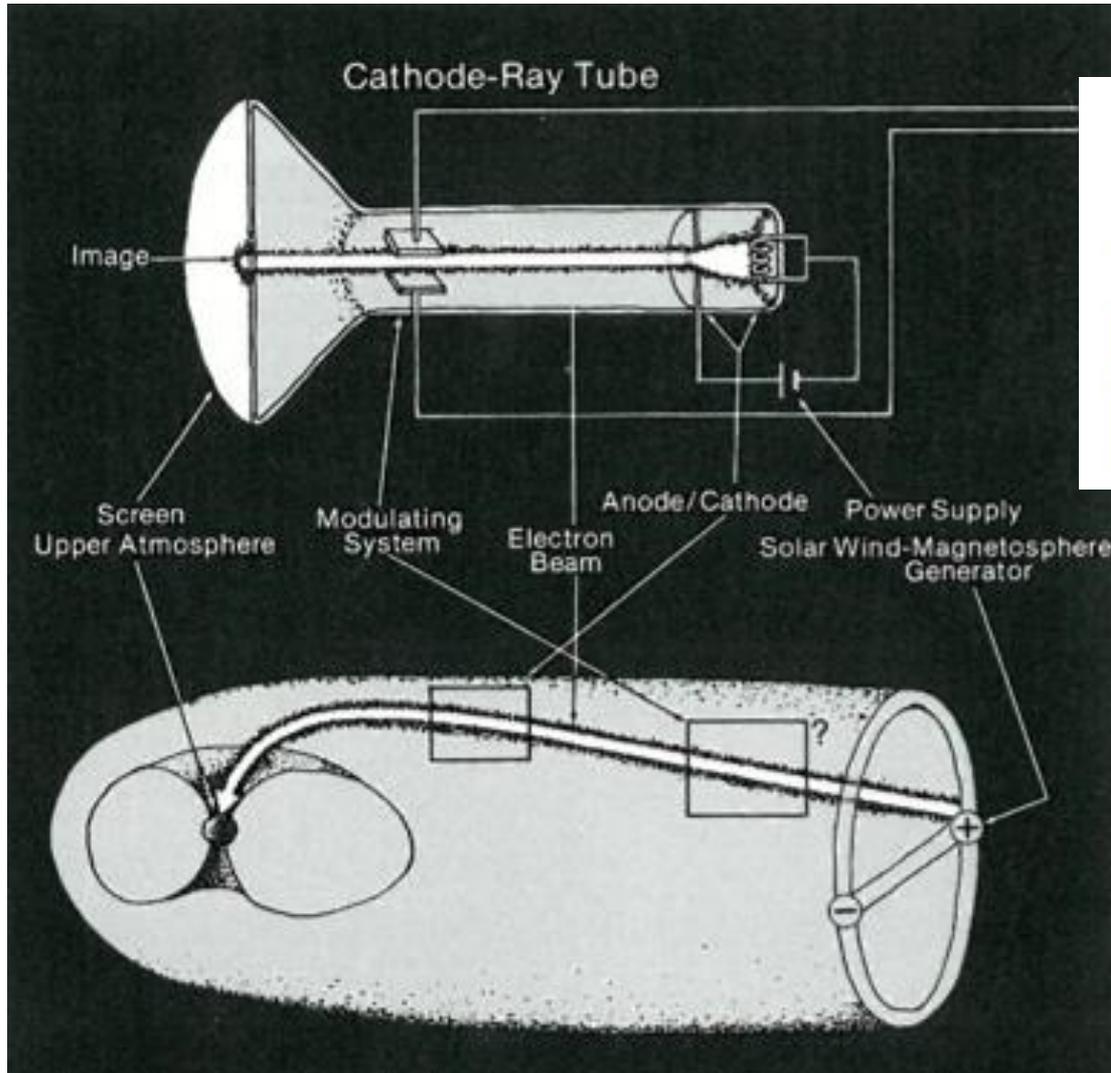
- пространственный масштаб
- время жизни
- направление закручивания
- обратимость



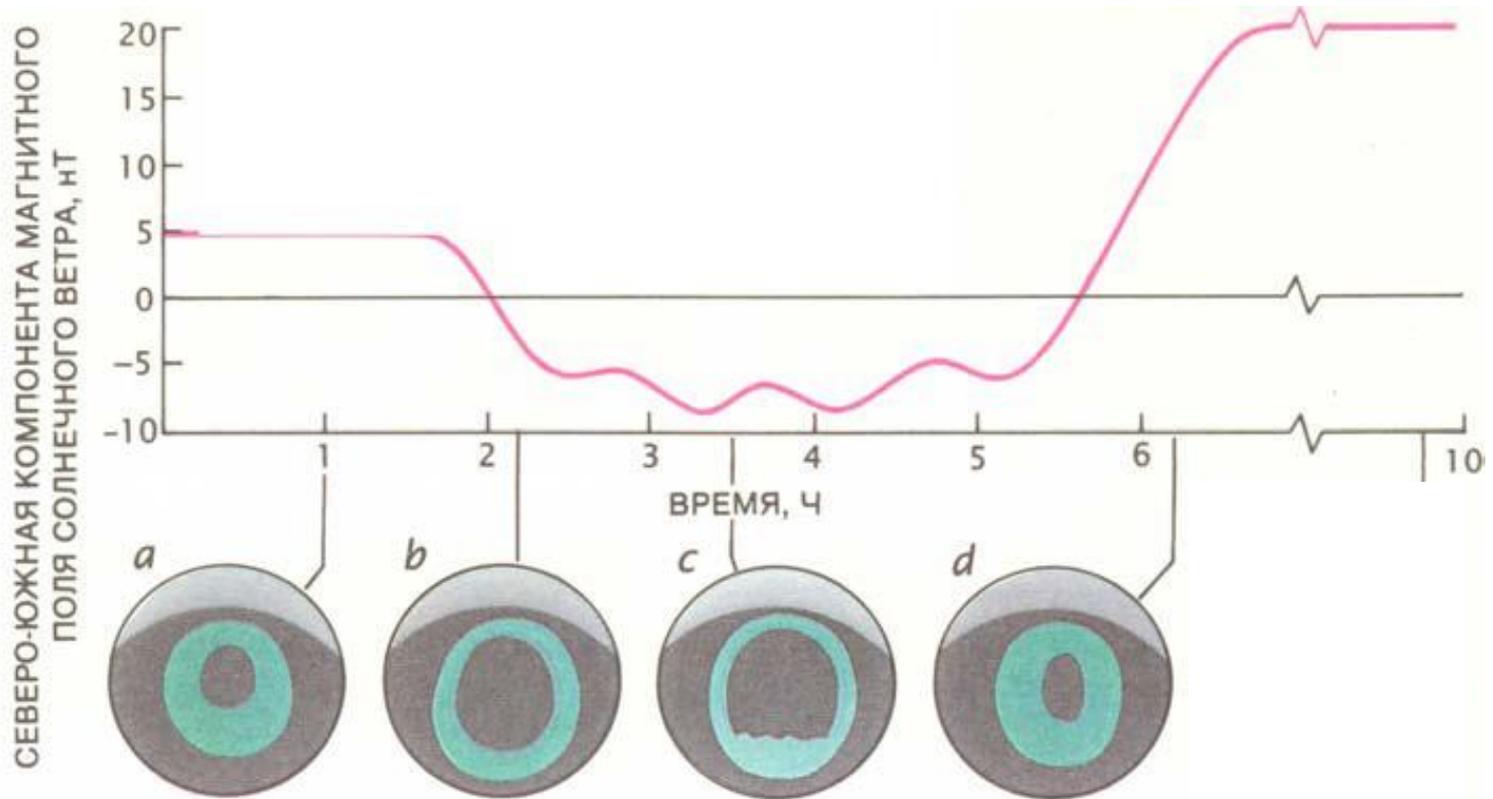
Три типа элементарных деформаций
авроральных дуг, сверху - вниз:
спирали, вихри, складки.



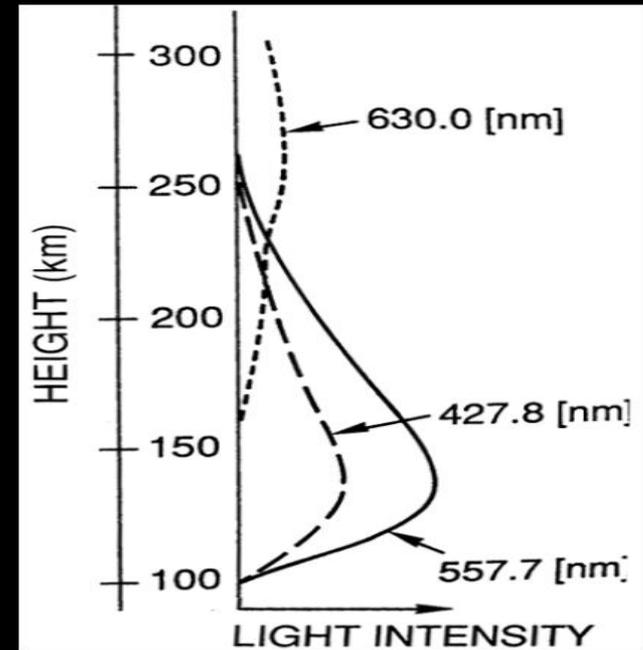
Аналогия с электронно-лучевой трубкой



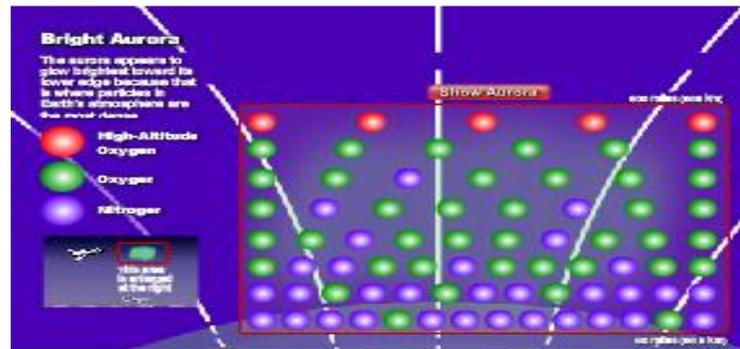
ДИНАМИКА ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ



Почему разные цвета?



Красная линия (630.0 нм), $O(^1D)$ - порог ~ 1.9 эВ, время жизни ~ 100 с
 Зеленая линия (557.7 нм), $O(^1S)$ - порог ~ 4.17 эВ, время жизни ~ 0.7 с
 Голубая линия (427.8 нм), $N_2^+(B^2\Sigma_u^+)$ - порог ~ 18.8 эВ, время жизни $\sim 10^{-4}$ с

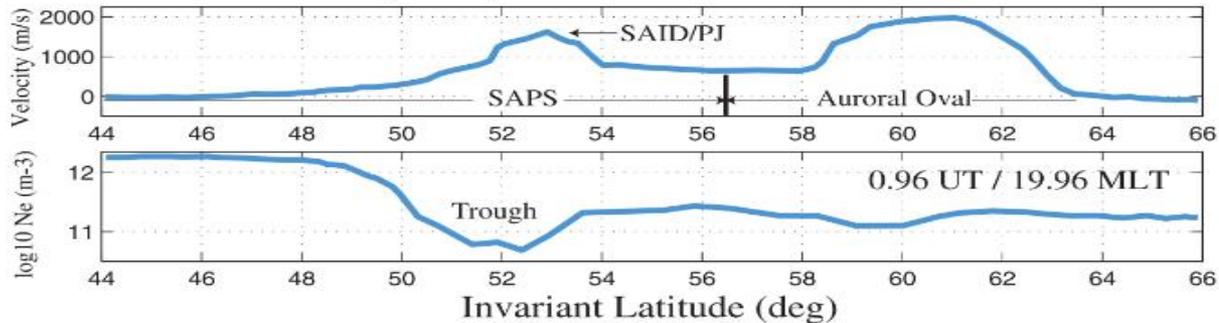


Авроральные явления – не только оптические свечения!

- Возмущения магнитного поля
- Ионизация верхней атмосферы
- Генерация электромагнитных и электростатических волн
- Возмущения в прохождении радиоволн
- Влияние на технические вещи

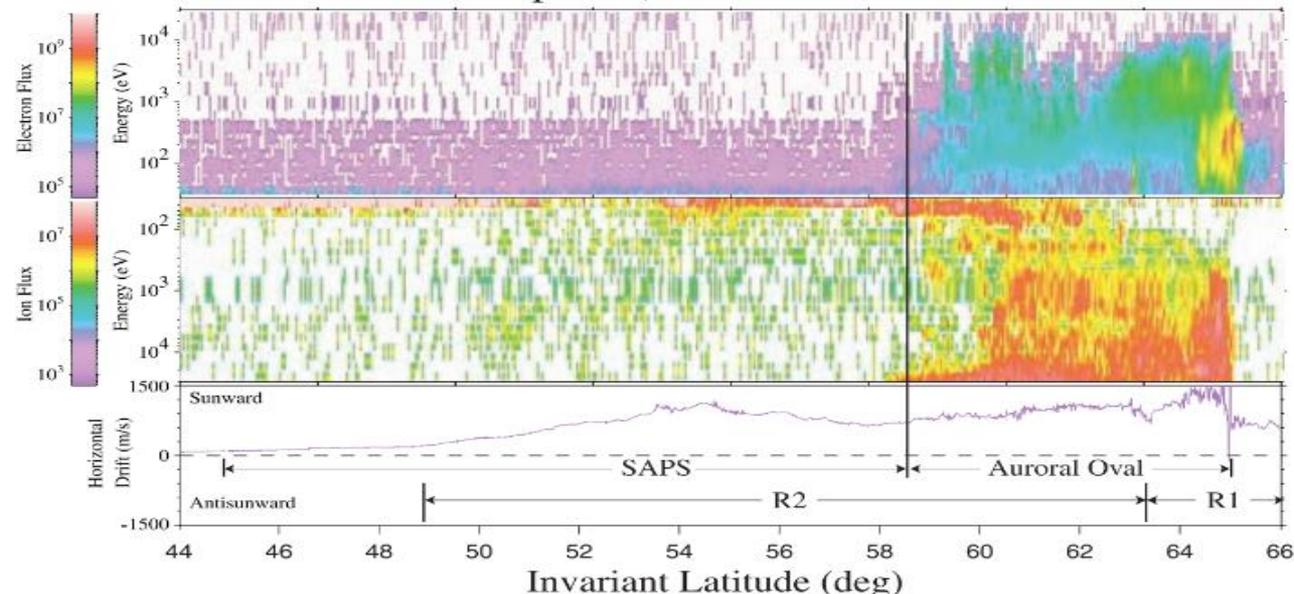
Поляризационный джет

April 12, 2001 Millstone Hill Radar



SAID – Subauroral Ion Drift – поляризационный джет.

