

Геофизика



2026 Лекция №12

Захаров Виктор Иванович

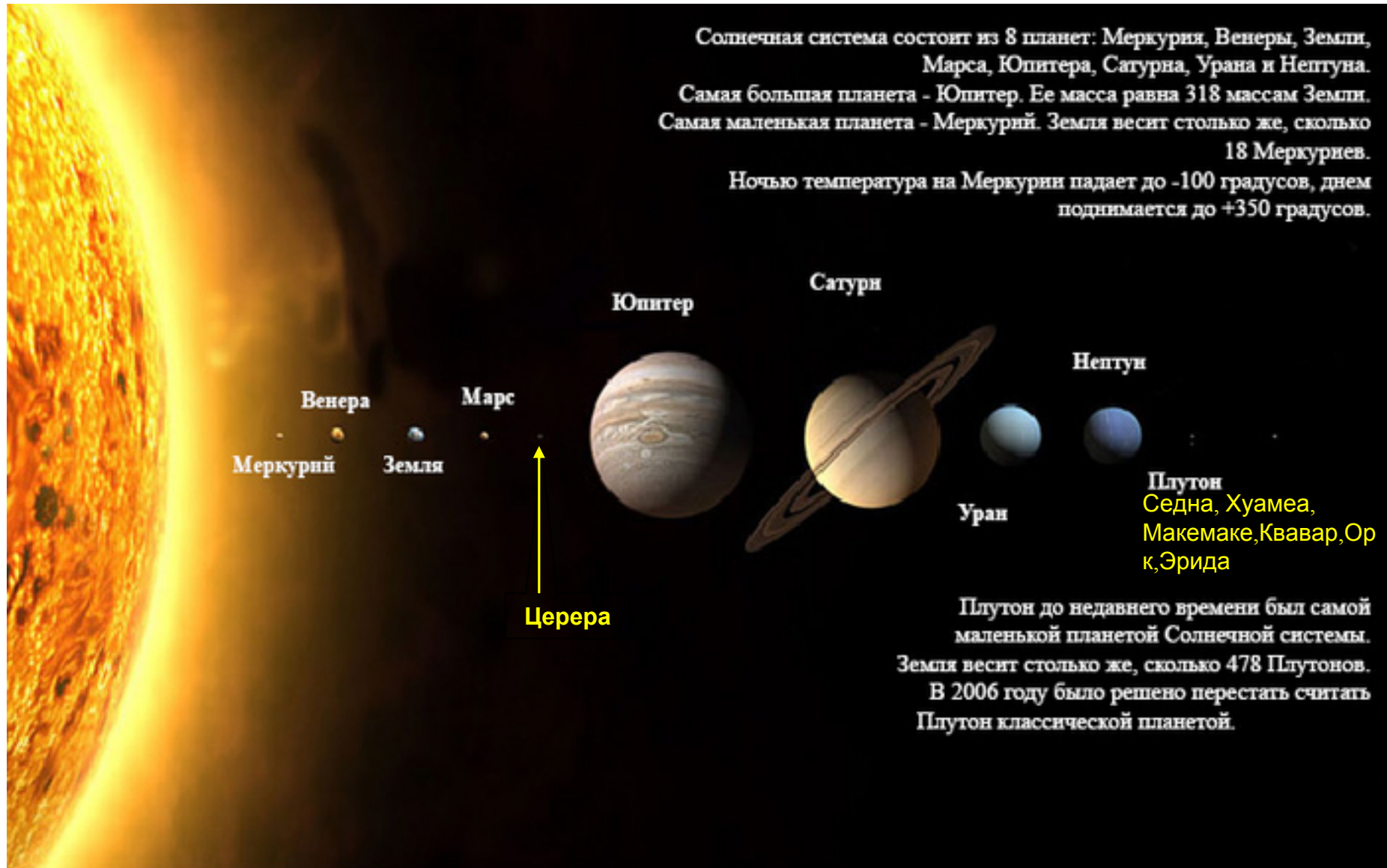
*отделение геофизики, каф. физики атмосферы
физический факультет МГУ*

Основные вопросы лекции

- Основные данные о Солнце. Источник солнечной энергии. Спектр излучения Солнца и планет. Солнечная постоянная и циклы. Понятие космической погоды и ее основные факторы.
- Образование ионосферы и понятие о плазме.
- Движение заряда в электрическом и магнитном полях. Радиационные пояса Земли.
- Солнечно-земные связи и примеры их проявлений. Геоиндуцированные токи.

**Земля в атмосфере
Солнца.**

Солнечная система



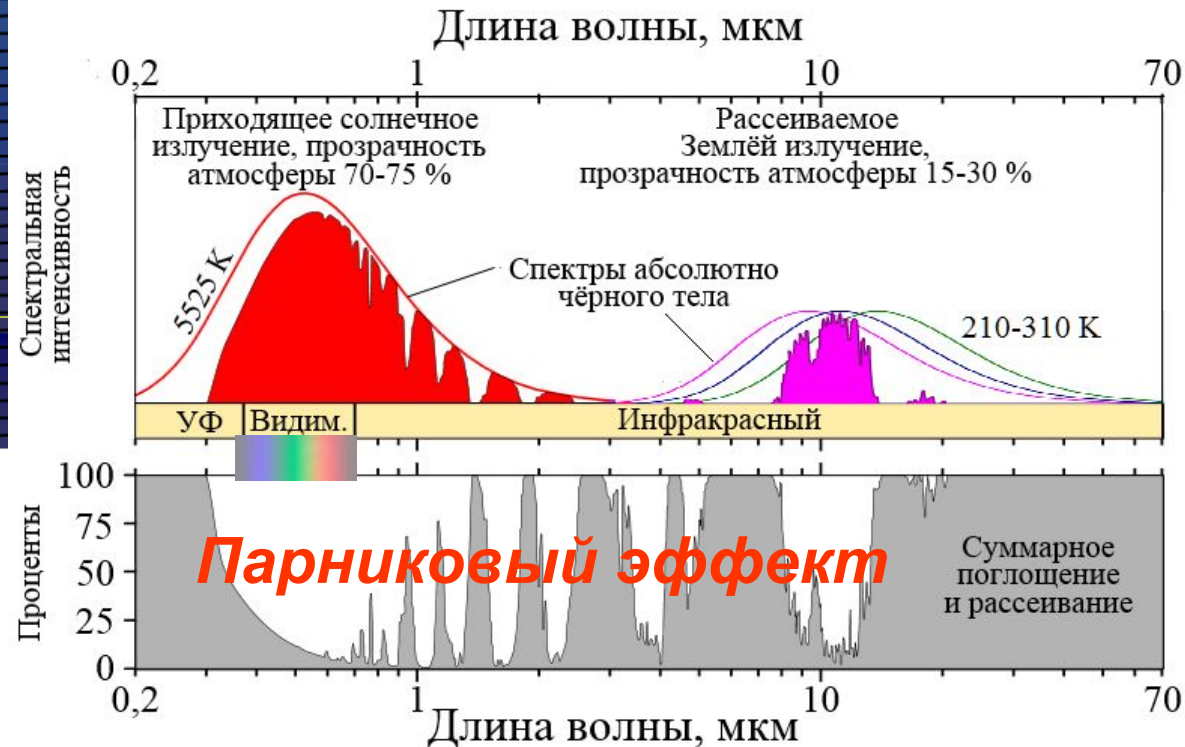
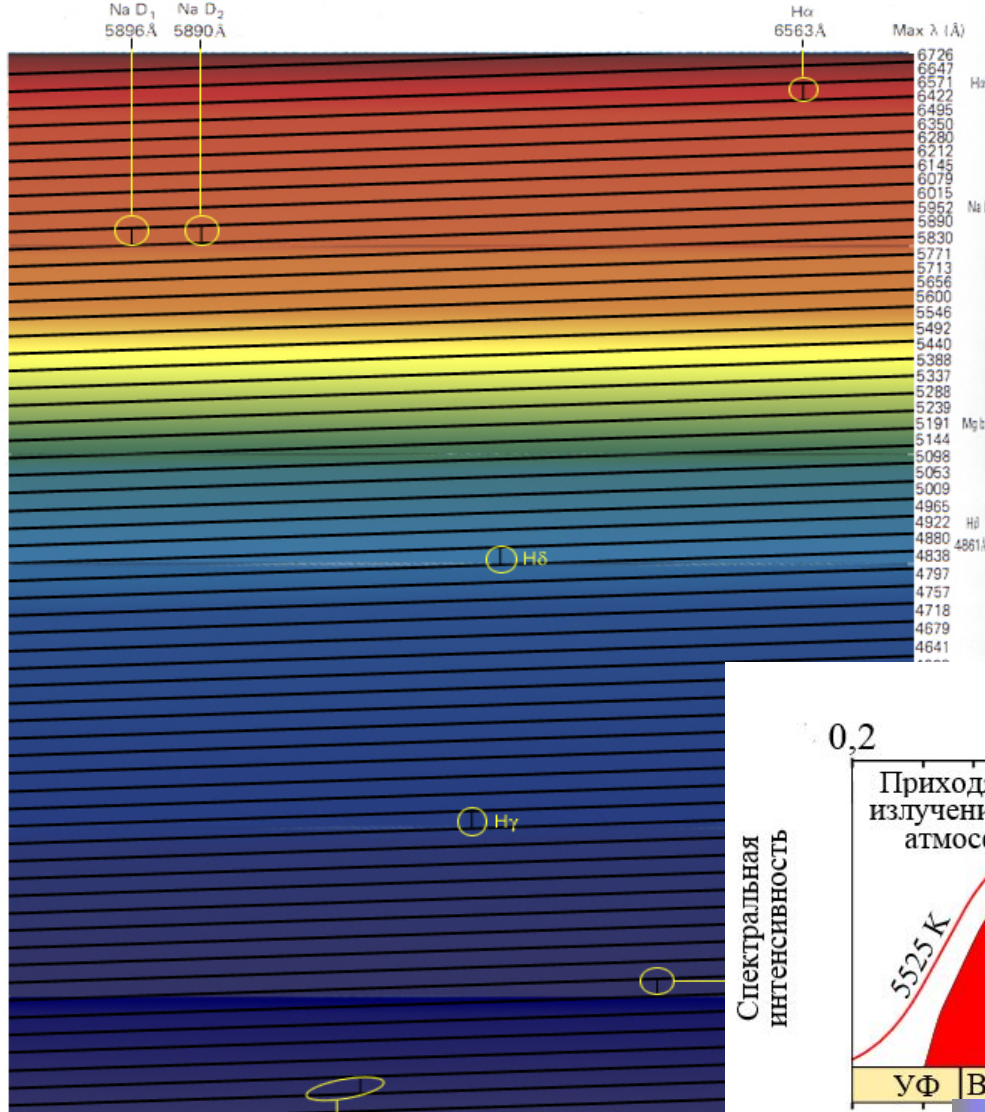
Солнце в цифрах

Имя	Солнце
Галактика	Млечный путь
Спектральный класс	G2, звезда-карлик !!!
Расстояние до Земли	149 598 000 км т.е., 1 а.е. // 8.3мин
Радиус R_s	696 000 км т.е., $109 R_E$
Масса M_s	1.989×10^{30} кг т.е., $333000 M_E$
Средняя плотность	1.41 г см^{-3}
Температура поверхности	5800 К // 5500...6000 К
Период вращения	25.38 дней на экваторе
Возраст	4.60 млрд. лет
Изменение расст. до Земли	+/- 1.69 % (+ в июле, - в январе)
Видимый диаметр	$31' 59.3'' = 1913.3''$ т.е. 0.5 градуса
Выход энергии	3.82×10^{33} Вт или 6,5 МВт/м²
Поступление энергии на Землю	1367 Вт/м²

Излучение Солнца и планет

Видимый свет

Цвет	Диапазон длин волн, нм
Фиолетовый	380—450
Синий	450—480
Голубой	480—510
Зелёный	510—570
Жёлтый	570—590
Оранжевый	590—630
Красный	630—780



Парниковый эффект

Опыты Фраунгофера 1814.
 Линии в спектре излучения Солнца образуются в результате поглощения квантов света в более холодных слоях солнечной атмосферы

Источники Солнечной энергии

- **Роберт Майер** (середина XIX в). **Метеоритная гипотеза.**

Солнце светит за счет постоянной бомбардировки поверхности метеоритами и метеорными частицами

-- слишком много вещества — за время существ. в 150 раз больше $M_{\odot}$

- **Гельмгольц и Кельвин** (середина XIX в). **Контракционная гипотеза.**

Солнце излучает за счет сжатия на 60–70 метров ежегодно. Причина сжатия — взаимное притяжение частиц Солнца.

-- слишком молодое Солнце (не старше 20 млн лет)

- **Джеймс Джинс** (начало XX в). **Распад тяжелых** радиоактивных элементов, содержащихся в недрах Солнца.

-- недостаточно энергии реакции распада урана для совр. светимости

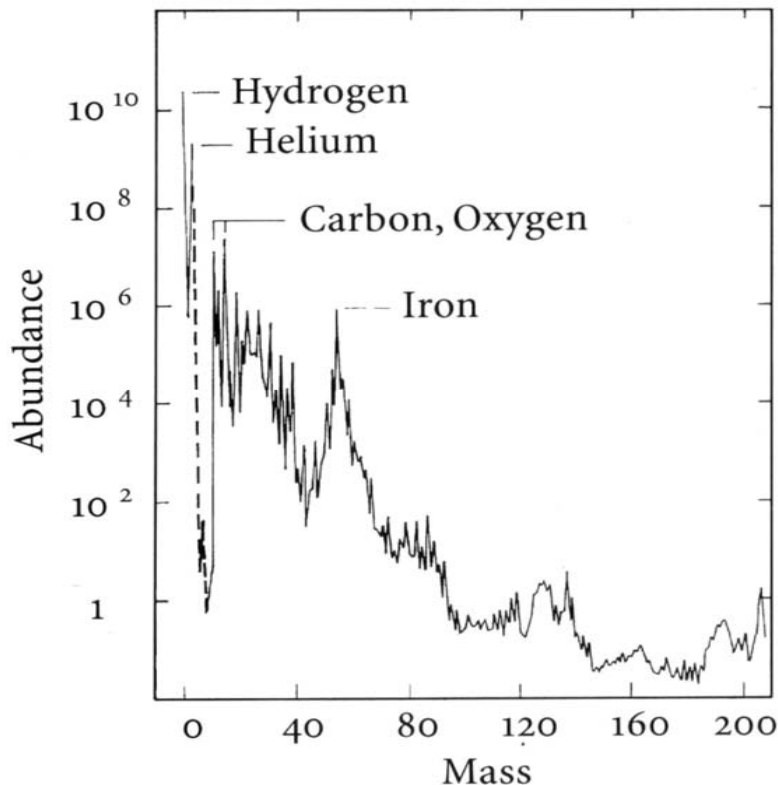
- **Ханс Бете** (1935 г). **Цикл синтеза Бете.**

Источник солнечной энергии - термоядерная реакция превращения водорода в гелий.

