

Зачем технологическим системам в Арктике бояться космической погоды?

РНФ
Российский
научный фонд

ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ЦЕНТР РАН
основан в 1934 г.

II ВСЕРОССИЙСКАЯ ШКОЛА МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ

Системный анализ
динамики природных процессов
в российской Арктике

Московская область, 6-9 июня 2022

Белаховский Владимир Борисович,

кандидат физико-математических наук,

старший научный сотрудник

Полярного геофизического института, г. Апатиты

**Полярный геофизический институт
создан в 1960 г. на базе нескольких
научных станций на Кольском полуострове**

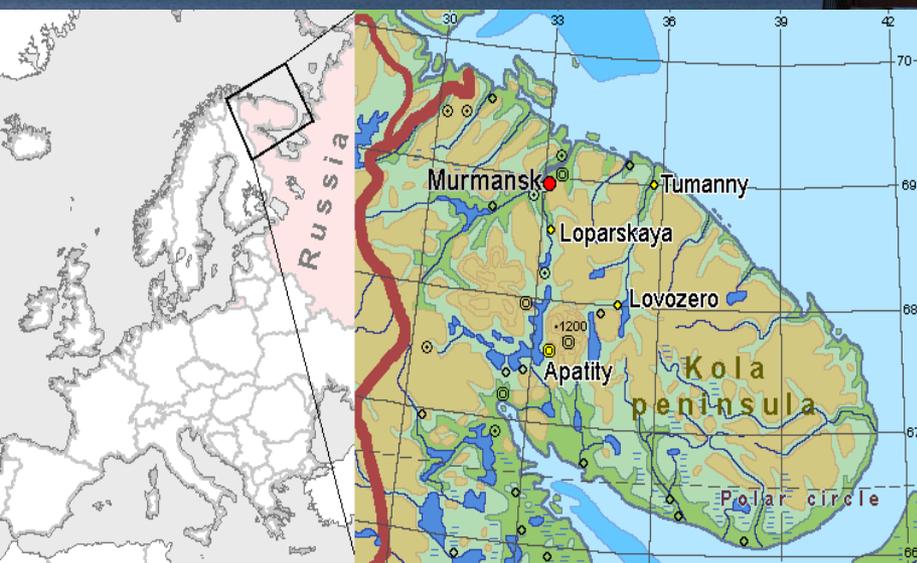


Апатиты



Мурманск

Обсерватории: Ловозеро, Лопарская, Баренцбург (Шпицберген).
Радиофизические полигоны: Туманный и Верхнетуломский.
Стратосферный полигон в г. Апатиты.