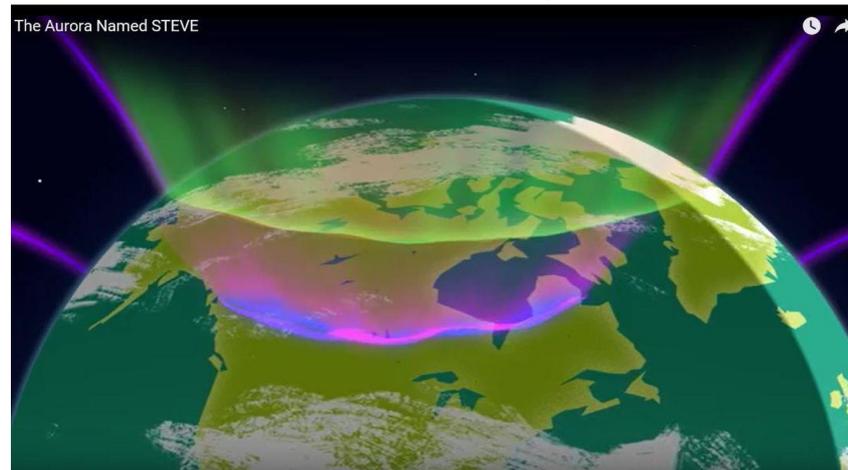
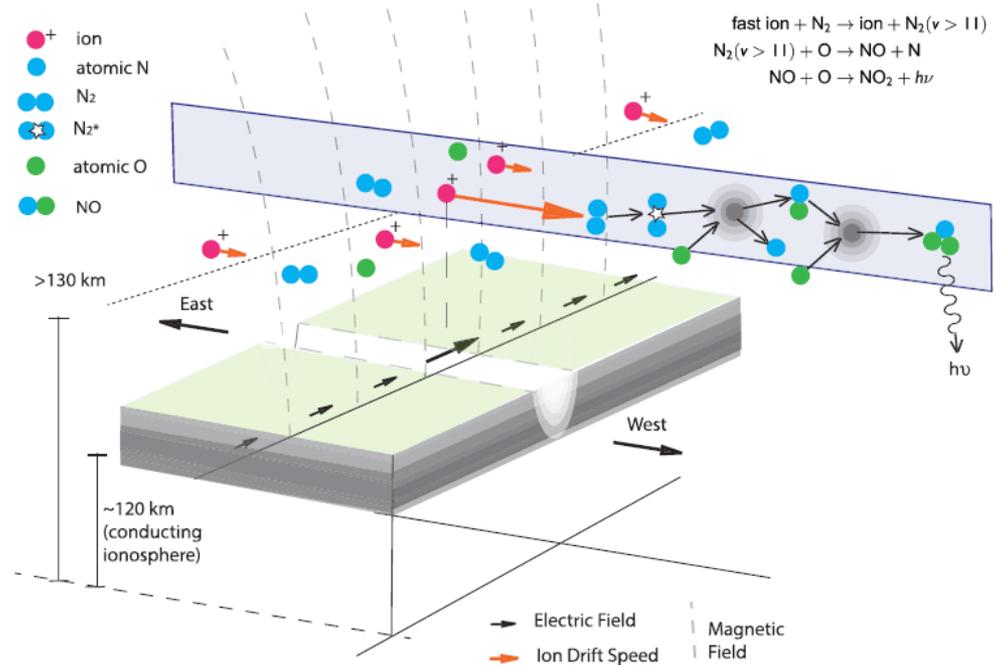
April 12, 2001 DMSP F13



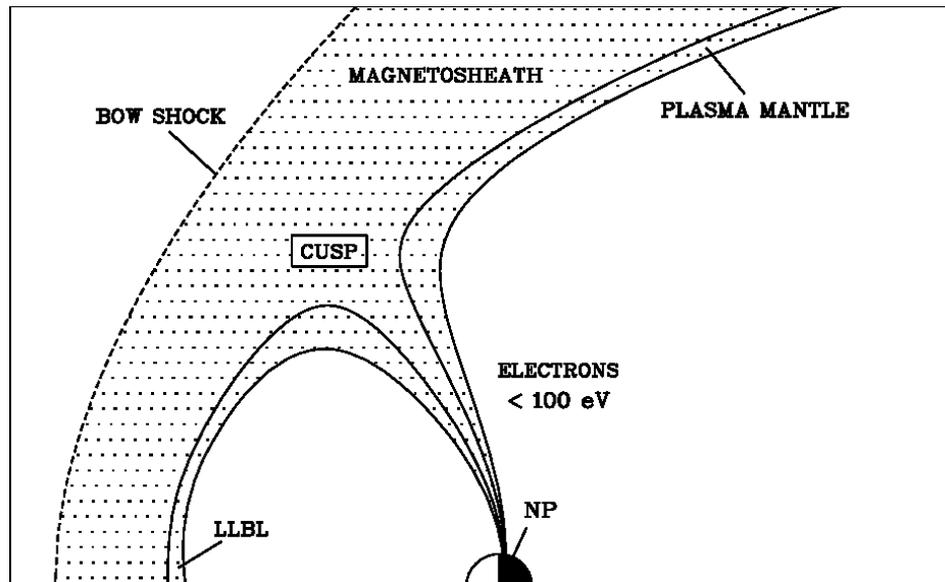
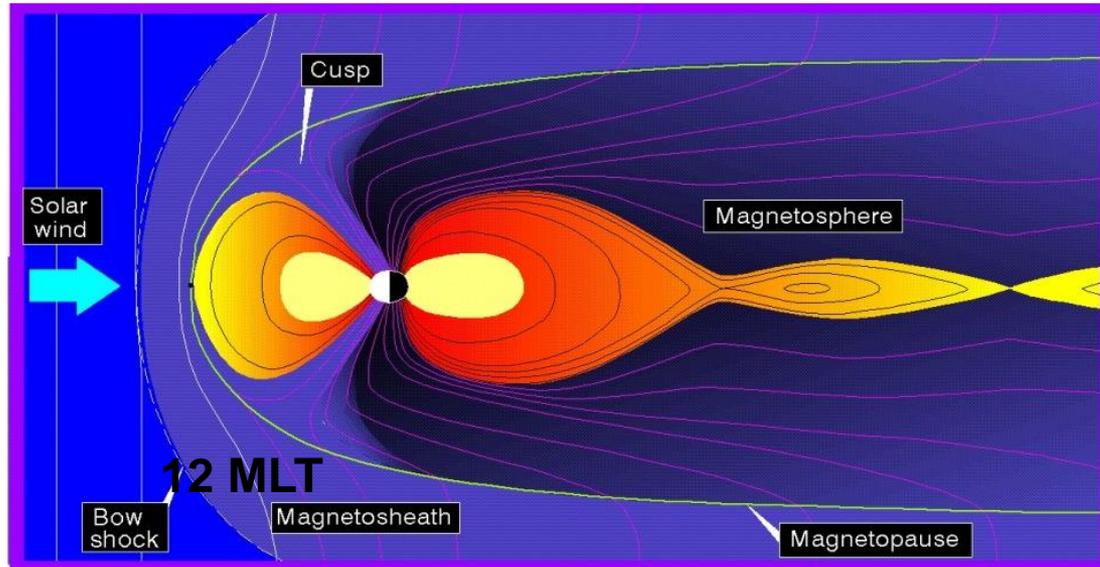
Наибольшая ионная скорость достигается приблизительно на той же широте, что и нижняя точка провала электронной концентрации.

ПД - узкая сверхзвуковая полоса (струя, поток, течение, дрейф) плазмы, движущейся в западном направлении в области ионосферной проекции плазмопаузы и наиболее явственно проявляющаяся во время магнитных бурь

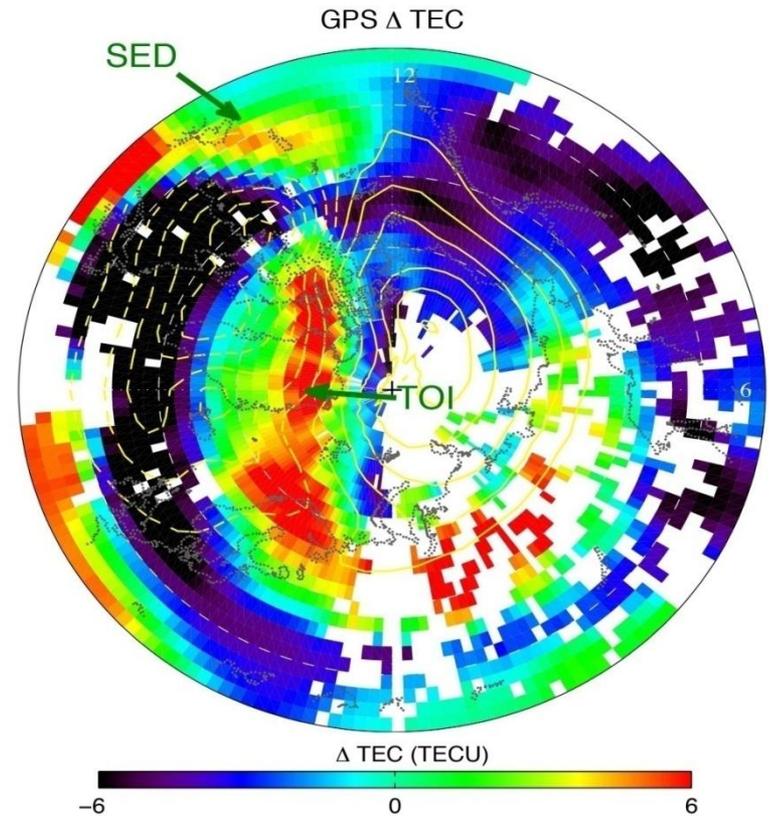
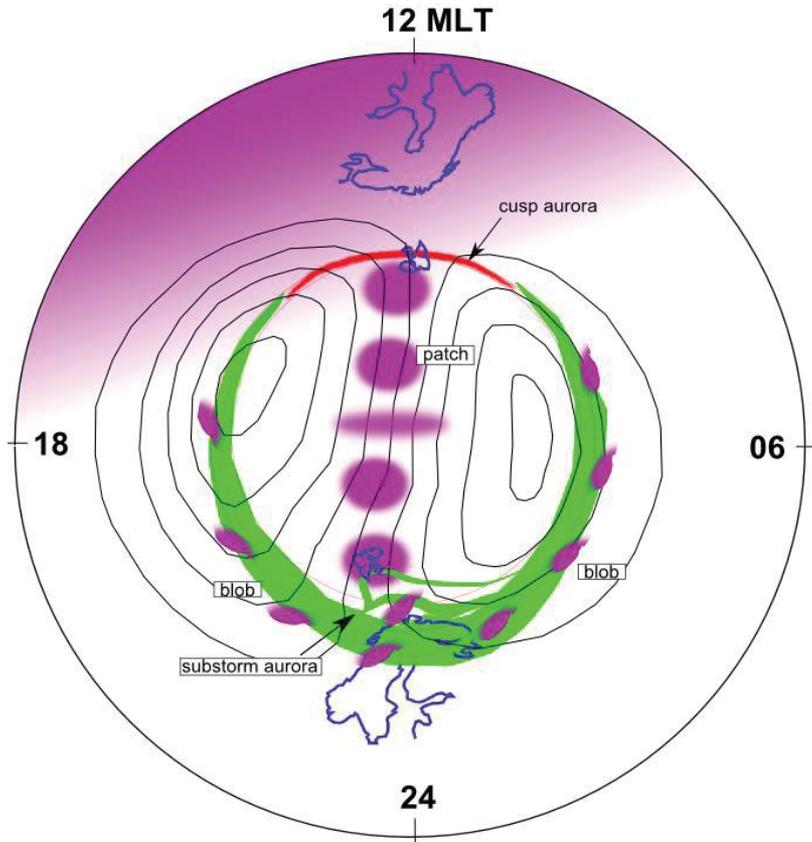
Strong thermal emission velocity enhancement (STEVE)



Касп



Полярная шапка



Повышенная ионизация, проникающая в полярную шапку, принимает форму «языка» ионизации (ТОИ) и дискретных участков полярной шапки (патчи).

Искусственная ионосферная турбулентность

Искусственные ионосферные неоднородности на ВЧ нагревными стендами

Задачи

Искусственная ионосферная турбулентность над мощными ОНЧ передатчиками

Модификация ионосферы под действие гармоник сети (50Гц и 60Гц в США)

Эффект Люксембург-Горький



The "technical room" at the 150 kw. Luxembourg station.

THE "LUXEMBOURG EFFECT" IN RADIO

How little we really know about the propagation of radio waves is well illustrated by this curious phenomenon which is baffling some of the foremost men who devote their time and study to radio and physics.

C. W. PALMER

Этот эффект был впервые обнаружен в 1933 году в Эйндховене, при включении люксембургской станции ее передачи стали слышны на других средневолновых станциях, частота которых никак не была связана с этой мощной радиостанцией. Аналогичное явление наблюдалось в городе Горьком, где мощные московские станции были услышаны во время приема радиостанций расположенный к западу от Москвы.