-- наименее противоречивая гипотеза

Бете получил Нобелевскую премию в 1967г

Химический состав Солнца



По массе:

**71% водорода,
27% гелия и
2% всех остальных
элементов.**

По числу атомов:

**водорода 90 %,
гелия менее 10%,
C, N₂, O₂ вместе 0.1%
всех остальных менее 0.01%**

Предполагается, что в начале эволюции химический состав солнечного вещества был всюду одинаковый.

**Считается, что в процессе дальнейшей эволюции химический состав
изменяется только в ядре из-за термоядерных реакций
превращения водорода в гелий.**

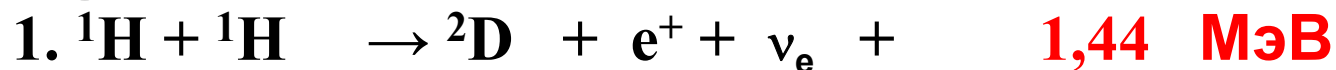
Основная цепочка протон – протонной (p-p) реакции

Основным источником энергии в недрах Солнца является *водородный цикл*, или *протон-протонная цепочка термоядерных реакций*, приводящая к превращению водорода в гелий. В большинстве случаев (около 70%) она состоит из следующих трех реакций основной цепочки:

1 - 14 млрд. лет

2 - До неск сек

3 - До млн лет



Для замкнутого цикла 1 и 2 реакции должны пройти 2 раза

Выделяется энергия

26,2 МэВ → На 1г водорода **$6,3 \cdot 10^{11}$ Дж** ($6,3 \cdot 10^{18}$ эрг)

0,5 МэВ уносят нейтрино

Строение Солнца

Ядро – центральная область Солнца, где спонтанно происходят термоядерные реакции и выделяется энергия в виде тепла и мощного электромагнитного излучения, а также нейтрино высоких энергий.

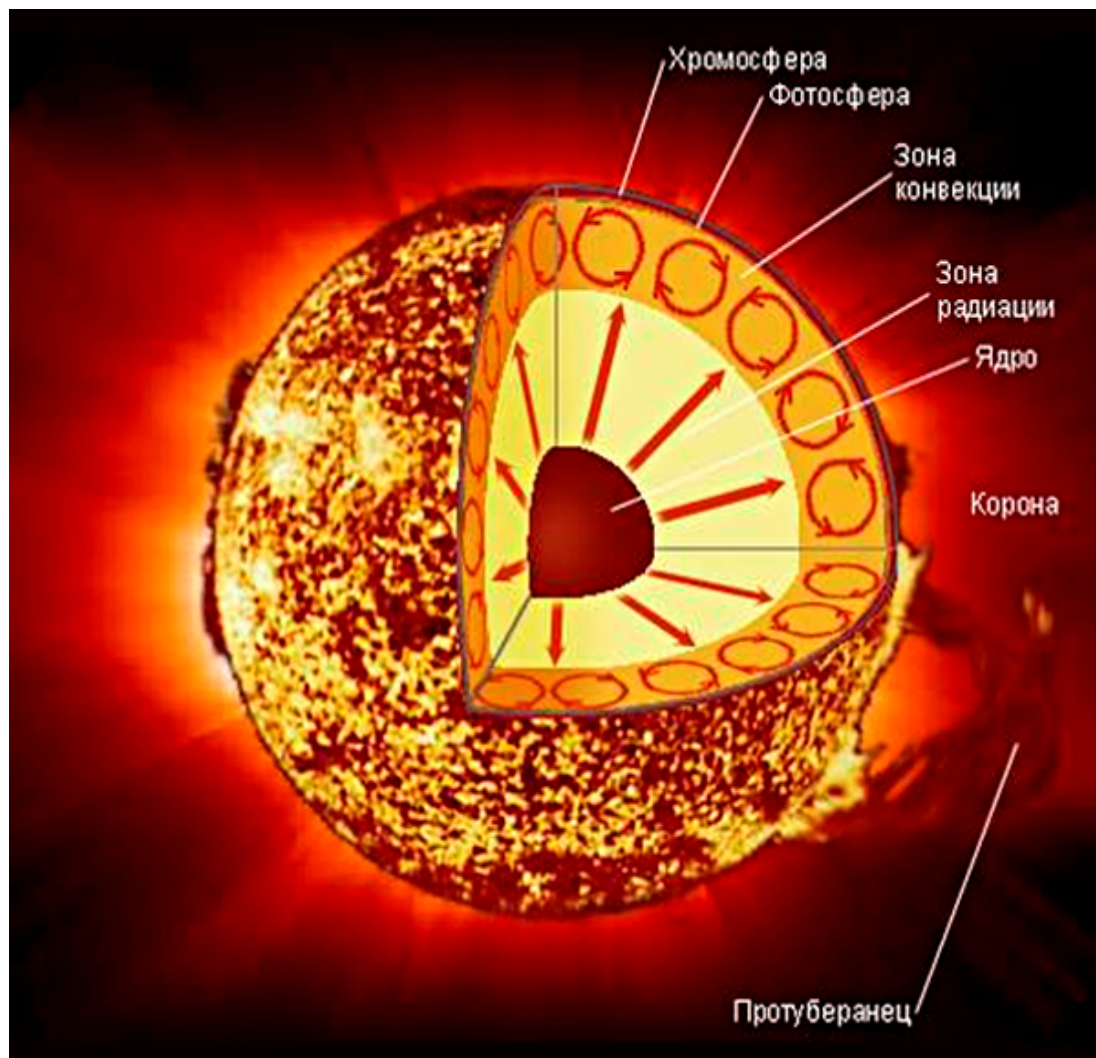
По массе ядро составляет примерно 10% массы Солнца, по радиусу – около трети радиуса Солнца .

Температура ядра –
 $\sim 15 \cdot 10^6 \text{ K}$,

плотность $\sim 160 \text{ г/см}^3$.

Температура фотосферы 6000 K

Температура короны 1.5-2 млн K



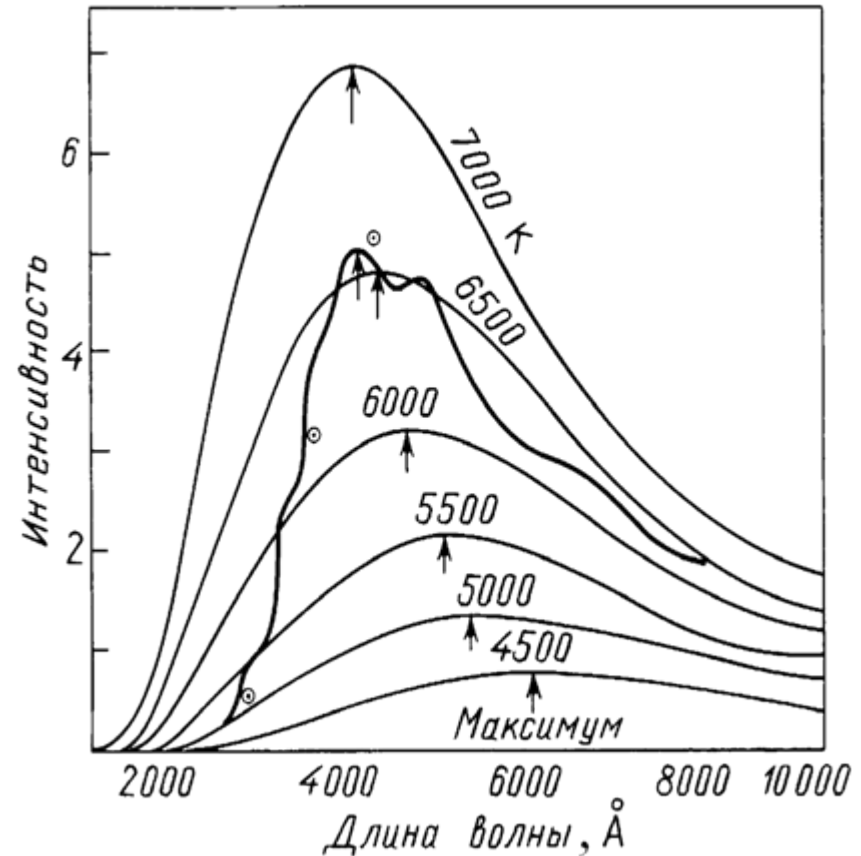
Распределение энергии в спектре Солнца

Сравнение распределения энергии в спектре **Солнца** (жирная кривая) с распределением энергии в спектре излучения **абсолютно черного тела** при **разных температурах**.

По оси Y – интенсивность в единицах $10^{11} \text{ Вт}/(\text{с} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{см} \cdot \text{ср})$ (ср – телесный угол в 1 стерадиан).

При росте температуры абсолютно черного тела максимум излучения смещается в сторону коротких длин волн согласно закону Вина

$$\lambda_{\text{max}} T = 2.898 \cdot 10^{-3} \cdot \text{К}$$



λ , нм	10	50	100	121,6	200	300	500	1000
W_{λ} (Вт/м ² *нм)	10⁻⁵	5·10⁻⁵	3·10⁻⁵	Lα	10 ⁻²	0.6	2	0.7

I (Вт/м²)

3·10⁻³

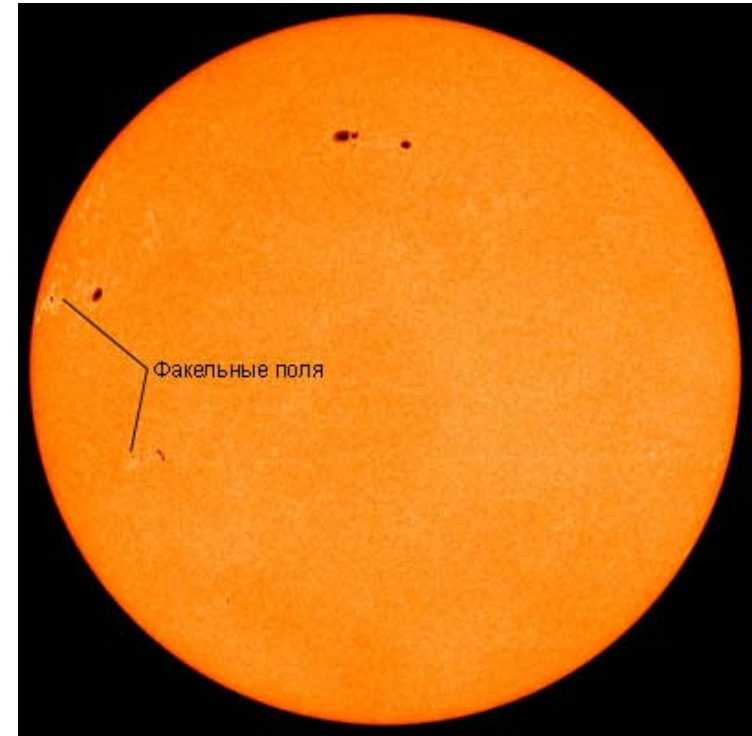
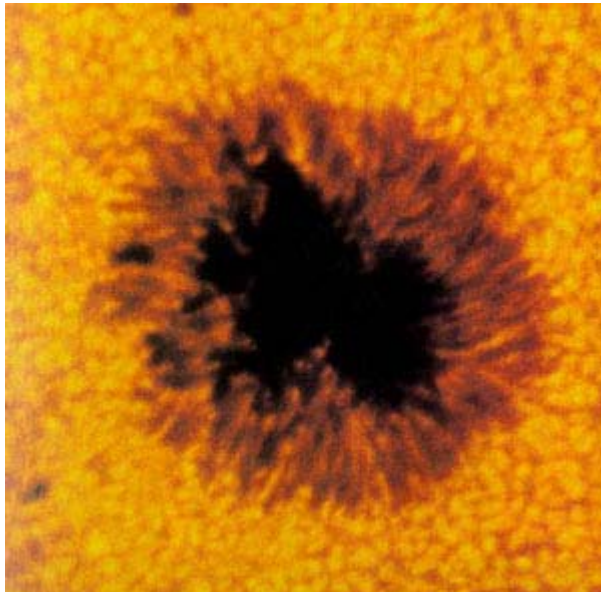
5·10⁻³

1200

Солнечные пятна

1. Никоновская летопись (1365 и 1371)
2. Галилей, 1610

Внутренняя структура пятна:
- **ядро** (более темную центральную часть)
- и окружающая ее **полутень**.



- **Температура пятен меньше температуры фотосферы** (~ 6000 K) на ($1000 \dots 2000$) K, поэтому на ее фоне они кажутся темнее.
- Образование пятен **связано с магнитным полем Солнца**.
- Небольшие **пятна имеют в поперечнике несколько тысяч километров**. Размеры крупных пятен достигают 100 000 км.

Вращение Солнца

Впервые вращение Солнца наблюдал **Галилей по движению пятен на поверхности.**

Установлено, что различные зоны Солнца вращаются вокруг оси с различными периодами.

Точки на экваторе имеют период около 25 суток, на широте 40° период вращения равен 27 суток, а вблизи полюсов – 30 суток.

Это доказывает, что **Солнце вращается не как твердое тело** - скорость вращения точек на поверхности уменьшается от экватора к полюсам - а как жидкостный или газовый шар !!!



Вольф Р.И.
(1816-1893)

Солнечный цикл

Понятие относится к почти регулярным сериям наблюдаемых изменений, которые сопровождают процесс эволюции магнитного поля Солнца.



Швабе Г.С.
(1789-1875)

Наблюдения солнечных пятен, используемые для научных исследований, астрономы проводят в течение почти четырех последних столетий.

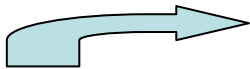
Галилей проводил свои наблюдения в 1610–1611 гг., и с этого периода регистрация пятен проводилась нерегулярно.

К 1843 г. **Генрих Швабе** собрал много данных о регулярных флуктуациях числа солнечных пятен. Швабе показал, что число пятен на диске меняется циклически, достигая максимума примерно через каждые одиннадцать лет.

Швейцарский астроном **Рудольф Вольф** в середине XIX в. систематизировал данные о пятнах. Он предложил численную характеристику солнечной активности – число Вольфа - и установил, что **средний период цикла равен 11,1 года.**

Число Вольфа

Число Вольфа W - числовой показатель количества солнечных пятен. Показатель солнечной активности. Используется и для метеорологических прогнозов.



