

Воздействие космических излучений на атмосферу Земли

Л.Л. Лазутин
НИИЯФ МГУ

СОДЕРЖАНИЕ

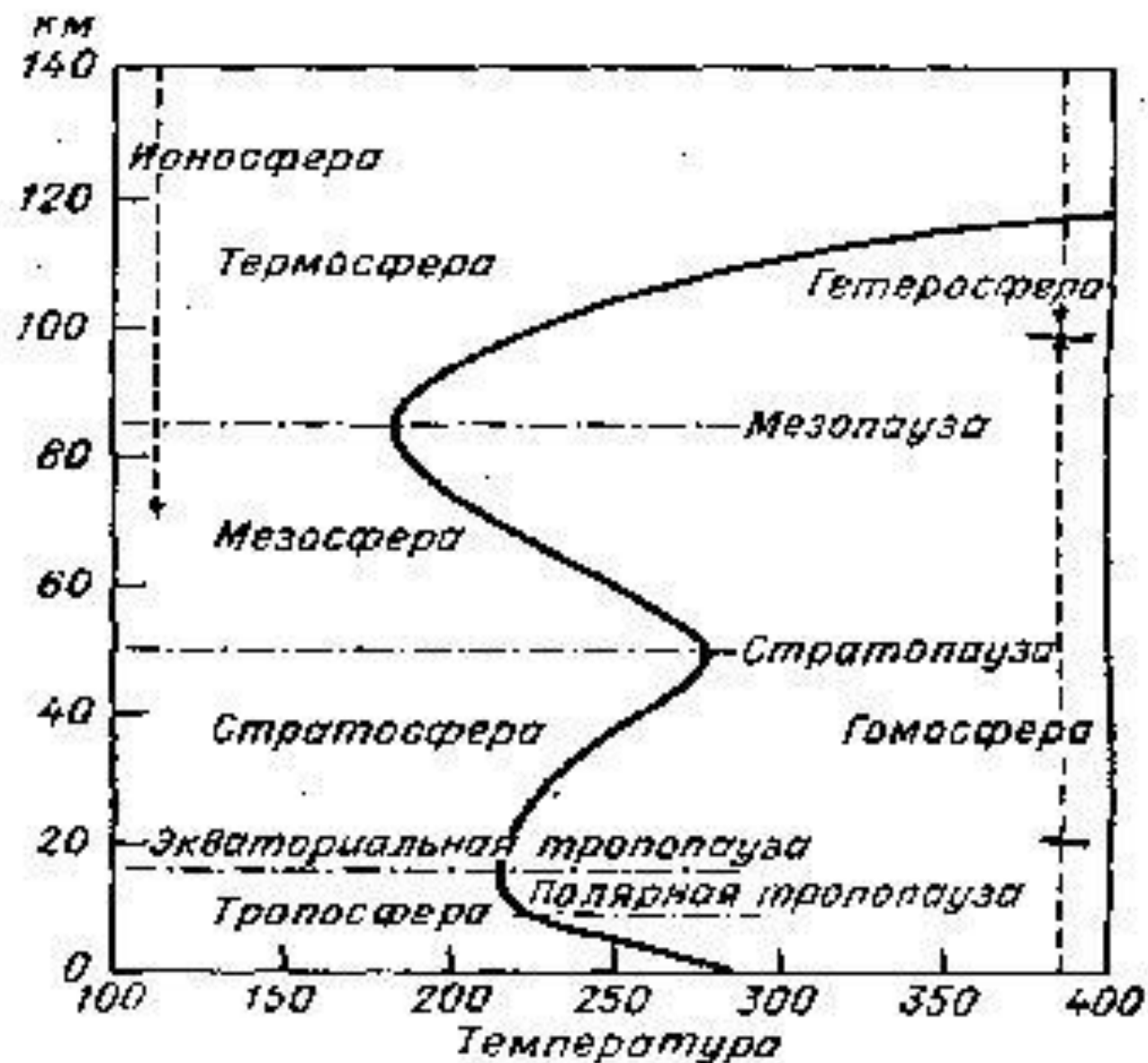
- Введение
- Ионосфера
- Распространение радиоволн
- Полярные сияния
- Токовые системы
- Пульсации и ОНЧ-излучения
- Электрические поля
- Аэростатные исследования
- Озон
- Погода и биосфера
- Литература

Введение

Космические излучения по типу делятся на корпускулярные и волновые (электромагнитные). По происхождению на галактические, солнечные и магнитосферные.

Воздействия могут приводить к изменению параметров атмосферы (таких как температура, плотность, ионный состав) и вызывать специфические процессы (полярные сияния, электроджет) в различных слоях атмосферы. Эти процессы, в свою очередь, могут воздействовать на другие природные факторы, например, на климат и биосферу Земли, на радиосвязь, навигацию и ряд других процессов прикладного значения.

Воздействия могут быть непрерывными, модулированными (например, суточной волной) или иррегулярными, внезапными. За исключением вспышечных всплесков рентгеновского излучения от Солнца, вызывающего эффект Кроше в магнитном поле и в ионосфере внезапные возмущения типа SID, все прочие иррегулярные воздействия вызываются корпускулярным излучением.



Солнечная энергия



Ионосфера

- Гипотеза о существовании проводящего слоя в верхней атмосфере была высказана английским ученым Стюартом в 1878 г., в 1902 г. Кеннеди в США и Хевисайд в Англии предположили существование в высоких слоях атмосферы области с большой проводимостью для объяснения распространения радиоволн на большие расстояния. В 1925 г. английские исследователи Эпплтон и Барнет впервые экспериментально доказали существование областей, отражающих радиоволны, и положили начало их систематическому изучению.
- Ионосферой мы называем ионизированную область земной атмосферы, начиная с высот порядка 60 км. Верхняя граница ионосферы не определяется четко, примерно на высотах в несколько тысяч км происходит плавный переход в плазмосферу или плазменные слои магнитосферы.
- Основные источники ионизации земной атмосферы — ультрафиолетовое излучение Солнца, мягкое рентгеновское излучение, солнечной короны, и корпускулярные потоки, солнечного, галактического и магнитосферного происхождения.

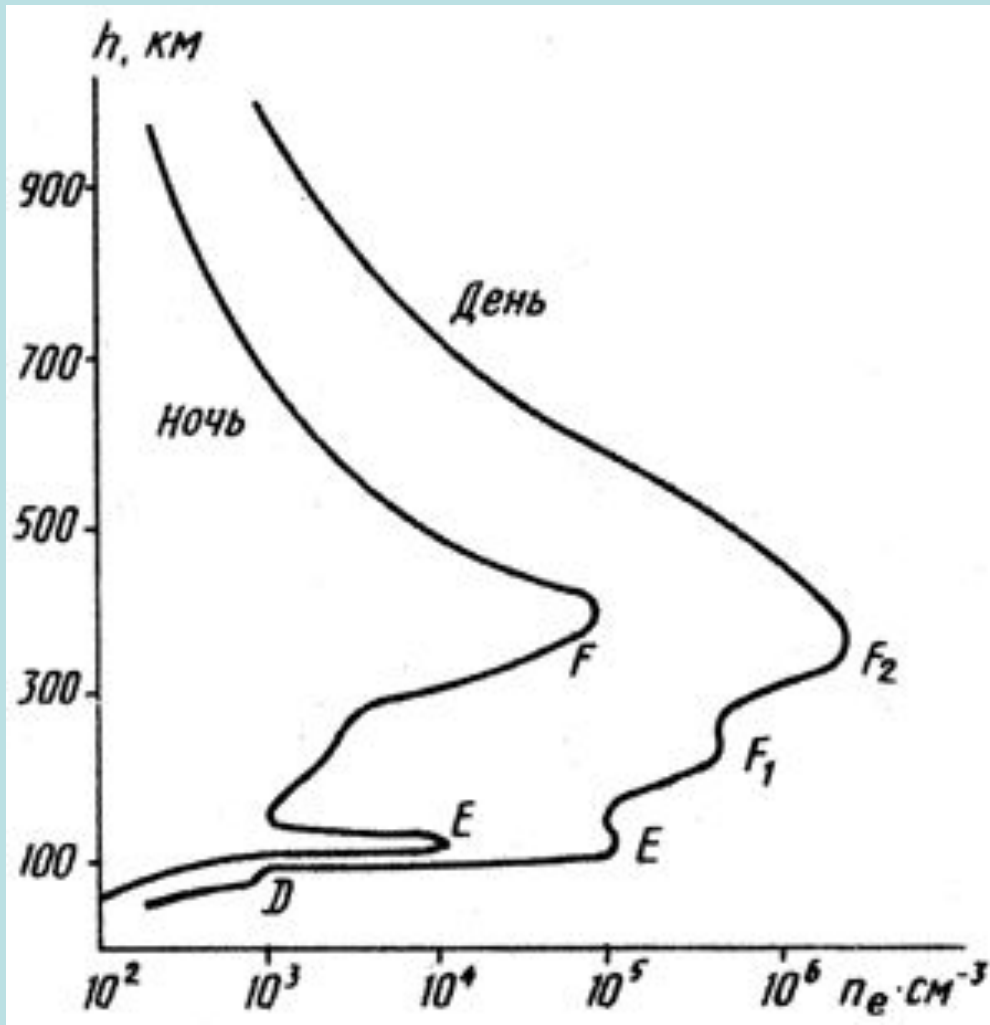
СЛОИ ИОНОСФЕРЫ

Ионосферные слои — области максимумов концентрации свободных электронов в единице объема.

F - 180—300 км

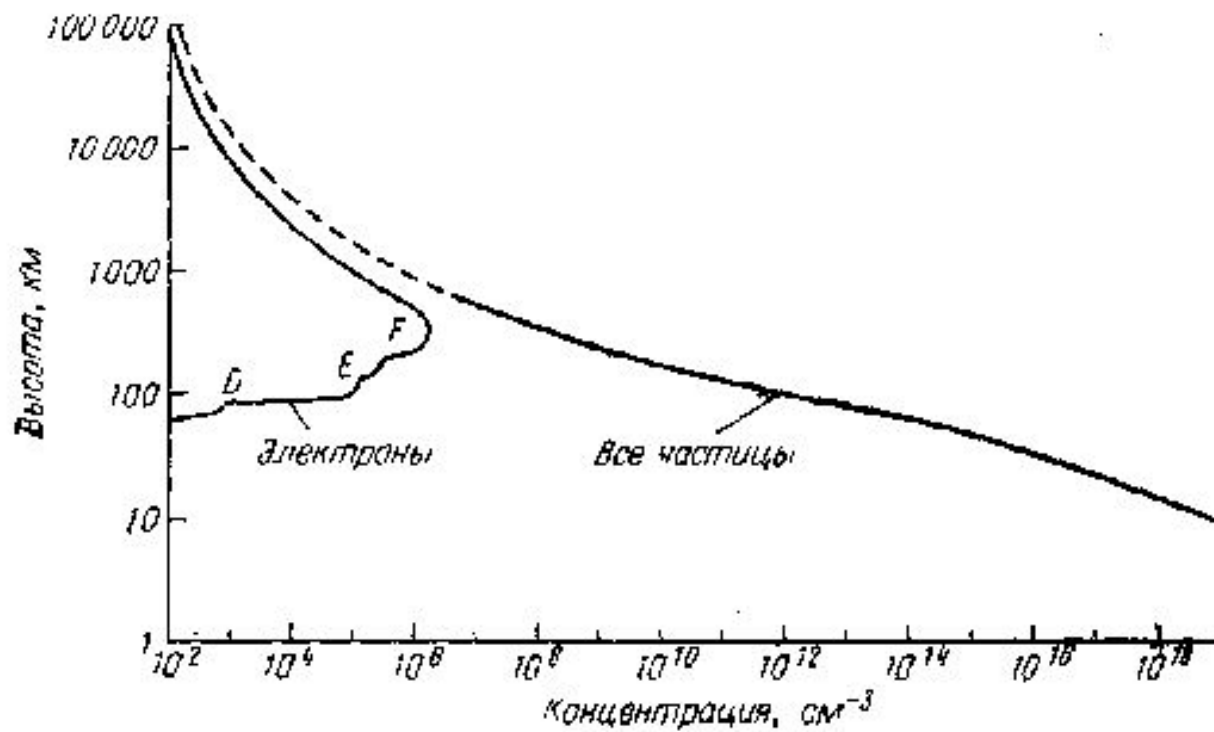
E - 100—120 км;

D - 60—70 км;



Источники ионизации в средней атмосфере

Источники	Поток эрг. $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
Постоянные	
Галактические космические лучи	$10^3 - 10^2$
Космическое рентгеновское излучение (0,1-1 нм)	$4 \cdot 10^9$
Солнечное рентгеновское излучение: слабая активность	
$\lambda < 1$	$10^{-3} - 10^{-1}$
$\lambda_{\text{нм}} \sim 10$	$10^{-1} - 1$
Солнечная линия Лайман- α	10
прямое излучение геокороне	$6 \cdot 10^3 - 6 \cdot 10^2$
Магнитосферные электроны авроральная зона	$10^1 - 10^4 - 10^3$
средние широты	10
Спорадические	
Солнечные протоны (ППШ)	$10^3 - 50$
Солнечное рентгеновское излучение: солнечные вспышки	
$\lambda < 1$	< 3
$\lambda_{\text{нм}} \sim 10$	< 35
Космическое рентгеновское излучение: источник SCO X=1,	$4 \cdot 10^7$
$\lambda = 1 - 10$	
Магнитосферные электроны	10^{-3}
авроральная зона	$1 - 10^3 - 10^2$
средние широты	10



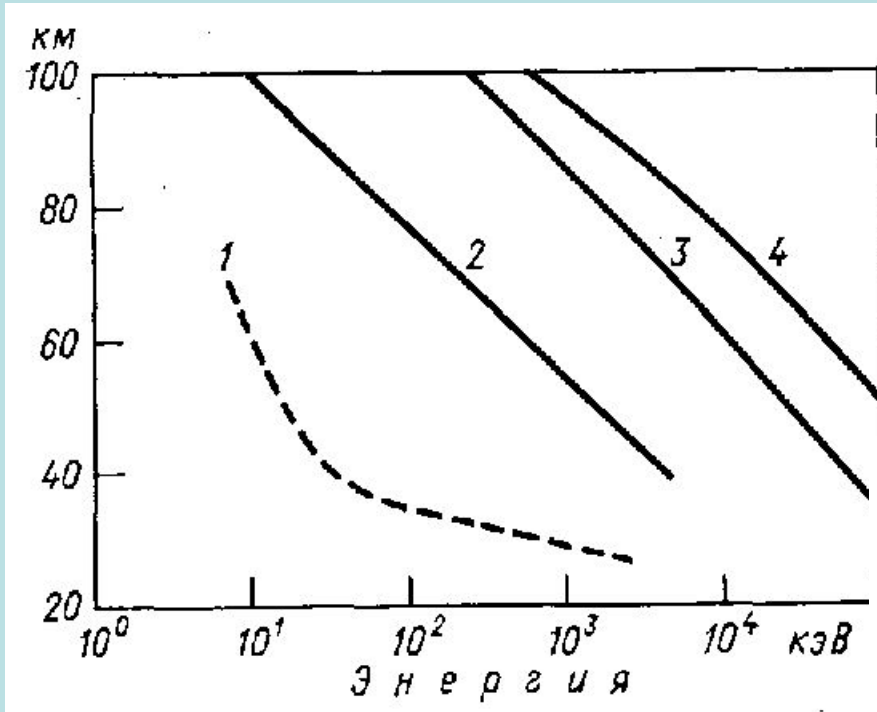
Распределение по высоте концентрации электронов и нейтральных молекул.

Примерная глубина проникновения частиц различных типов как функция их энергии. 1 – рентгеновское излучение, 2 – электроны, 3 – протоны, 4 – альфа частицы

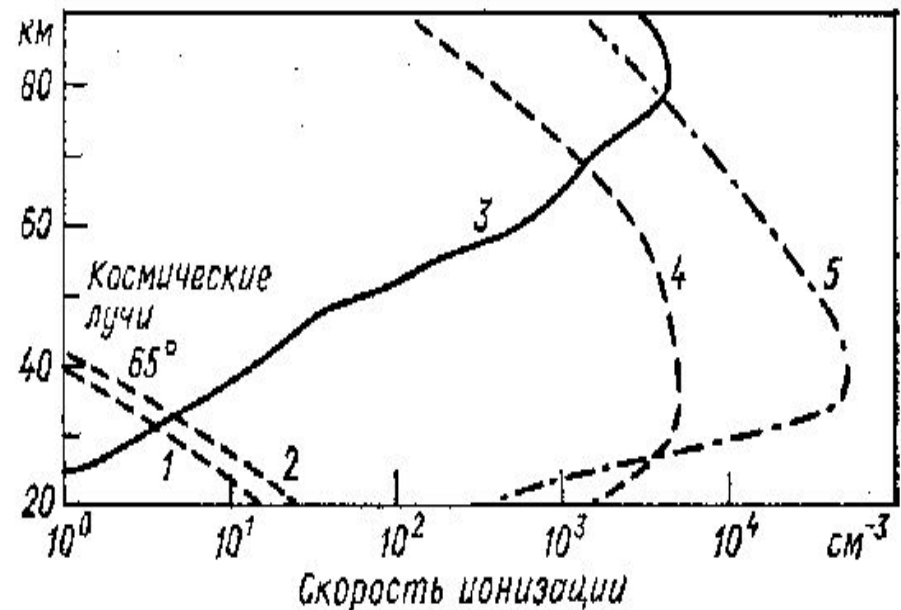
Скорость ионизации (число актов ионизации в секунду в единичном объеме) заряженными частицами на высоте h равна:

$$q(z) = \rho(z) \int \left(\frac{dE}{dx} \right) \frac{1}{W} \frac{dI}{dE} dE,$$

где W – средняя энергия, необходимая для образования одной ионной пары ($W \approx 35$ эв); dI/dE – дифференциальный поток частиц в единицах $(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{эВ})^{-1}$; $\rho(z)$ – массовая плотность на высоте z , dE/dx – энергетические потери частицы в единицах $\text{см}^2 \cdot \text{эВ} \cdot \text{г}^{-1}$.



Скорость ионизации космическими лучами в период максимума (1) и минимума (2) солнечной активности и солнечными протонами в июле 1982 г. (3), июле 1959 г. (4), августе 1972 г. (5).