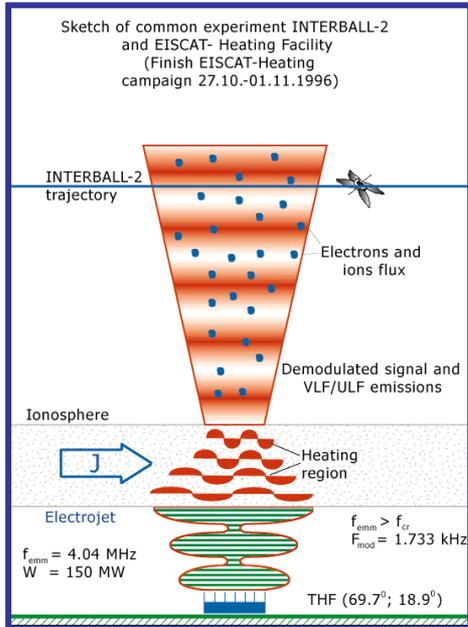
Местоположение нагревных стендов и мощных НЧ передатчиков



Красные кружки – нагревные стенды, фиолетовые – ОНЧ передатчики

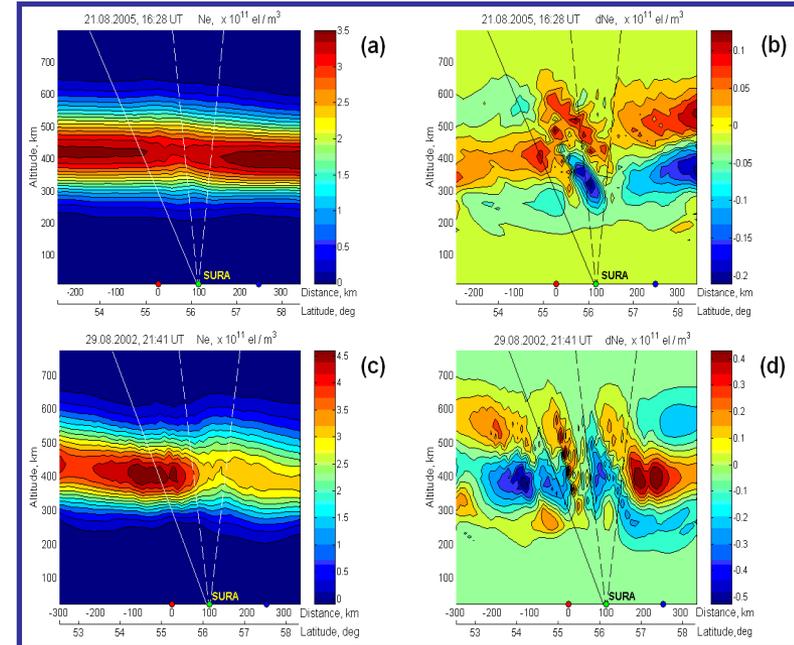
Модификация ионосферы под действием электромагнитного излучения от наземных передатчиков

ВЧ нагревные стенды



Антенное поле HAARP

ВЧ нагревный стенд представляет собой КВ передатчик на частотах 2-10 МГц, с антенной, излучение которой направлено вверх. Большие антенные поля позволяют создать на уровне ионосферы достаточно мощное электромагнитное излучение, которое, изменяет свойства ионосферы: формирует мелкомасштабные неоднородности, генерирует электромагнитные излучения и нагревает плазму.



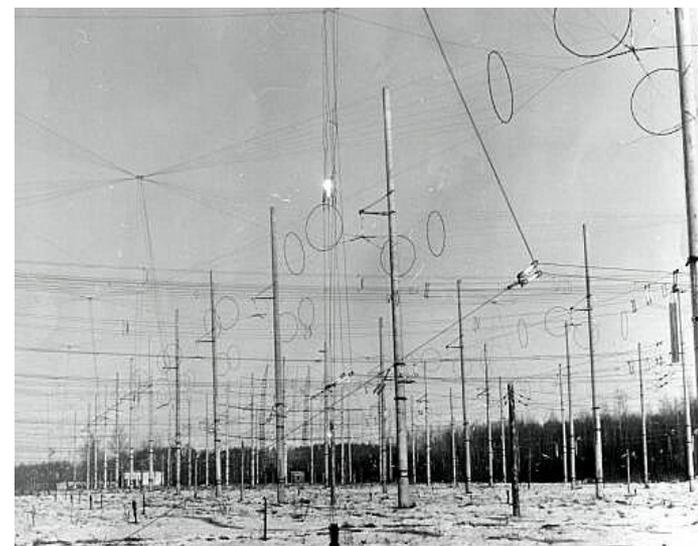
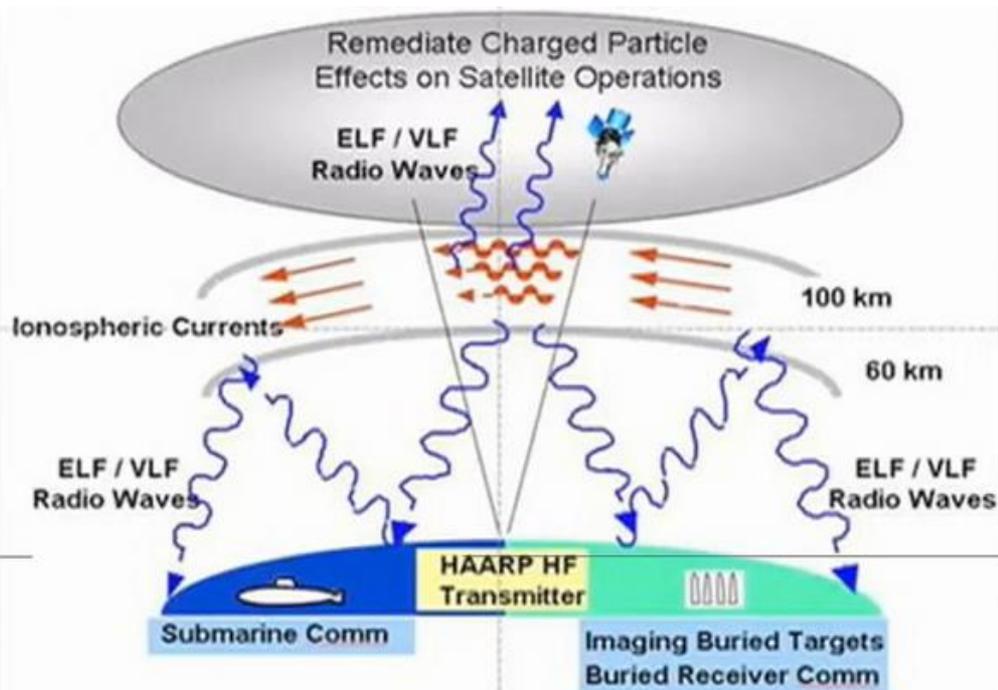
Томографическая реконструкция профиля плазмы (а, в) и вариаций плотности (б, г) для условий вечерней ионосферы (а, б) и ночной ионосферы (в, г). (Фролов и др., 2007)

США: HAARP (Аляска), мощность до 10 МВт

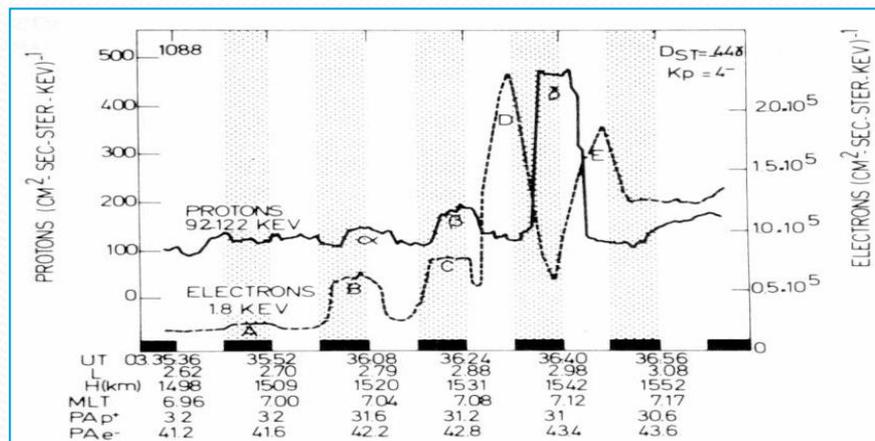
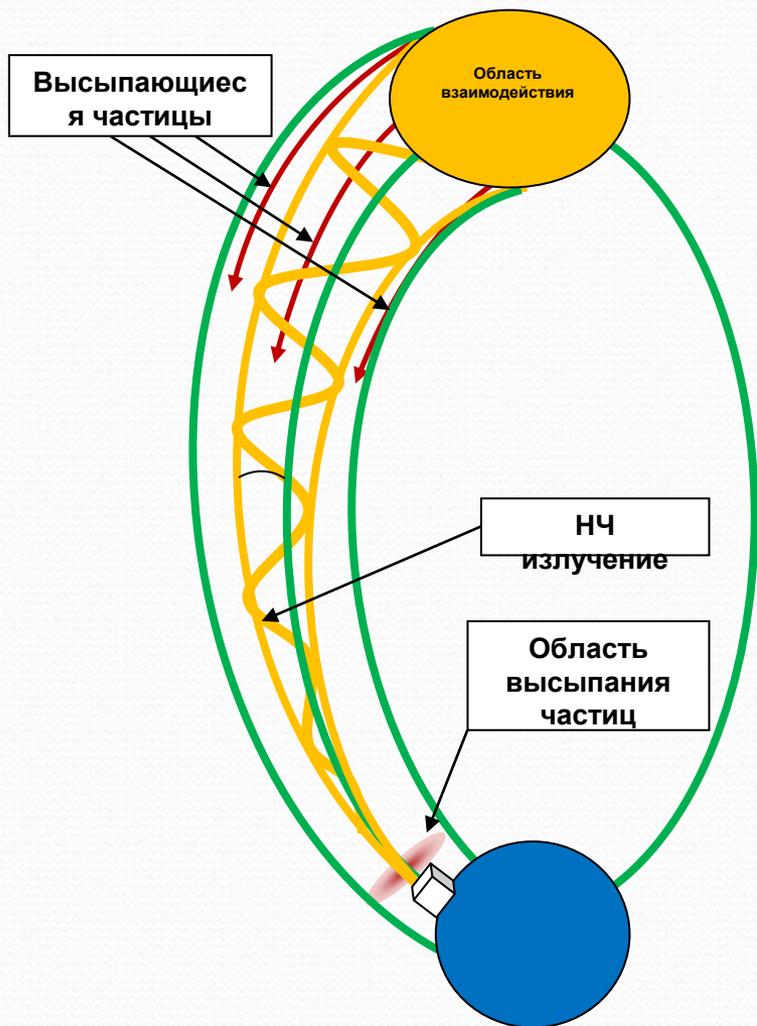
Россия: СУРА (Нижегородская обл), до 750 кВт

Норвегия: EISCAT (Норвегия), до 1 МВт

Нагревный стенд

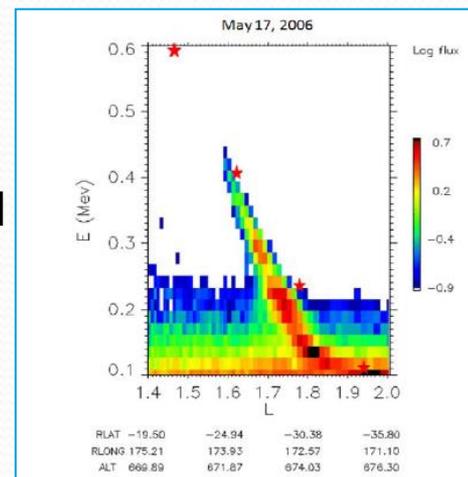


Высыпания частиц под действием искусственного НЧ излучения



Потоки электронов и протонов при пролете над высокоширотным НЧ передатчиком

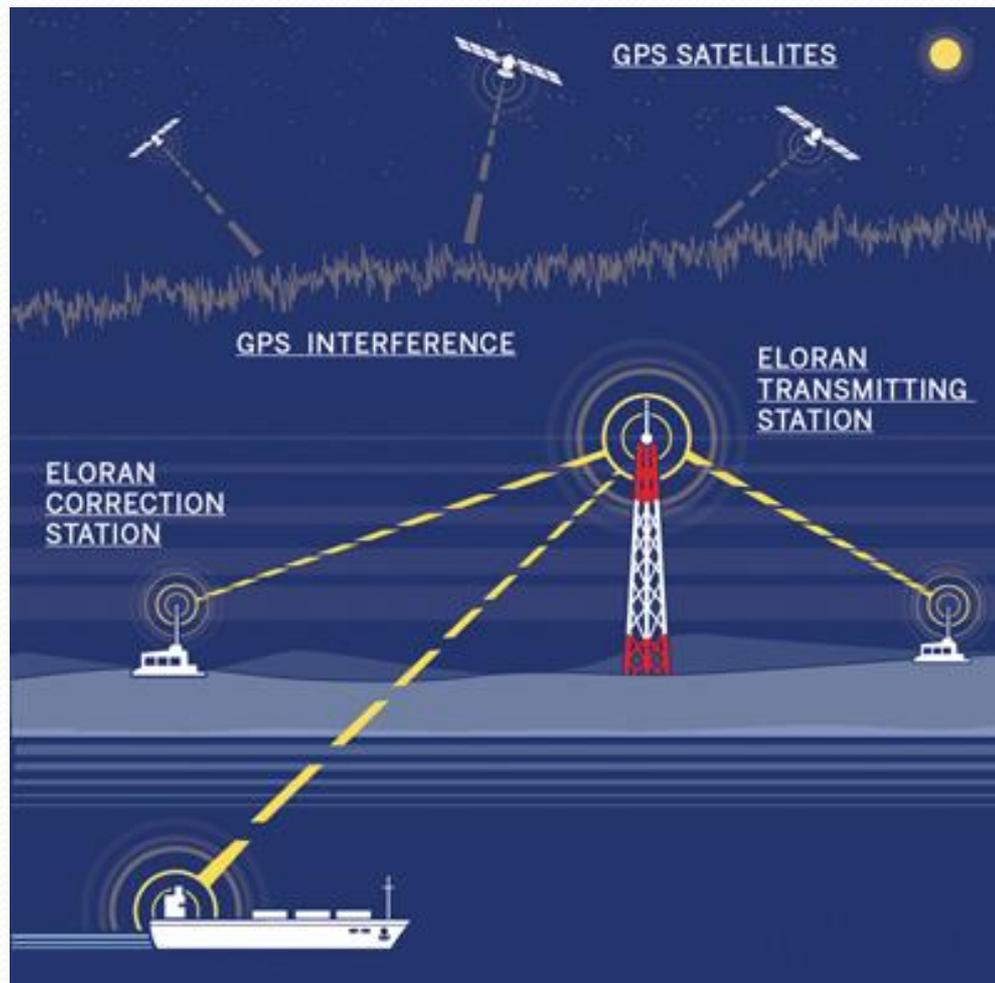
Потоки частиц над низкоширотным НЧ передатчиком (Австралия)