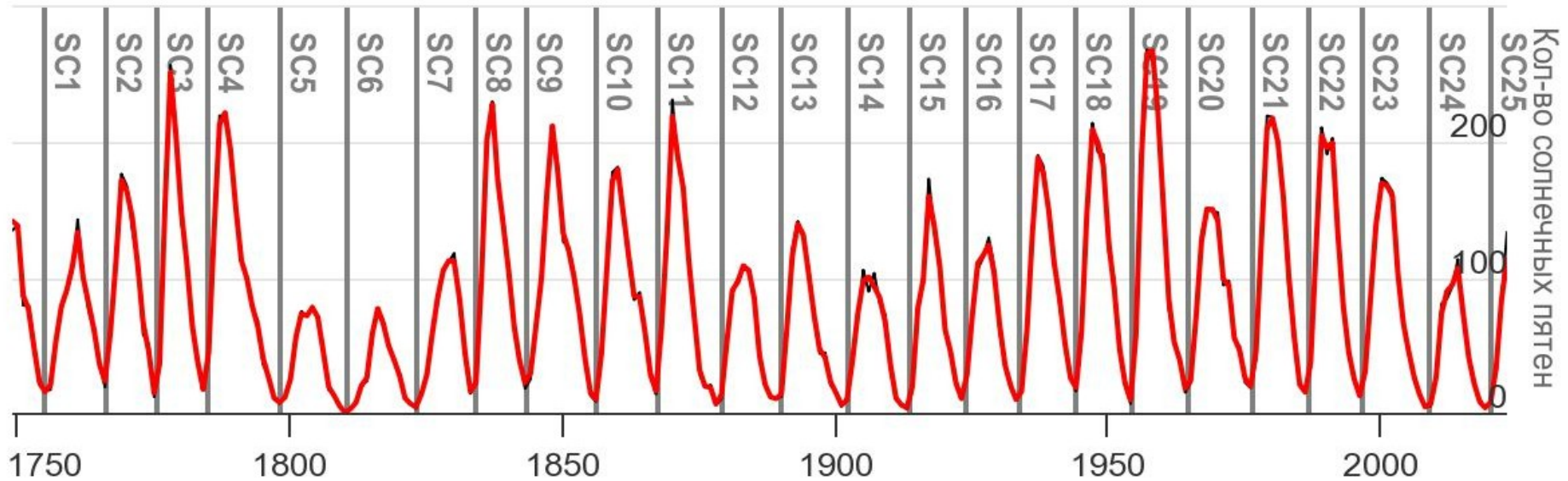
$W = k * (f + 10 * g)$???

где f — количество наблюдаемых пятен;
 g — количество наблюдаемых групп пятен;
 k — нормировка.

Нормировочные коэффициенты k выводятся для каждого наблюдателя и телескопа, что даёт возможность совместно использовать числа Вольфа, найденные разными наблюдателями.

За международную систему приняты числа Вольфа, которые в 1849г начала публиковать Цюрихская обсерватория (для нее $k=1$).

Солнечный цикл и числа Вольфа



Статистика

За последние 50 лет цикл уменьшился с 11,2 до 10,5 лет.

Усреднение за 200 лет дает период в 11,2 года.

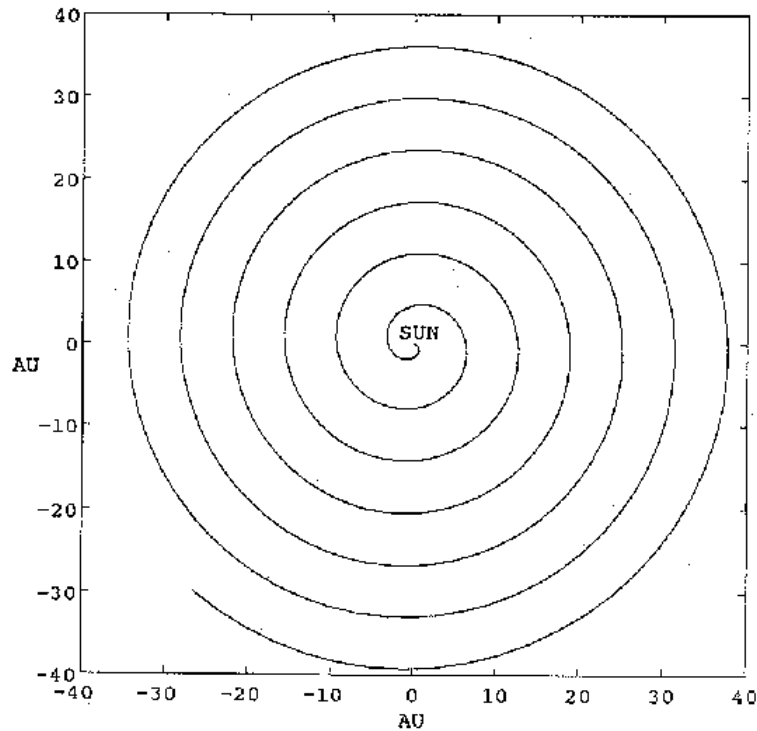
За последние 300 лет самый короткий период
был равен **7 годам**, самый длинный— **17**.

Магнитное поле Солнца и чередование полярности

- Важнейшей особенностью цикла солнечной активности является закон **изменения магнитной полярности пятен**. В течение каждого 11-летнего цикла все ведущие пятна биполярных групп имеют некоторую одинаковую полярность в северном полушарии и противоположную в южном.
- В следующем цикле полярность ведущих и хвостовых пятен меняется на противоположную.
- Одновременно с этим **меняется полярность и общего магнитного поля Солнца, полюсы которого находятся вблизи полюсов вращения**. Поэтому правильнее говорят о **22-летнем цикле солнечной активности для магнитного поля (цикл Хейла, 1919)**.

Модель Паркера спирального межпланетного магнитного поля

$$\text{rot}(\mathbf{E}) = \text{rot}(\mathbf{V} \times \mathbf{B}) = 0$$



1 AU =

1 астрономическая ед.



Солнечная постоянная

Солнечная радиация

Годовой приход коротковолновой солнечной радиации на верхнюю границу атмосферы (или на поверхность Земли без учета атмосферы) равен $5,49 \cdot 10^{24}$ Дж, что превосходит **мировые запасы невозобновляемых энергоресурсов**

Приходящая
мощность или
Солнечная
постоянная
 1367 Вт/м^2

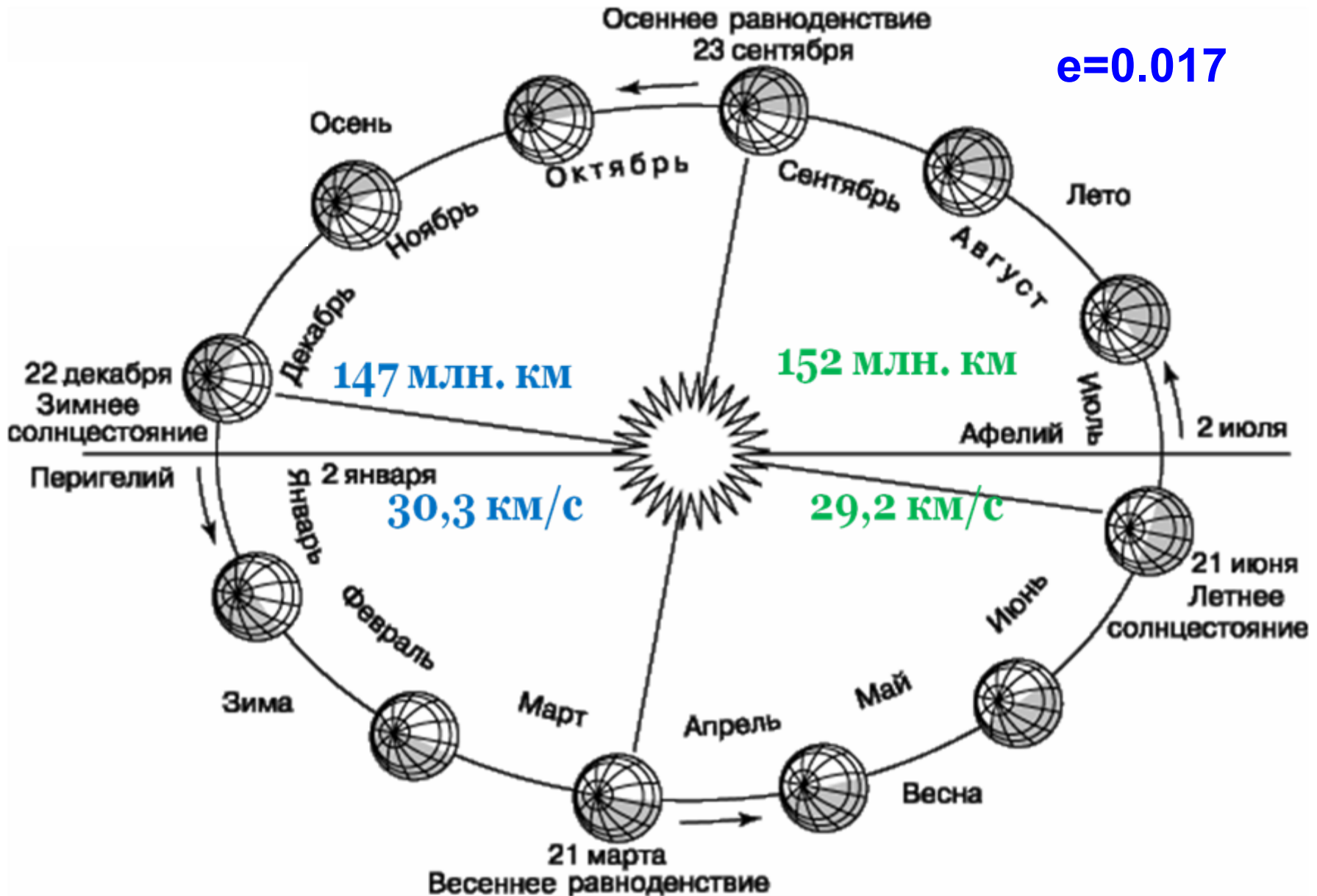
Постоянная -
с ошибкой
менее 0.1%
в цикле



Цикличность Климата

- В XIX веке геологи сделали важное открытие: когда-то **арктические ледники наступили на сушу** и накрыли почти всю Европу и Северную Америку.
- В частности, на оледенение этих зон **указывают следующие геологические признаки:**
 - *ледниковые морены.*
 - *глубокие параллельные борозды* на поверхность горной долины, образованной ледником
- Вскоре после этого открытия стало ясно, что **ледниковый период на Земле наступал не один раз** ледниковые периоды повторялись в прошлом через определенные промежутки времени.
- **Догадка Гершеля**

Движение Земли по орбите

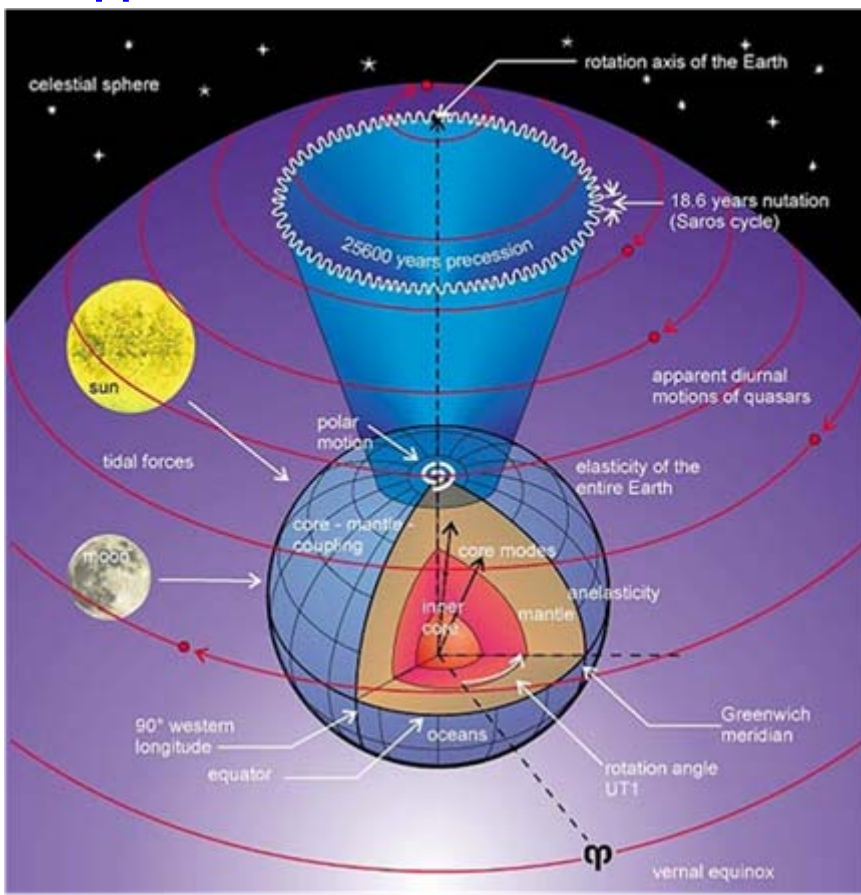


Циклы Миланковича

Смена климатических условий связана с изменениями в земной орбите и происходит из-за гравитационного взаимодействия Земли с Солнцем, Луной, другими массивными планетами (например, Юпитером). **Задача взаимодействия многих тел**

Экспериментальное подтверждение климатических изменений - содержание CO₂ в пузырьках воздуха во льду Антарктиды.

Влияние массивных тел выражается в **изменении динамики движения Земли:**



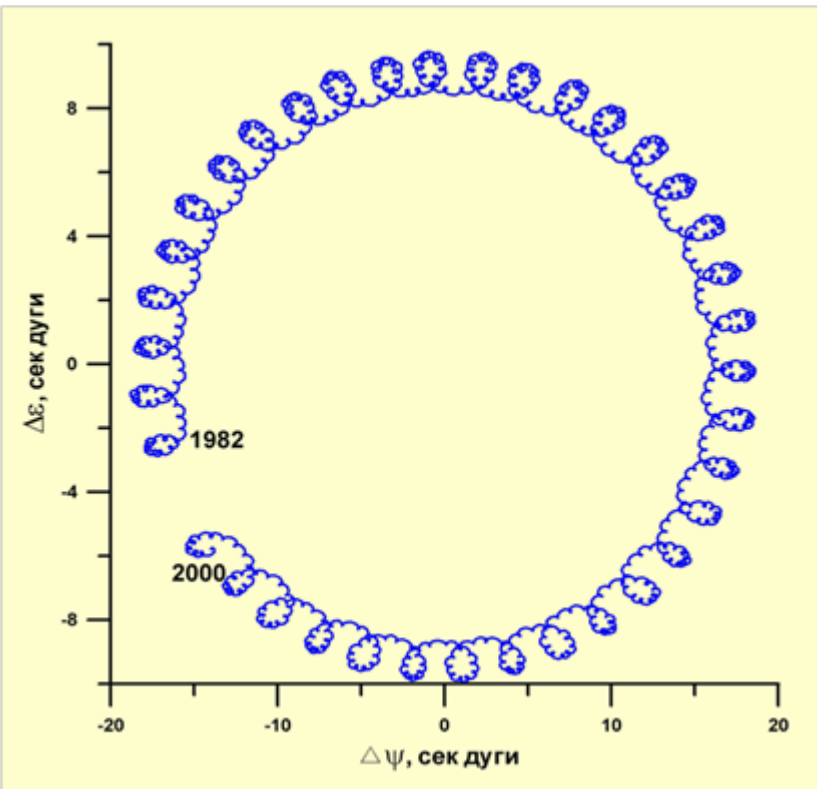
Прецессия. Земная ось медленно движется по круговому конусу с периодом полного оборота приблизительно **25,6 тысячи лет**.