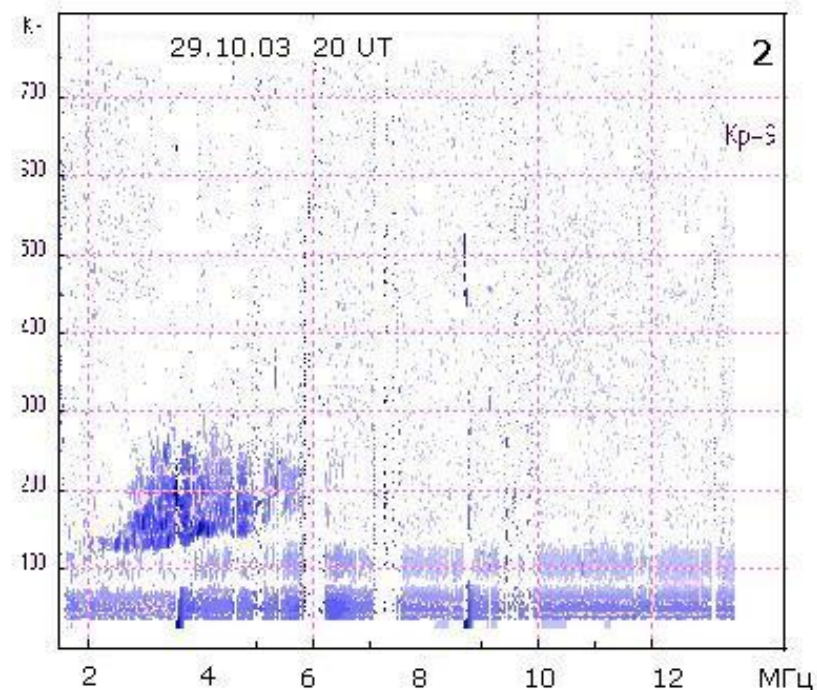
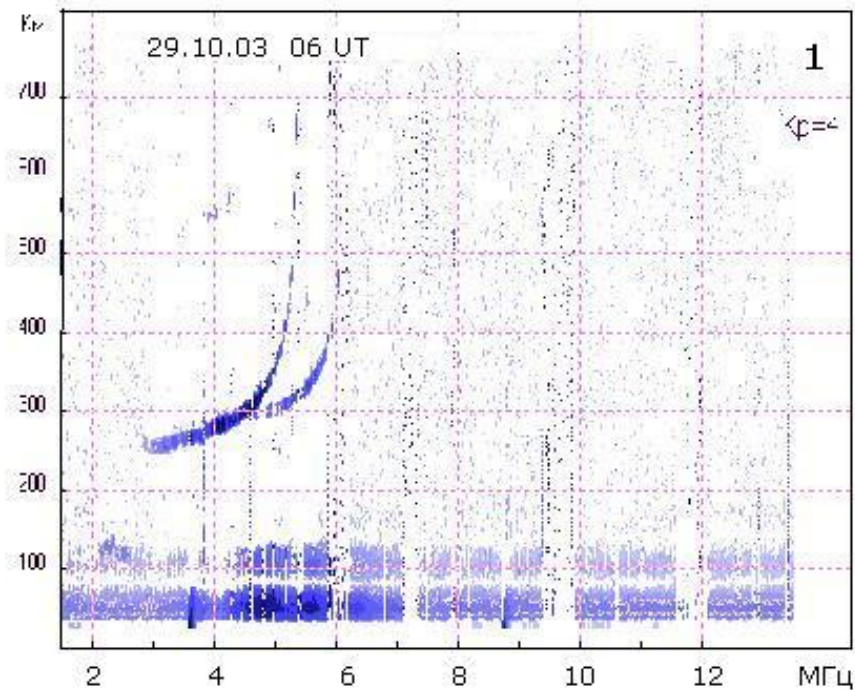


Аппаратура и методы исследования ионосферы

- Наиболее распространенные методы - ионозонды, риометры, радары, установки некогерентного рассеяния, распространение радиоволн, прием сигналов со спутников (томография).



Ионозонды используют метод импульсного зондирования — посылки радиоимпульсов и наблюдения их отражений от различных слоев ионосферы с измерением времени запаздывания и изучением формы отраженных сигналов. На фотографии - приемно-передающая аппаратура современной ионосферной станции (Кируна, Швеция)



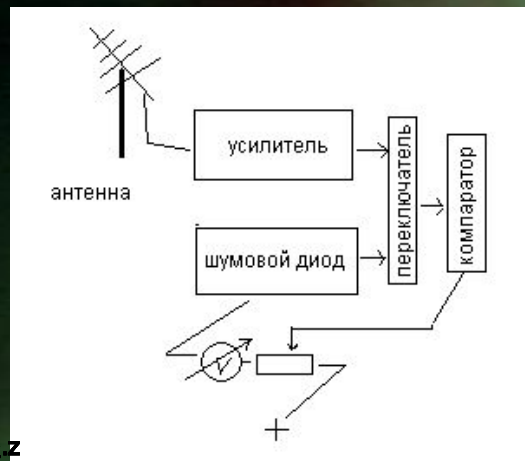
Ионограммы, Троицк, ИЗМИРАН

Слева – спокойное время, слои F1 и F2, справа- во время магнитной бури, слой *Es* сильно рассеянный по высоте, слой F экранирован

- Метод некогерентного рассеяния радиоволн



Блок-схема риометра



Поглощение волны вдоль пути на расстоянии z описывается выражением

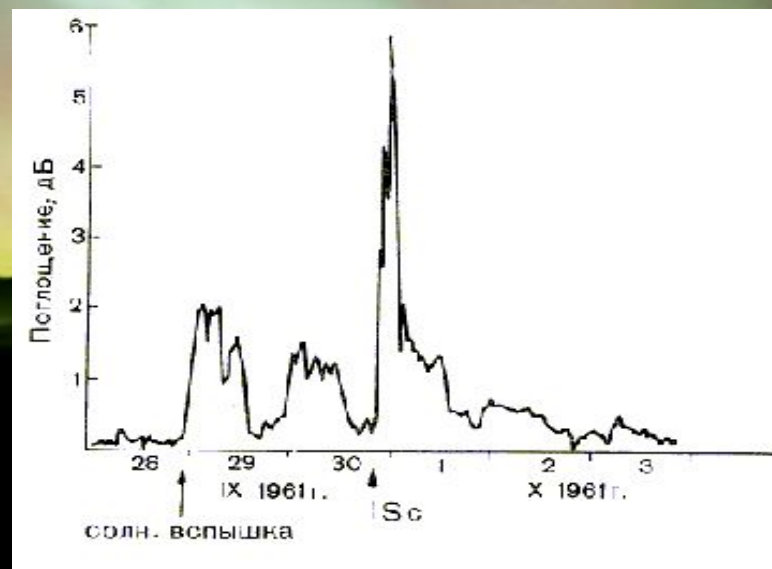
$$E = E_0 e^{-\chi \cdot L}$$

χ - показатель поглощения

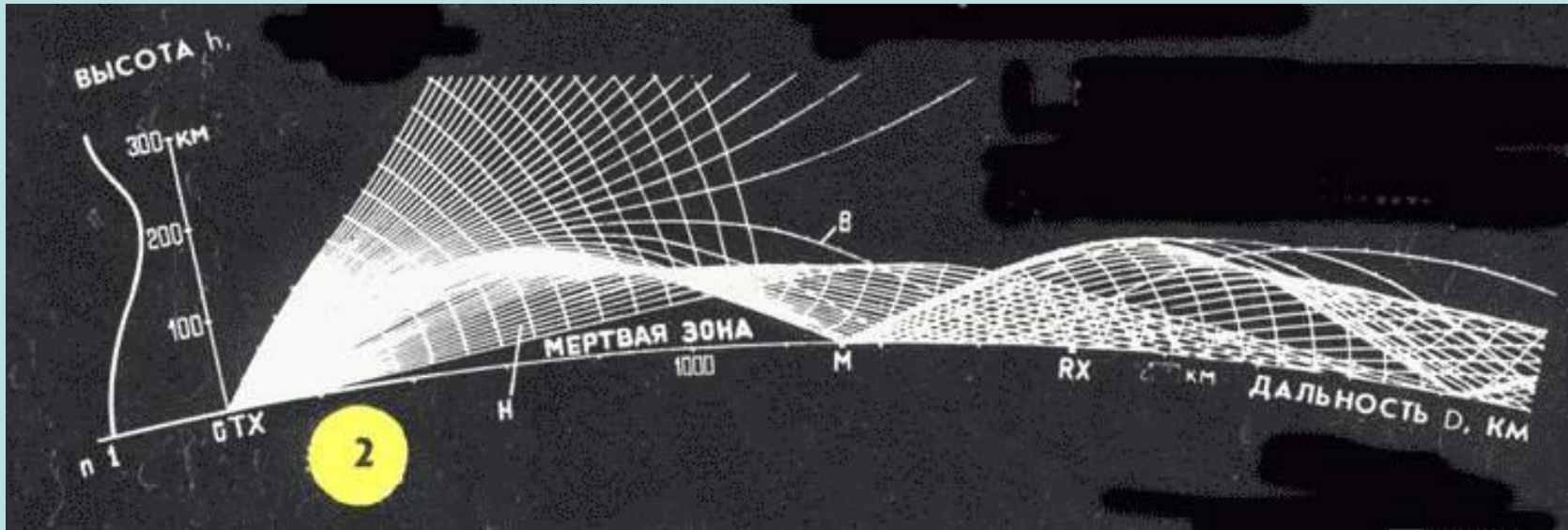
$$\chi = \frac{2\pi e^2}{m_e c} \frac{n_e \nu_e}{\omega^2 + \nu_e^2}$$

m_e n_e и ν_e - масса, концентрация электронов и частота соударений, $\omega=2\pi f$ - частота волны.

Поглощение типа полярной шапки (ППШ) и авроральное (после SC)



РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН



Свободные электроны, возникающие в процессе ионизации атомов газов атмосферы, играют решающую роль в процессах взаимодействия с радиоволнами (роль положительных ионов в этих процессах вследствие их большой массы ничтожно мала).

Рисунок иллюстрирует скачковый механизм распространения КВ, изображены рассчитанные на ЭВМ траектории лучей из точки ТХ на Земле на частоте 12 МГц. Вертикальный профиль коэффициента преломления в F-слое показан на рисунке слева. Частота $f_{кр}$ меньше частоты f , поэтому крутые лучи уходят в космос. Однако лучи испытывают рефракцию — постепенное изменение направления, что приводит к возвращению части лучей (не слишком круто идущих вверх!) на Землю, где они отражаются и опять уходят вверх. Совершая таким образом скачки, лучи продвигаются от ТХ к точке приема РХ примерно по дуге большого круга, соединяющей точки ТХ и РХ. Возможны два пути: короткий и длинный. На каждом из них сигнал КВ может приходиться по нескольким траекториям с различным числом скачков, т. е. разными «модами».

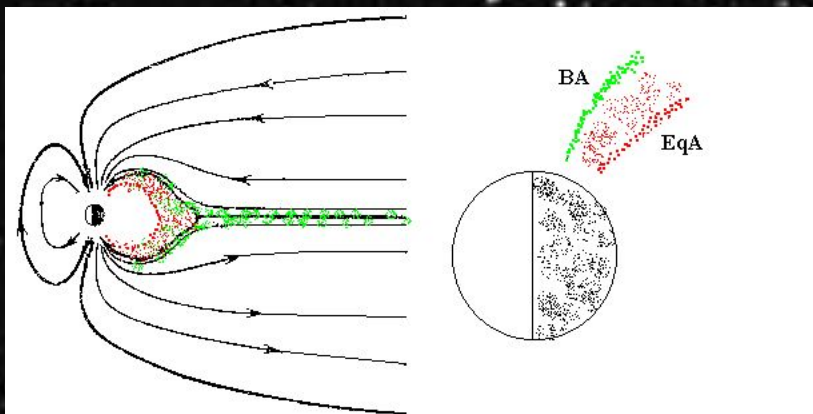


ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ

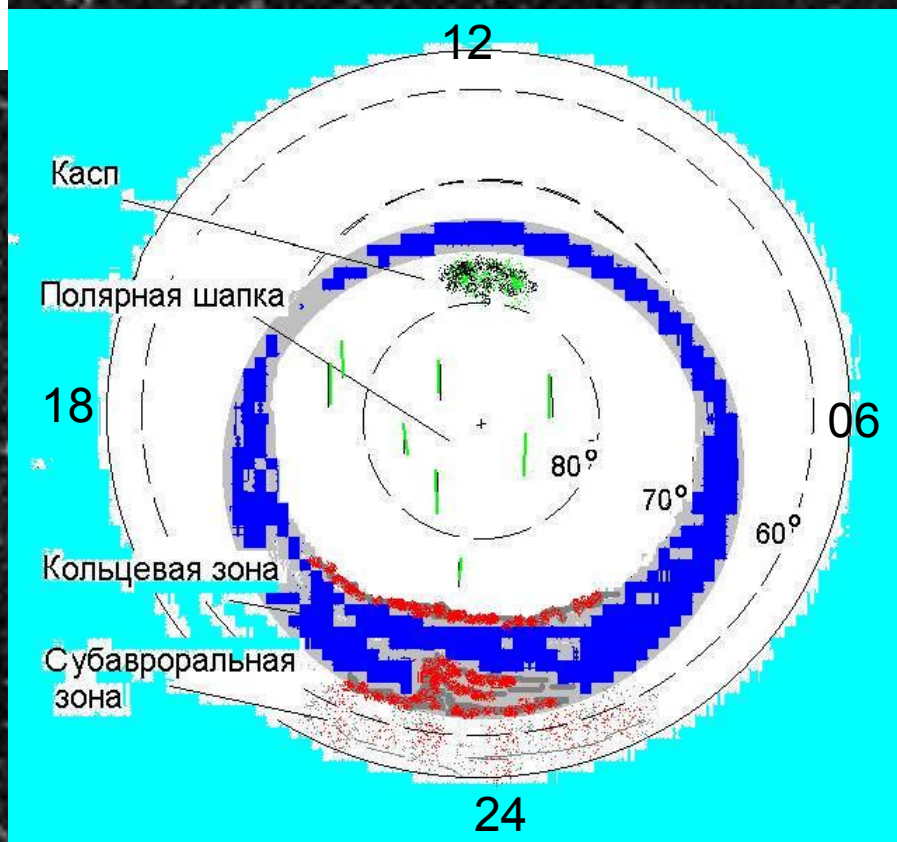
Erschreckliche Wunderwerk/ so abermal den 5. October/ 1591. Jar/ in der Nacht zu Nürnberg ist gesehen worden.



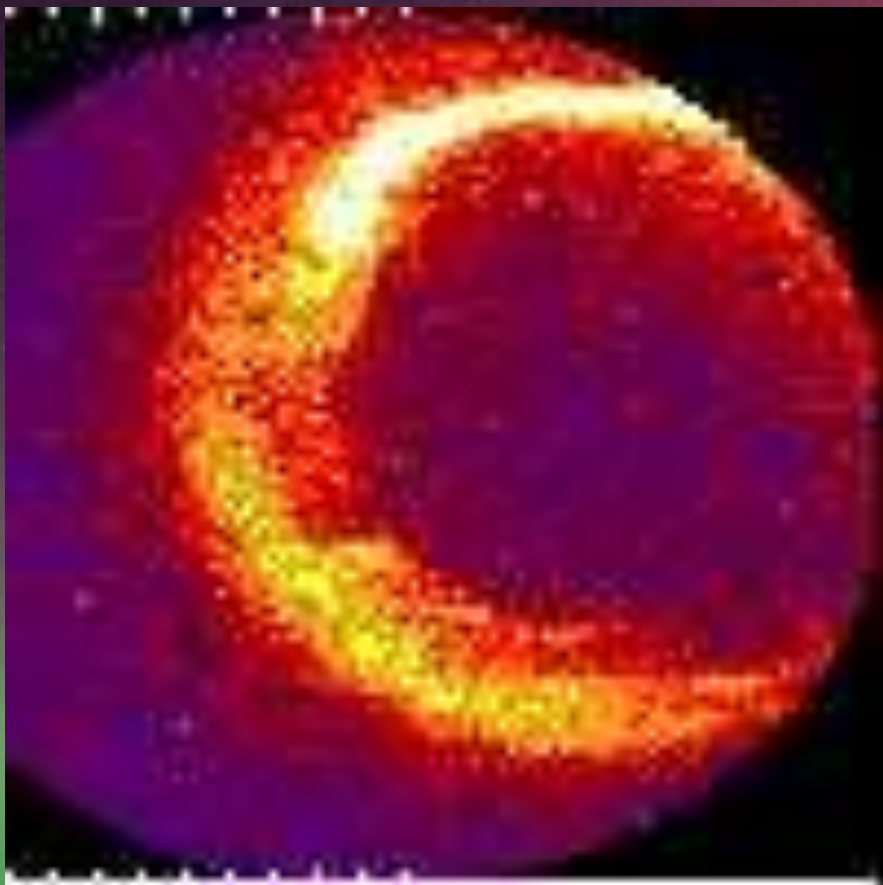
Полярное сияние 5 октября 1591г. Гравюра по дереву
Вольфа Дрехсея из музея Нюрнберга



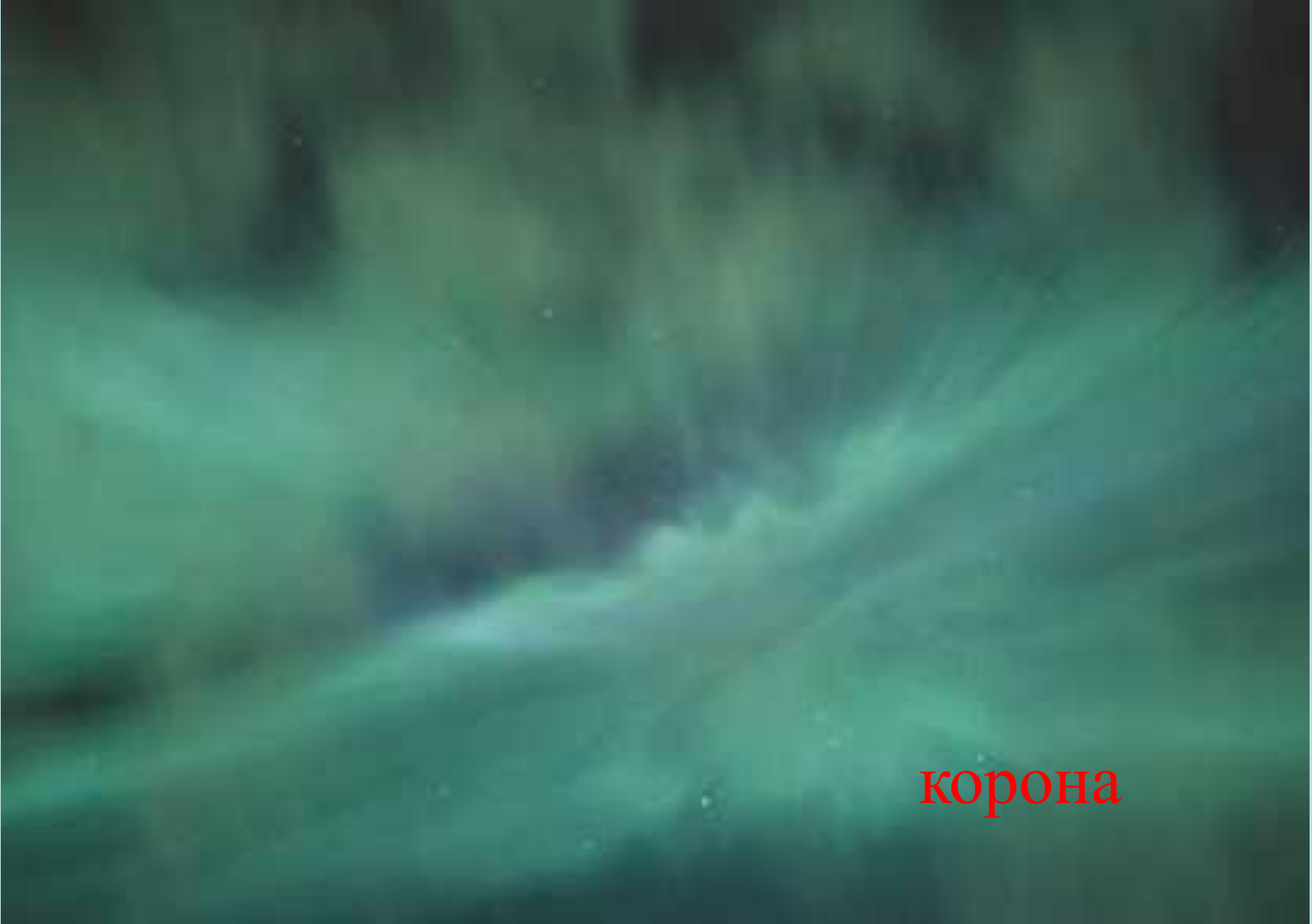
Справа - основные зоны полярных сияний,
 Вверху – проекция кольцевой зоны сияний на магнитосферу.