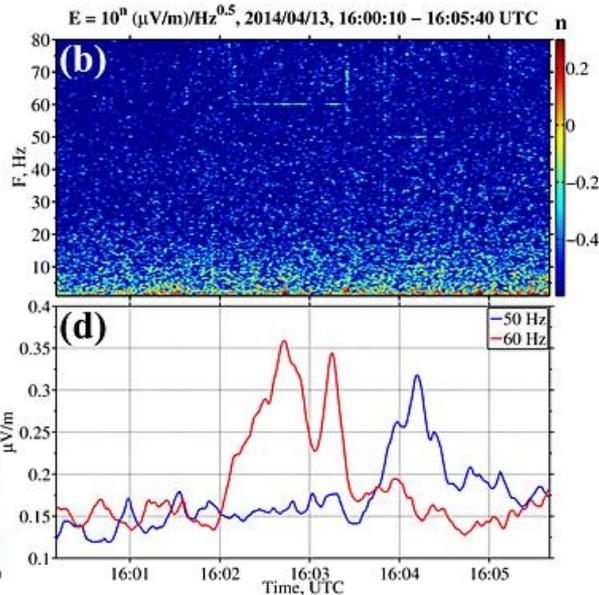
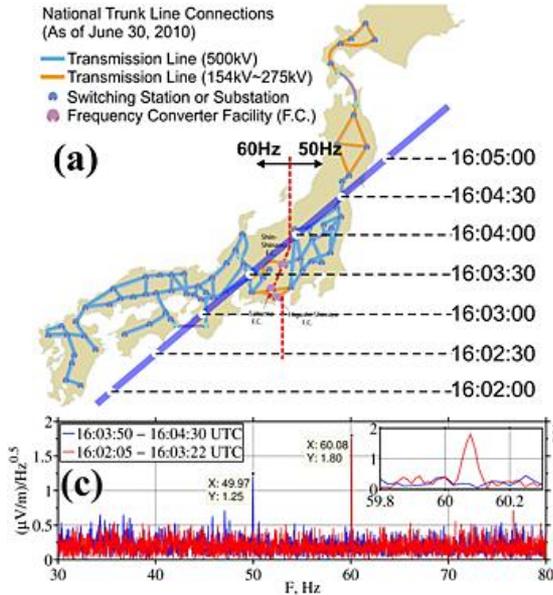
РНС "ЧАЙКА" и ЛОРАН-С

Радионавигационная система (РНС) Loran-C (отечественный аналог — «Чайка») относится к разностно-дальномерным РНС с синхронизацией моментов излучения и фазы импульсных сигналов, излучаемых наземными передающими станциями.

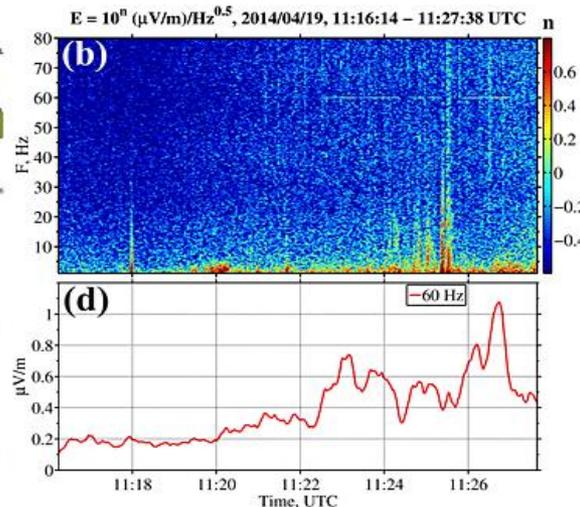
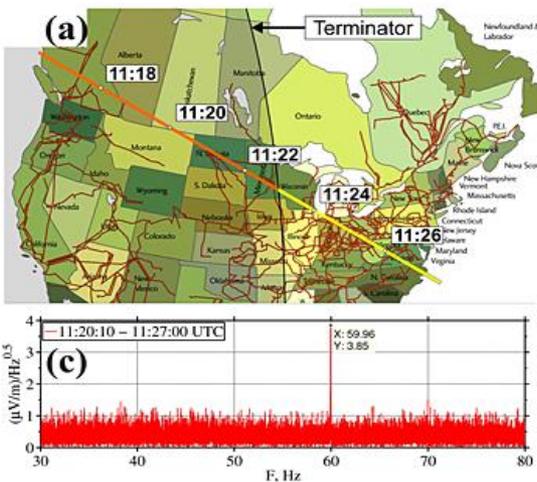
Каждая цепь РНС состоит из одной ведущей и ведомых станций, работающих с одинаковым, только этой цепи присвоенным периодом повторения серий импульсов.



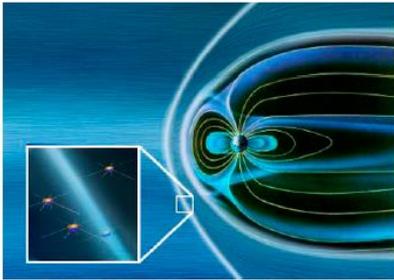
Влияние линий электропередач 50/60 Hz



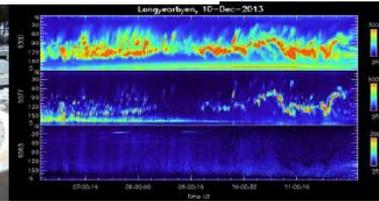
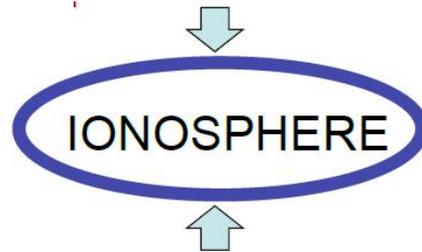
По наблюдения
спутника Чибис-М
(*Dudkin et al. 2015*)