Сейчас ось Земли наклонена к плоскости эклиптики так, что в январе (когда Земля находится ближе всего к Солнцу) северное полушарие, отвернуто от Солнца.

Через 13 тысяч лет ситуация станет противоположной - в январе северное полушарие будет повернуто к Солнцу, и январь станет в северном полушарии серединой лета.



Особенности движения Земли



Нутация. Дополнительно незначительно колеблется и угол наклона земной оси (эти колебания с периодом ~ 18.6 года и называются «нутацией»). Сейчас ось наклонена на 23° к плоскости земной орбиты.

Каждую 41 тысячу лет под влиянием не только Луны, но и Юпитера (массивной планеты) угол наклона уменьшается до 22° и затем вновь возрастает.

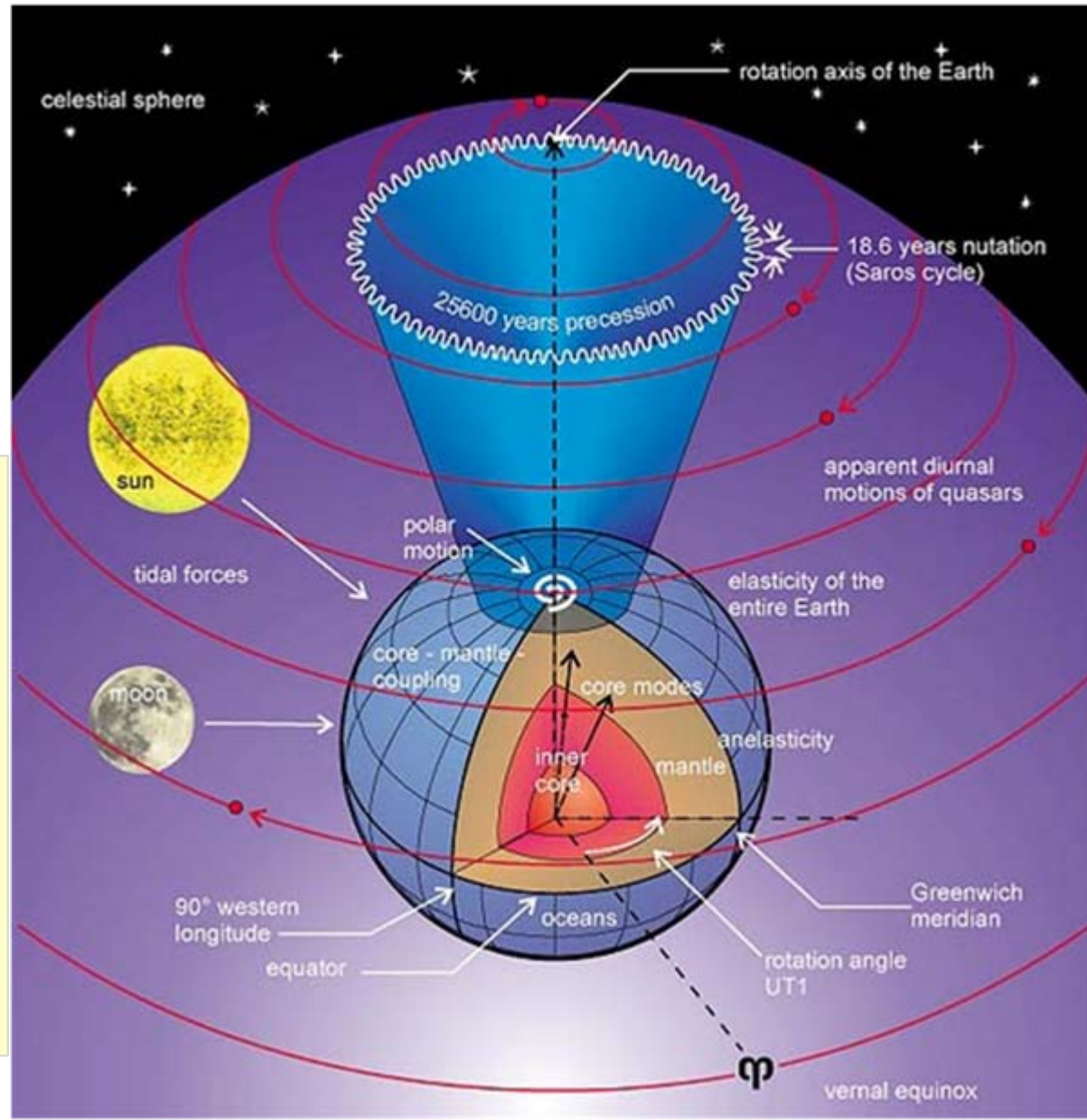
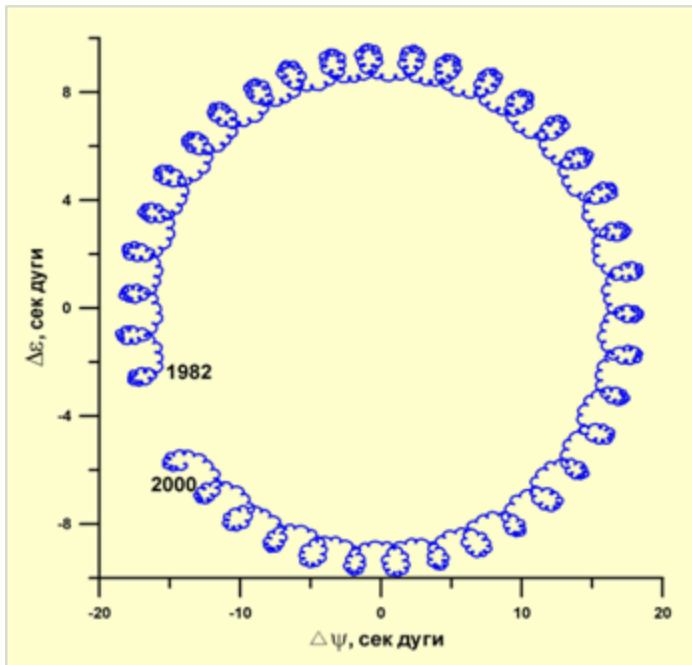
Изменение формы орбиты.

Из-за притяжения других планет с течением времени меняется и форма земной орбиты. От эллипса, вытянутого в одном направлении, она превращается в круг, затем — в эллипс, вытянутый в направлении, перпендикулярном исходному, затем — снова в круг и т. д.

Этот цикл длится примерно 93 тысячи лет.

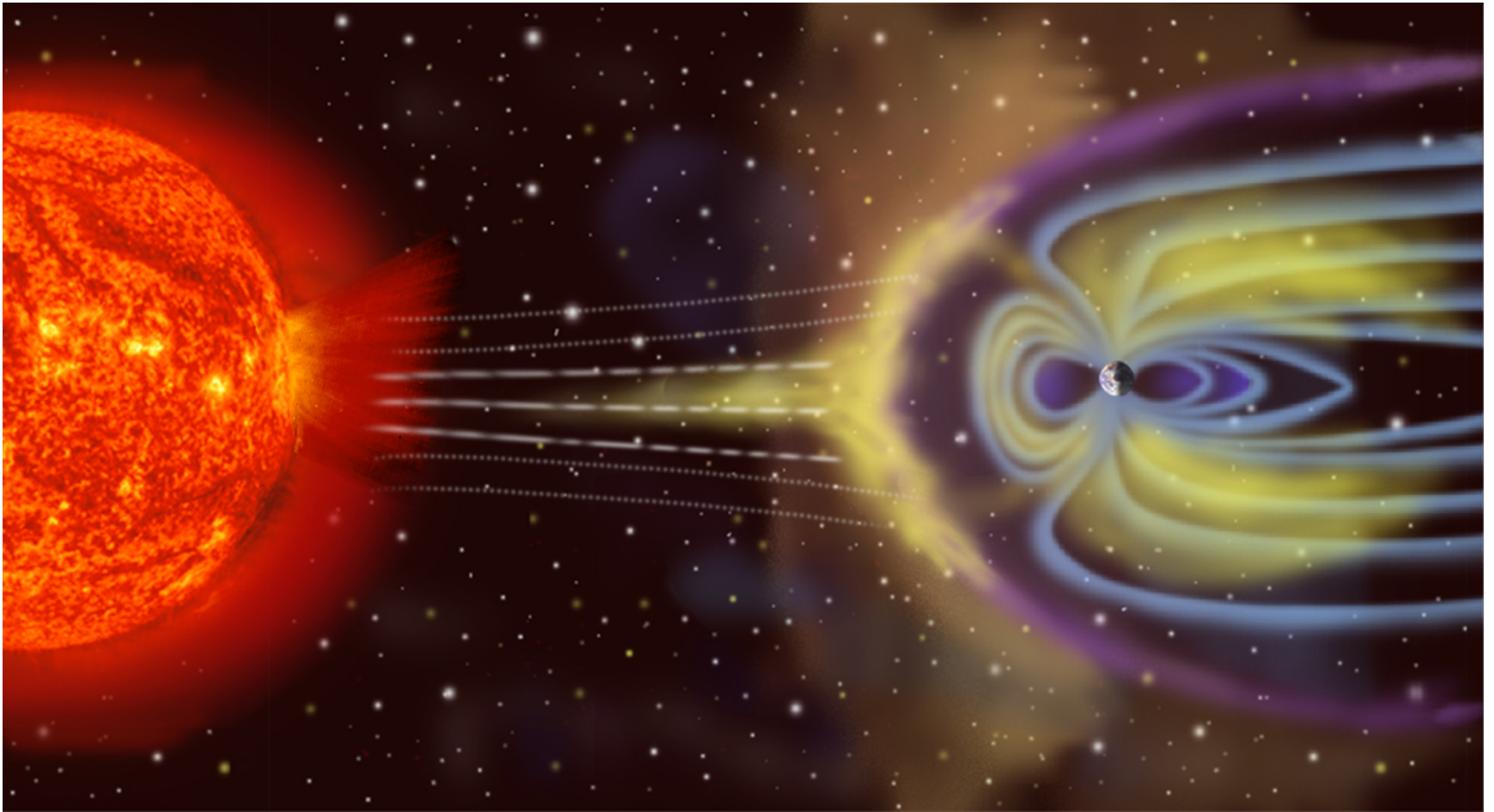
В целом : движение Земли

Движение оси вращения в пространстве - прецессия и нутация



Земля в атмосфере Солнца

Солнечно-земные связи



**Частицы плазмы двигаются в магнитном поле,
которое имеет сложную конфигурацию.**

– Радиационные пояса – Магнитные бури

Космическая погода

Впервые определение понятия «космическая погода» было дано в США в 1995 г при разработке национальной программы NSWP - National Space Weather Program .

Космическая погода – это изменения условий на Солнце, в солнечном ветре, магнитосфере и ионосфере, которые могут повлиять на работу и надежность бортовых и наземных технологических систем и угрожать здоровью и жизни людей.

(National Space Weather Program. Strategic Plan. Office of Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research FCM-P30-1995. Washington DC. 1995.)

В последние годы проявления долгопериодических вариаций солнечной активности и космической погоды получили название «**Космический климат**».

Основные факторы космической погоды

- **Солнечные пятна** – индикатор активности
- **Солнечный ветер**, включая и приход к Земле высокоскоростных его потоков ;
- **Ионизирующее электромагнитное излучение** (рентгеновское и УФ) – как регулярное так и от **солнечных вспышек**, вызывает разогрев и дополнительную ионизацию верхней атмосферы;

Класс	Интенсивность Вт/м ²	Отсутствие радиосвязи
В	$<10^{-6}$	Нет
С	от 10^{-6} до 10^{-5}	Нет
М	от 10^{-5} до 10^{-4}	нарушения
Х	$>10^{-4}$	Значительные нарушения

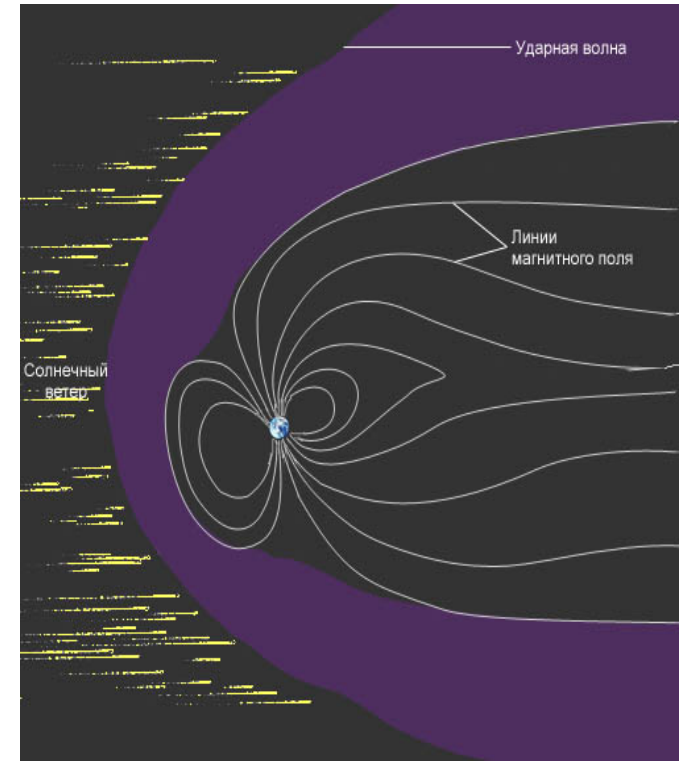
- **Солнечные космические лучи и коронарные выбросы массы** - протоны, электроны, ядра, образовавшиеся во вспышках на Солнце и достигшие орбиты Земли после взаимодействия с межпланетной средой ;
- **Магнитосферные бури**, вызванные приходом к Земле коронарных выбросов солнечной массы и/или высокоскоростных потоков солнечного ветра;