Кольцо-овал полярных сияний



О. В. ХОРОШЕВА



корона

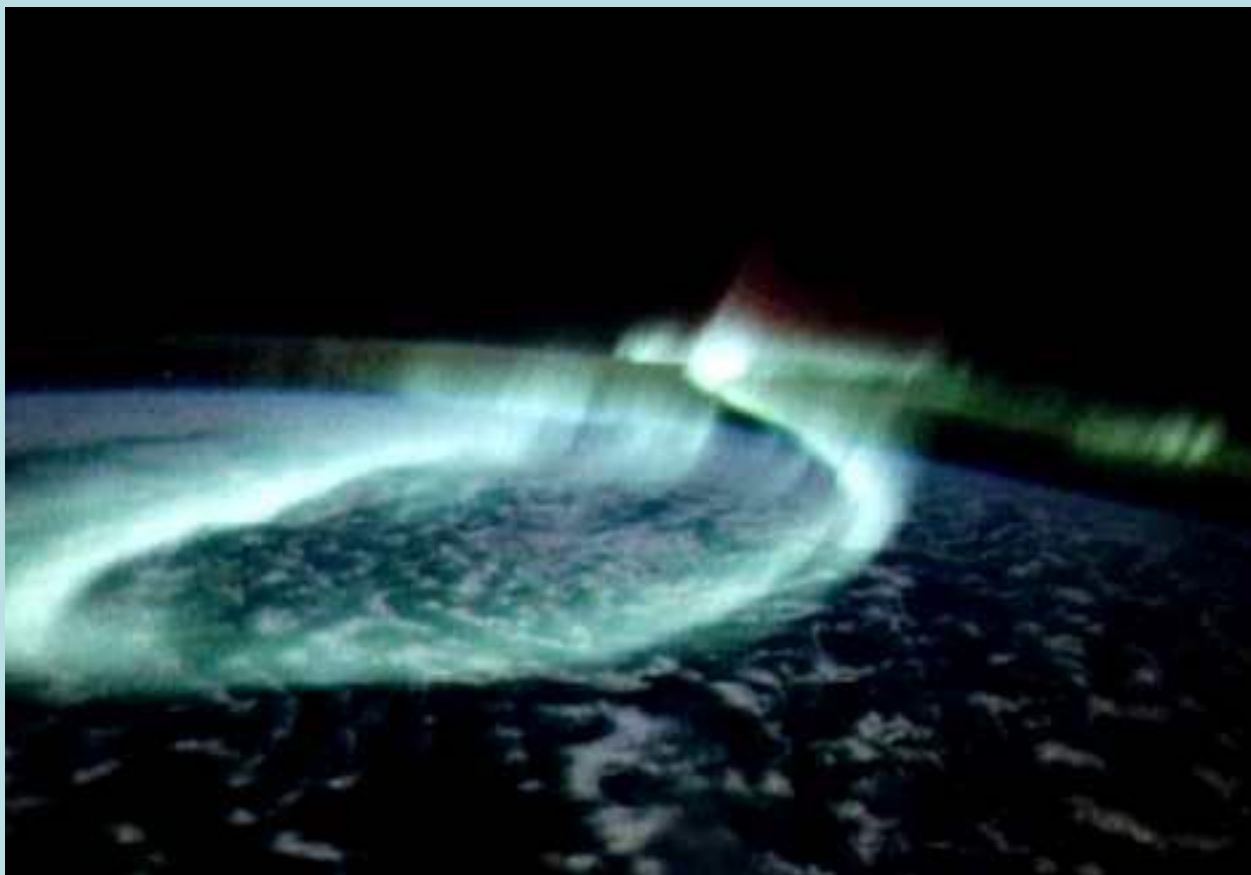


Лучи и лучистая дуга

The image displays a night sky with a prominent auroral display. A broad, diffuse band of light stretches across the horizon, exhibiting a color gradient from a bright yellow-green at the top to a deep red at the bottom. The lower portion of this band is particularly intense and has a slightly more defined edge. The background is a dark, starry sky. In the foreground, the dark silhouette of a mountain range is visible against the glowing light. The overall scene is a natural phenomenon of the aurora borealis.

Диффузные дуги с нижним красным краем

Фотография полярного сияния с борта КА «ШАТТЛ»

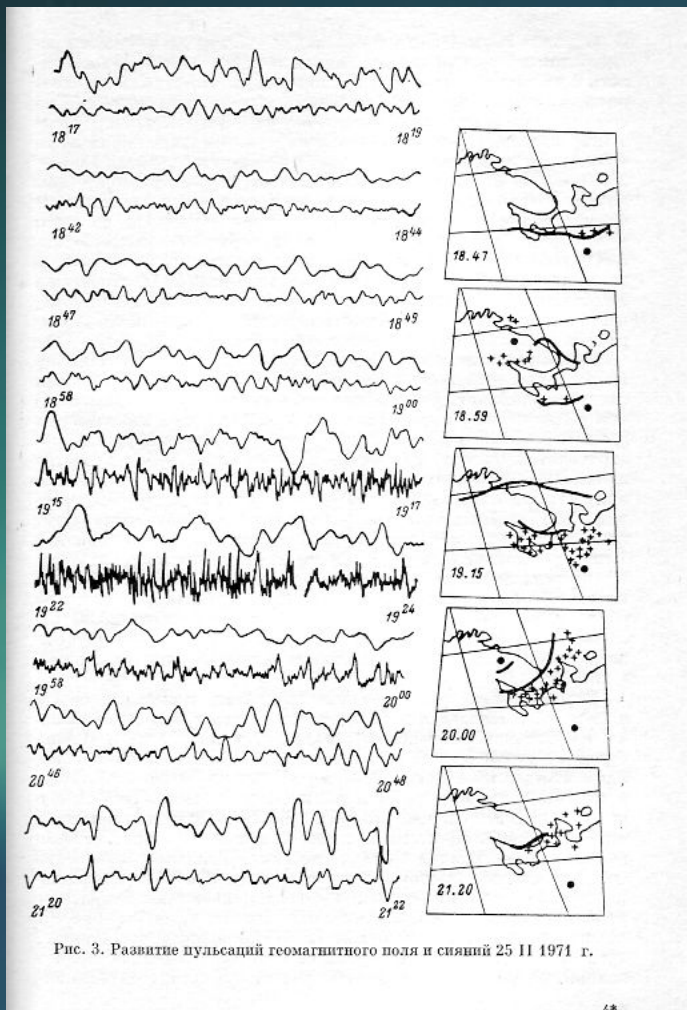


Методы регистрации полярных сияний

1. Наиболее древний способ - визуальные наблюдения.
2. Регистрация п.с. фотоаппаратурой - в частности камерами всего неба (all-sky camera). Камера с-180 А.И. Лебединского работала долгие годы на сети отечественных станций.
3. Фотометры, измеряющие яркость п.с. Широко- и узко-направленные, сканирующие, в отдельных линиях или интегральные.
4. Спектрометры или спектрографы (камера С180s)
5. ТВ-камеры в настоящее время пришли на смену камерам всего неба.
6. Регистрация п.с. на борту космических аппаратов.

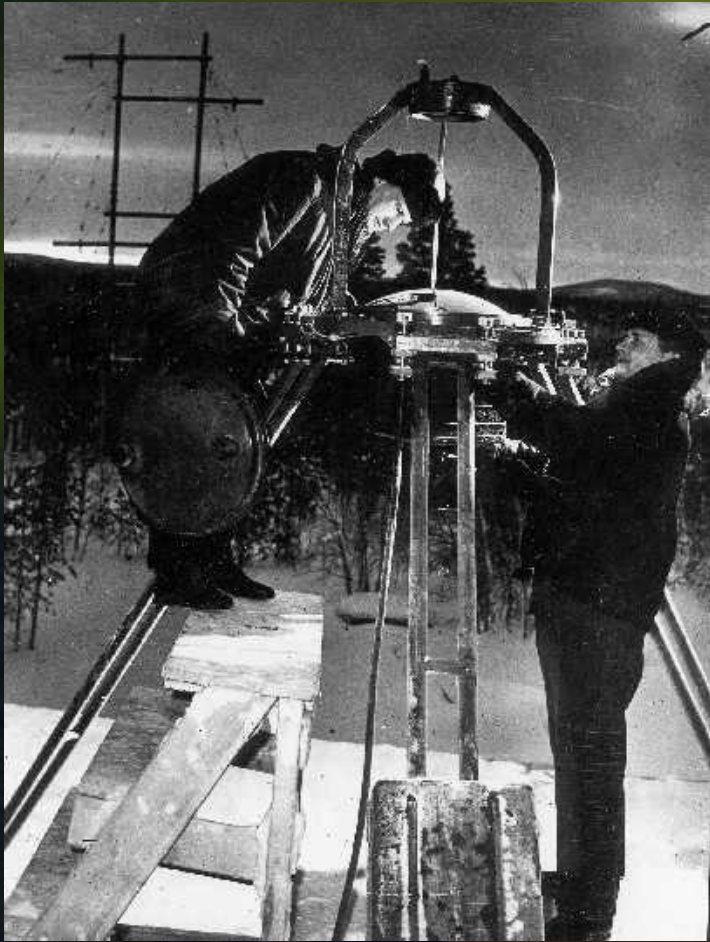


Узконаправленный Фотометр,
Яренск, Арх. обл., Советско-
французский эксперимент



Запись пульсаций свечения с
помощью фотометра.

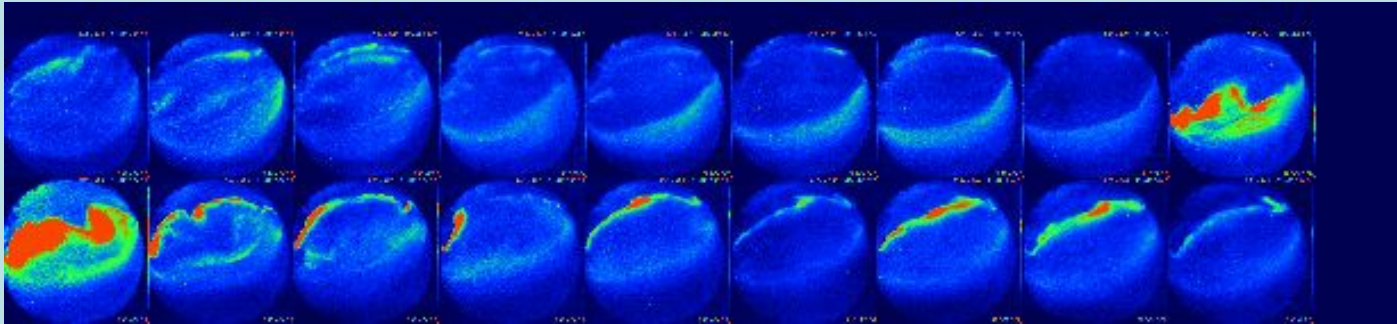




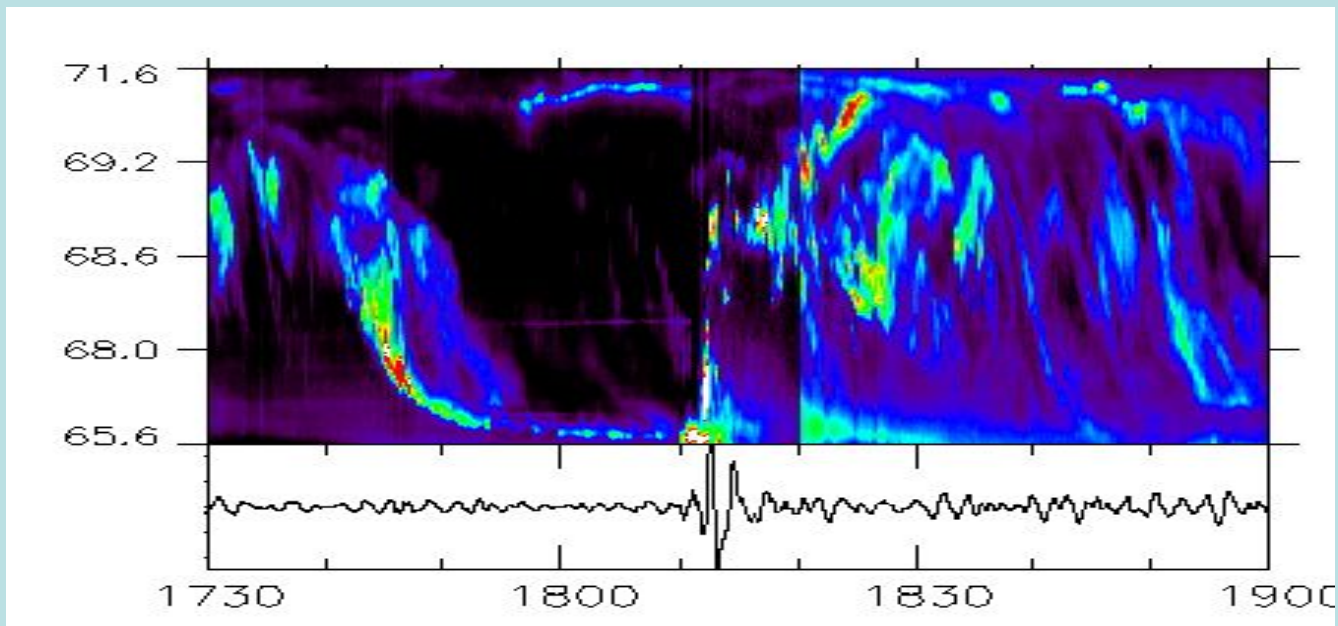
Камера всего неба,
Лопарская, МГГ, 1958г.

Снимок полярного
сияния с помощью
камеры всего неба,
Ловозеро, 2003г.

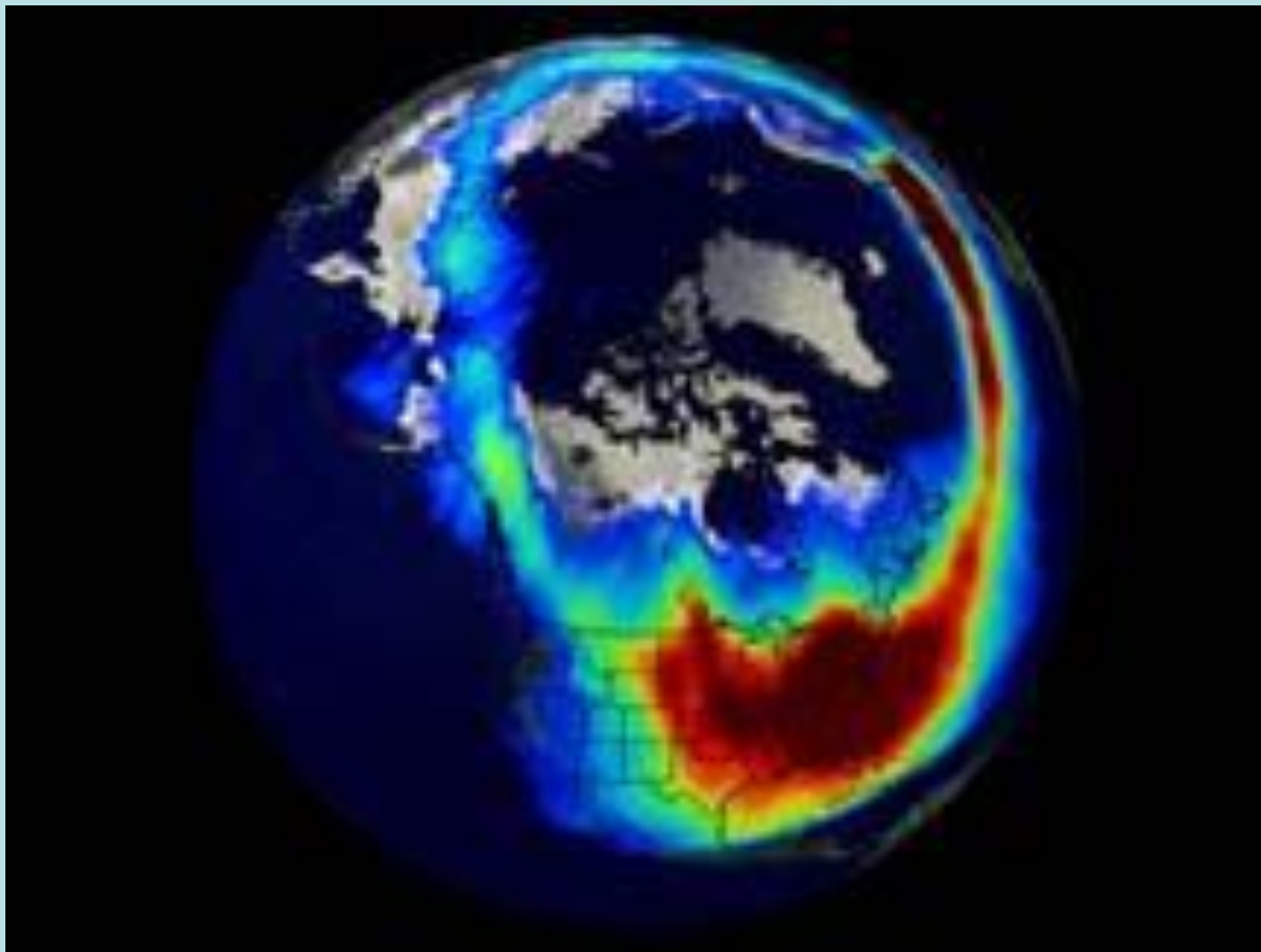




Телекадры сияния и кеограмма – распределение яркости свечения по широте во время подготовительной фазы суббури и полярной экспансии.