Способы изучения ионосферы

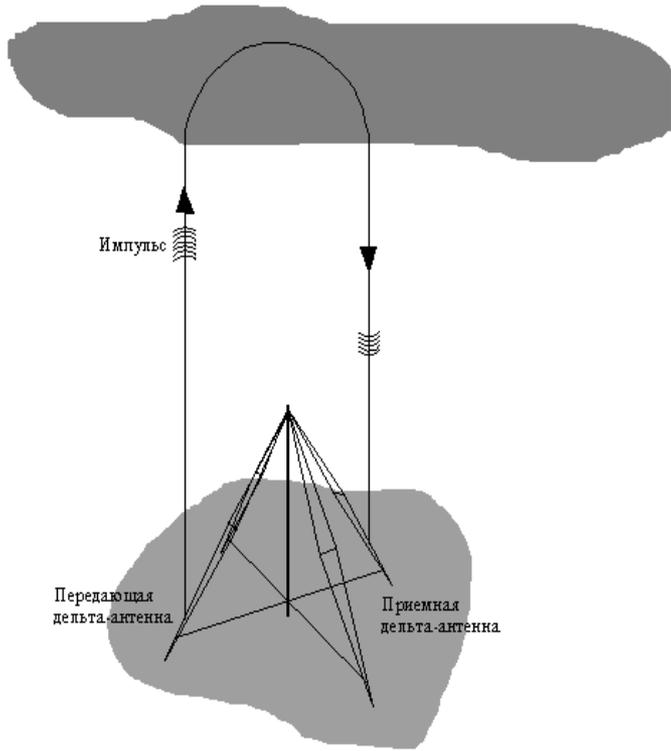


Спутники

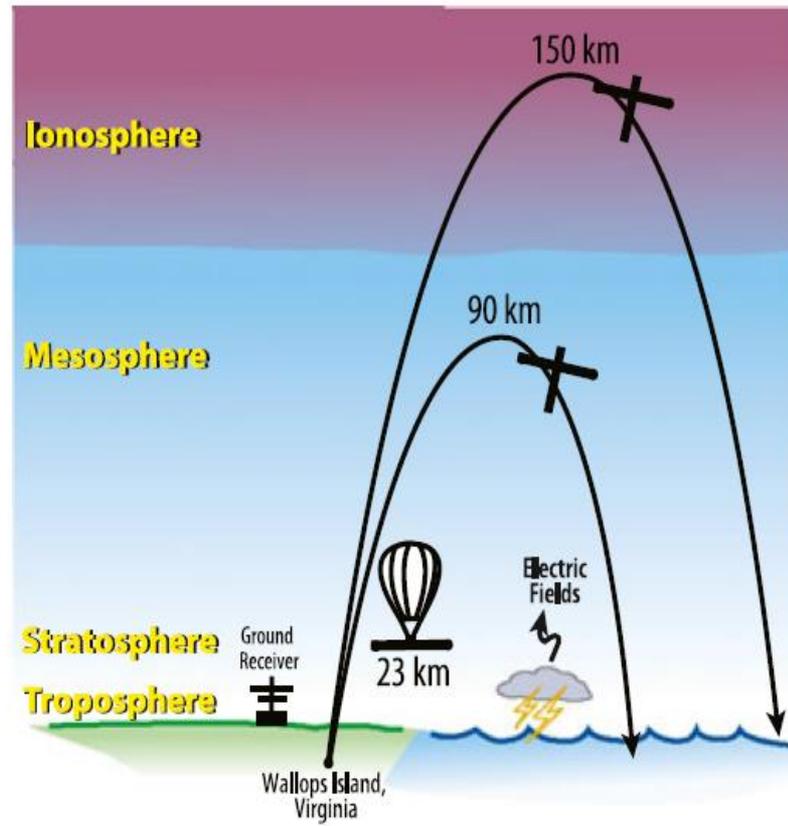


Радары,
оптические
наблюдения

Способы изучения ионосферы



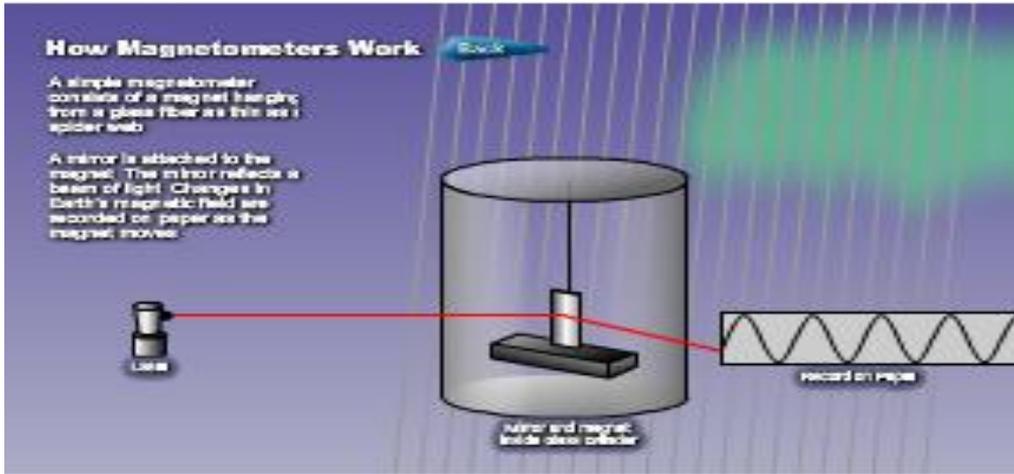
Сеть ионозондов



Ракеты, баллоны

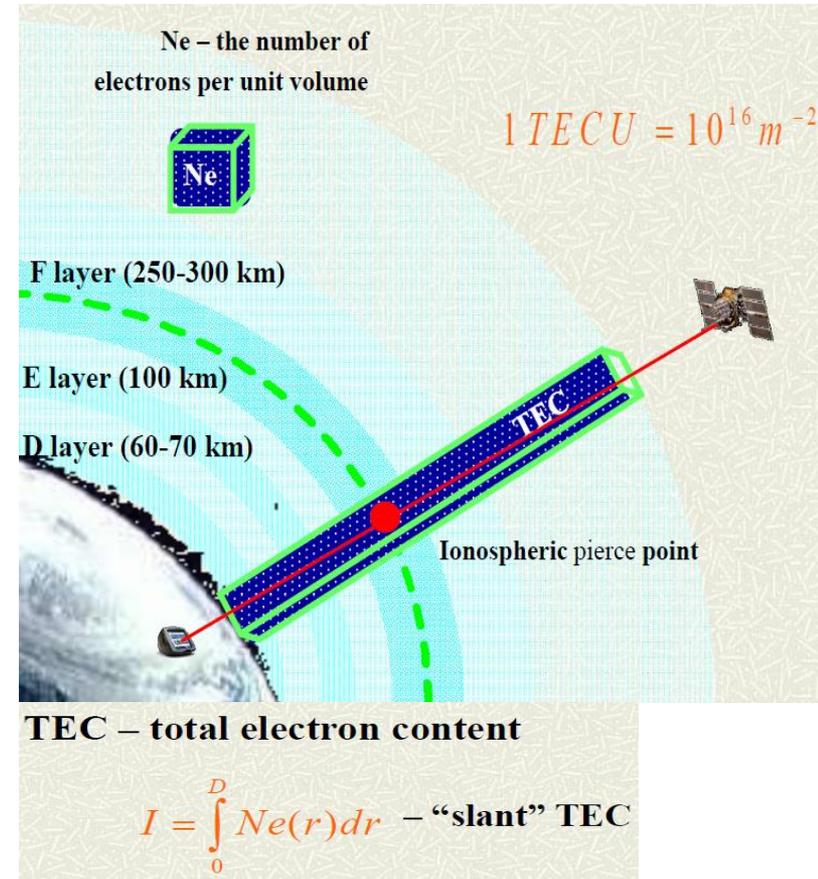


Способы изучения ионосферы



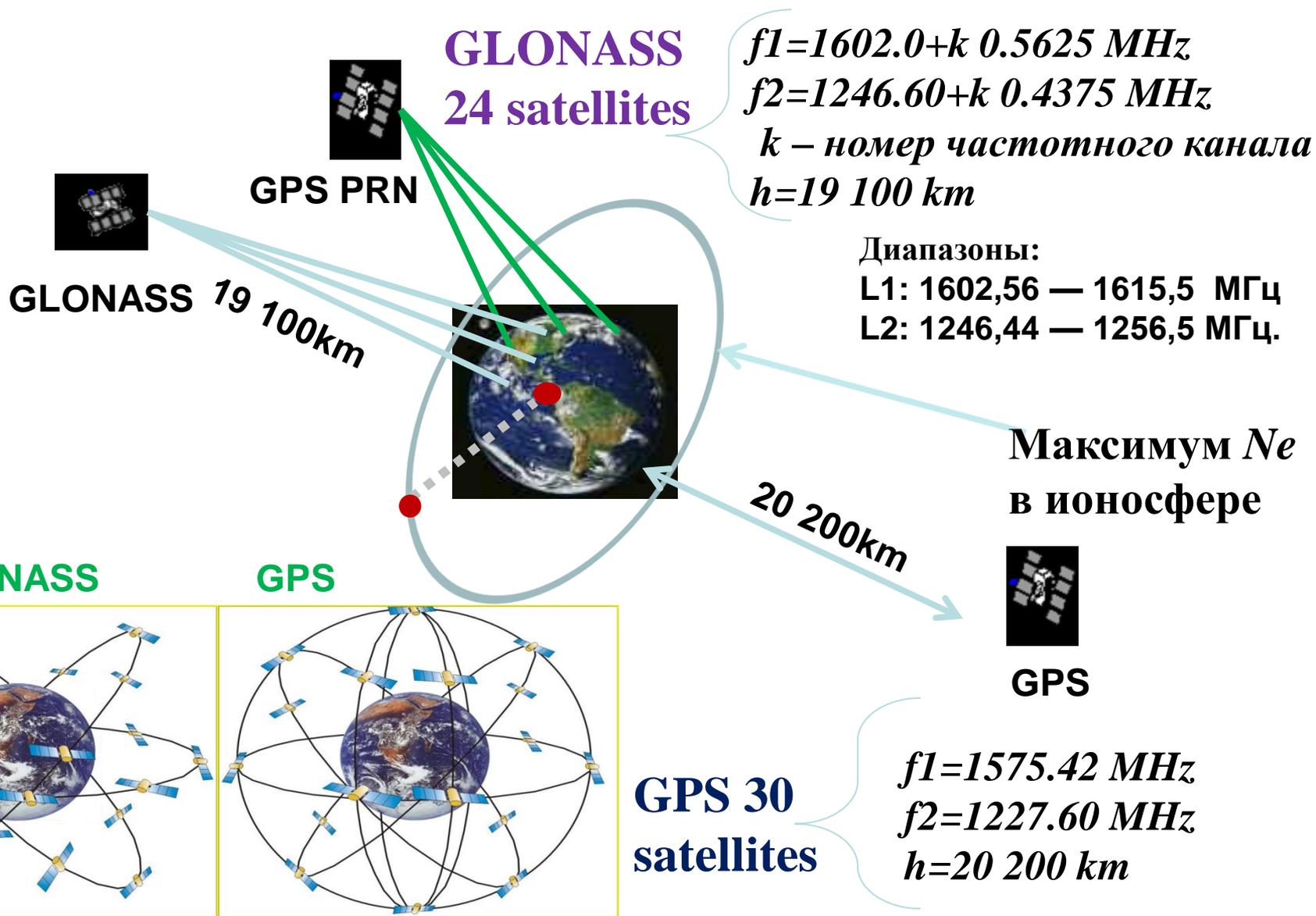
Сеть магнитометров.

По показания магнитометров определяют геомагнитные индексы

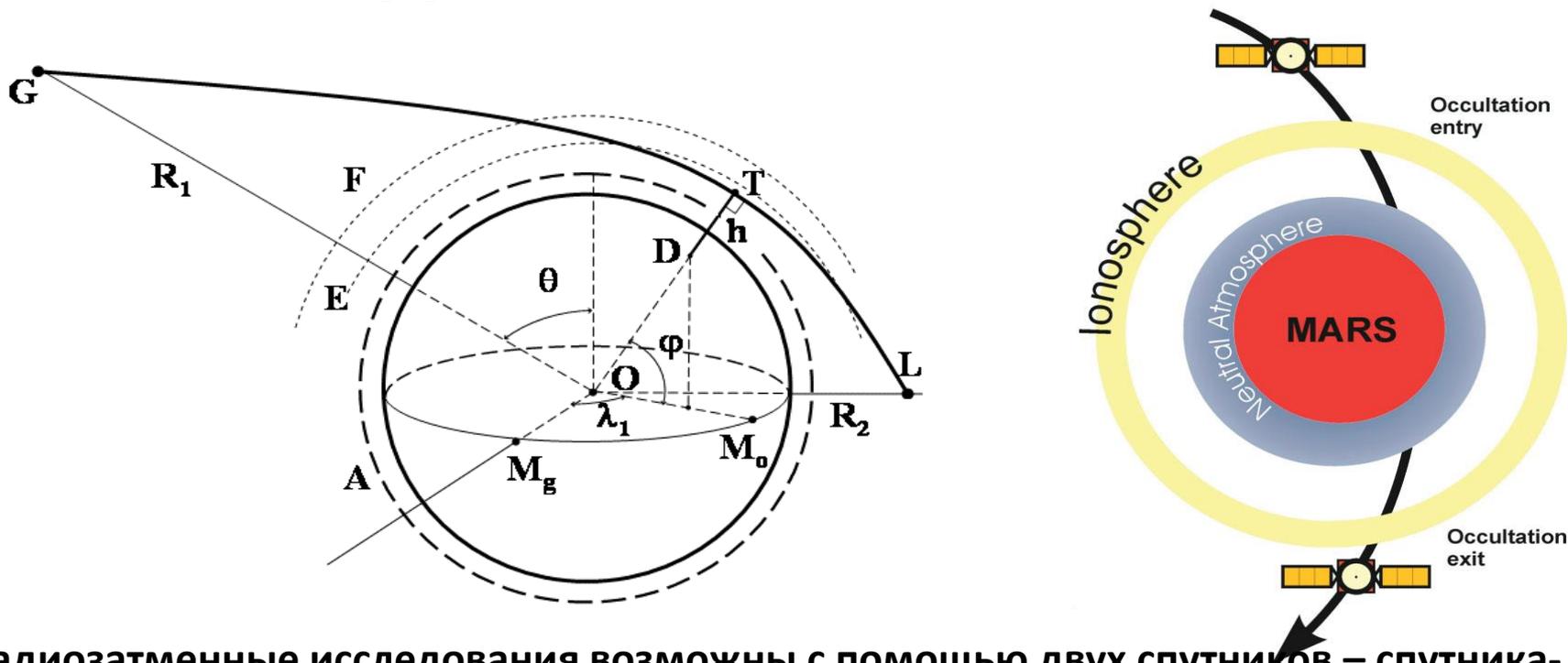


Полное электронное содержания по данным Глонасс-GPS ПЭС (TEC) определяется по псевдодальности или по фазе

Навигационные спутники



Радиозатменный метод



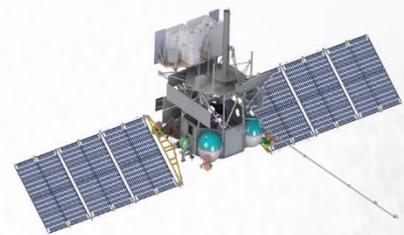
Радиозатменные исследования возможны с помощью двух спутников – спутника-излучателя G и спутника-приемника сигналов L, находящихся на орбитах разной высоты и движущихся с разными скоростями относительно поверхности Земли. При заходе спутника L в зону тени Земли относительно спутника G перигей T лучевой траектории GTL, перемещаясь вдоль линии TD, проходит через ионосферу и атмосферу.

По измеренным изменениям фаз и амплитуд и по известным эфемеридам спутников можно рассчитать высотный профиль угла рефракции и затем, найти высотную зависимость показателя преломления в атмосфере, а также электронной концентрации в ионосфере

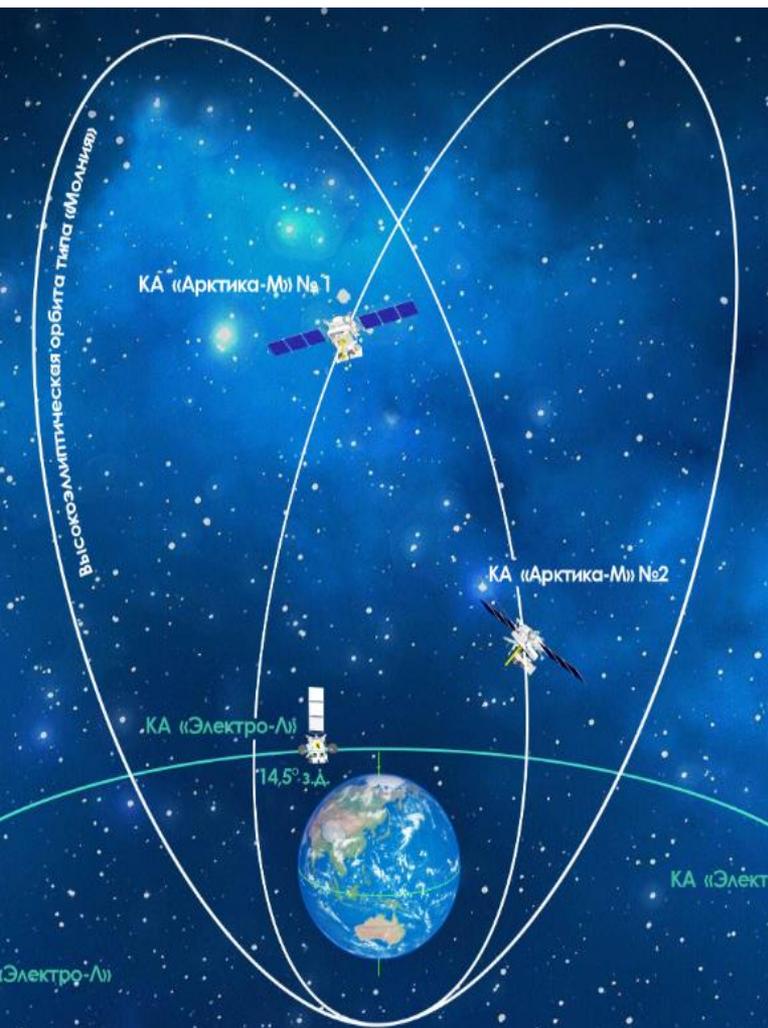
Современные отечественные спутниковые проекты по исследованию полярных областей

- ✓ Арктика-М (запущен)**
- ✓ Ионозонд/Ионосфера (запуск первой пары в 2023)**
- ✓ Кубсаты (в 2023-2024гг)**
- ✓ Резонанс (после 2025)**

«Арктика-М»



28 февраля 2021 года выполнен пуск ракеты-носителя «Союз-2.1б» с космическим аппаратом «Арктика-М1» на борту.



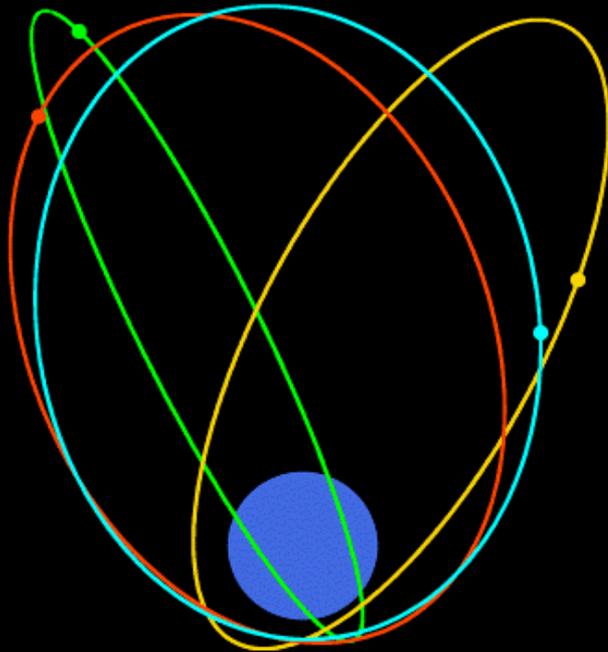
- Многозональное сканирующее устройство гидрометеорологического обеспечения (МСУ-ГС): изображения облачного слоя и поверхности Земли.
- Гелиогеофизический аппаратный комплекс (ГГК-ВЭ)

Высокоэллиптическая орбита типа «Молния» с высотой апогея 37 400 — 39 800 км, перигея 600 — 3 000 км и наклоном 63,30 градуса.

Орбита Арктика-М

2020-05-25 00:00

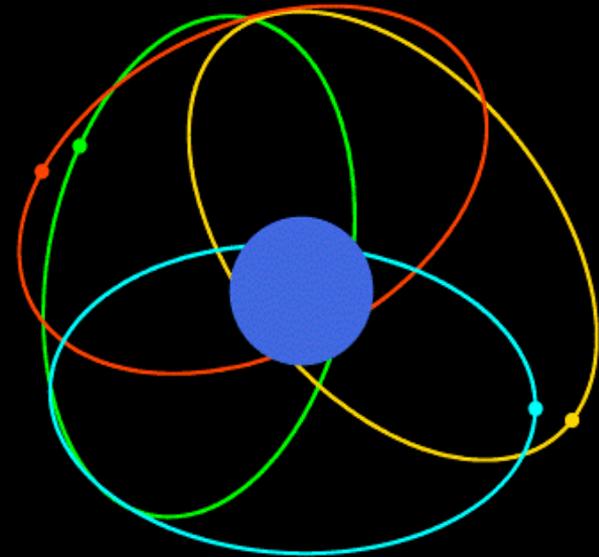
EKS



С экватора

2020-05-25 00:00

EKS



С полюса

КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ «АРКТИКА-М»

Космический аппарат (КА) спроектирован по модульному принципу, что обеспечивает независимость создания и удобство наземной отработки комплекса целевой аппаратуры и базового модуля служебных систем вплоть до этапа комплексных испытаний собранного КА.



ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ:

Масса КА на старте	2 200 кг
Масса комплекса целевой аппаратуры	780 кг
Масса целевой аппаратуры	445 кг
Высота в сложенном положении	3 690 мм
Размеры в раскрытом положении на рабочей орбите	4 038 x 13 800 x 3 940 мм
Срок активного существования	7 лет

Арктика-М

ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИЙ АППАРАТУРНЫЙ КОМПЛЕКС (ГАК-ВЭ)

Разработчик— АО «Российские космические системы».

Назначение - непрерывное получение гелиогеофизических данных на высоте орбиты с целью:

- контроля и прогноза вспышечной активности Солнца;
- контроля и прогноза радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве и состояния геомагнитного поля;
- диагностики и контроля состояния естественных и модифицированных магнитосферы, ионосферы и верхней атмосферы.

МНОГОЗОНАЛЬНОЕ СКАНИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО (МСУ-ГС)

Разработчик — АО «Российские космические системы».

КА «Арктика-М» оборудован двумя МСУ-ГС (основным и резервным) для получения многоспектральных изображений облачности и поверхности Земли в видимом и инфракрасном (ИК) диапазонах в пределах видимого диска Земли во всем диапазоне условий наблюдения и выдачи цифровой информации в бортовую систему сбора данных.

СОСТАВ МСУ-ГС:



- Оптико-механический модуль видимого диапазона для съемки с разрешением 1 км в трех спектральных каналах;
- оптико-механический модуль инфракрасного (ИК) диапазона для съемки с разрешением 4 км в семи спектральных каналах.

В МСУ-ГС КА «Арктика-М» существенно повышена точность измерений параметров движения съемочной системы и координатной привязки с учетом особенностей рабочей орбиты.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ:

Полоса обзора	весь видимый диск Земли и часть околоземного пространства
Диапазон длин волн	0,5 – 12,5 мкм
Полоса обзора	- до 30 мин в штатном режиме, - до 15 мин в учащенном режиме
Рабочая t° фотоприемников ИК диапазона	$(-193 \pm 2)^{\circ}$ С

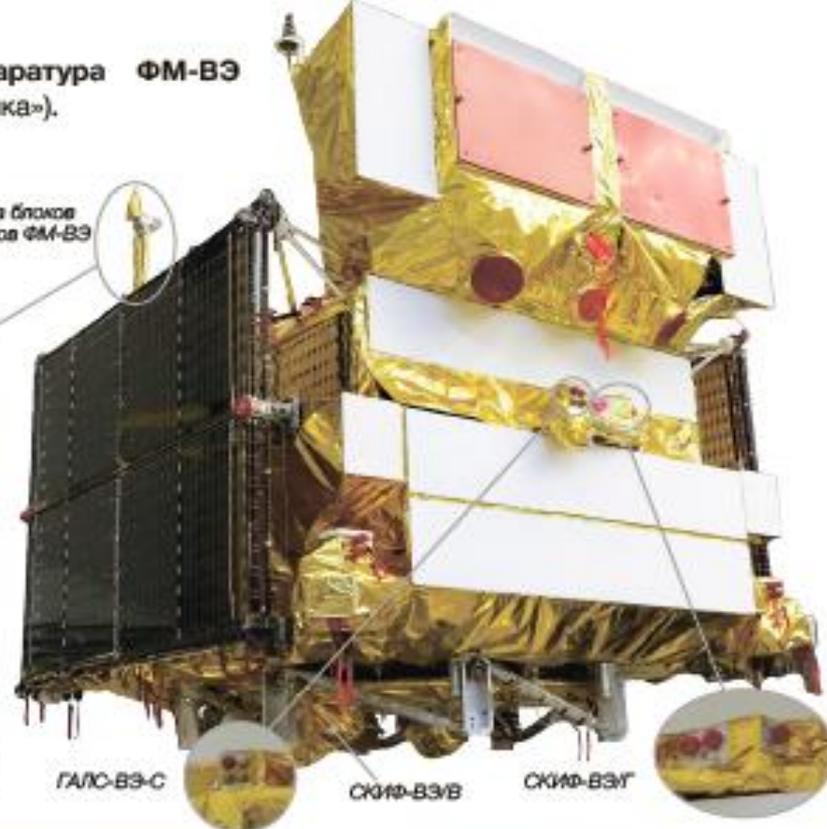
СОСТАВ ГАК-ВЭ:

1. Магнитометрическая аппаратура ФМ-ВЭ (ООО «НПП «Астрон Электроника»).



Штанга блоков датчиков ФМ-ВЭ

ФМ-ВЭ обеспечивает измерение трех компонент вектора магнитной индукции в диапазоне измерений от минус 65,0 до плюс 65,0 мкТл.



ГАЛС-ВЭ-С

СКИФ-ВЭ/В

СКИФ-ВЭ/Г

2. Спектрометр галактических космических лучей ГАЛС-ВЭ, включающий ГАЛС-ВЭ-С и ГАЛС-ВЭ-Ч (ФГБУ «ИПГ»).

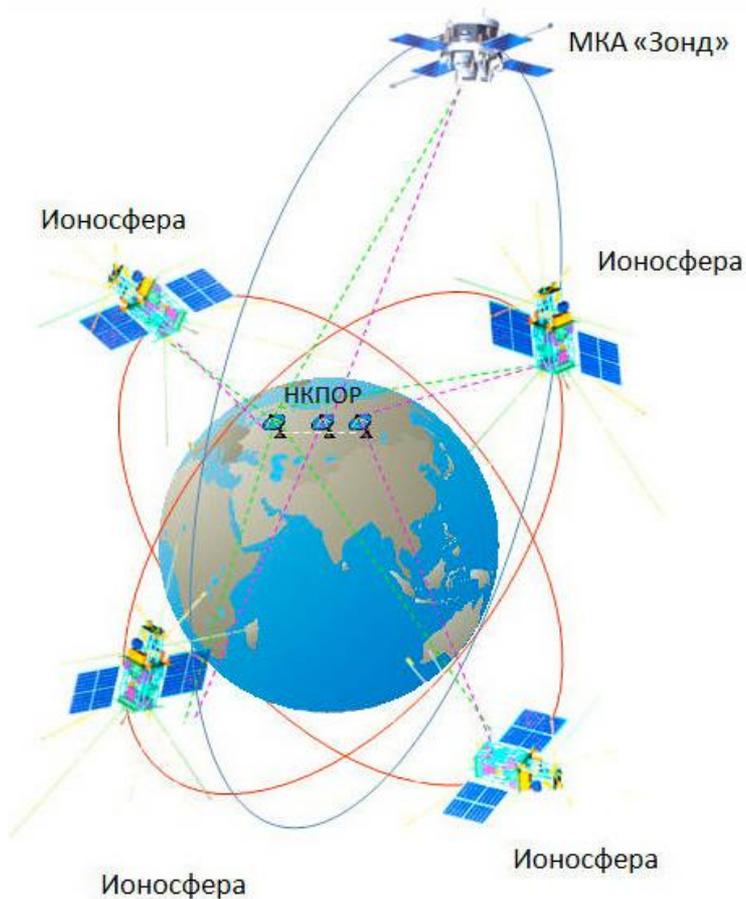
ГАЛС-ВЭ обеспечивает измерения плотности потока протонов галактического космического излучения с энергией более 600 МэВ, измерение суммарной плотности потока электронов с энергией более 0,15, 0,7, 1,7 и 3,2 МэВ и плотности потока протонов с энергией более 5,0, 15,0, 25,0 и 40,0 МэВ соответственно.

3. Объединенный спектрометр корпускулярных излучений СКИФ-ВЭ, включающий СКИФ-ВЭ/В и СКИФ-ВЭ/Г (Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына - НИИЯФ МГУ).

СКИФ-ВЭ обеспечивает измерения дифференциальных энергетических спектров низкоэнергичных электронов и протонов (0,05 - 20,0 кэВ), спектров электронов с отстройкой от фона протонов (0,1 - 10,0 МэВ), спектров протонов с отстройкой от фона электронов (1,0 - 100,0 МэВ) и α -частиц (9,0 - 50,0 МэВ), электронов более 40 кэВ, протонов более 0,5 МэВ.

4. Интерфейсный электронный блок БНД-ВЭ (Специальное конструкторское бюро космического приборостроения ИКИ РАН).

Группировка КА проекта «Ионозонд-2025»



В состав группировки КА проекта «Ионозонд-2025» входят 5 спутников: четыре однотипных КА «Ионосфера» для мониторинга параметров ионосферной плазмы и один КА «Зонд» предназначенный для мониторинга параметров солнечной активности.

Спутники «Ионосфера» будут расположены попарно на солнечно-синхронных орбитах 03-15 и 09-21LT.

Орбита спутника «Зонд» будет расположена вблизи линии терминатора с тем, чтобы максимально увеличить видимость Солнца.

Целевые задачи КЦА КА «Ионосфера» и КА «Зонд»

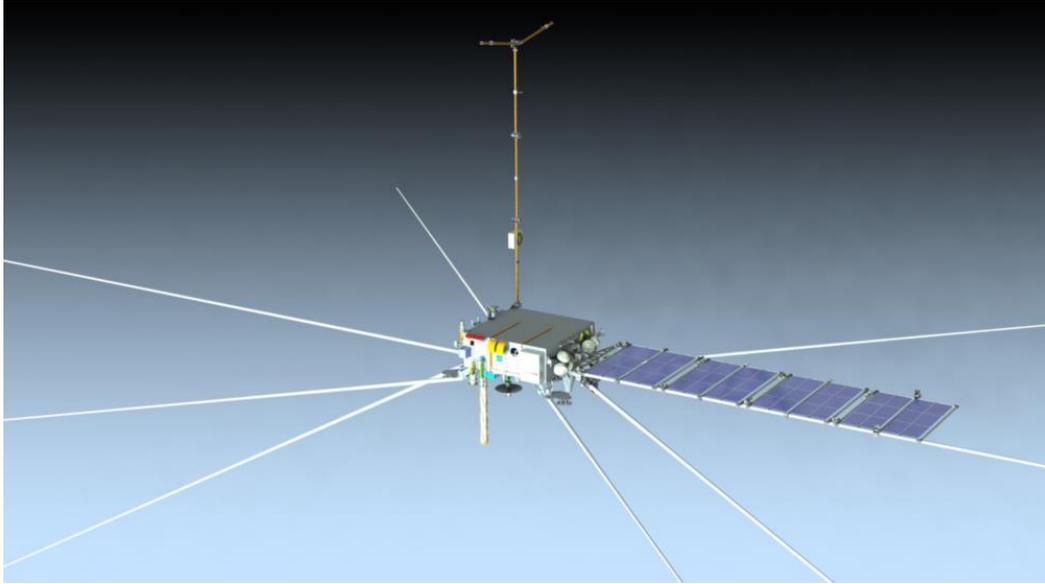
- Наблюдение и контроль Солнца и солнечной активности;**
- Мониторинг состояния ионосферы;**
- Наблюдение и контроль верхней атмосферы;**
- Контроль состояния магнитосферы;**
- Измерение волновой активности (электромагнитные, акустические волны);**
- Диагностика корпускулярных ионизирующих излучений;**
- Диагностика состояния озона, (определение планетарного распределения озона).**

	Прибор	Изготовитель
1	Бортовой ионозонд в диапазоне 1-20 МГц с передатчиком 137 МГц	ВНИИЭМ/ИРЭ/ ИПГ/ИЗМИРАН
2	GPS-ГЛОНАСС измеритель полного содержания электронов	ИЗМИРАН
3	Бортовые радиопередатчики на частоте 150/400 МГц	ИЗМИРАН/ИКИ
4	Зонд Ленгмюра и энергоспектрометр ионосферной плазмы	ИКИ
5	ОНЧ волновой комплекс	ИЗМИРАН
6	СПЭР/1 - спектрометр плазмы и энергичной радиации	НИИЯФ МГУ
7	Прибор ГАЛС/1 –спектрометр галактических космических лучей	ИПГ
8	Гамма-спектрометр СГ/1 (20кэВ – 10МэВ)	НИИЯФ МГУ
9	Озонометр	ИКИ

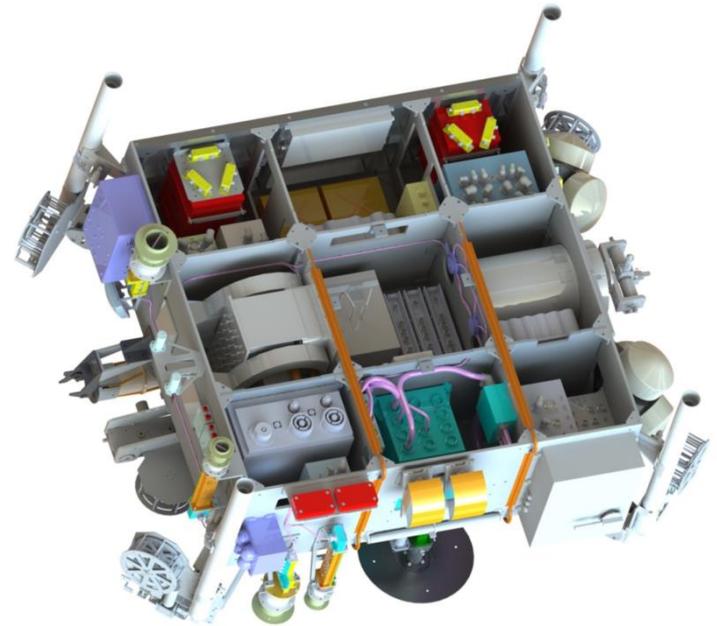
Тактико-технические характеристики КА «Ионосфера»

№	Параметр	Значение
1	Тип орбиты	круговая солнечносинхронная
2	Средняя высота орбиты	~ 820 км
3	Местное время восходящего узла орбиты	21 ч (первая пара), 15 ч (вторая пара)
4	Выведение КА на целевую орбиту	попарно, попутно с КА «Метеор-М» №2-1, №2-2
5	Ориентация	трехосная, Земля - курс
6	Коррекция орбиты	для поддержания параметров орбиты КА
7	Точность ориентации	не хуже 0,5°
8	Точность стабилизации	не хуже 0,01 град/сек
9	Точность определения орбитального положения центра масс КА	не хуже 100 м (только бортовыми средствами), не хуже 10 м (бортовыми и наземными средствами)
1	Среднесуточное энергопотребление КЦА	до 100 Вт
11	Среднесуточное энергопотребление КА	до 250 Вт
12	Масса полезной нагрузки	до 75 кг
13	Масса КА в целом	около 370 кг
14	Срок активного существования	не менее 5 лет