Солнечный ветер

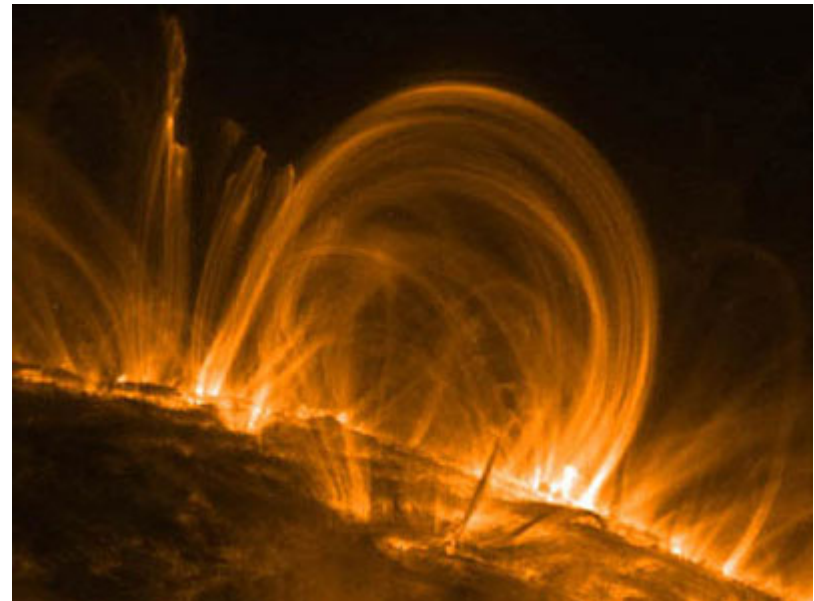
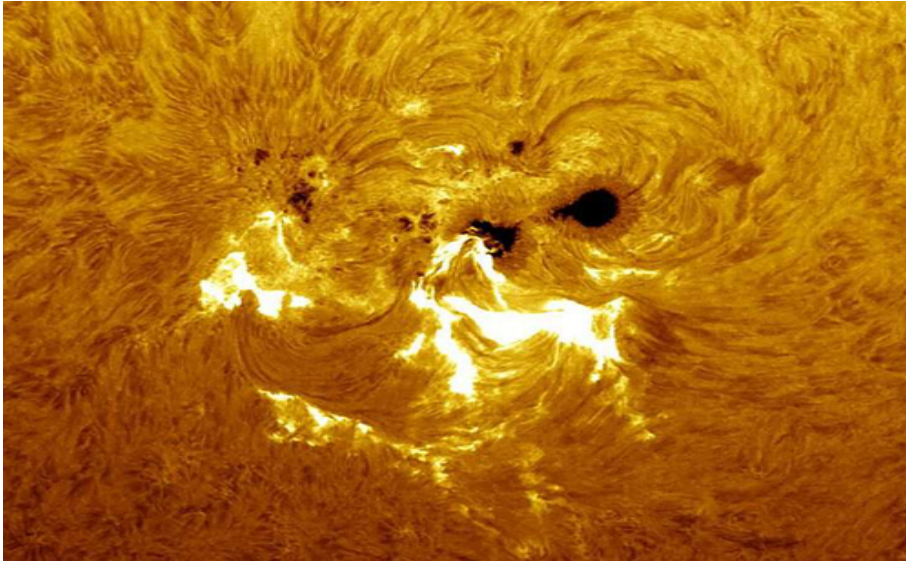
- **Солнечный ветер** - непрерывное истечение плазмы (т.е. корпускулярными потоками от Солнца нейтрино, электронов, протонов, альфа-частиц, а также более тяжелых атомных ядер) **из солнечной атмосферы**
- Первые измерения солнечного ветра произведены в 1959 году на АМС «Луна-9». В 1962 году «Маринер-2», направлявшийся к Венере, произвел наблюдения солнечного ветра и получил следующие его параметры
- **скорость солнечного ветра изменялась в границах от 350 км/с до 800 км/с, средняя концентрация солнечного ветра 5,4 иона/см³, ионная температура 160 000 К. Средняя напряженность магнитного поля $6 \cdot 10^{-5}$ Э**

Под воздействием солнечного ветра хвосты комет всегда направлены в сторону от Солнца.

Если есть **резкие изменения солнечного ветра – наступают магнитные бури. Источник изменений** - коронарный выброс массы Солнца. Все это вызывает полярные сияния иные проявления бури на Земле.



Вспышки, протуберанцы ...



- Если на Солнце есть большие группы пятен, в хромосфере возникают вспышки. Они похожи на огромные взрывы, длящиеся всего лишь несколько минут.

За несколько минут в маленькой области высвобождается энергия порядка 100 000 млрд кВт/час (столько же тепла поступает от Солнца на Землю в год).

- Причины вспышек плохо изучены.

Вспышки вызывают изменения в магнитном поле Земли

В атмосфере Земли

Атмосфера Земли



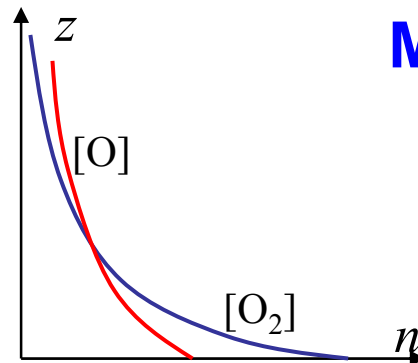
Газ	Содерж. по объёму, %	Молекулярная масса, ед.
Азот	78,081	28,0134
Кислород	20,945	31,9988
Аргон	0,932	39,9484
Углекислый газ	0,04	44,00995
<u>Неон</u>	$1,82 \cdot 10^{-3}$	20,179
<u>Гелий</u>	$4,6 \cdot 10^{-4}$	4,0026

Барометрическая формула

$$N = N_0 \cdot \exp \left[- \frac{mg}{kT} z \right]$$

$1/H_0$

$$k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$$



Основные Механизмы ионизации

- УФ и рентгеновское излучение
- Нагрев вещества и столкновения

Понятие **плазмы как квазинейтрального газа заряженных частиц** введено Ленгмюром в 1929г.

Плазма – 4 агрегатное состояние вещества.

В физике плазмы температуру принято отождествлять с энергией.

$$1\text{эВ} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ эрг} = 11606 \text{ }^{\circ}\text{К}$$

Основные характеристики плазмы

$\omega_L^2 = e^2 N_e / \varepsilon_0 m_e$ - частота собственных колебаний (Ленгмюр).

Время существования возбуждения в плазме

$$t \sim 2\pi / \omega_L = \sqrt{\varepsilon_0 m_e / N_e e^2}$$

Характерный пространственный размер возбуждения

$$r_D = t V_{\text{теп}} = t \sqrt{kT_e / m_e} = \sqrt{\varepsilon_0 kT_e / N_e e^2} \text{ - радиус Дебая}$$

Коллективные эффекты - Дебаевская экранировка в плазме.

$$\Phi(r) = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r} \exp(-r / r_D)$$

Параметры околоземной плазмы

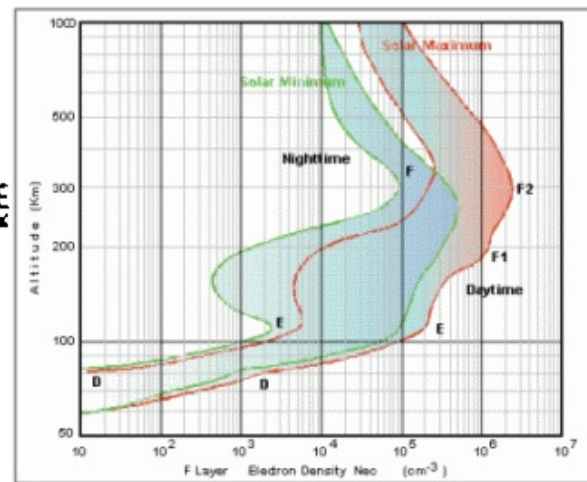
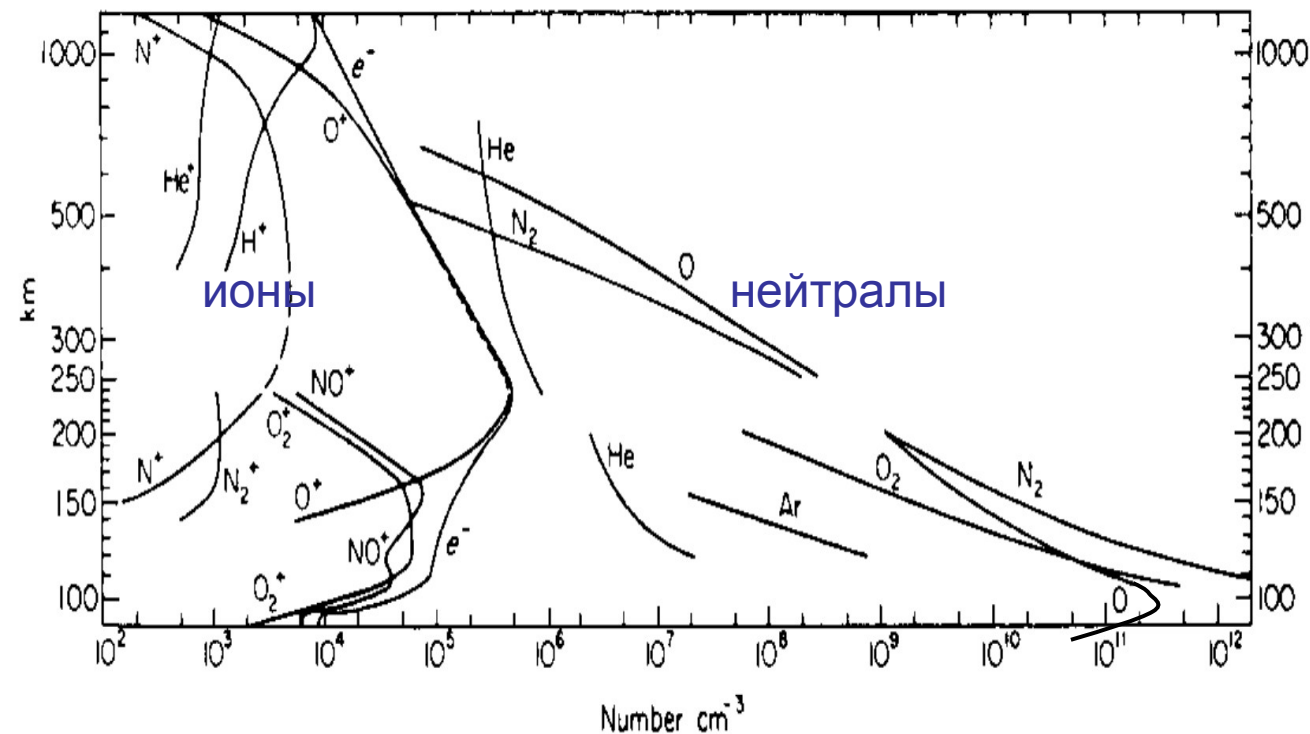
	$n, \text{ см}^{-3}$	$T, \text{ эВ}$
Солнечная корона	10^6	200
Солнечная атмосфера	10^{14}	1
Ионосфера Земли	$10^5 \div 10^6$	0,1
Солнечный ветер	5	$10 \div 50$
Межзвёздный газ	1	$0,01 \div 1$

Немного истории

- **Гаусс (Gauss), 1839** , **Стьюарт (Stewart), 1882** – вывод о наличии в атмосфере проводящей области на высоте ~ 70 км
- После радиопередачи Маркони через Атлантический океан (1901 г.) вывод о наличии в небе отражающего слоя независимо сделали **Кеннели (Kennelly) и Хэвисайд (Heaviside), 1902**. Высоту отражения оценивали как ~ 80 км.
- Прямое наблюдение слоя Кеннели-Хэвисайда по анализу радиоотражений провел **Эпплтон (Appleton), 1925**. Он назвал этот слой «слой E» (Electricity). Другие слои называли в алфавитном порядке – D, E, F
- **Термин «ИОНОСФЕРА» предложил в 1930г. Роберт Александр Уотсон-Ватт**
- Теория деления ионосферы на слои принадлежит **Чепмену (Chapman), 1931**.
- **Нобелевская премия 1947г.** «За исследования верхних слоев атмосферы, в особенности за открытие так называемого слоя Эпплтона»

Государственная премия РФ в области науки и техники 1998г.-
ТОМОГРАФИЯ (Куницын В.Е.**, Андреева Е.С., Терещенко Е.Д. и др)**

РЕАЛЬНАЯ ионосфера



Е-область. Основные нейтралы O_2 , N_2 . Основные ионы O_2^+ , NO^+ .

F1,2-область. Основной ион O^+ .

Ниже 80 км атмосфера химически однородна – **гомосфера**. Выше химический состав атмосферы изменяется с высотой.

Магнитное поле Земли

Основное поле (до 99%). По форме близко к полю диполя, центр которого смещён относительно центра Земли, а ось наклонена к оси вращения Земли на $11,5^\circ$ (вектор магнитной индукции направлен вниз).

Величина магнитного момента диполя в настоящее время составляет $8,3 \cdot 10^{22} \text{ А} \cdot \text{м}^2$.

Средняя величина магнитного поля $\sim 5 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$.

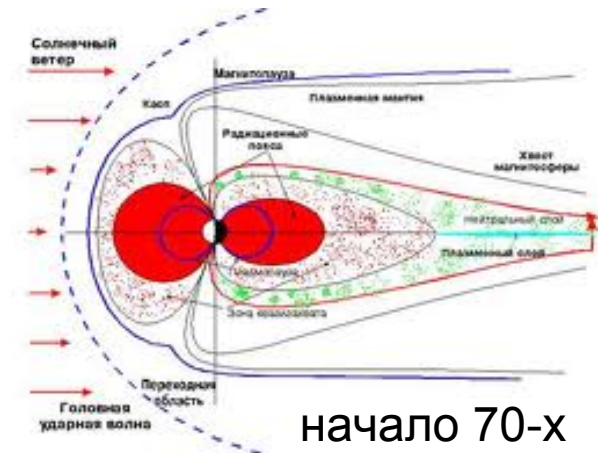
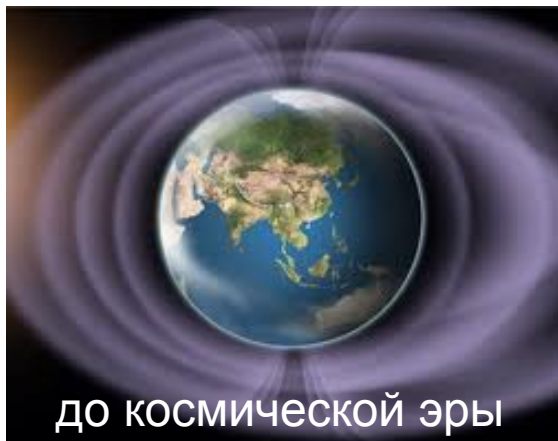
Напряжённость геомагнитного. поля убывает от магнитных полюсов к магнитному экватору от 55,7 до 33,4 А/м (от 0,70 до 0,42 Э).

**Переменная часть составляет $\sim 1\%$,
причем величина варьируется во
времени !!!**

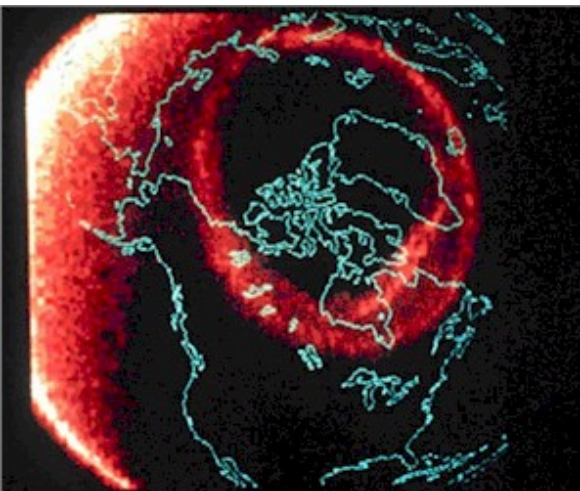
Долгое время считали, что сверху ионосфера переходит в межпланетную среду.