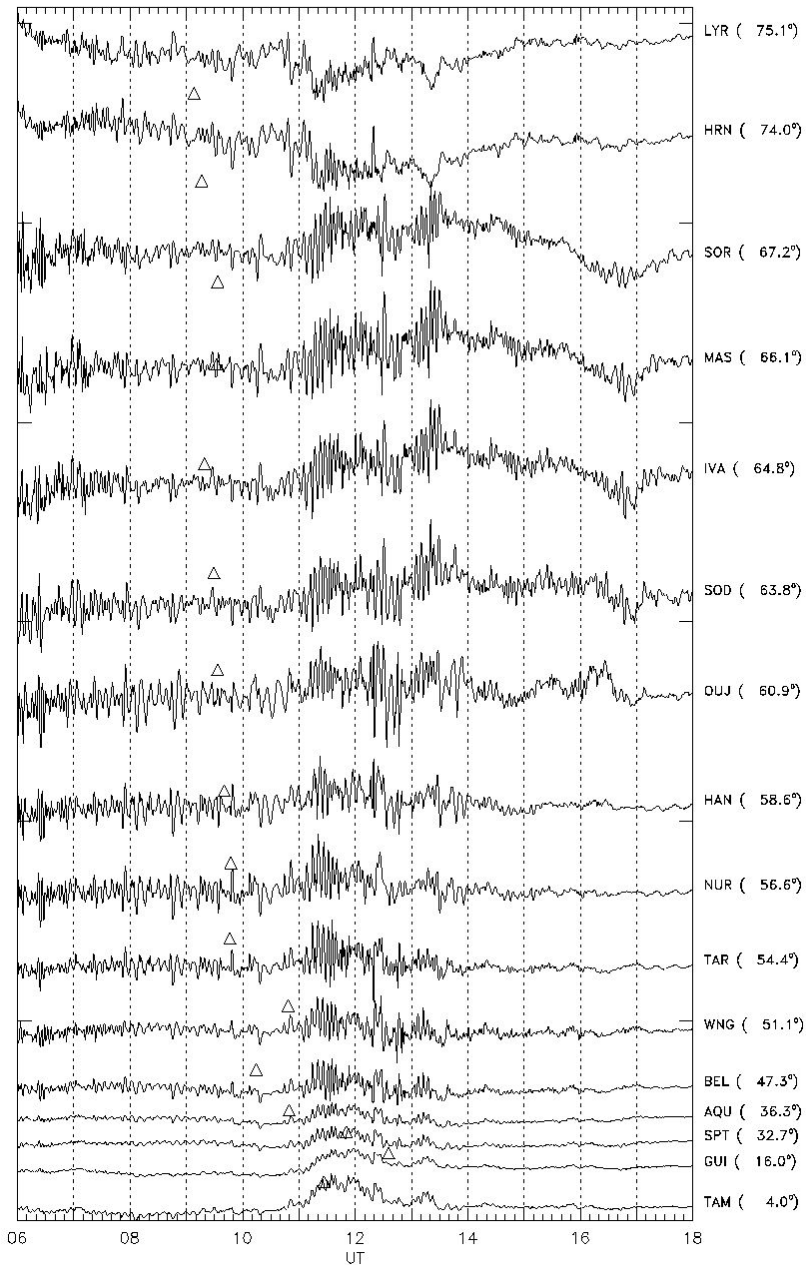
Овал полярных сияний во время магнитной бури. Спутник "POLAR"



2000 нТ/ дел.

31.10.03

X-компонента



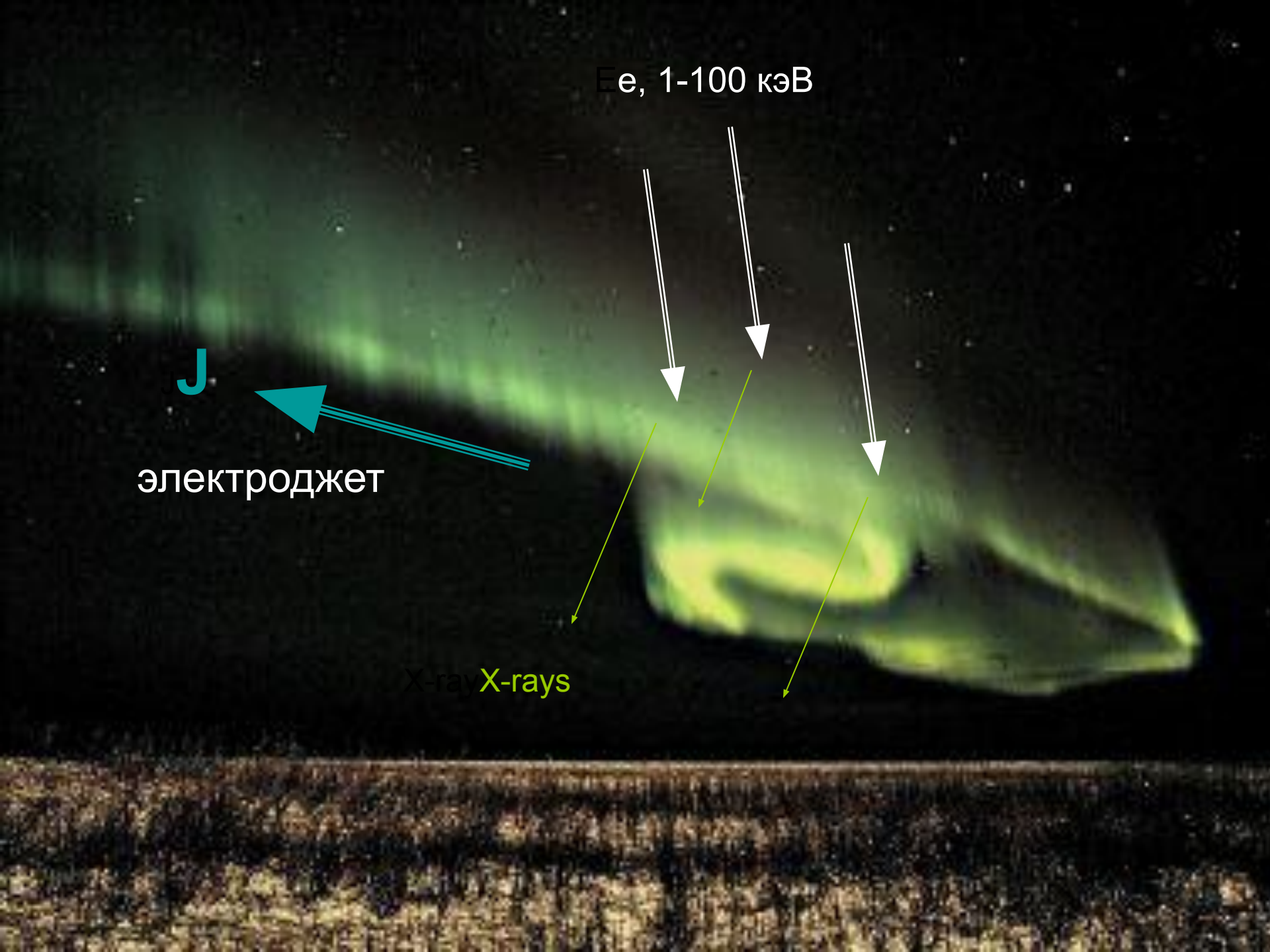
**Токовые
системы.
Пульсации
магнитного
поля.
Волны**

$E_e, 1-100 \text{ кэВ}$

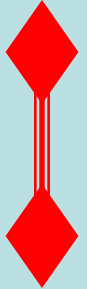
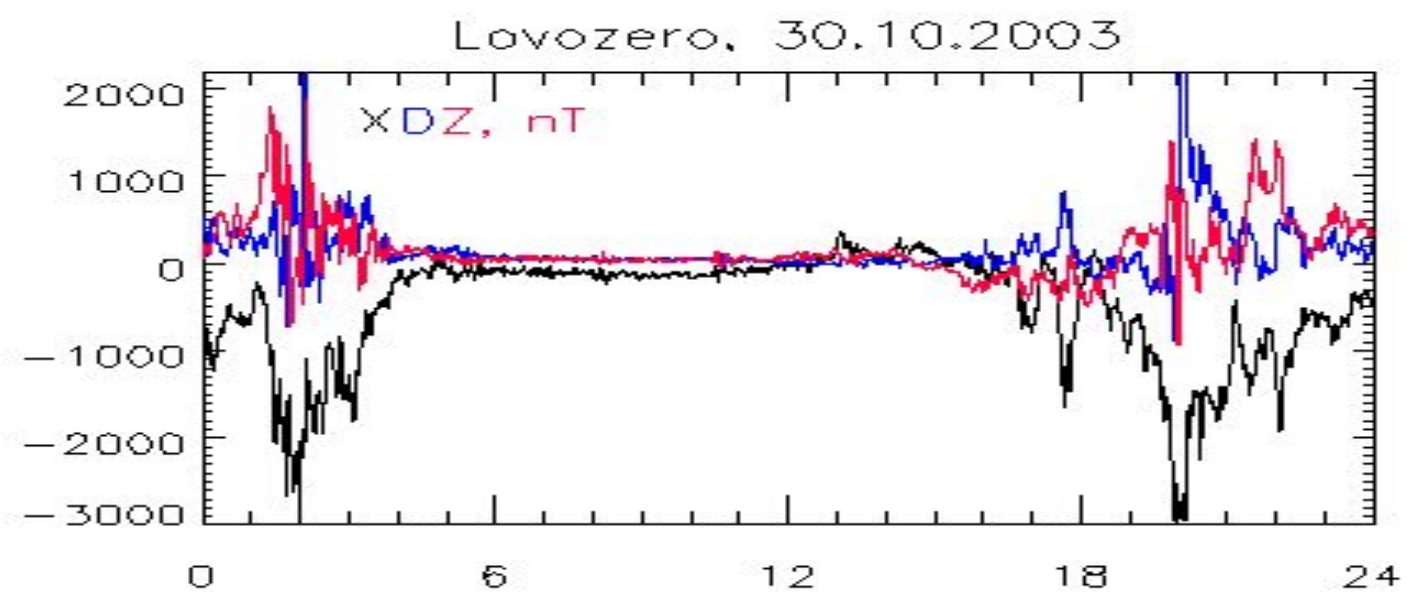
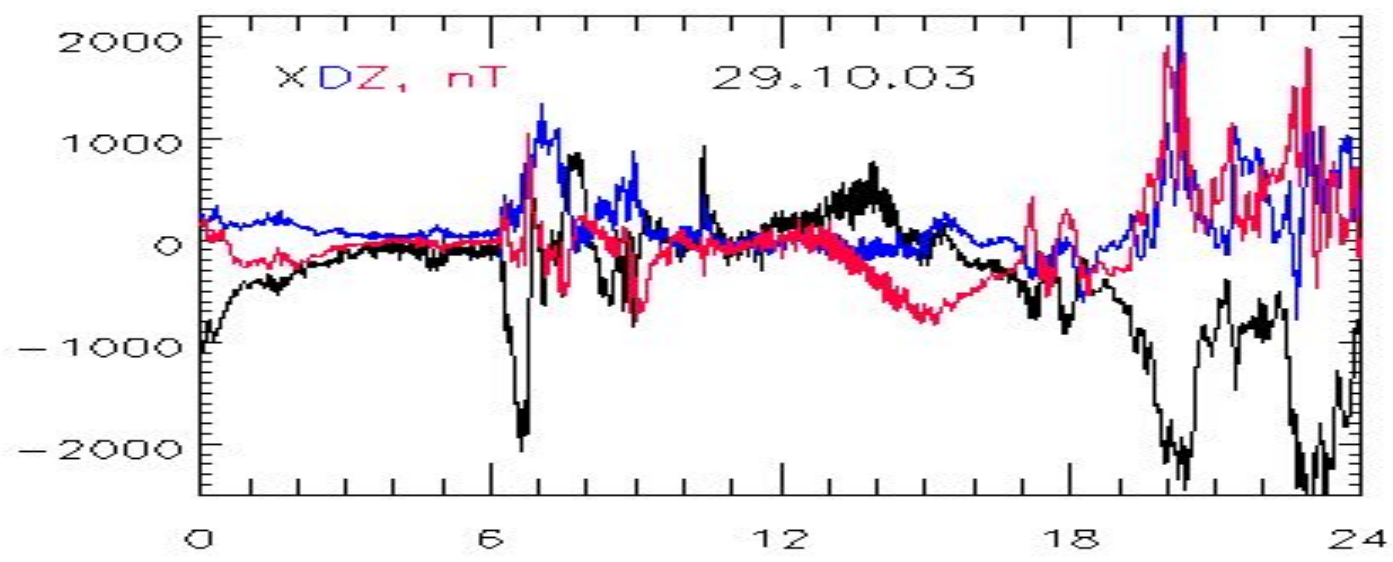
J

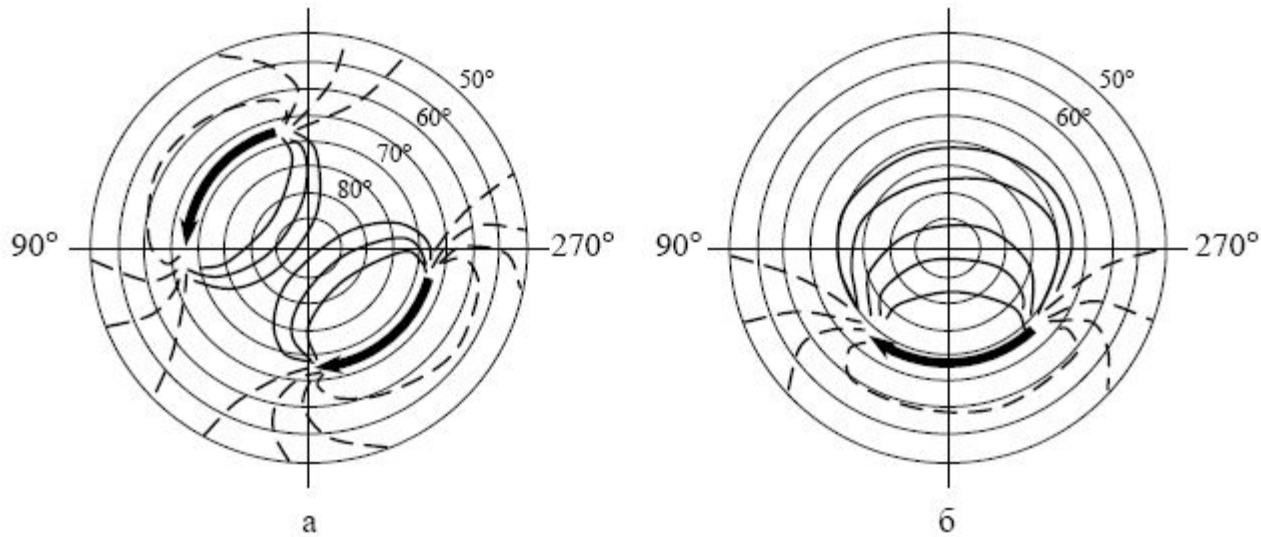
электроджет

X-ray X-rays

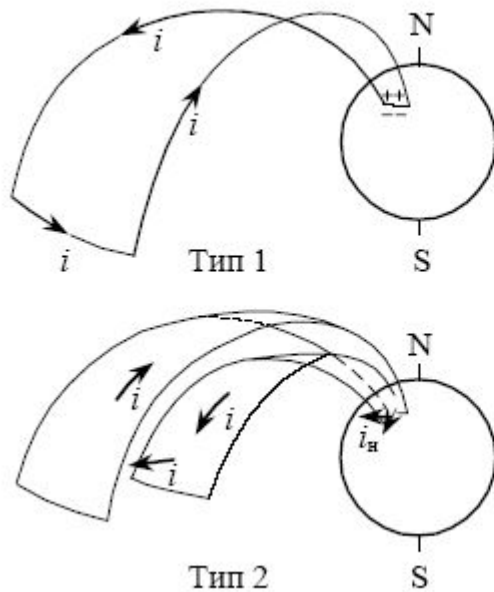


Магнитограмма obs. Ловозеро во время интенсивной суббуревой активности. Местная полночь в 22 UT.

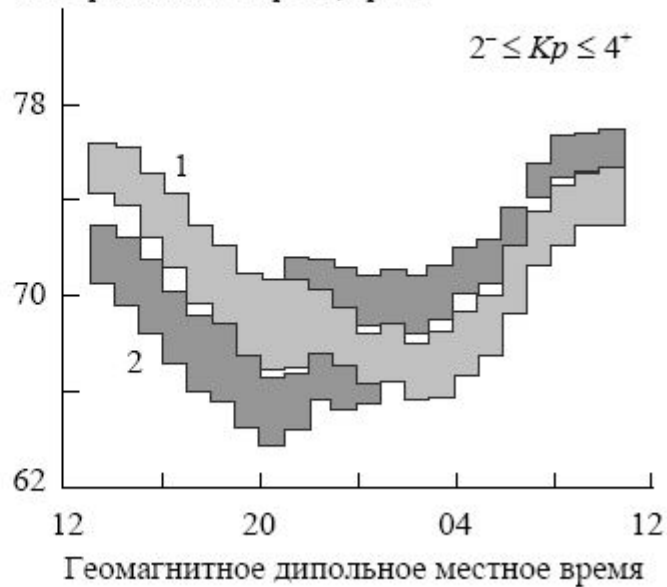




Ионосферные
токовые системы
Dp11 (а) и *Dp12*
(б)



Инвариантная широта, град.