КА «Ионосфера»



Полетная конфигурация



**Вид КА со снятой
крышкой**

Спутники стандарта CubeSat



Размеры и масса спутников CubeSat

1U: 100x100x113,5 мм, до 1,33 кг

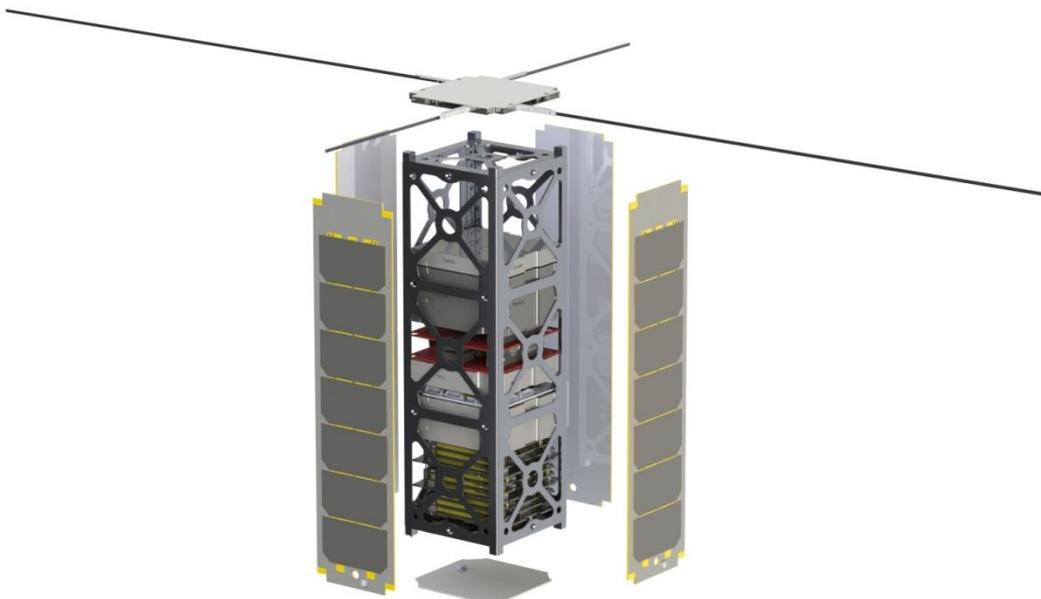
2U: 100x100x226,5 мм, до 2,67 кг

3U: 100x100x340,5 мм, до 4 кг

4U: 100x100x533,5 мм, до 5,33 кг

5U: 100x100x665,5 мм, до 6,67 кг

6U: 100x200x340,5 мм, до 8 кг



Базовые системы спутника:

Модуль центрального процессора

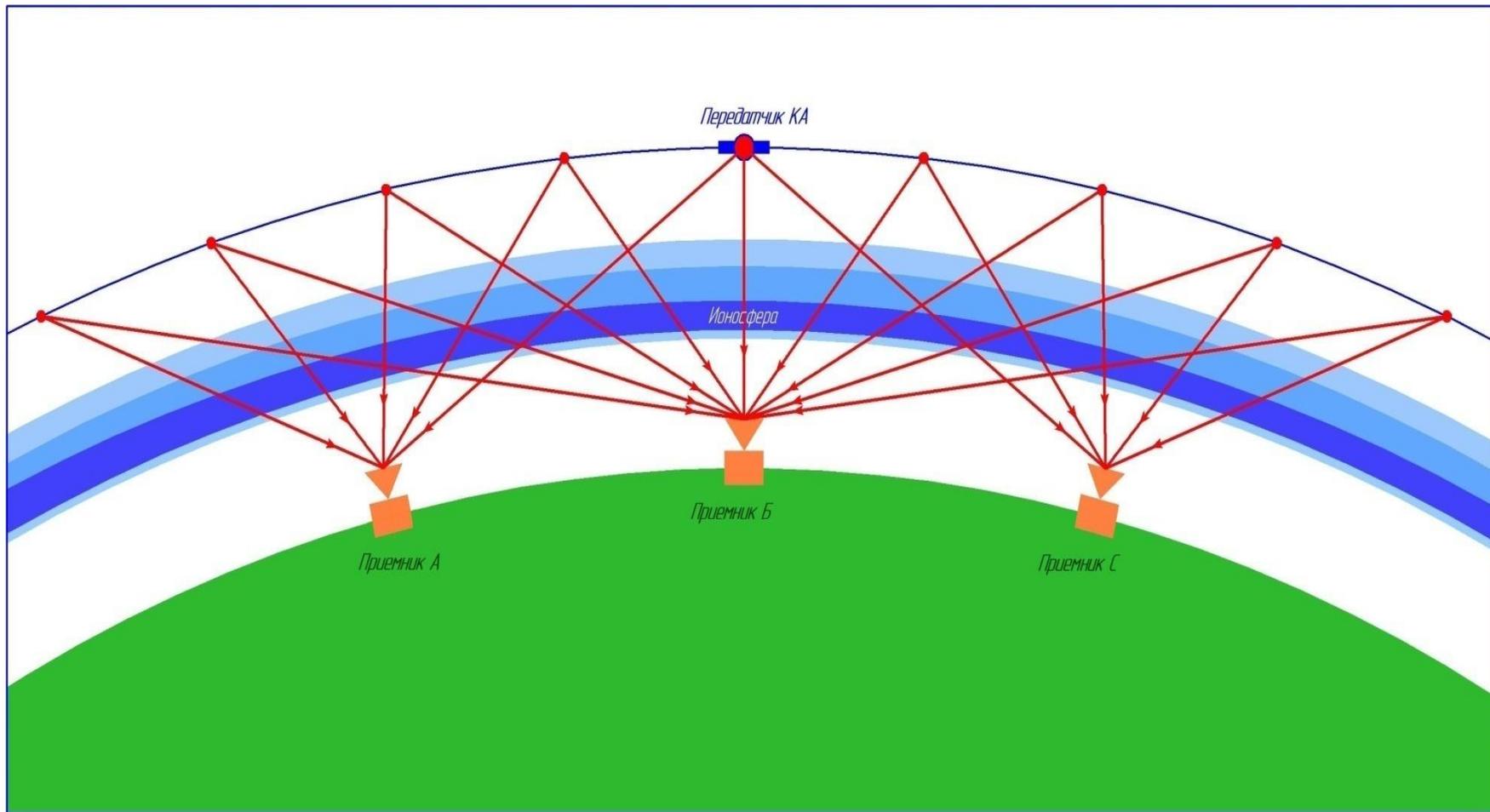
Радиоканал и антенно-фидерные устройства

Система питания, аккумуляторы и контроллер заряда, солнечные батареи

Опционально. Система определения положения спутника

Опционально. Система коррекции положения спутника

Схема радиотомографического метода измерений



Особенности низкоорбитальной томографии

- Высокая скорость движения спутника и соответственно более высокая разрешающая способность по времени.
- Получение двумерных сечений электронной концентрации за времена порядка 10-20 минут.
- Возможность исследования не только более быстрых ионосферных процессов но и ионосферных возмущений, порождаемых антропогенными источниками.
- Высокая пространственная разрешающая способность: 20-30 км по горизонтали и 30-40 км по вертикали.

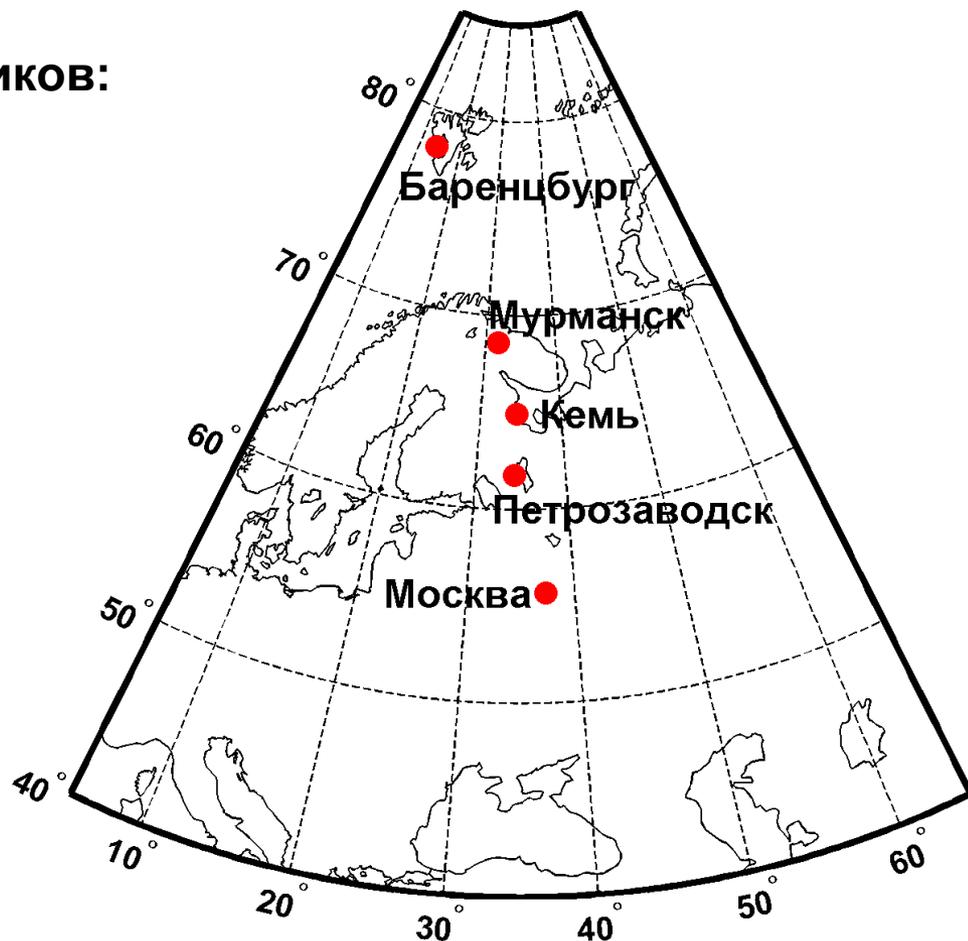
Российская низкоорбитальная РТ система приемников (северо-запад России: Шпицберген – Москва)

Координаты стационарных приемников:

Баренцбург	78.06°N, 14.22°E
Мурманск	68.94°N, 33.06°E
Кемь	64.95 °N, 34.57°E
Петрозаводск	61.78°N, 34.37°E
Москва	55.71°N, 37.52°E

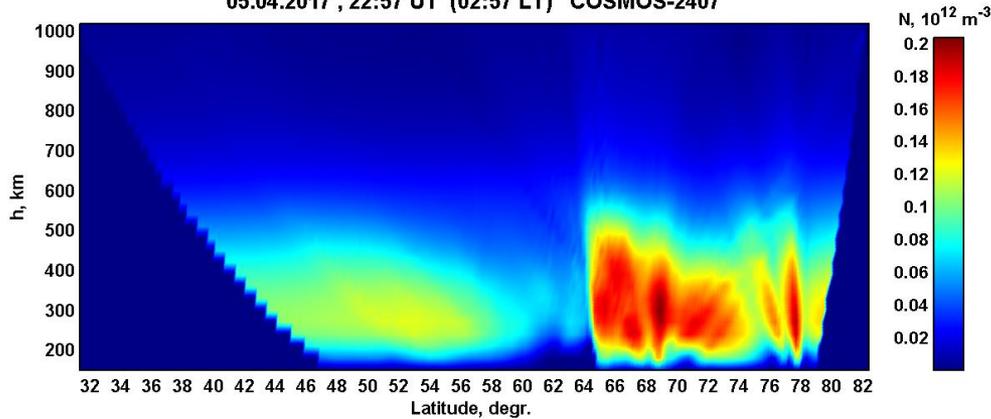
Есть также возможность
развертывания мобильной
РТ цепочки приемников.

Например, в период проведения экспериментов по модификации ионосферы мощным КВ излучением стенда «Сура», была развернута мобильная РТ цепочка из трех приемных станций.