Всё изменилось в **космическую эру** - прямые спутниковые измерения выявили физически разные среды: ионосферу, магнитосферу и солнечный ветер.

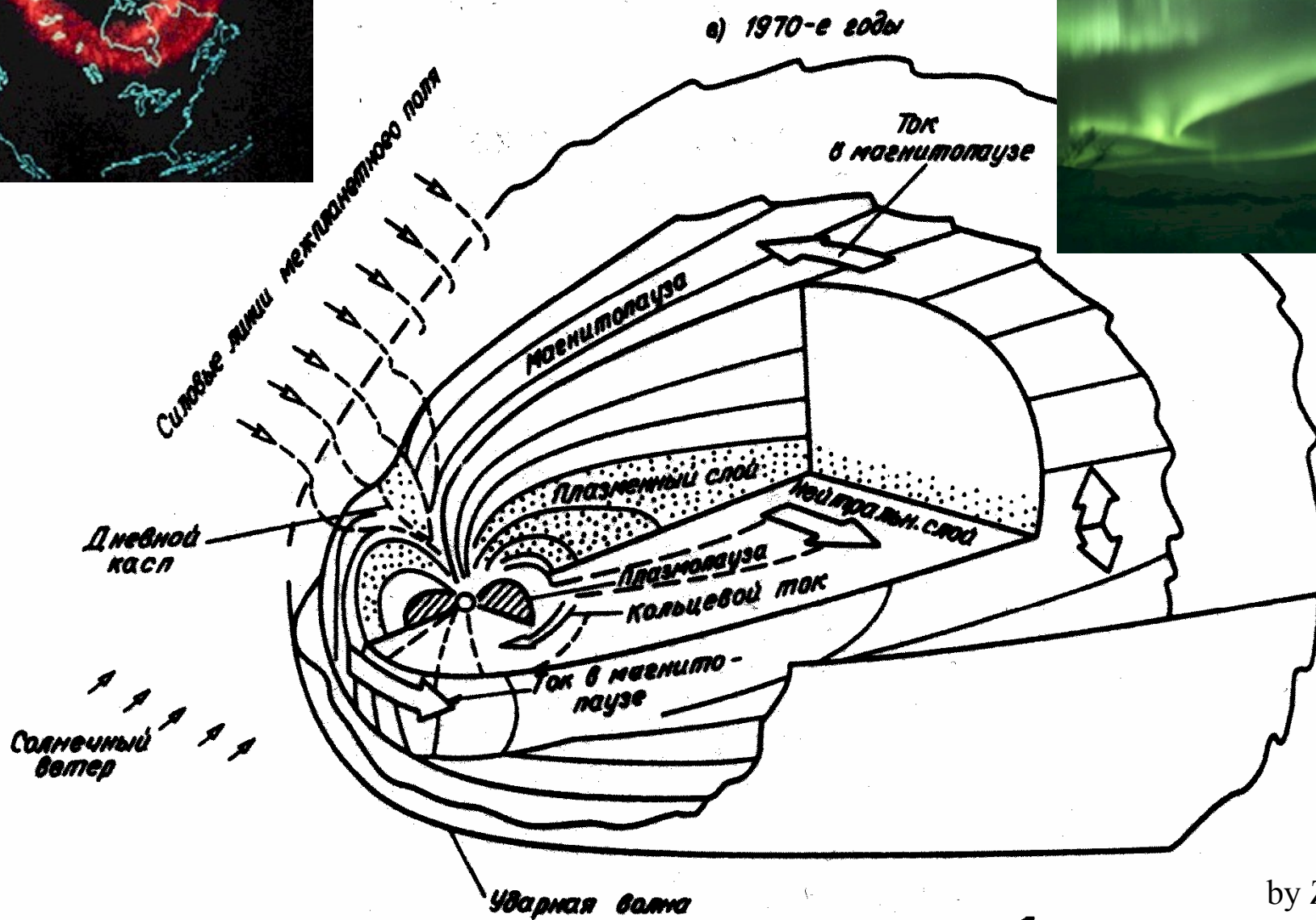
Смена парадигмы



время



Система ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ТОКОВ



Движение заряженной частицы

Уравнение
движения

$$\frac{d}{dt} m\mathbf{v} = q \left(\mathbf{E} + \frac{1}{c} [\mathbf{v}\mathbf{B}] \right) + \mathbf{F}$$

1. Только электрическое поле (или поле силы тяжести)

Рассмотрим движение частицы с зарядом e и массой m в **однородном электрическом поле** напряженностью $E = \text{const}$ ($B=0$).

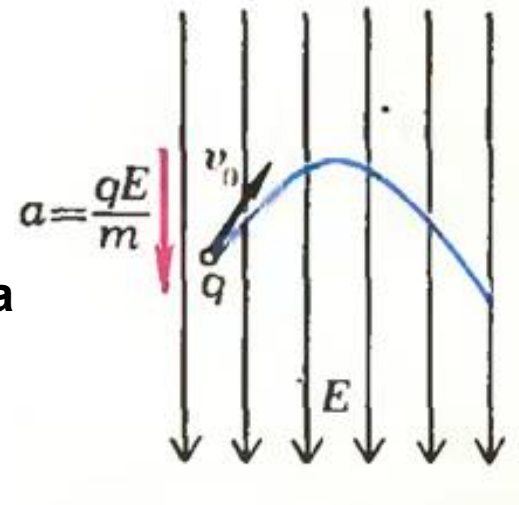
На заряженную частицу со стороны поля **действует сила** $F = qE$,

которая сообщает частице **ускорение** $a = F/m = qE/m$.

Если частица имеет начальную скорость $V \neq 0$, то ее движение в таком поле похоже на движение тела, брошенного под углом к горизонту в однородном поле тяжести, где ускорение тела также постоянно и равно g .

Траектория движения — парабола.

Если $V=0$, то — равноускоренное движение по прямой



2. Электрического поля НЕТ

$$\mathbf{B} = \text{const}, \mathbf{E} = 0, |V_0| = \text{const}, m = \text{const},$$

$$V_{\parallel} = \text{const} \neq 0$$

$$\frac{d}{dt} m V_{\perp} = q [V_{\perp} \mathbf{B}]$$

$$m V_{\perp}^2 / R = q V B$$

$$V_{\perp} = [\omega_B \mathbf{r}]$$

Циклотронная частота

$$\omega_B = \frac{qB}{m}$$

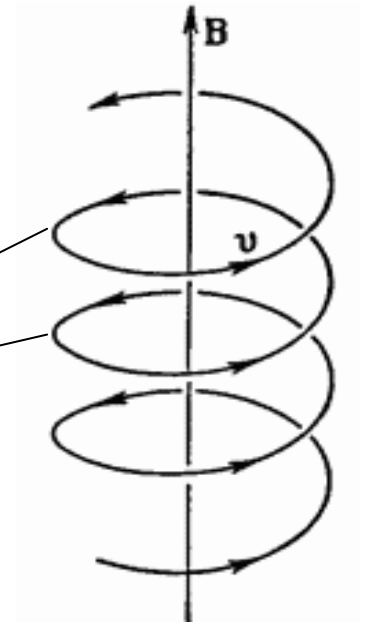
Шаг винтовой линии

$$h = 2\pi \frac{m V_0}{qB} \cos \alpha$$

Радиус ларморовской окружности

$$V_{\parallel} = 0$$

$$r_L = m V_{\perp} / qB$$



3. Постоянные скрещенные поля

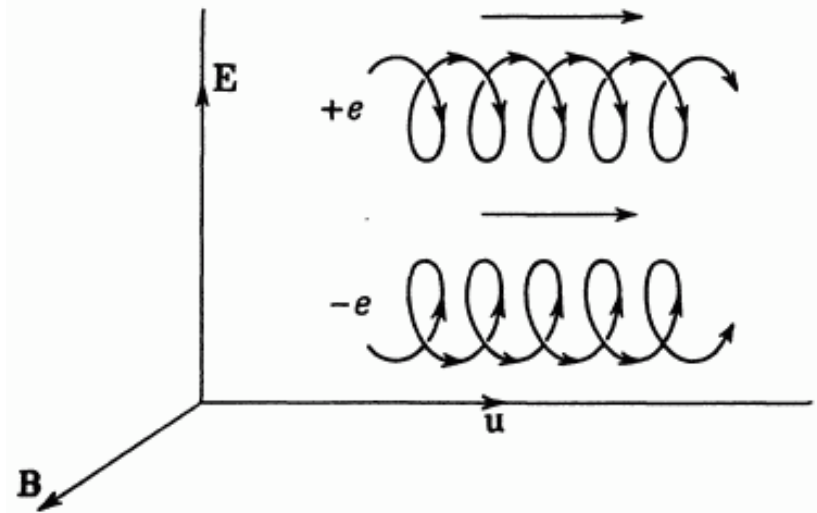
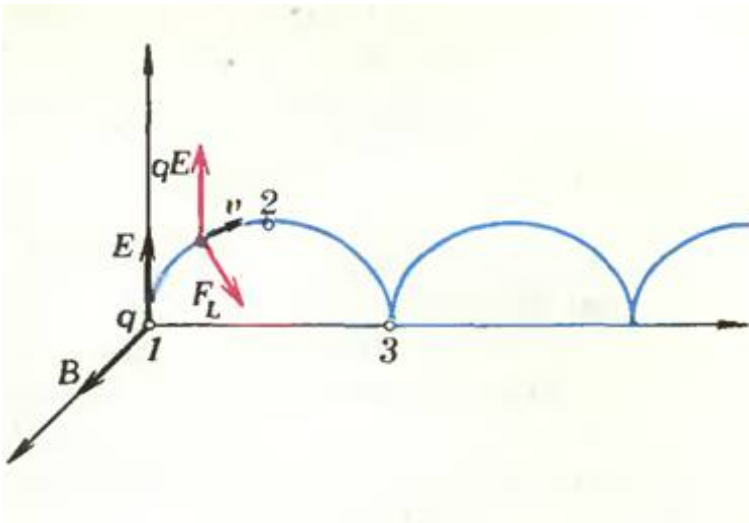
$$\mathbf{E} = \text{const}, \mathbf{E} \perp \mathbf{B}$$

$$\mathbf{E}' = \left(\mathbf{E} + \frac{1}{c} [\mathbf{v}_d \mathbf{B}] \right) / \left(1 - \frac{v_d^2}{c^2} \right)^{1/2} = 0$$

Дрейф в эл.
поле

$$\mathbf{v}_d^E = c \frac{[\mathbf{E} \mathbf{B}]}{B^2}$$

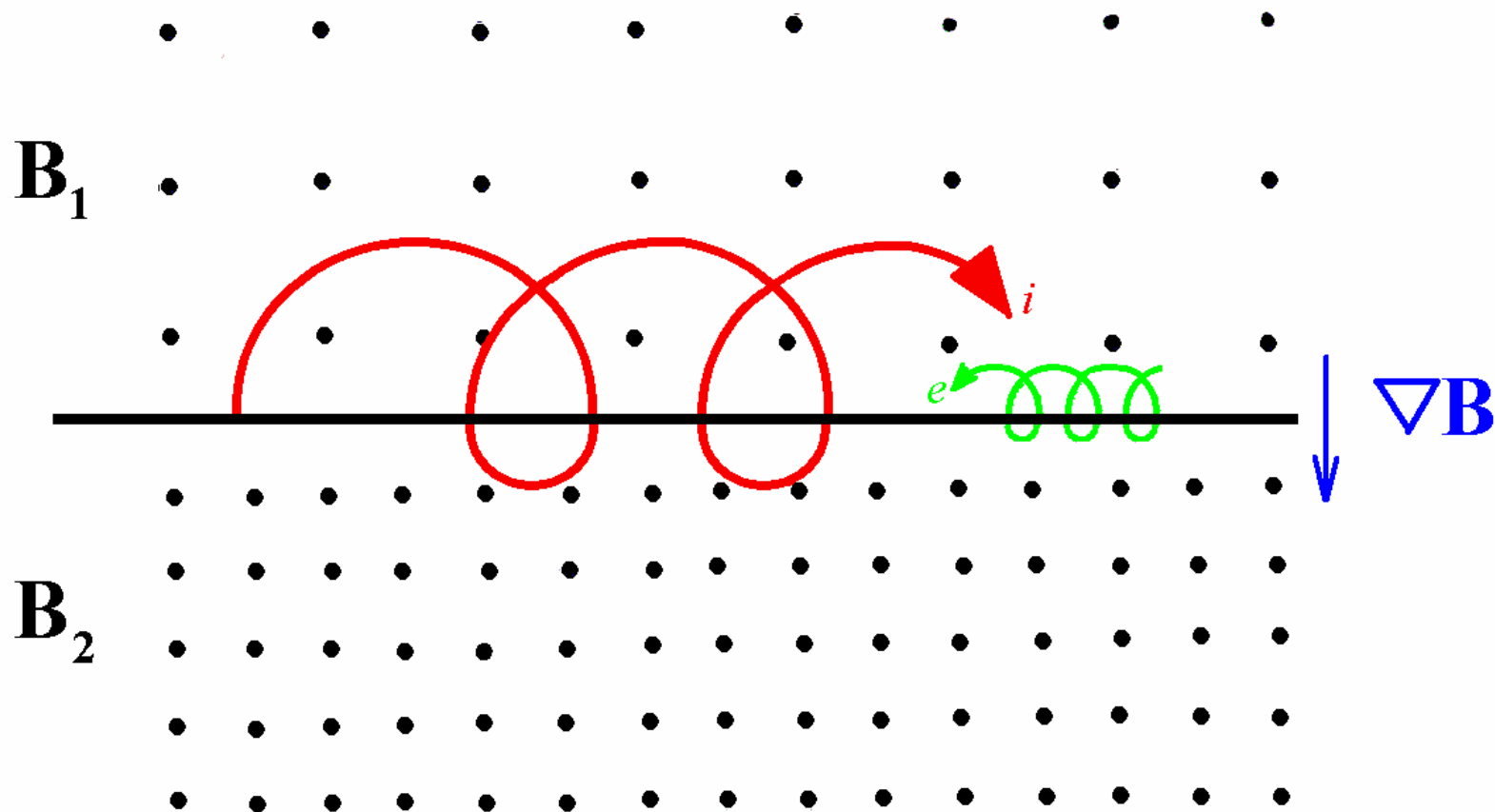
Релятив. поправка



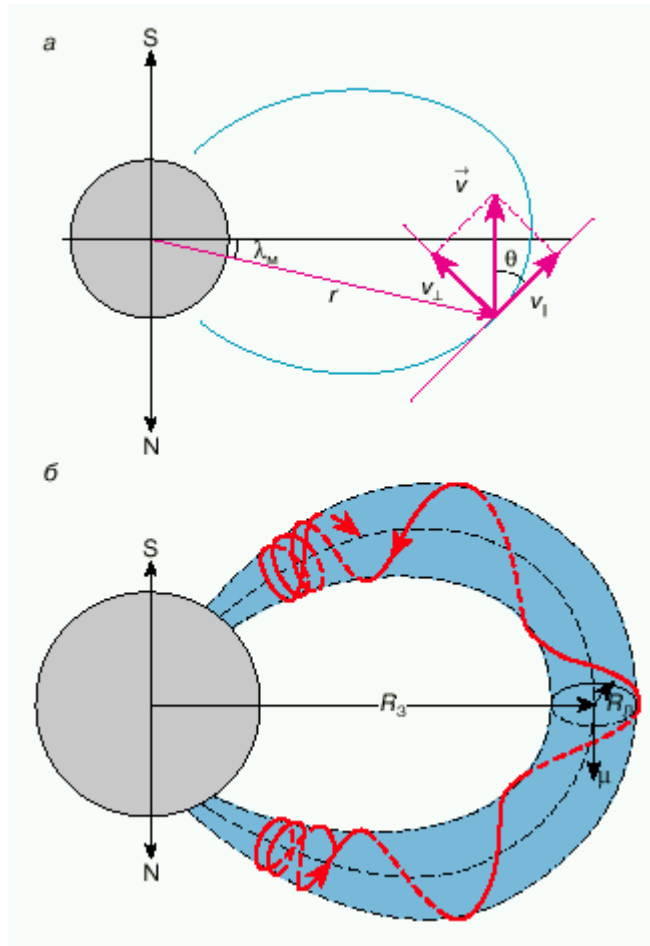
1. Пусть $v=0$.