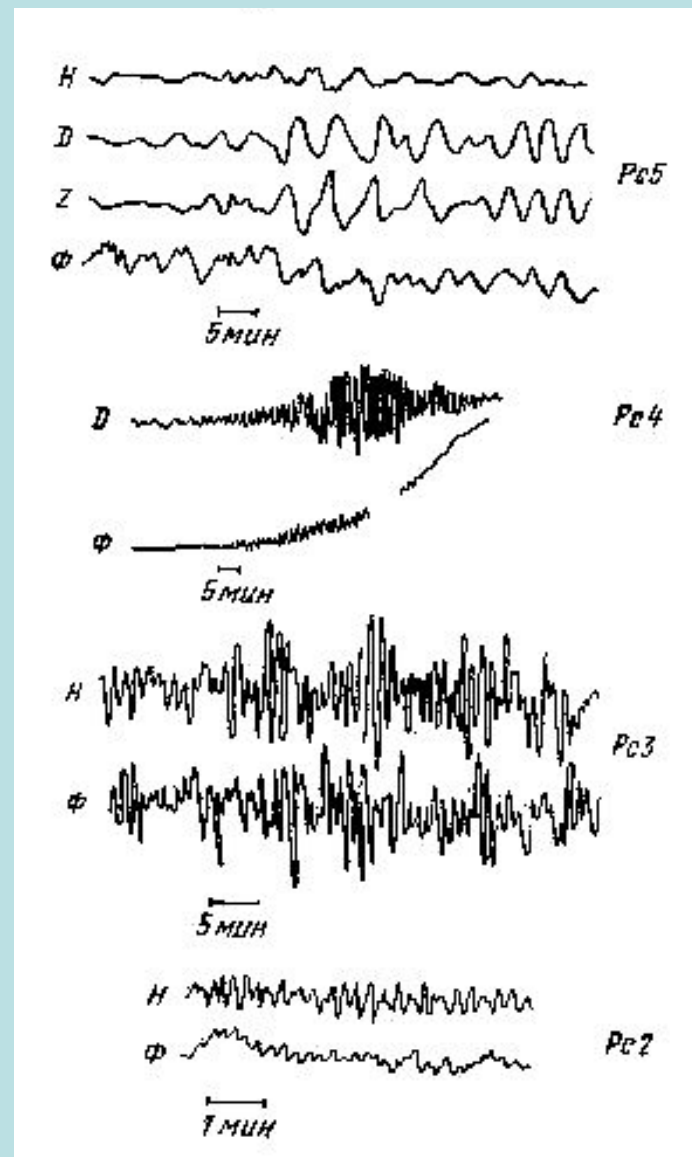
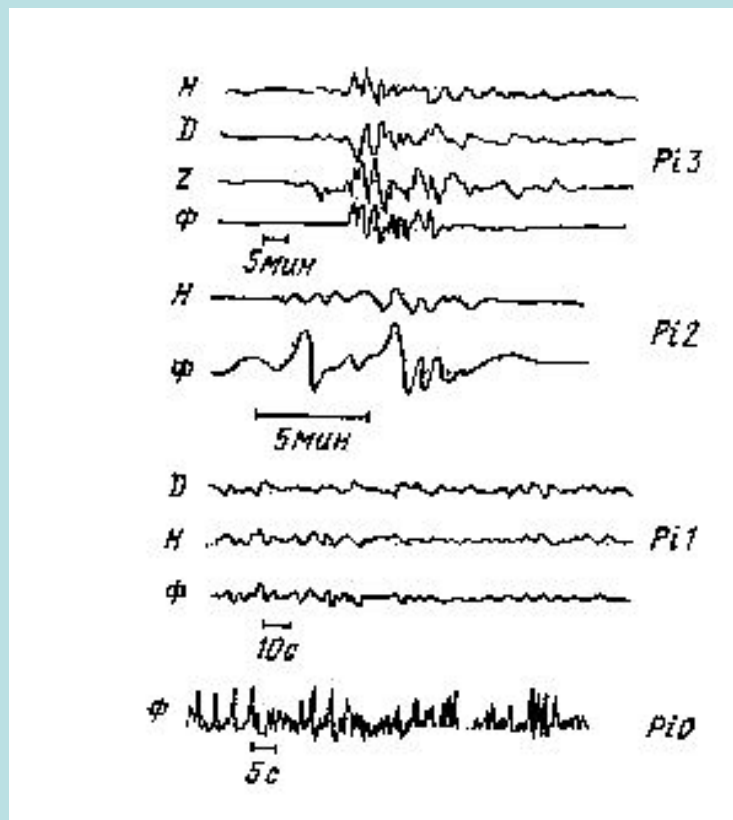
Конфигурации
продольных
токов по
Бострёму

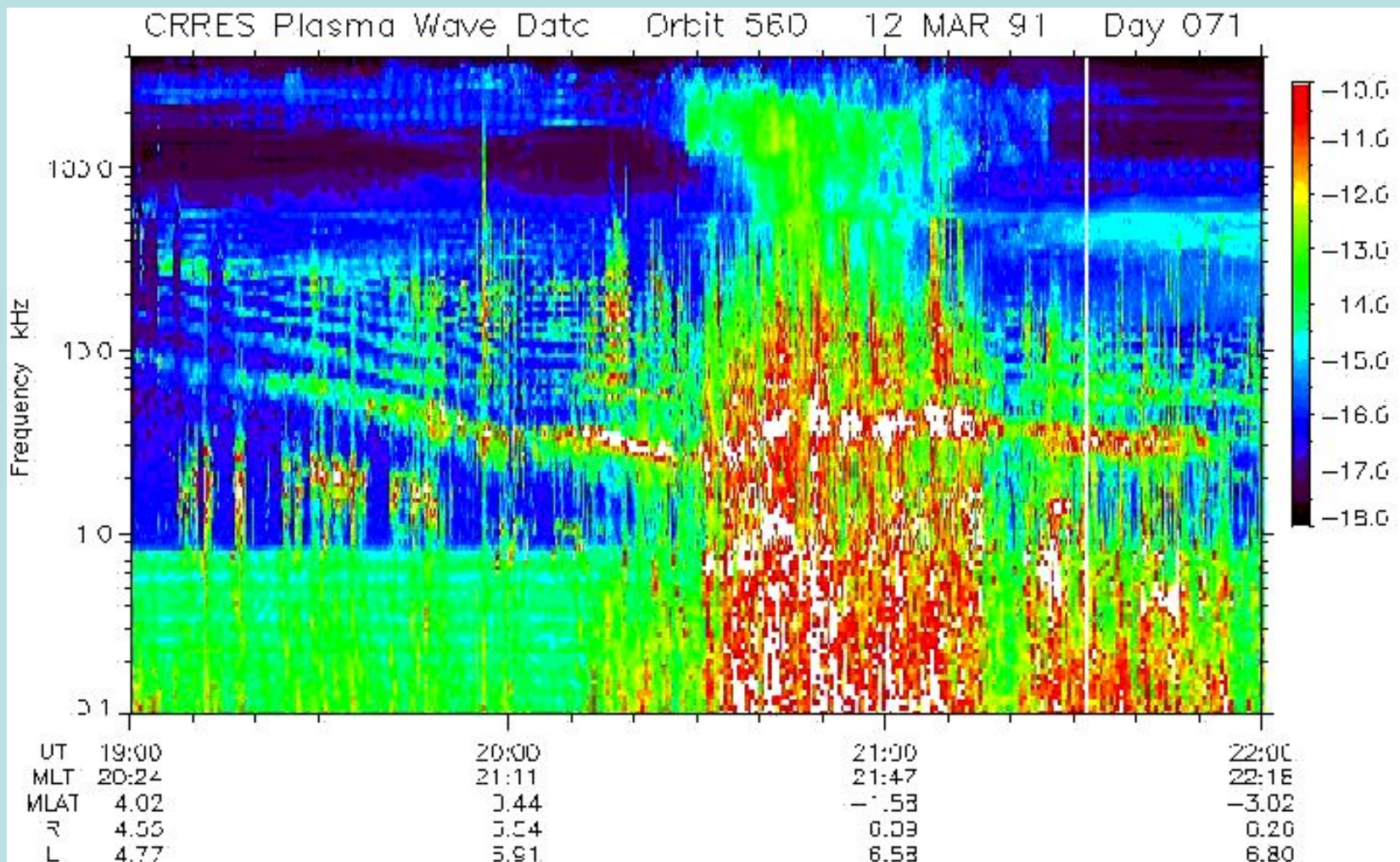
Два типа
токовых систем

Ионосферные эффекты высыпаний

- Высыпание частиц в атмосферу вызывает ионизацию и ионосферные токи, наиболее ярким проявлением которых на наземных магнитограммах являются бухтообразные возмущения во время суббури. По магнитограммам высокоширотной сети станций можно построить эквивалентную картину токов, текущих в ионосфере, ответственных за то или иное возмущение магнитного поля. Такие токовые системы называют эквивалентными, потому что реальные токовые системы трехмерны. В спокойное время в высоких широтах существует токовая система в виде двух вихрей, выявленная по данным сети магнитометров и получившая название *Dp11* (верхний рисунок), которая ассоциируется с электрическим полем конвекции.
- На вечерней стороне электроджет направлен на восток и вызывает положительное отклонение в *H*-составляющей магнитного поля, тогда как противоположное направление тока на утренней стороне дает отрицательное отклонение. Переход от восточного к западному току, регистрируемый вблизи полуночи, носит название *разрыва Харанга (Harang discontinuity)*.
- На подготовительной фазе суббури система *Dp11* усиливается, к ней на фазе экспансии суббури добавляется вихрь *Dp12* и резко усиливает западную электрострую. Этот дополнительный короткоживущий ток связывают со сбросом в ионосферу авроральных электронов и индукционным электрическим полем суббуревых активизаций.
- Существование трехмерных токовых систем в магнитосфере было предсказано норвежским ученым Биркеландом. Наименование *токи Биркеланда (Birkeland currents)* часто встречается в литературе. Измерения на спутниках подтвердили догадку Биркеланда. Две возможных конфигурации продольных токов были рассмотрены Бостромом (рисунок внизу): в системе типа 1 ток втекает на утренней стороне и вытекает на вечерней, в системе типа 2 ток втекает на северной (полюсной) полосе и вытекает на экваториальной. Оба типа токовых систем обнаруживаются при анализе измерений магнитного поля и фигурируют в моделях магнитосферных возмущений. Они могут иметь глобальный или локальный характер.
- На рис. Внизу справа приведена схема продольных токов в проекции на ионосферу, построенная Ииджимой и Потемрой по данным спутника TRIAD. Высокоширотная и низкоширотная токовые зоны совпадают с границами овала полярных сияний.

Типы иррегулярных пульсации магнитного поля P_i (слева) и регулярных P_c (справа)



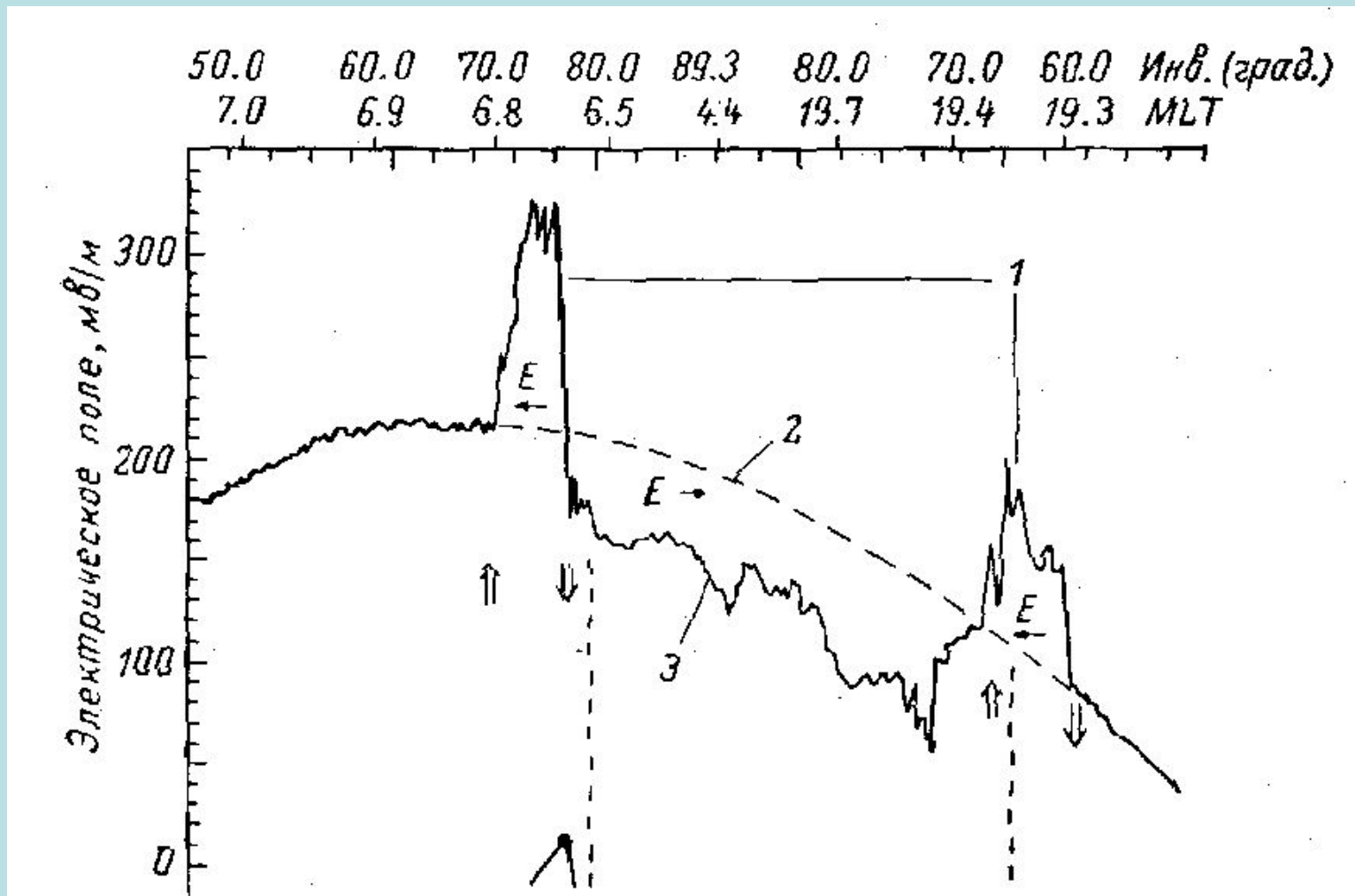


Спутник CRRES. Волновые измерения 12.03.1991 вблизи полуночи в экваториальной плоскости на расстоянии от 5 до 6.5 земных радиусов. Суббуревая экспансия началась около 20.30 UT.

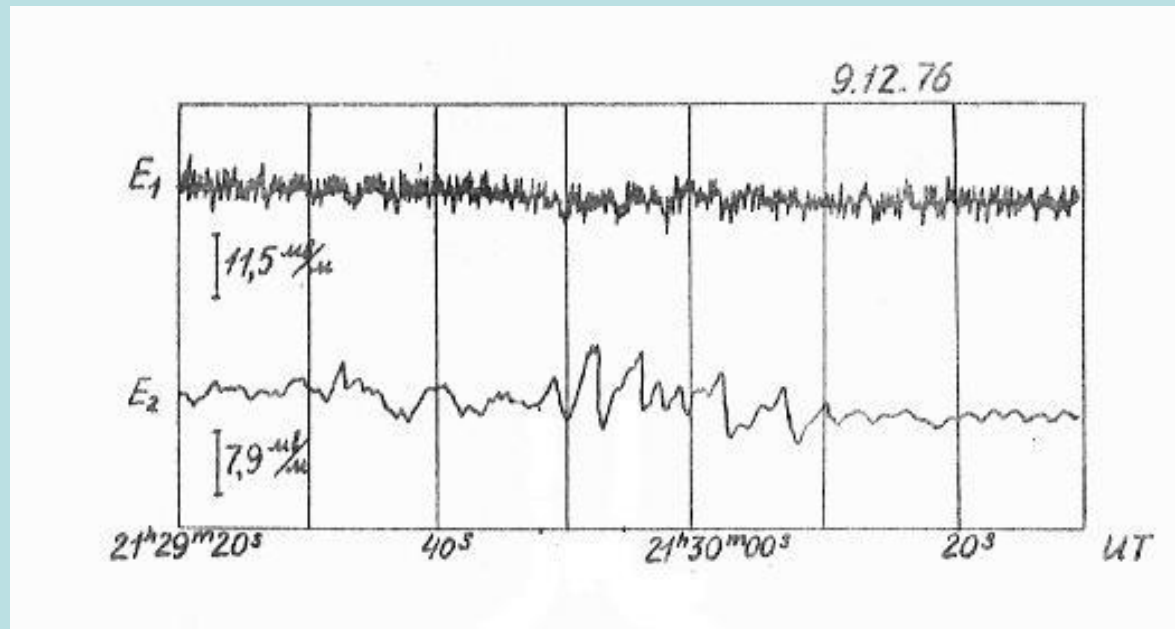
Атмосферное электричество

- Две основные современные теории атмосферного электричества были созданы английским учёным Ч. Вильсоном и советским учёным Я. И. Френкелем.
- Согласно теории Вильсона, Земля и ионосфера играют роль обкладок конденсатора, заряжаемого грозowymi облаками. Возникающая между обкладками разность потенциалов приводит к появлению электрического поля атмосферы.
- По теории Френкеля, электрическое поле атмосферы объясняется всецело электрическими явлениями, происходящими в тропосфере, — поляризацией облаков и их взаимодействием с Землёй, а ионосфера не играет существенной роли в протекании атмосферных электрических процессов.
- По теории Вильсона, выпадения заряженных частиц воздействуя на ионосферу, непосредственно влияют на атмосферное электрическое поле.
- Теория Френеля также не исключает воздействие космических излучений, в частности, через вариации проводимости.