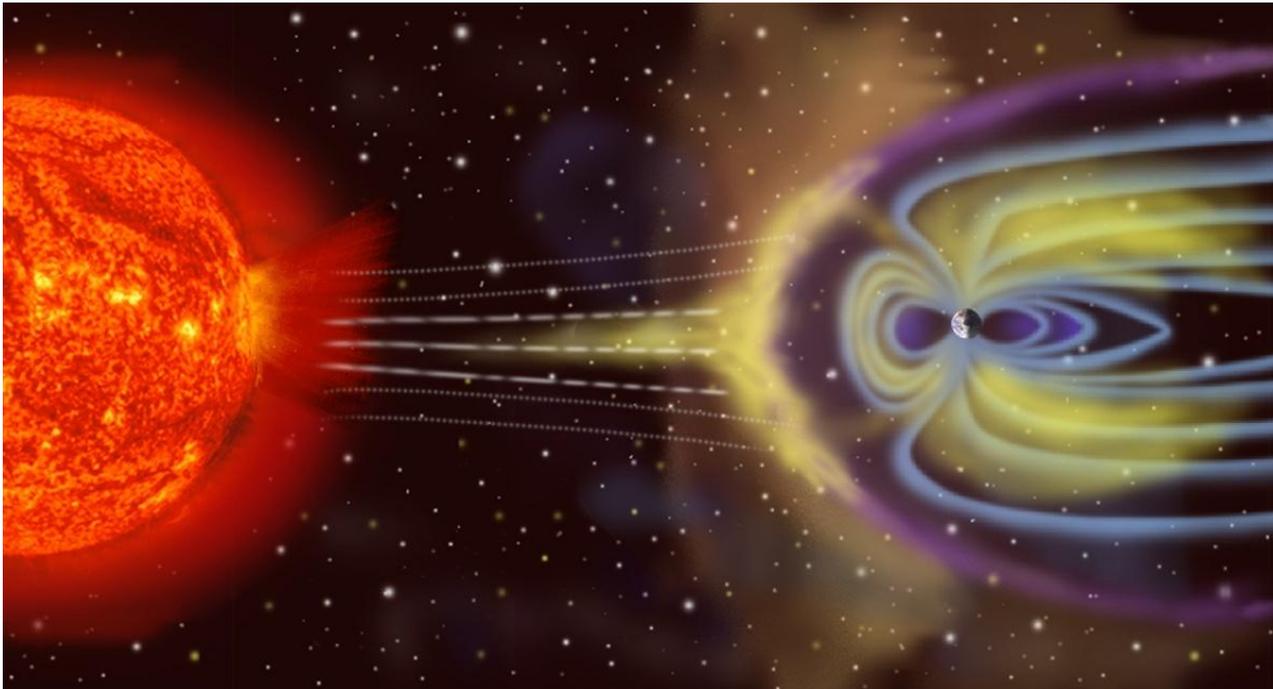




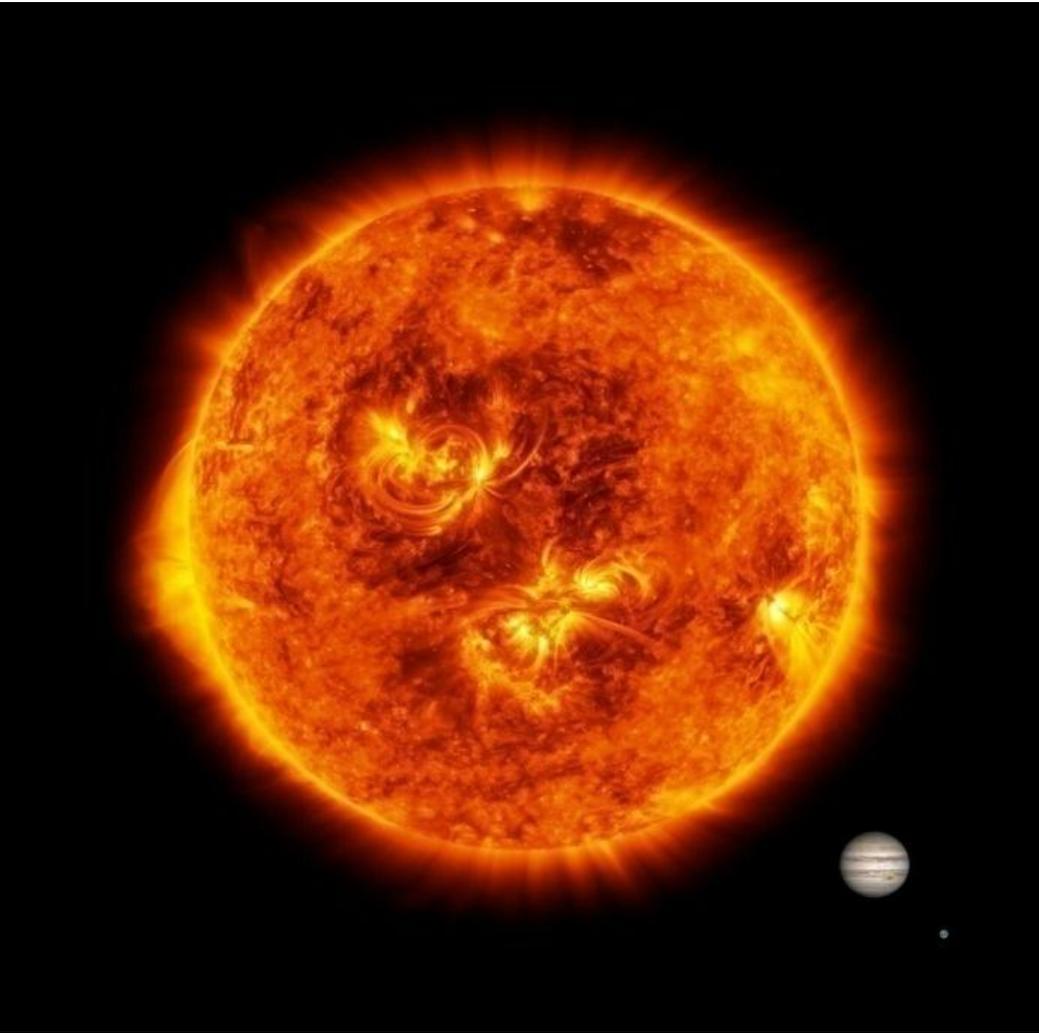
Космическая погода – это природный фактор, связанный с воздействием солнечной активности на состояние наземных, спутниковых технологических систем, биологические объекты.

Солнце дает жизнь на планете Земля, но при этом и создает существенные проблемы для современной цивилизации.

Наиболее мощно на земной поверхности проявляется в высоких широтах.