В поле $\mathbf{E}$ частица ускоряется. Сила Лоренца $\perp \mathbf{V}$, и она не совершает работы, но искривляет траекторию и после момента времени (2) частица движется обратно, $\mathbf{E}$ ее тормозит. Точка 3 - скорость частицы опять обратится в нуль, и цикл повторяется

Роль градиента магнитного поля



Пинч-эффект



- Вращение вокруг магнитной силовой линии для иона Z

$$T = 2\pi R / V_{\perp} = 2\pi R / (V \sin \theta) = 2\pi mc / (ZeH)$$

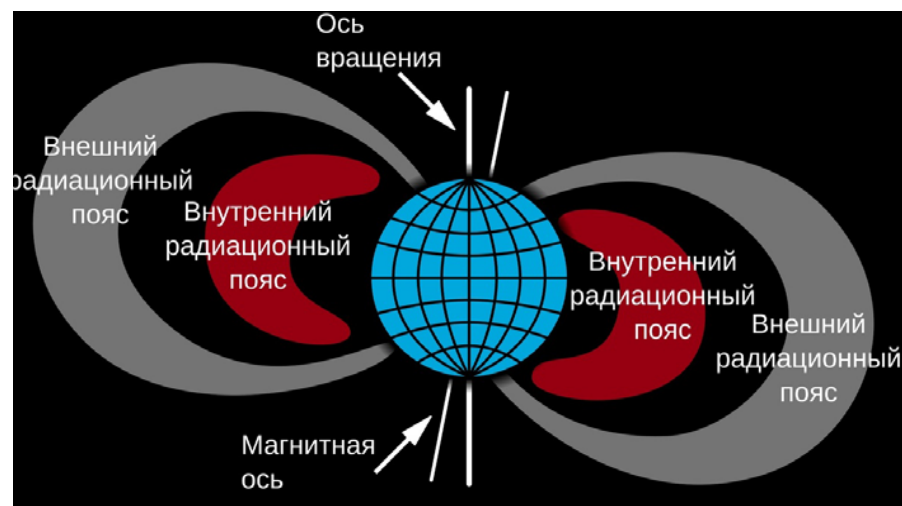
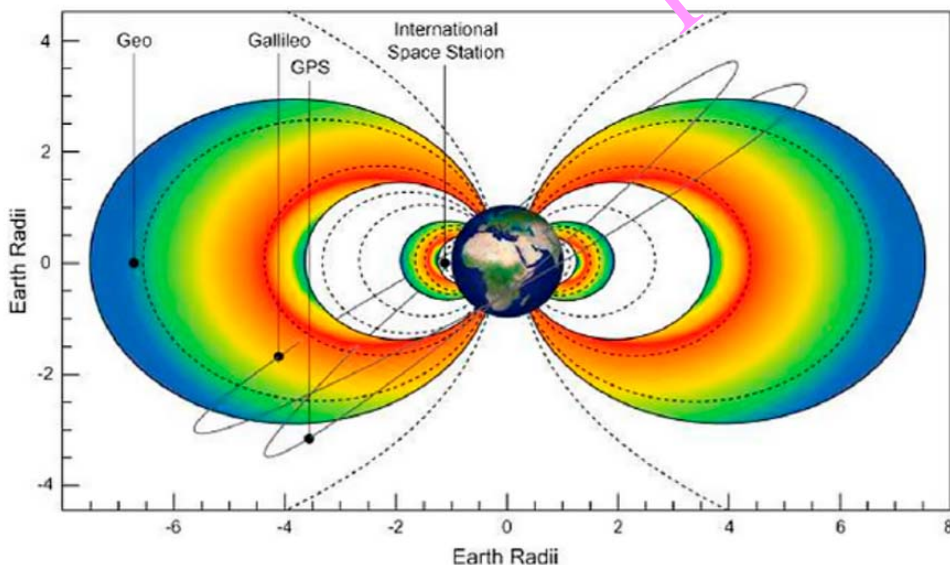
- Поступательное движение до зеркальной точки, причем условие отражения $\sin^2(\theta) = H_0 / H_m$, где H_0 - поле на магнитном экваторе, а H_m - напряженность поля в точке отражения

Радиационные пояса Земли

Радиационный пояс Земли (внутренний) был открыт после полета Эксплорер-1 американским учёным Джеймсом ван Алленом и советскими учёными (С. Н. Верновым и А. Е. Чудаковым) после полёта Спутник-3 в 1958 году и представляет собой, в первом приближении, тороид, в котором выделяется две области:

- **внутренний радиационный пояс на высоте ~ 4000 км, состоящий преимущественно из протонов с энергией в десятки МэВ;**
- **внешний радиационный пояс на высоте ~ 17 000 км, состоящий преимущественно из электронов с энергией в десятки кэВ.**

Космос
радиационный

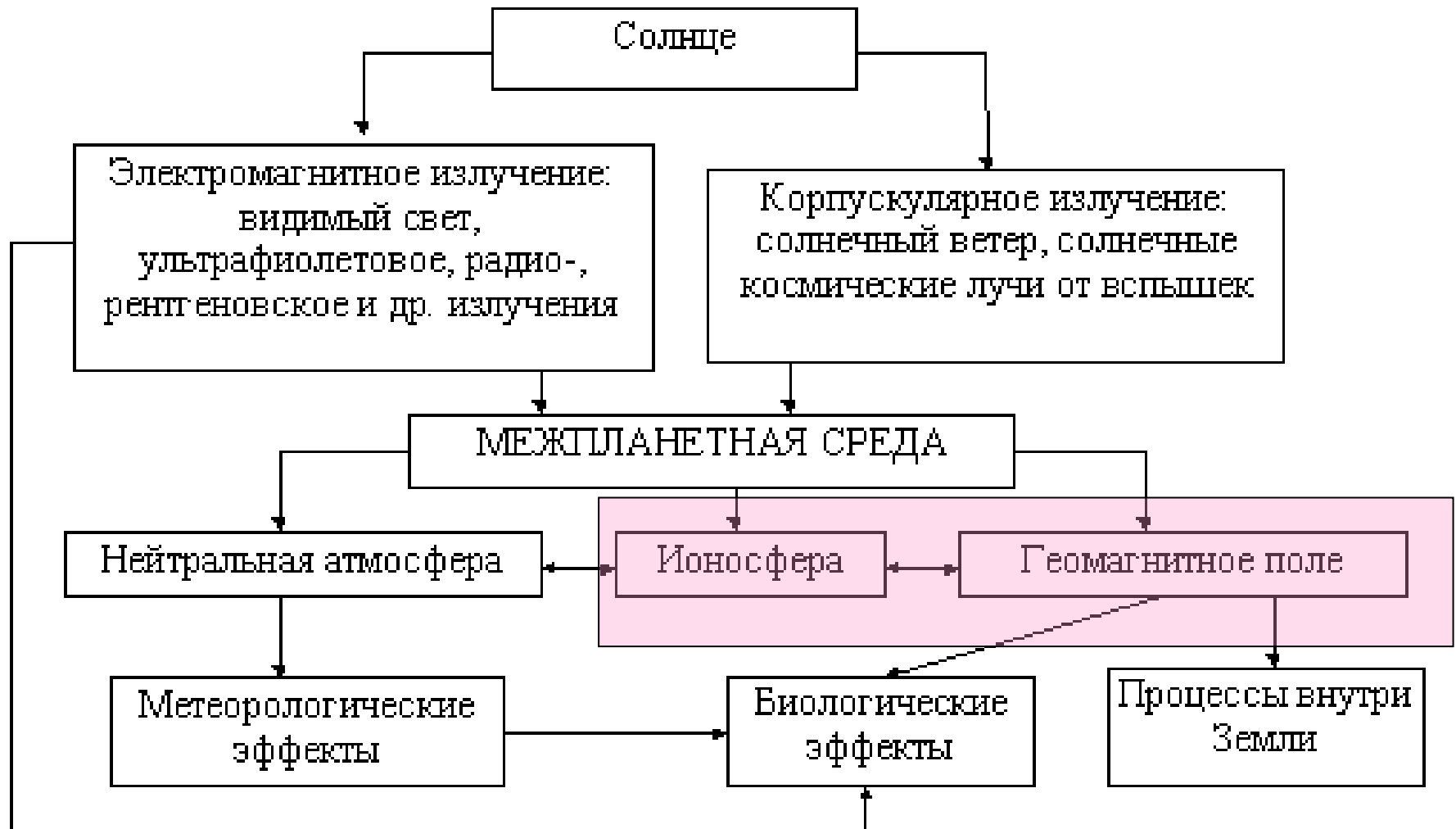




Солнечно- земные связи

- 1. Гравитационное взаимодействие
- 2. Излучение различных диапазонов (RF, VL, UF, UHF)
 - влияние на ионосферу, атмосферу
 - влияние на биообъекты
- 3. Космические лучи – потоки высокоэнергетичных частиц
- 4. «Солнечное вещество» и его взаимодействие с оболочками Земли
 - радиационные пояса
 - магнитные бури и суббури

Солнечно-земные связи



Энергетика магнитной бури

По имеющимся оценкам, **средняя скорость (мощность) поступления энергии солнечного ветра в магнитосферу составляет около $3 \cdot 10^{18}$ эрг/с = $3 \cdot 10^{11}$ Вт.**

$$1 \text{ эрг} = 10^{-7} \text{ Дж}$$

При этом полная энергия большой магнитной бури может достигать $2 \cdot 10^{24}$ эрг составляет малую часть энергии вспышки (для сравнения - при большой солнечной вспышке выделяется энергия $\sim 2 \cdot 10^{32}$ эрг).

Поток кинетической энергии солнечного ветра, падающий на одно полушарие Земли в отсутствие магнитного поля, можно описывать формулой (Olsson *et al.*, 2004)

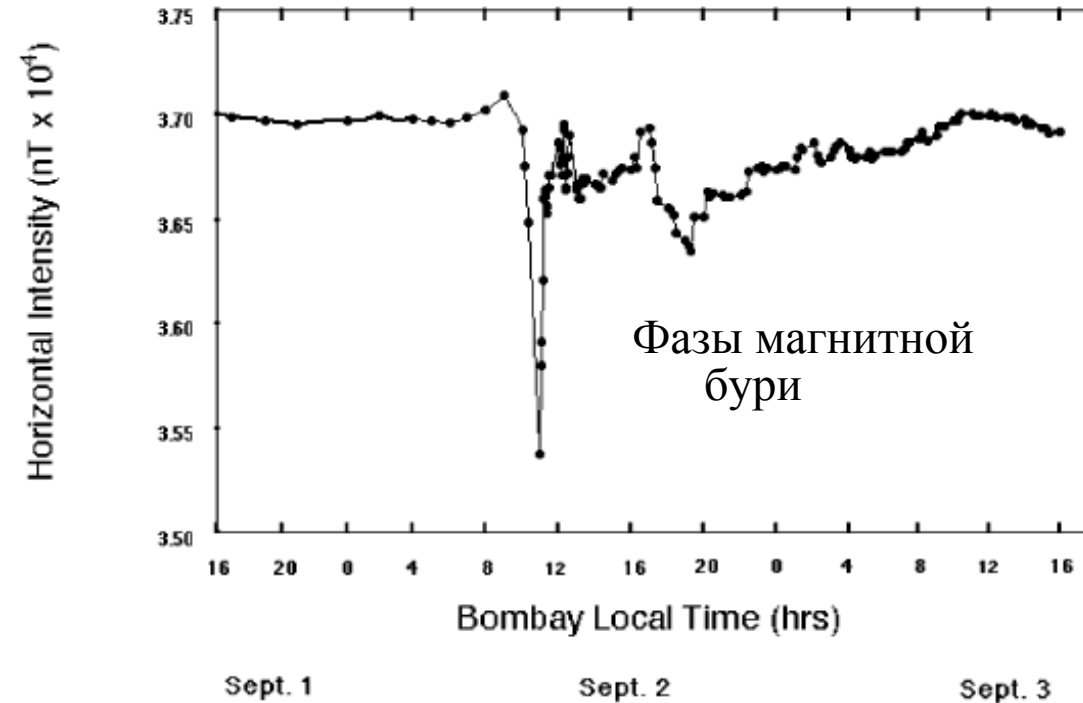
$$W_{sw} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} \rho V_{sw}^2 \right) \cdot V_{sw} \cdot \pi R_E^2$$

где V_{sw} – скорость солнечного ветра; R_E – средний радиус Земли (6371 км);
 ρ – массовая плотность частиц в солнечном ветре.

Поток хорошо коррелирует с полной энергией, поступающей в ионосферу.

Для справки: $1000 \text{ кТ TNT} = 1 \text{ Мт TNT} = 4.185 \cdot 10^{15} \text{ Дж} \rightarrow 1.16 \cdot 10^{12} \text{ Вт (Дж/сек)}$

Экстремальные солнечные события и магнитные бури



Магнитограмма во время гелио-геофизического возмущения 1-2 сентября 1859 г. на обсерватории Колаба (Бомбей, Индия)

Во время бури были отмечены искрения в аппаратах телеграфной связи в Европе, Америке и Австралии. Среди других геофизических эффектов - обширные полярные сияния на низких широтах (на Гавайях и в Чили).

Магнитная буря 2 сентября 1859 г. оказалась самой большой за всю историю инструментальных наблюдений. Ее причиной была **исторически первая наблюдавшаяся солнечная вспышка 1 сентября 1859г.**

Эта вспышка, как полагают, сопровождалась выбросом мощного коронарного выброса, которое и стало непосредственной причиной бури с рекордным понижением геомагнитного индекса $Dst \approx -1760$ нТ

По современным оценкам, энергия вспышки 1 сентября 1859 г.
и скорость коронарного выброса
были крайне большими, но не уникальными.
В наше время регистрируются и другие энергичные события
(они получили название «экстремальных»)
с более высокими параметрами,
так что буря такого порядка или уже была или может случиться вновь.