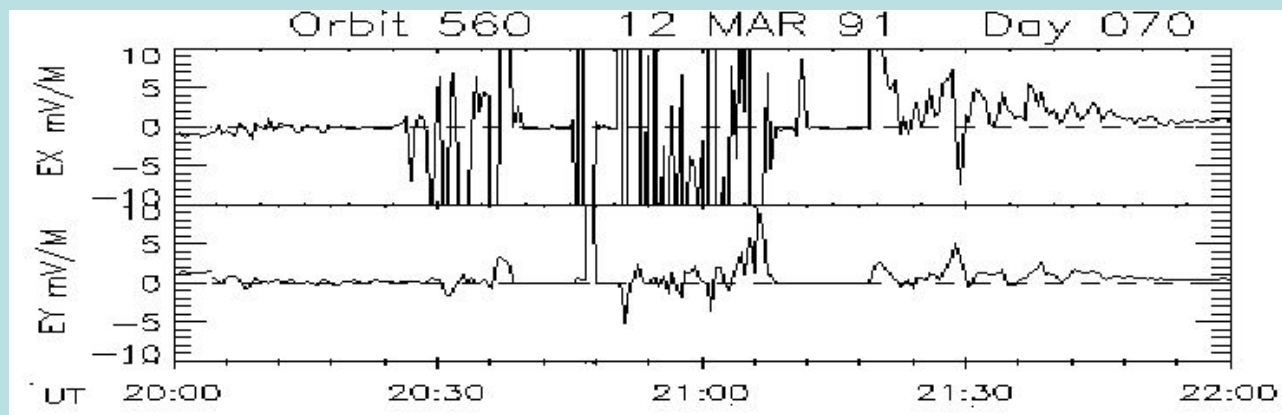
Измерение электрического поля при пролете спутника
через авроральные зоны и полярную шапку, 600 км



Электрическое поле в стратосфере, 30 км



Электрическое поле в авральной магнитосфере



МАГНИТОСФЕРНО – ИОНОСФЕРНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

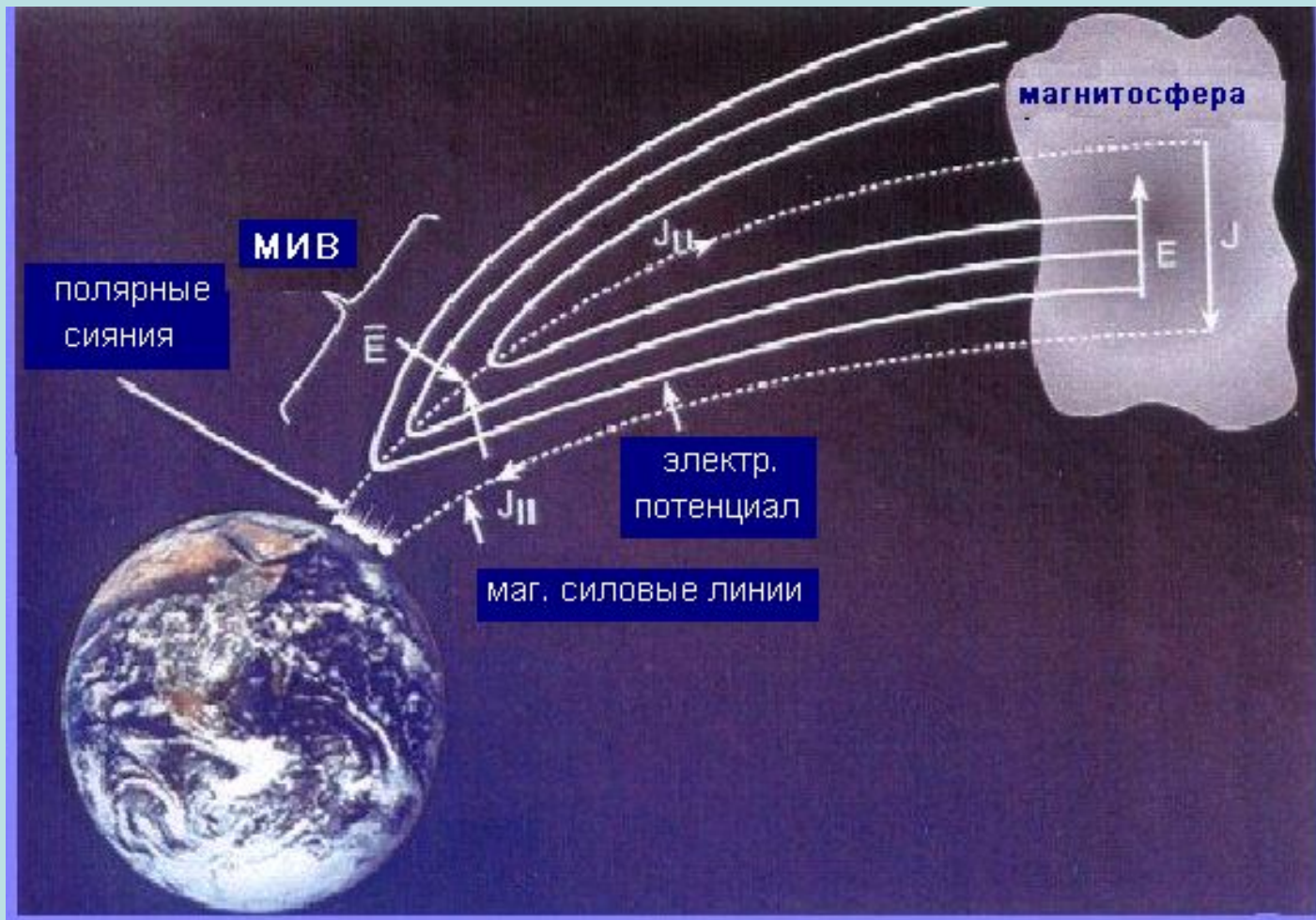
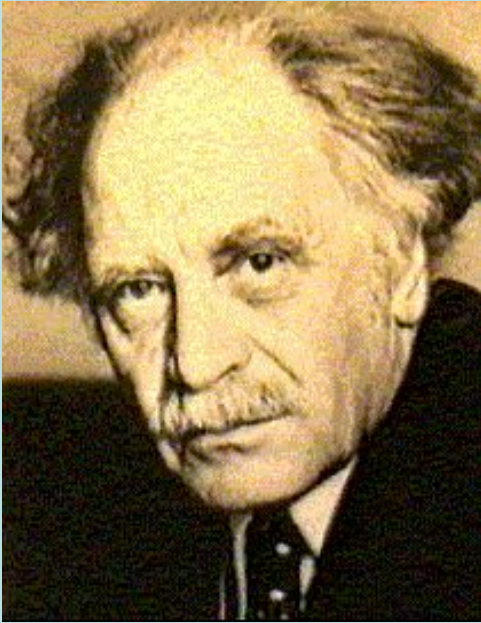


Схема генерации электрических полей и загрузки энергии в ионосферу

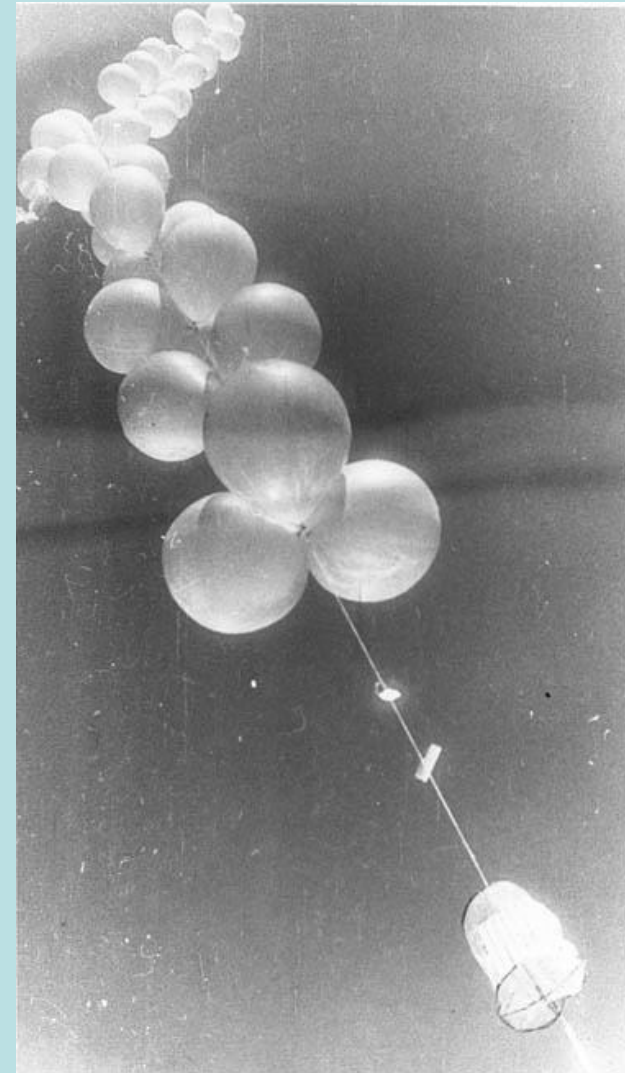
Аэростатные исследования

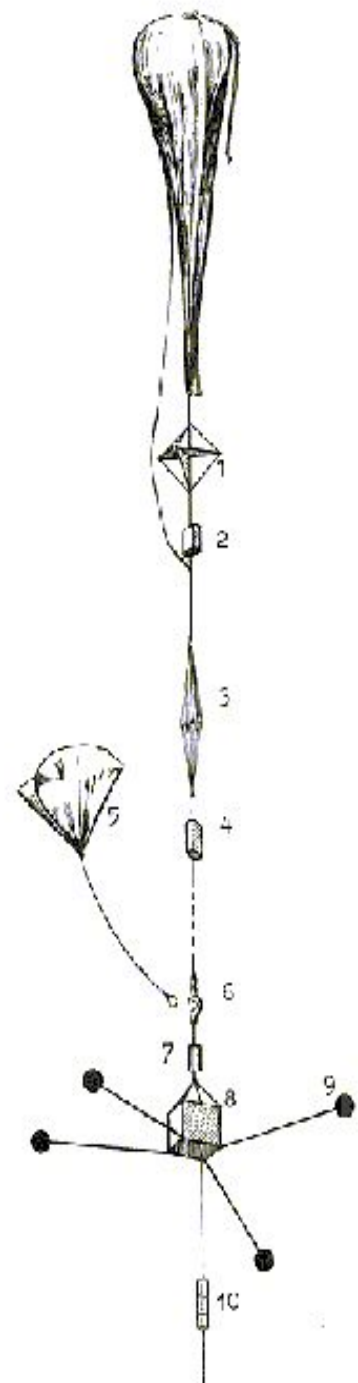


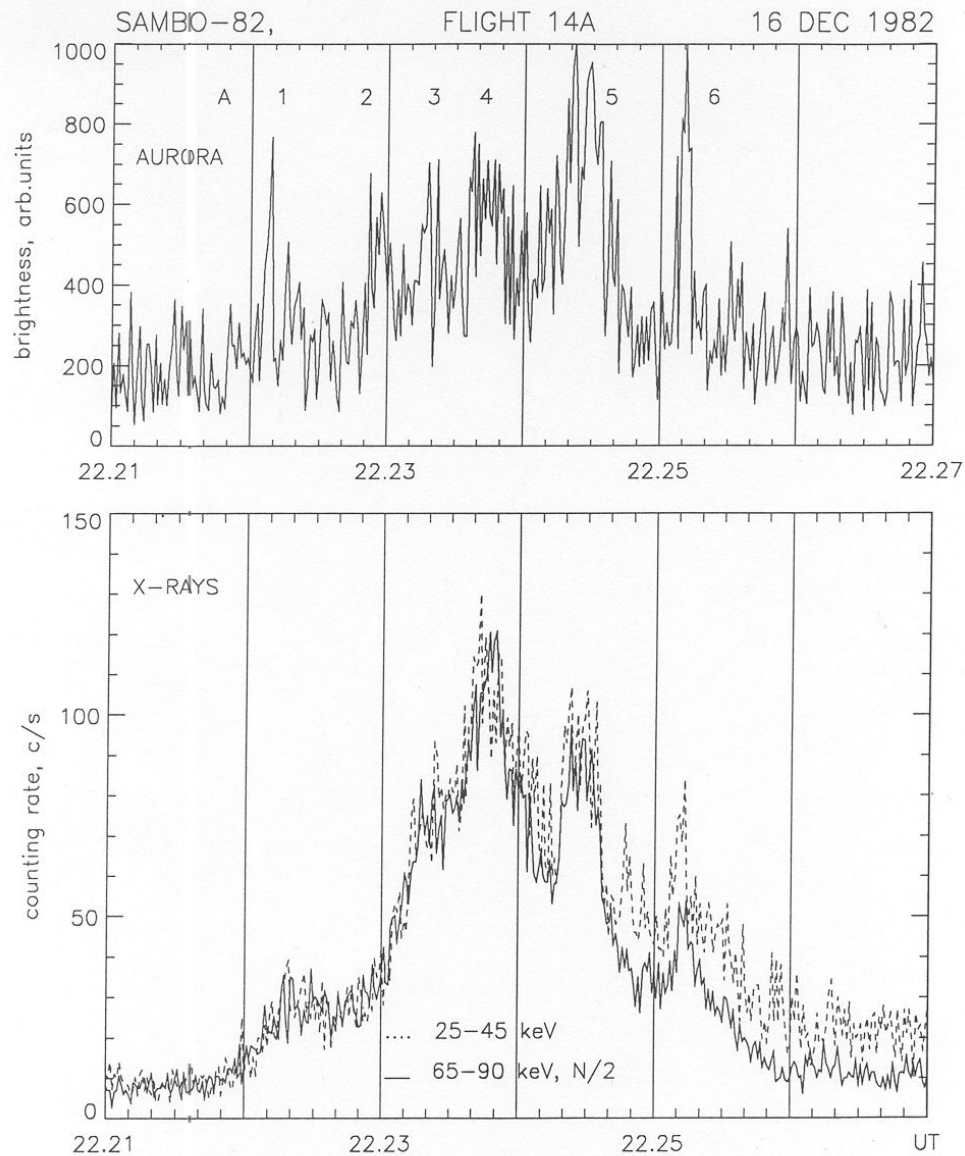
С.Н. Вернов

- Радиозонд космических лучей был разработан и запущен С. Н. Верновым в 1936г. Он поднимался на резиновых оболочках.

Современные аэростаты – это комплексные лаборатории, дрейфующие на высоте 25-35 км. десятки часов, а в отдельных экспериментах – несколько недель.







Комплекс полетной аппаратуры включает спектрометр рентгеновского излучения, фотометры полярных сияний, электрометр, магнитометр, датчик ОНЧ-излучения, телескоп космических лучей (Эксперимент «САМБО»)

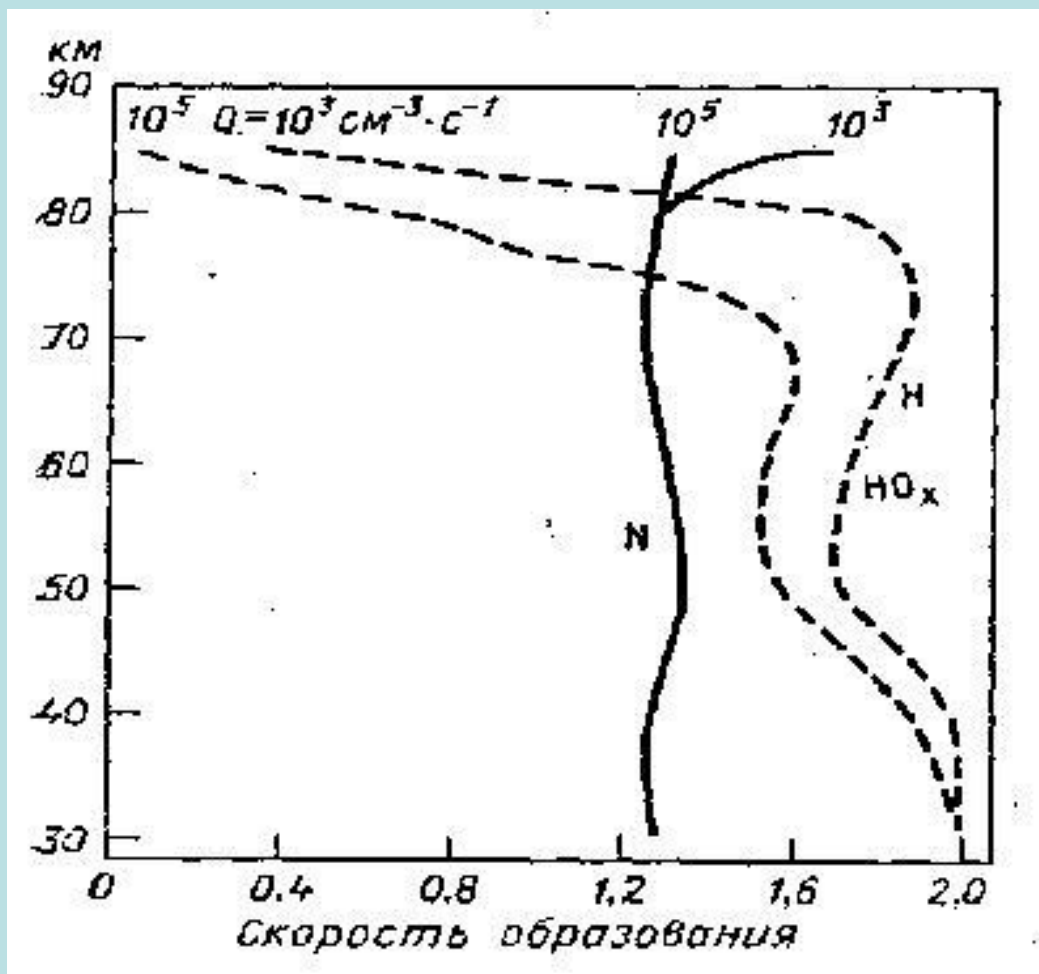
С помощью аэростатов впервые были зарегистрированы рентгеновское излучение авроральных электронов и высыпания в атмосферу релятивистский электронов.

На рисунке: верхний график – вариации интегральной яркости полярных сияний, внизу – тормозное рентгеновское излучение, два канала спектрометра.