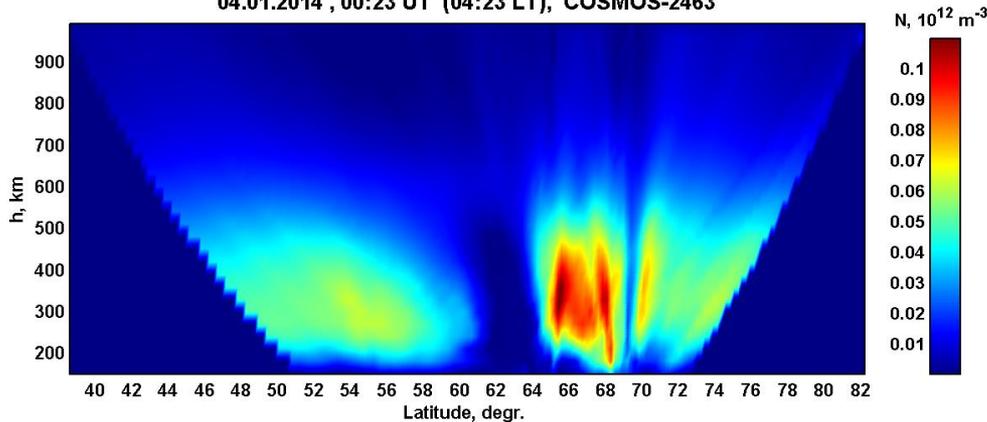
Примеры 2D РТ реконструкций электронной концентрации в ионосфере

05.04.2017 , 22:57 UT (02:57 LT) COSMOS-2407



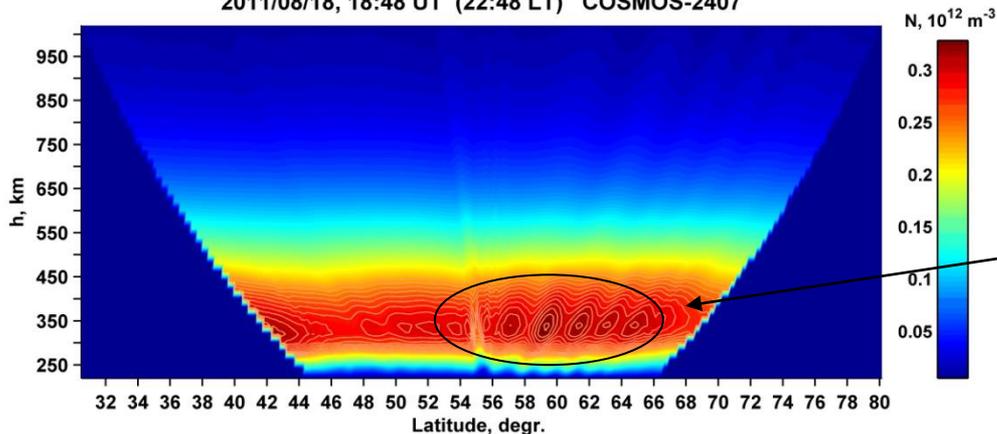
*Ионосферные структуры,
характерные для
высокоширотной области*

04.01.2014 , 00:23 UT (04:23 LT), COSMOS-2463



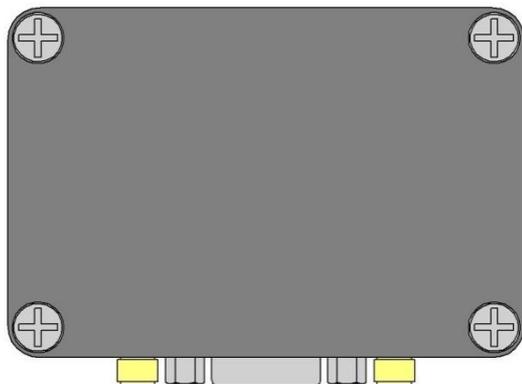
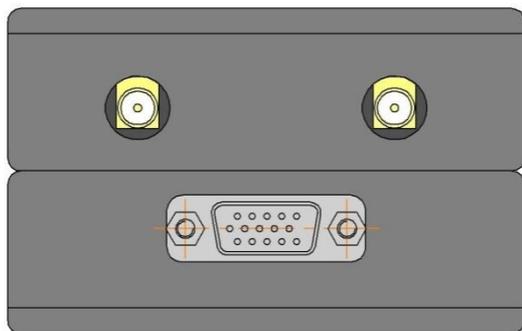
**провалы ионизации и
квазиволновые возмущения**

2011/08/18, 18:48 UT (22:48 LT) COSMOS-2407



**Волновые возмущения,
вызванные КВ нагревом стенда
«Сура», и узкий провал (~60
км), соответствующий
диаграмме направленности
стенда**

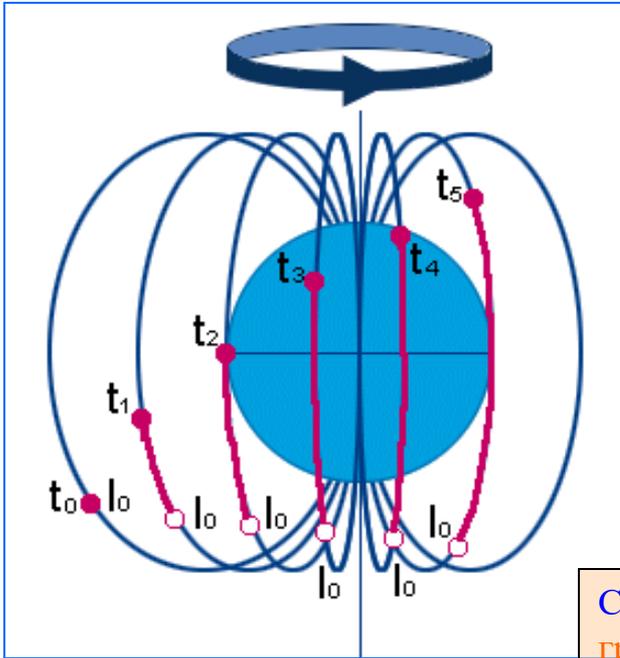
Модуль передатчика когерентных сигналов бортового (ПКСБ)



- Число каналов передатчика 2
- Центральная частота канала А (f_0^a) 150 МГц
- Центральная частота канала В (f_0^b) 400 МГц
- Выходная мощность каждого канала 0,5 Вт
- Рабочая частота канала передатчика $f_0 \pm \Delta f \cdot n$
- Число рабочих частот канала (n) 31
- Шаг сетки частот канала А (Δf_a) 30 кГц
- Шаг сетки частот канала В (Δf_b) 80 кГц
- Отношение рабочих частот каналов 3/8
- Потребляемая мощность
 - в режиме передачи 3,8 Вт
 - в режиме готовности 1,4 Вт
 - в режиме ожидания 0,1 Вт
- Габариты модуля передатчика, мм 80x60x51
- Масса, г 350

Резонанс

Одна из особенностей проекта РЕЗОНАНС – магнитосинхронная орбита



Одним из основных условий выбора орбит спутников проекта является возможность проведения долговременных измерений в выбранной силовой трубке.

Такому условию удовлетворяет «магнитосинхронная орбита» – спутник коротирует с Землей и движется вдоль выбранной силовой линии.

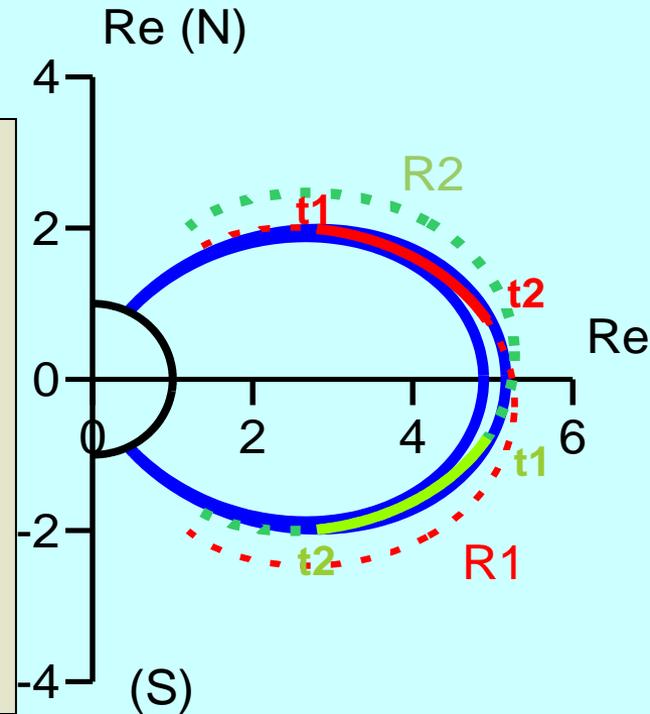
$h_{ap} = 28\,000\text{ km}$
 $h_{per} = 500\text{ km}$
 $i = \pm 63,4^\circ$

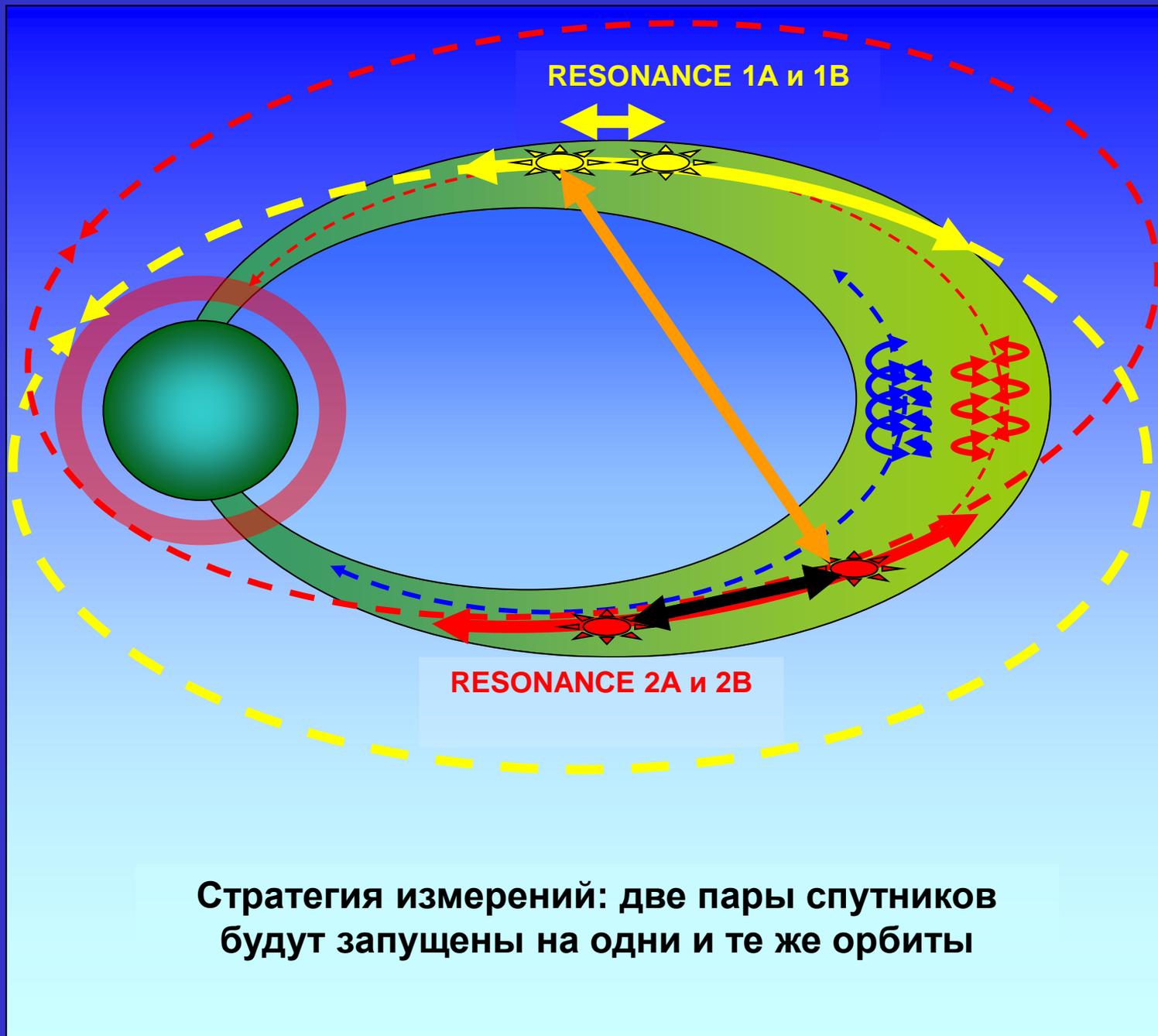
Синяя кривая – внешняя и внутренняя граница выбранной силовой трубки.

Красная кривая – проекция орбиты спутника R1 (сплошная кривая – внутри трубки, пунктирная – вне трубки).

Зеленая кривая – аналогично красной кривой для спутника R2.

Символами t1 и t2 (соответствующими цветами) отмечены синхронные вход и выход в силовую трубку спутников R1 и R2.





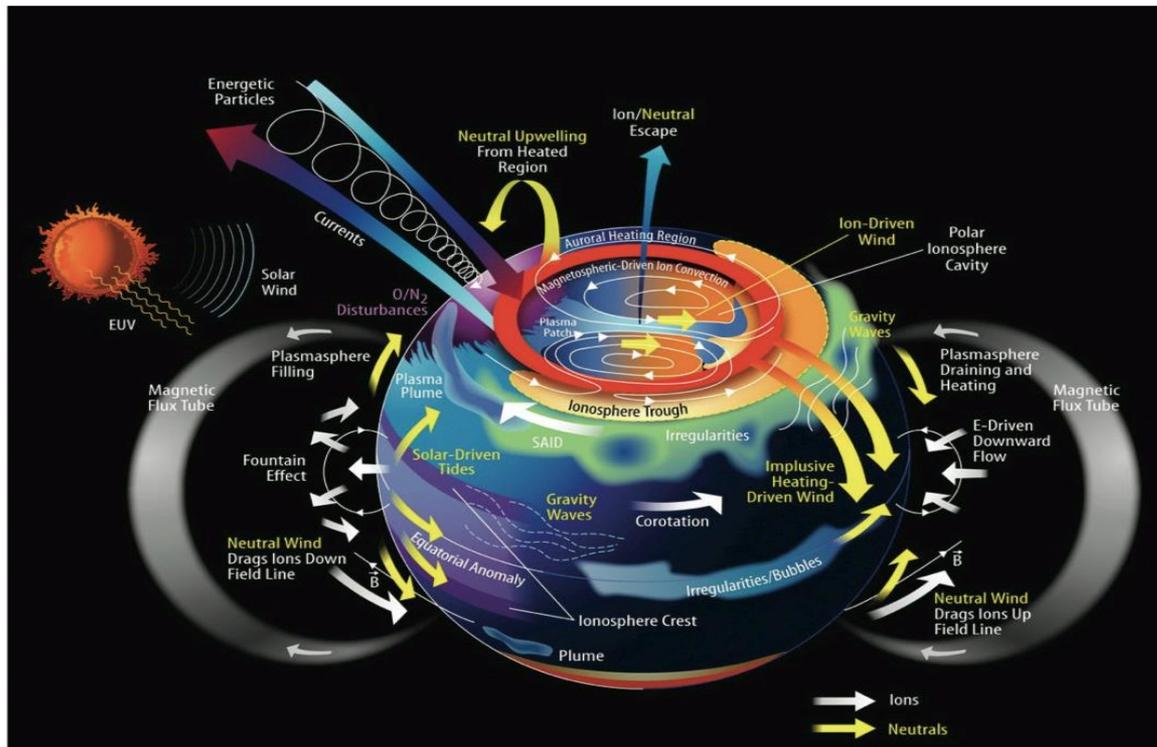
Стратегия измерений: две пары спутников
будут запущены на одни и те же орбиты



Заключение

Ионосфера влияет на нас, а мы на ионосферу

Ионосферу нужно изучать, особенно на высокоширотную



Спасибо за внимание!

Чернышов Александр Александрович

Кандидат физико-математических наук

Старший научный сотрудник Института космических исследований РАН

Доцент Факультета физики Высшей школы экономики

achernyshov@iki.rssi.ru