Датировка методом дендрохронологии

В 2012 году аспирантка ун-та Нагоя **Фуса Мияке** изучала древесину 1900-летнего японского кедра, срубленного в 1956-м.

Наличие изотопа C^{14} в годовых кольцах между 774-775 гг. н.э. имело 12%-ый скачок C^{14} – **событие Мияки**

Это колебание было в 20 раз больше, чем при обычных космических феноменах, и значительно превышает уровень от события Кэррингтона.

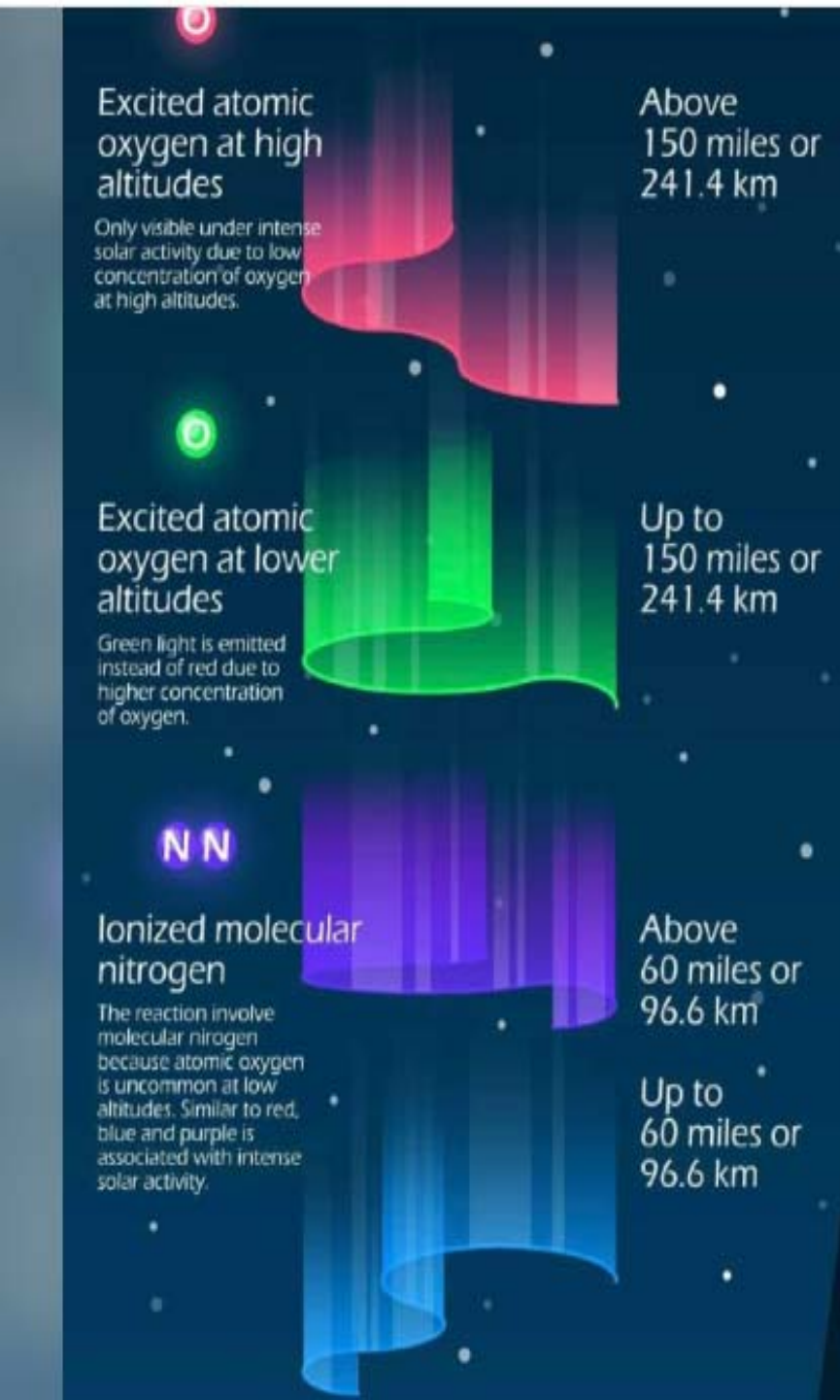
Проявления магнитной бури - Полярные сияния 05.11.2023



Алые сполохи 5 ноября наблюдались в небе практически над всей Россией.

Кадрами с необычным полярным сиянием делились в соцсетях не только жители Урала, Сибири и Дальнего Востока, но и пользователи из Донбасса, Крыма, Ростовской, Калининградской, Воронежской и других областей, регионов Кавказа.



A vertical diagram showing three layers of aurora against a dark blue background with white stars. The top layer is red, the middle is green, and the bottom is purple/blue. Each layer has a corresponding colored wavy band. To the right of each band are altitude ranges. To the left of each band are descriptive text blocks.

Excited atomic oxygen at high altitudes

Only visible under intense solar activity due to low concentration of oxygen at high altitudes.

Above
150 miles or
241.4 km

Excited atomic oxygen at lower altitudes

Green light is emitted instead of red due to higher concentration of oxygen.

Up to
150 miles or
241.4 km

NN

Ionized molecular nitrogen

The reaction involve molecular nitrogen because atomic oxygen is uncommon at low altitudes. Similar to red, blue and purple is associated with intense solar activity.

Above
60 miles or
96.6 km

Up to
60 miles or
96.6 km

Свечение кислорода обусловлено излучением возбуждённых атомов в метастабильных состояниях с длинами волн 557,7 нм (**зелёная линия**) и дублетом 630 и 636,4 нм (**красная область**, время жизни. Вследствие этого **красный дублет** излучается на высотах 150—400 км.

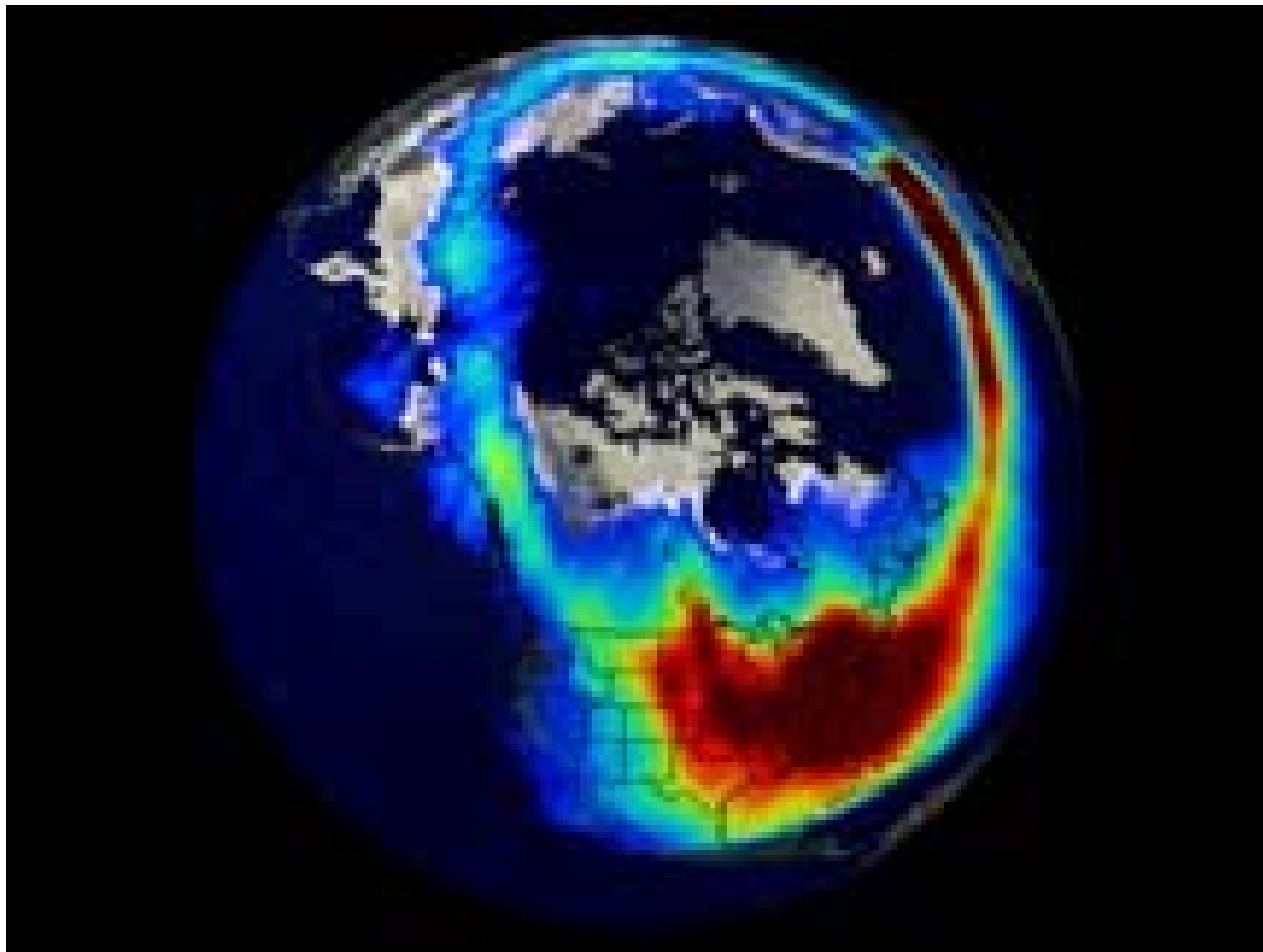
Ионизированные молекулы азота излучают на длинах волн **391,4 нм (ближний ультрафиолет)**, **427,8 нм (фиолетовый)** и **522,8 нм (зелёный)**.

Фиолетово-красное свечение наблюдается как правило в нижней части дуг

В некоторых формах полярных сияний **обнаружено излучение водорода**, что важно для понимания природы полярных сияний, так как **эта эмиссия указывает на поступление потока протонов**.

Каждое явление обладает своей неповторимой гаммой в силу непостоянства химического состава атмосферы и погодных факторов.

Овал полярных сияний во время магнитной бури.



Спутник POLAR

«Агент» космической погоды

Вариации **геомагнитного поля** во время различных проявлений космической погоды -

ПРИЧИНЫ РАЗНЫЕ – результат один...

ВОЗНИКНОВЕНИЕ геоиндуцированных

ТОКОВ и влияние на

- Энергетические системы
- Кабельные линии, телефонные и телеграфные линии
- Железнодорожное оборудование
- Трубопроводы

Закон Фарадея :

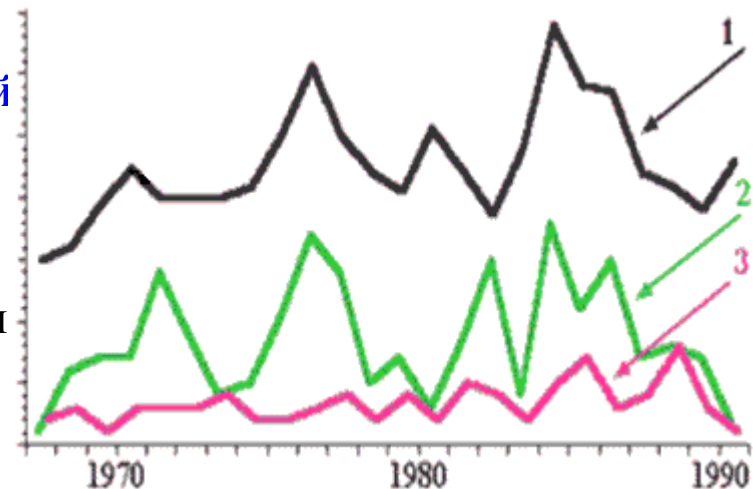
$$\operatorname{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Воздействия магнитных бурь на линии электропередач, ж/д, трубопроводы

Крупная авария, произошедшая во время магнитной бури 13.03.1989 года в энергетической сети Канады, наглядно продемонстрировала опасность магнитных бурь для ЛЭП.

Исследования показали, что причиной аварии стали **трансформаторы**. Постоянная составляющая тока вводит трансформатор в неоптимальный режим работы с избыточным магнитным насыщением сердечника. Это приводит к избыточному поглощению энергии, перегреву обмоток и, в конце концов, к аварии всей системы.

Последовавший анализ работоспособности всех энергетических установок Северной Америки выявил статистическую зависимость между количеством сбоев в зонах повышенного риска и уровнем геомагнитной активности



Число аварий в энергосетях США в районах повышенного риска (близких к авроральной зоне) возрастает вслед за уровнем геомагнитной активности. В годы минимума активности вероятности аварий в опасных и безопасных районах практически уравниваются.

- 1 - уровень геомагнитной активности,
- 2 - число аварий в геомагнитно-опасных районах,
- 3 - число аварий в безопасных районах

Влияние магнитных бурь на состояние здоровья людей

- В настоящее время имеются результаты медицинских исследований, доказывающих **наличие реакции человека на геомагнитные возмущения.**
- Данные исследования показывают, что **существует достаточно большая категория людей, на которых магнитные бури действуют отрицательно:** активность человека затормаживается, притупляется внимание, обостряются хронические заболевания.
- Исследования воздействия геомагнитных возмущений на здоровье человека еще только начинаются, и результаты их **достаточно спорны** и противоречивы.
- Однако большинство исследователей сходится во мнении, что в данном случае существует три категории людей: на одних геомагнитные возмущения действуют угнетающе, на других, наоборот, возбуждающе, у третьих же никакой реакции не наблюдается.

Прогноз космической погоды

- **Прогнозирование космической погоды подразделяют в зависимости от временного интервала, на который делается прогноз.**
- **Текущая диагностика** осуществляется в реальном масштабе времени с целью идентификации события с энергичными частицами на Земле и на борту самолета и предусматривает непрерывный мониторинг развития события. С запаздыванием в несколько часов вычисляется доза радиации. Принимаются меры по снижению высоты полета, изменению курса или посадке. **Проблема текущей диагностики (мониторинга) на настоящий момент представляется практически решенной.**
- **Предупреждение** (заблаговременность 0 - 24 часа) о наблюдении вспышек и KBM. Оценивается вероятность события с энергичными частицами. Прогнозируется доза радиации.
- **Краткосрочный прогноз** (заблаговременность 1 - 3 дня) опасных уровней излучения на высотах и маршрутах, используемых коммерческими авиалиниями, которые могут представлять угрозу для экипажа, пассажиров и бортовой электронной аппаратуры. На основе мониторинга солнечной активности предсказывается вероятность события с энергичными частицами. Производится оценка степени риска и выбор экипажа в зависимости от полученной ранее дозы облучения.
- **РОЛЬ НАБЛЮДЕНИЙ , в т.ч. В ТОЧКЕ ЛАГРАНЖА**