Космические излучения и озоновый слой

Существованием озонового слоя мы обязаны солнечной радиации. Вариации слоя в значительной степени находят объяснение в рамках фотохимической теории озона. Объяснение основано на увеличении концентрации хлора в атмосфере, вызванном ростом содержания фреонов, диссоциирующих в стратосфере с освобождением атома хлора, разрушающего озон (т. е. по современным представлениям это явление антропогенного происхождения). Физика озоносферы - большой раздел современной физики атмосферы и его рассмотрение в рамках данной лекции не предусмотрено. Мы лишь отметим, каким образом могут влиять на озоновый слой корпускулярные излучения. На количество озона в атмосфере влияет содержание окислов азота и водорода. Дополнительное количество образовавшихся в атмосфере радикалов OH и NO приводит к усилению разрушения молекул озона вследствие интенсификации каталитических циклов, что приводит к смещению равновесных значений концентрации озона в сторону меньших значений в периоды вспышек солнечных протонов и выпадений энергичных электронов магнитосферного происхождения.

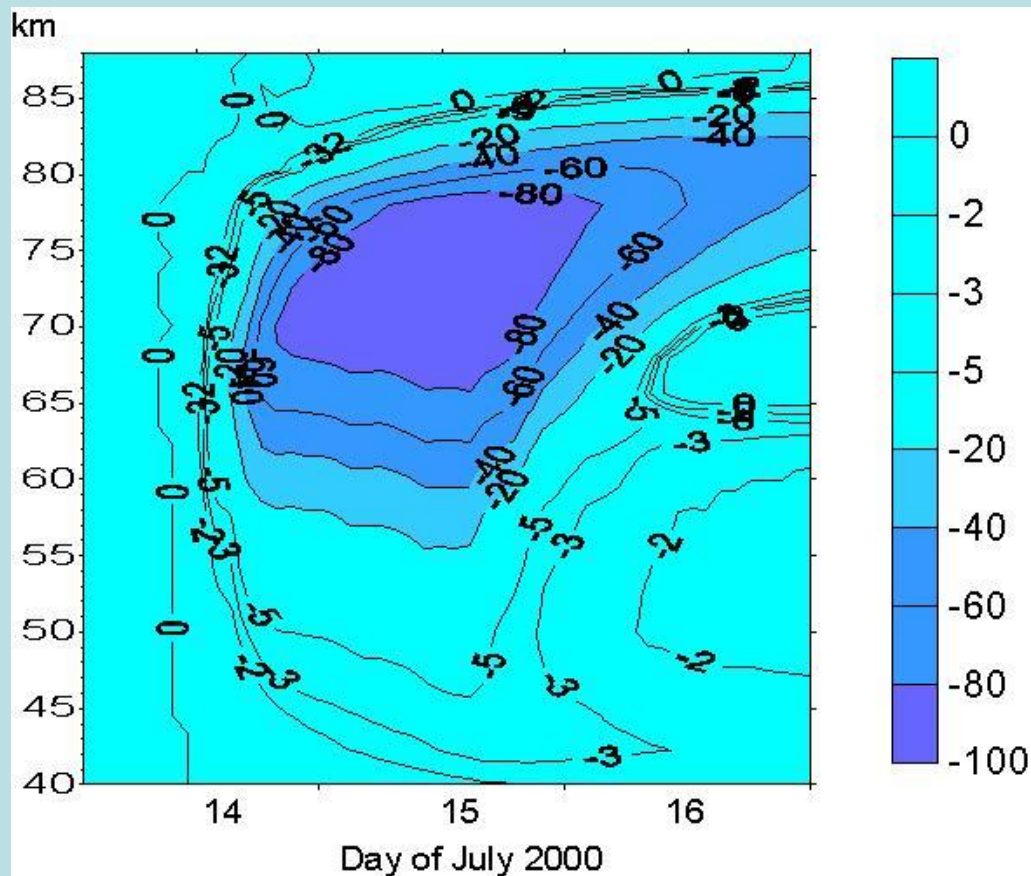
Космические излучения и озоновый слой



Ионизация атмосферы высокоэнергичными частицами приводит к дополнительному образованию оксидов азота и водорода. При этом на каждую пару ионов образуется приблизительно 1,25 молекул NO и две молекулы OH .

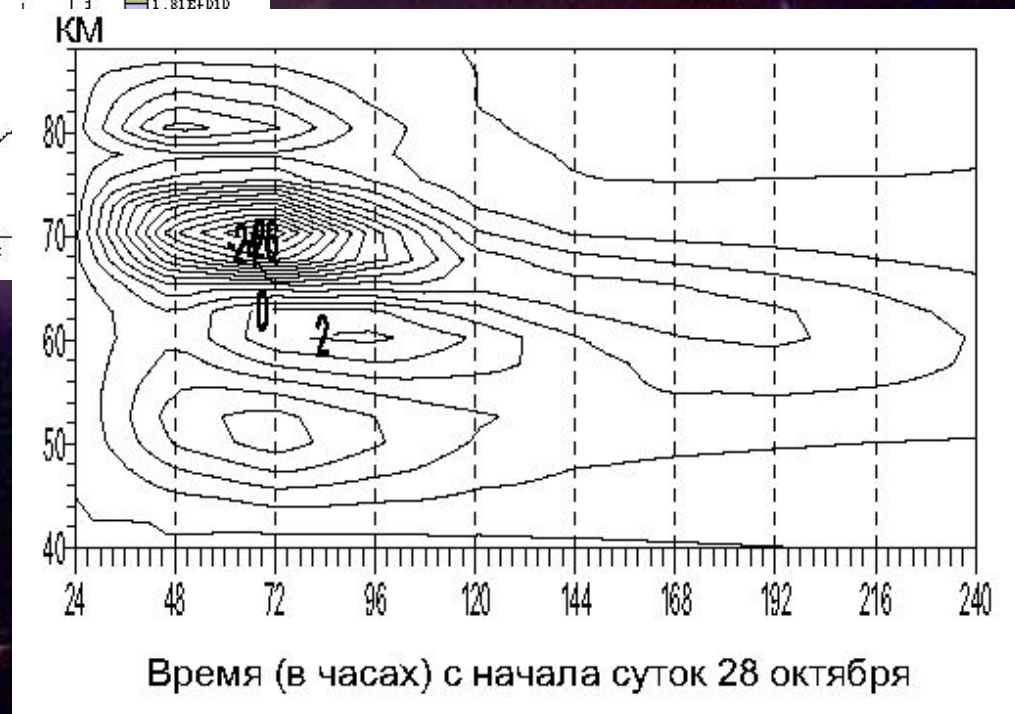
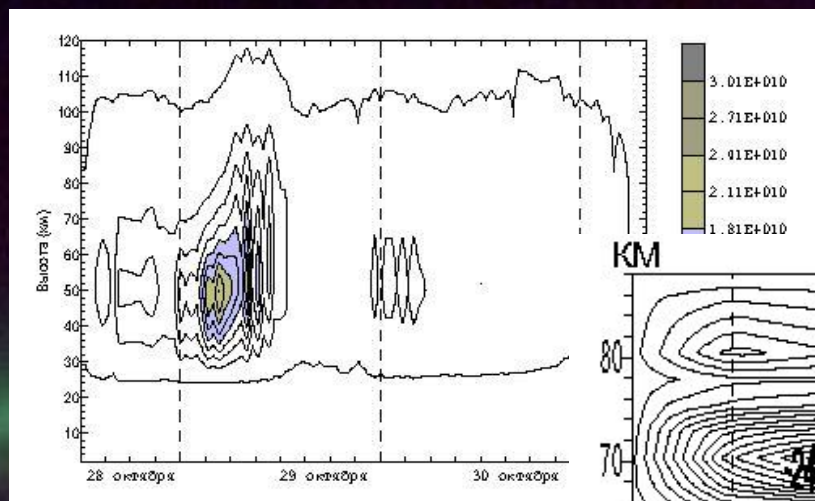
На рисунке показан высотный ход эффективности образования оксидов азота и водорода (число молекул на каждую пару ионов) при ионизации атмосферы солнечными космическими лучами

Космические излучения и озоновый слой



Результаты
фотохимических
расчетов по трехмерной
модели,
демонстрирующих
изменение в содержании
озона над северной
полярной областью (700
с. ш.) после СПС
14.07.2000 г.

Ozone



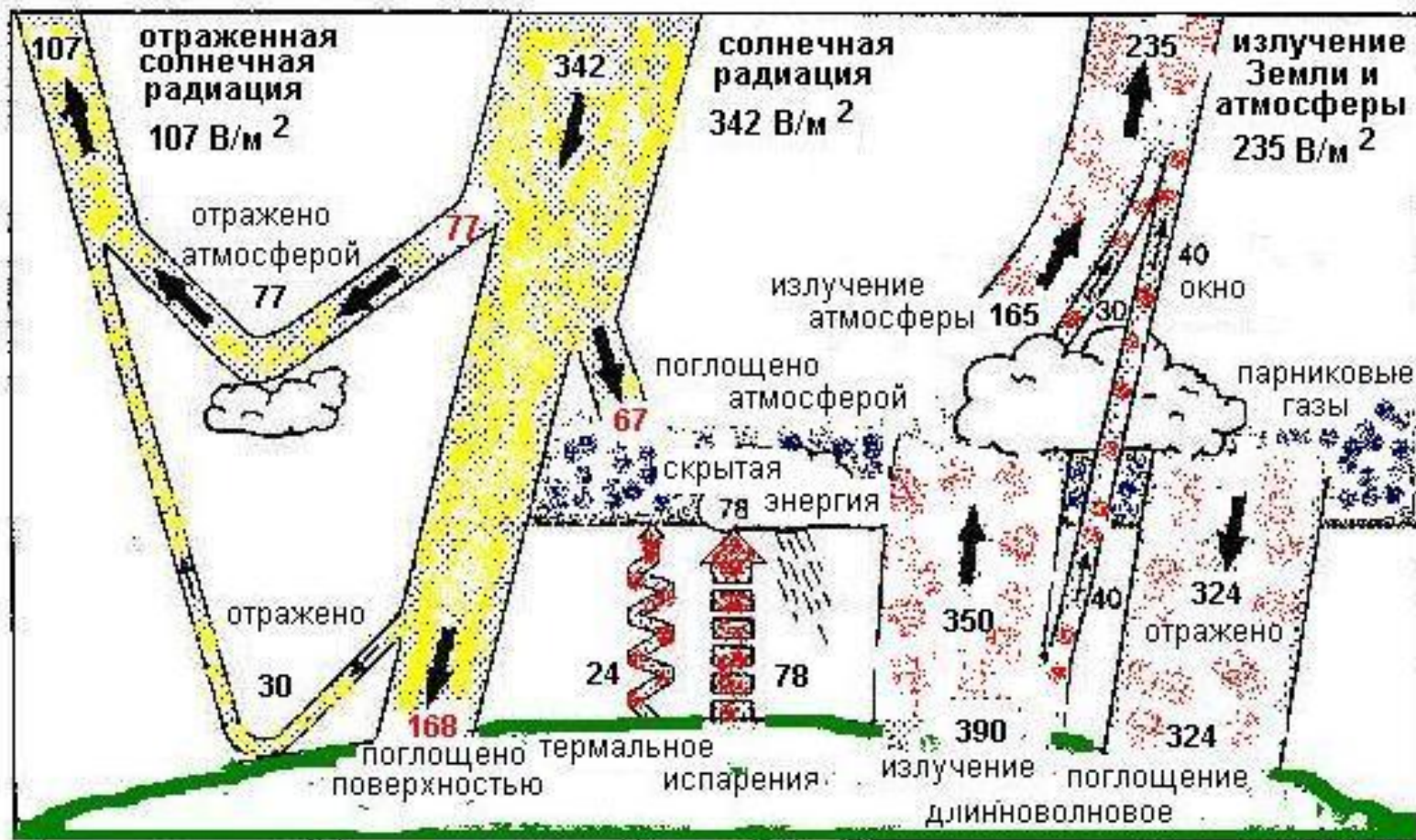
Моделирование
динамики озонового слоя
после начала вспышки
СКЛ. (А.А.Криволицкий)

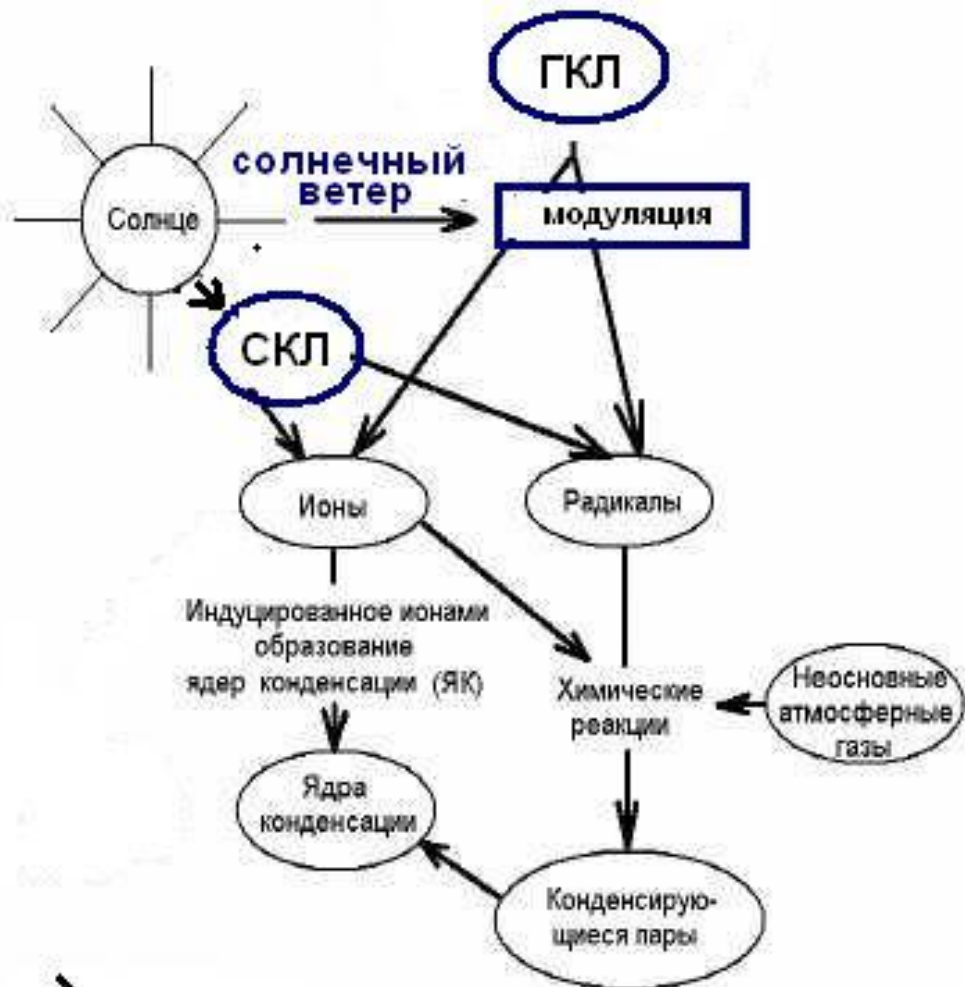
Космические излучения и нижняя атмосфера Земли

Энергетика системы Земля-океан-атмосфера определяется электромагнитным излучением Солнца. Энергетический вклад корпускулярных излучений ничтожно мал. Однако есть многочисленные свидетельства корреляции метеорологических факторов и солнечной активности (см. следующие слайды), т.е. реального воздействия корпускулярных потоков на атмосферу.

Такое воздействие может иметь триггерный характер. Как видно из схемы энергетического баланса системы, облачный покров и прозрачность атмосферы существенно влияют на соотношение поступающей, поглощенной и отраженной энергии. Прозрачность атмосферы может регулироваться вторгающимися в атмосферу корпускулярными потоками. Приводятся две схемы такого воздействия, предложенные Н.Г. Скрыбиным и М.И. Пудовкиным.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС ЗЕМЛИ

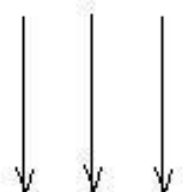




Связь ГКЛ и СКЛ с образованием частиц атмосферного аэрозоля.

H, км

80



авроральные электроны 1-100 кэВ
релятивистские электроны, 100-2000 кэВ
солнечные протоны, 1-100 МэВ

60



образование тяжелых ионов и
микроскопических аэрозолей: кластеры
гидроксония, нитрата аммония и др.

40



диффузия, перенос

20



свобождение скрытой энергии атмосферы:
т.е. увеличение облачного покрова,
частоты образования гроз т.д.

МОДЕЛЬ Н.Г. СКРЯБИНА

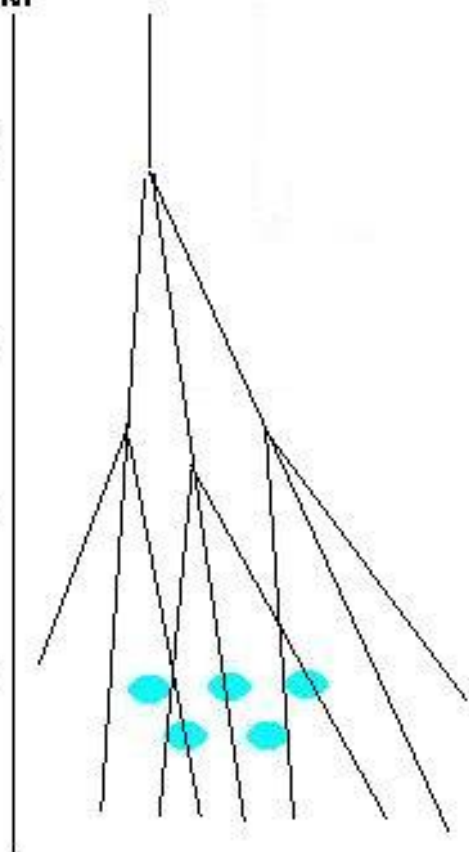
H, км

80

60

40

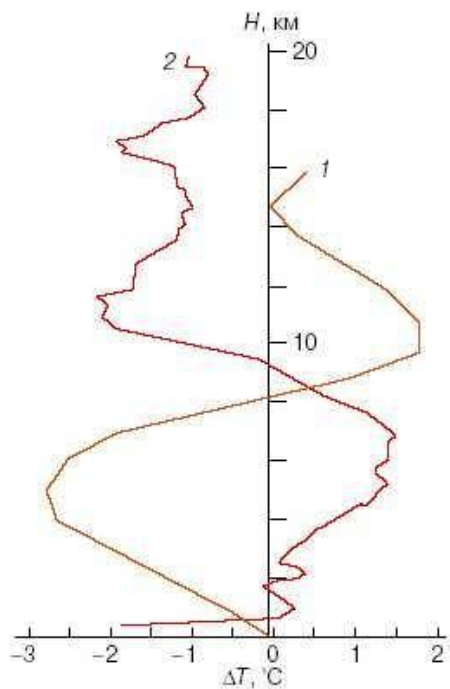
20



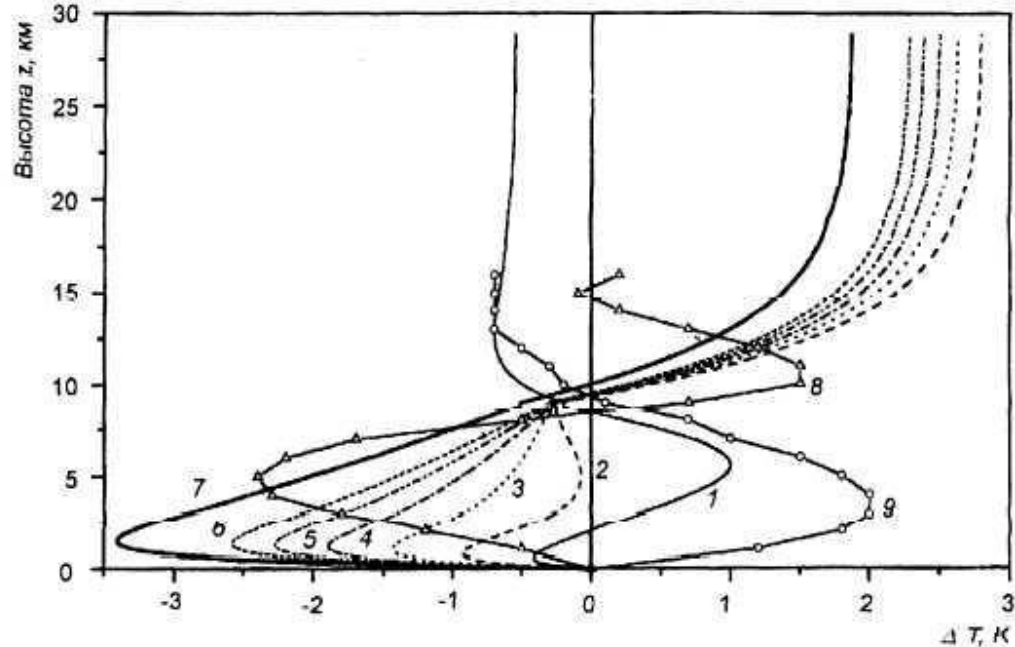
галактические космические
лучи 1-100 ГэВ
солнечные протоны 10-1000 МэВ

ионизация - аэрозоли - изменение
прозрачности атмосферы

МОДЕЛЬ М.И. ПУДОВКИНА

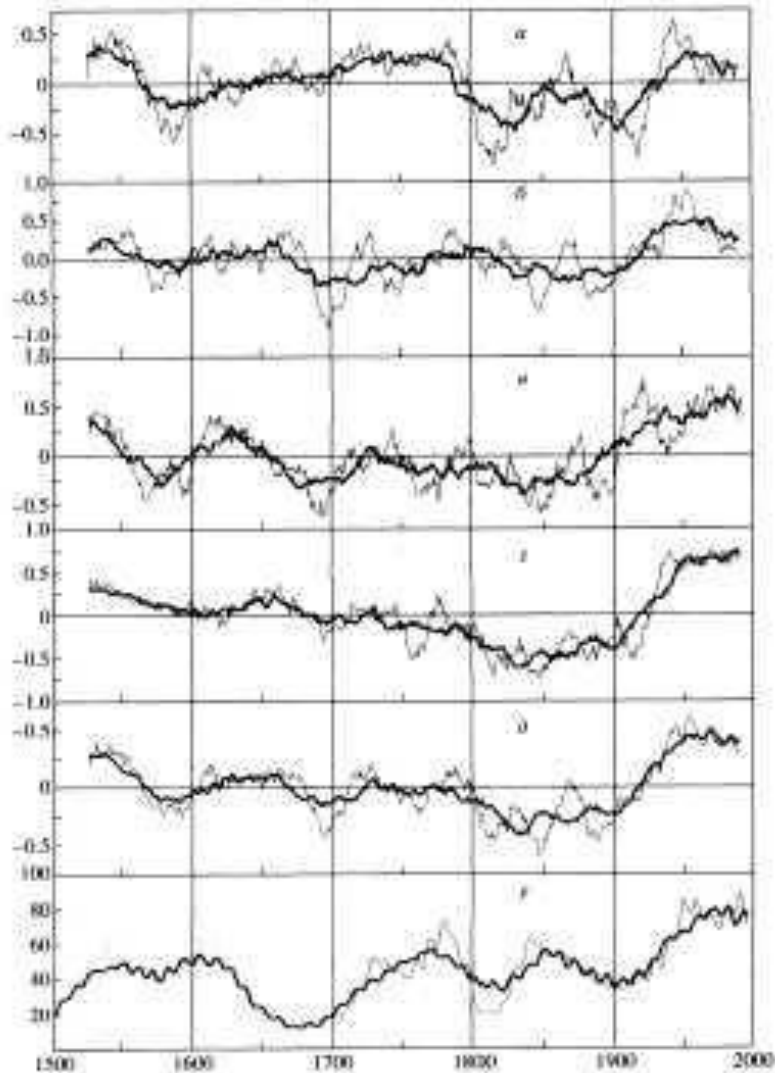


Высотный профиль отклонений температуры воздуха ΔT от "спокойного" уровня во время всплесков СКЛ (кривая 1) и форбуш-понижений (кривая 2).



Вариации высотного профиля температуры воздуха в тропосфере после всплеска СКЛ — модель и эксперимент.

Модель: 1-6 — нулевой — пятый дни после всплеска СКЛ, 7 — десятый день; эксперимент: 9 — нулевой день после всплеска СКЛ, 8 — третий день.



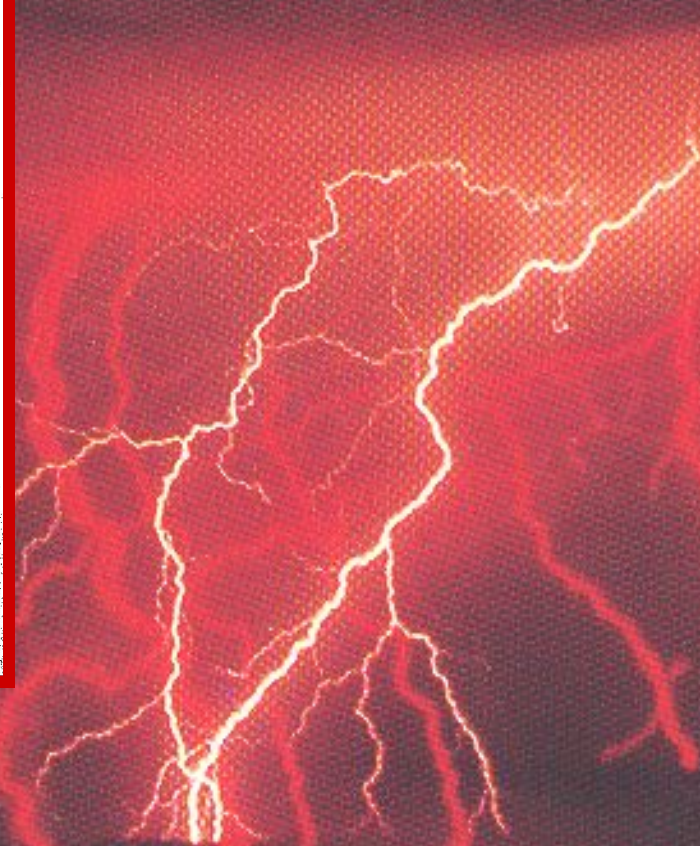
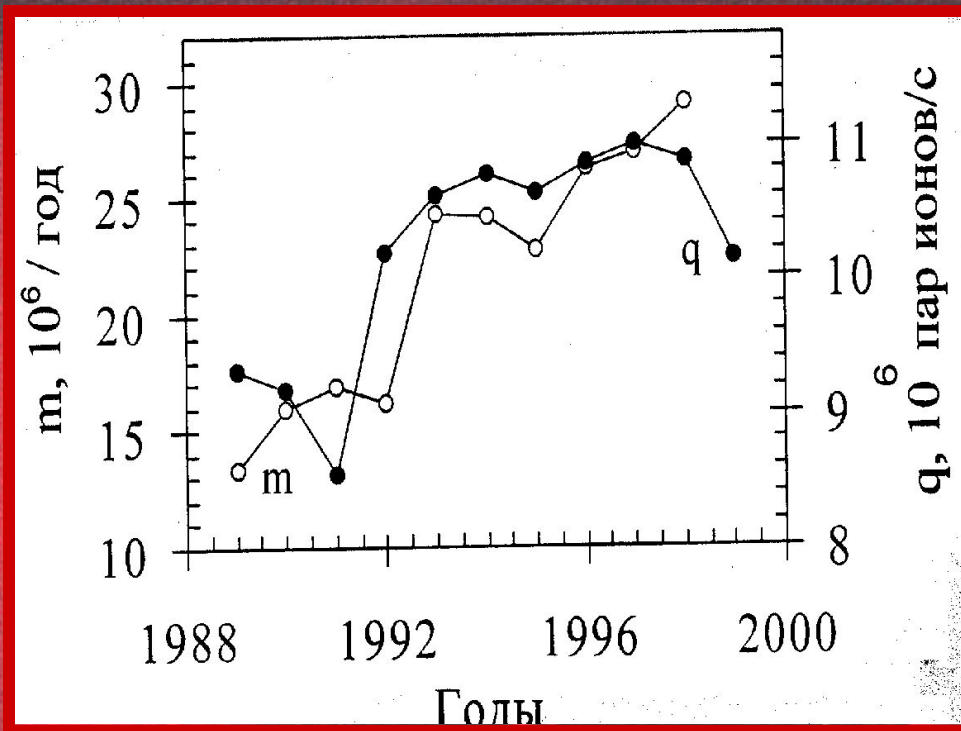
Вариации высотной температуры в Швейцарии с 1525 по 1989 г., усредненные 20-летние (толстая линия) и 50-летние (ожиревшая линия) скользящим средним для различных сезонов года (лето – а, осень – б, зима – в, весна – д) и в среднем за год (е); вариации индекса Вельфа (ф), стандартный аналитический образчик.

Анализ вариаций метеорологических параметров (температура, количество осадков, атмосферное давление) в центральной части Европы (Швейцария) с 1700 по 1989 гг. в зависимости от изменения общего уровня солнечной активности свидетельствует не только о наличии корреляций между вековыми изменениями климата и солнечной активностью, но и об изменении как величины, так и знака коэффициентов корреляции в зависимости от фазы вековых циклов (ветви спада и роста активности Солнца) и при переходе от одного векового цикла к другому.



схема влияния солнечной активности на возникновение землетрясений

Число молний в год над США и скорость ионообразования на высоте 2-10 км



Космические излучения и ноосфера

- Пионерская роль в исследованиях воздействия космических излучений и солнечной активности в частности, на биосферу Земли, здоровье людей, и даже на исторические процессы принадлежит российскому ученому А.Л. Чижевскому.
- В настоящее время идеи Чижевского подтверждены и получили дальнейшее развитие, хотя о общем признании говорить еще рано. Анализ результатов этого обширного раздела солнечно-земной физики требует отдельного рассмотрения. Здесь же коротко отметим, что воздействие космических излучений на биосферу передается через атмосферу Земли – прежде всего посредством электромагнитных волн и пульсаций, генерирующихся в ионосфере, затем через вариации атмосферных параметров, статического электричества и т.д.



А.Л. Чижевский

ЗЕМНОЕ
ЭХО
СОЛНЕЧНЫХ
БУРЬ

Второе издание



Издательство «Мысль»
Москва, 1976

Земная органическая жизнь испытывает на себе все эти изменения в энергетических функциях космической среды, так как живое существо по своим физиологическим свойствам является наиболее чувствительным резонатором. Поток электронов и протонов, вылетевший из жерла солнечного пятна и пролетающий мимо Земли, вызывает огромные возмущения во всем физическом и органическом мире планеты: вспыхивают огни полярных сияний, Землю охватывают магнитные бури, резко увеличивается число внезапных смертей, заболеваний, случаев сумасшествия, эпилептических припадков, несчастных случаев вследствие шока в нервной системе и т. д.

Заключение

- Проблема воздействия космических излучений на атмосферу Земли – междисциплинарная, она находится на стыке таких фундаментальных направлений, как физика плазмы, солнечно-земная физика, оптика, физика атмосферы и метеорология, физика ионосферы и распространения радиоволн. В рамках одной лекции невозможно сколько-нибудь подробно углубиться в каждое из этих направлений. Мы надеялись лишь показать взаимосвязь, перекрытие этих физических проблем.
- Следует подчеркнуть нелинейный характер процессов воздействия космических излучений на верхнюю атмосферу. Сами исходные процессы в источниках излучений – на Солнце и в возмущенной магнитосфере – нелинейны, проходят фазы медленной эволюции, накопления энергии и взрывного ее высвобождения, взрывных неустойчивостей. Процессы такого рода описываются теорией катастроф. Отсюда и изменения в верхней атмосфере динамичны и значительны, от черного неба к яркой динамике сияний, от спокойной ионосферы к возмущенной.
- Вторая особенность, которую необходимо иметь в виду – триггерный характер воздействия, или, как иногда говорят, информационное воздействие. Мощность, энергетика воздействующих факторов может быть на порядок, на несколько порядков меньше энергетике объекта и тем не менее оказывать существенное влияние на эти процессы. Таково, по-видимому, воздействие корпускулярных космических излучений на погоду и биосферу.

ЛИТЕРАТУРА

• **Александров Э.Л., Кароль И.Л. и др.** Атмосферный озон и изменения глобального климата. Л.: Гидрометеоиздат. - 1982.

Альперт Я.Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. М.: Наука, 1972. 559 с.

Арыков А.А. Токовые системы геомагнитной бури, Изд. КНЦ РАН, Апатиты, 1999, 74стр.

Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы Изд. "Наука", М., 1988, 528 стр.

Витинский Ю.И. Прогнозы солнечной активности Изд. "Наука", ГАО, М., 1963, 152 стр.

Витинский Ю.И. Цикличность и прогнозы солнечной активности. Л.: Наука, 1973. 256 с.

Владимирский Б.М., Темурьянц Н.А. Воздействие солнечно-земных процессов на биосферу-ноосферу, Гелиобиология от А.Л. Чижевского до наших дней, МНЭПУ, 200, 374стр.

• **Григоров Н.Л.** Электроны высоких энергий в окрестности Земли, Изд. "Наука", М., 1985, 120 стр.

Гульельми А.В. МГД- волны в околоземной плазме Изд. "Наука", М., 1979, 138 стр.

Гульельми А.В., В.А. Троицкая Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. Изд. "Наука", М., 1973, 208 стр.

Данилов А.Д., Казимировский Э.С., Вергасова Г.В., Хачикия Г.Я. Метеорологические эффекты в ионосфере. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 269 с.

Исаев С. И. Морфология полярных сияний. Изд. "Наука", Ленингр. отд., Л., 1968, 168 стр. ([см. на СиЗифе](#))

Исаев С. И., Пудовкин М.И. Полярные сияния и процессы в магнитосфере Земли. Изд. "Наука", Ленингр. отд., Л., 1972, 244 стр.

Казимировский Э.С., Кокоуров В.Д. Движения в ионосфере. Новосибирск : Наука, 1979. 344 с.

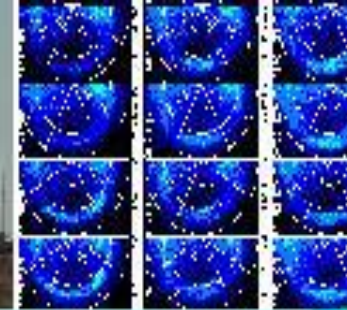
Лазутин Л.Л. Рентгеновское излучение авроральных электронов и динамика магнитосферы, Изд. "Наука", Ленингр. отд., Л., 1979, 200 стр.

Макарова Е.А., Харитонов А.В., Казачевская Т.В. Поток солнечного излучения. М.: Наука, 1991. 396 с.

Молчанов О. А. Низкочастотные волны и индуцированные излучения в околоземной плазме, М. Наука, 1985, 224 с.

Панасюк М.И., Кузнецов С.Н., Лазутин Л.Л. и др., Магнитные бури в октябре 2003 года. Коллаборация «Солнечные экстремальные события 2003 года (СЭС - 2003)» Космические исследования , 42, № 5, 2004, 489-534

- **Пудовкин М.И., В.П. Козелов, Л.Л. Лазутин, О.А. Трошичев, А.Д. Чертков** Физические основы прогнозирования магнитосферных возмущений *Изд. "Наука", Ленингр. отд., Л., 1977, 312 стр.*
Пудовкин М.И., Распопов ОМ., Клейменова НТ. Возмущения электромагнитного поля Земли. *Л.: Изд-во ЛГУ, 1976. 247 с.*
Харгривс Д.К. Верхняя атмосфера и солнечно-земные связи. Введение в физику околоземной космической среды. - *Л.: Гидрометеиздат. - 1982.*
Хесс В. Радиационный пояс и магнитосфера, пер. с англ., *М., 1972*
Хорошева О.В. Пространственно-временное распределение полярных сияний *Изд. "Наука", МГК, Полярные сияния №16, М., 1967, 82 стр.*
Чижевский А.Л. Земное эхо солнечных бурь. *М.: Наука. - 1973.*
Шабанский В.П. Явления в околоземном пространстве *Изд. "Наука", М., 1972, 272 стр.*
Шабанский В.П., Веселовский И.С., Кропоткин А.П. Физика межпланетного и околоземного пространства. *М.: Изд. МГУ. 1981.*
Шкловский И.С. Вселенная, жизнь, разум. *М.: Наука, 1987. 352 с.*
Шургин С.М., Обум А.М.. Солнечная активность и биосфера. *Новосибирск.: Наука. - 1986.*
Эйгенсон М.С. Солнце, погода и климат. *Л.: Гидрометеиздат, 1963. 274 с.*
Эйгенсон М.С. Очерки физико-географических проявлений солнечной активности. *Издательство львовского университета, 1957. 229 с.*
 Дополнительные материалы по теме можно найти на портале по солнечно-земной физике (СиЗиФ) по адресу <http://kosmofizika/ru> Оттуда же взяты некоторые иллюстрации.
- Фотографии полярных сияний Джони Юссила, университет Оулу, Финляндия.



Космическая погода =
**СОЛНЕЧНО
ЗЕМНАЯ
ФИЗИКА**