Солнце – звезда, плазменный шар



Плазма – ионизированный газ, 4-ое состояние вещества.

$$D_{\text{Солнца}} = 109 D_{\text{Земли}}$$
$$M_{\text{Солнца}} = 330\,000 M_{\text{Земли}}$$

Солнце в основном состоит из ядер водорода (протонов) - 73% и ядер гелия - 25%.

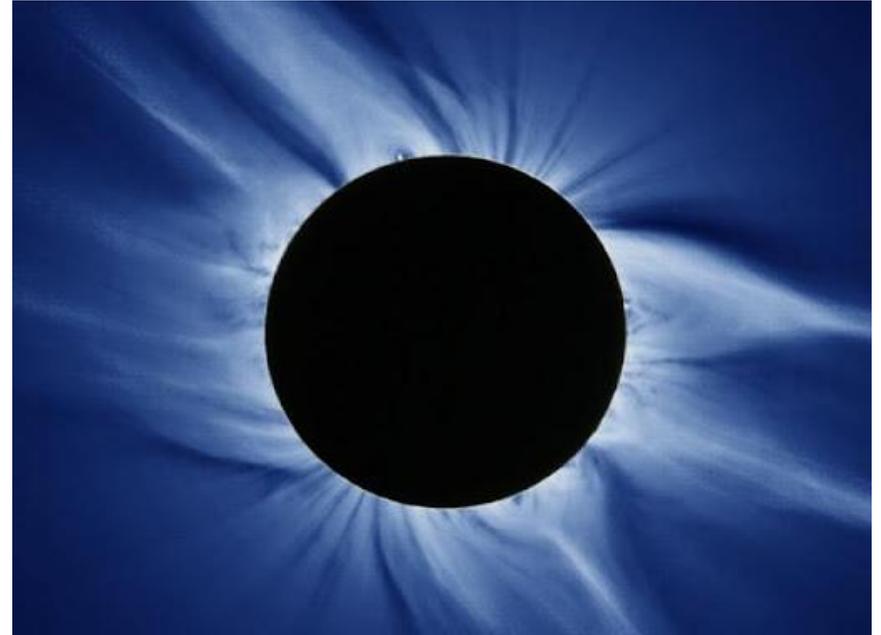
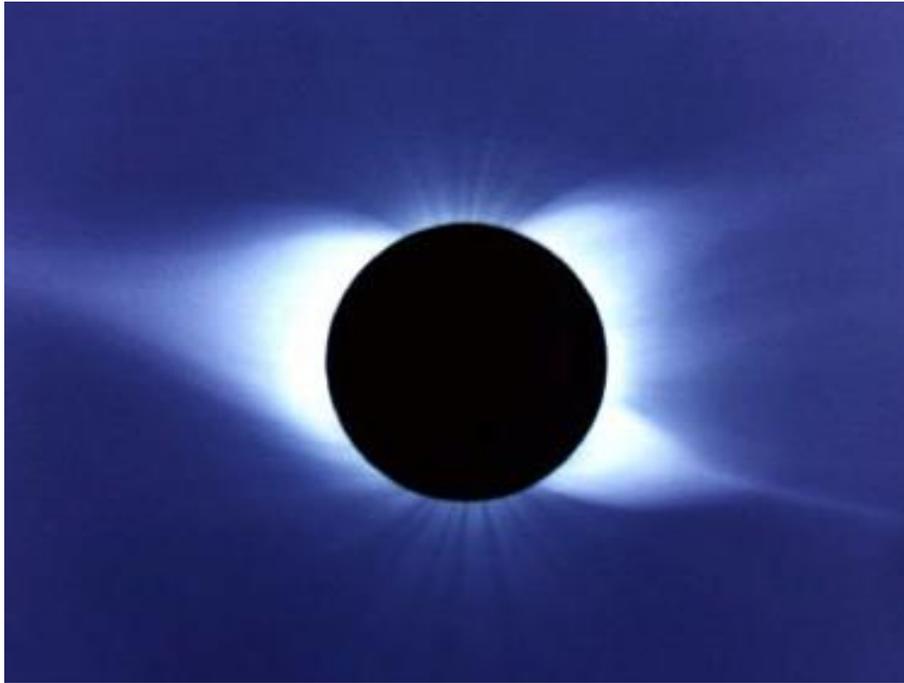
Плотность ядра Солнца – 150 000 кг/м³

В ядре Солнца постоянно происходят термоядерные реакции (H → He).

Расстояние от Земли до Солнца - **150 млн. км (астрономическая единица)**

Фотосфера – видимая часть Солнца

Солнечная корона – внешняя часть Солнца



Низкая плотность короны

Спутник Паркер – декабрь 2021

Температура короны (порядка млн. К) выше температуры нижележащих слоев (фотосферы – 6 000 К, хромосферы).

Солнечный ветер – это непрерывный поток плазмы, истекающий от Солнца

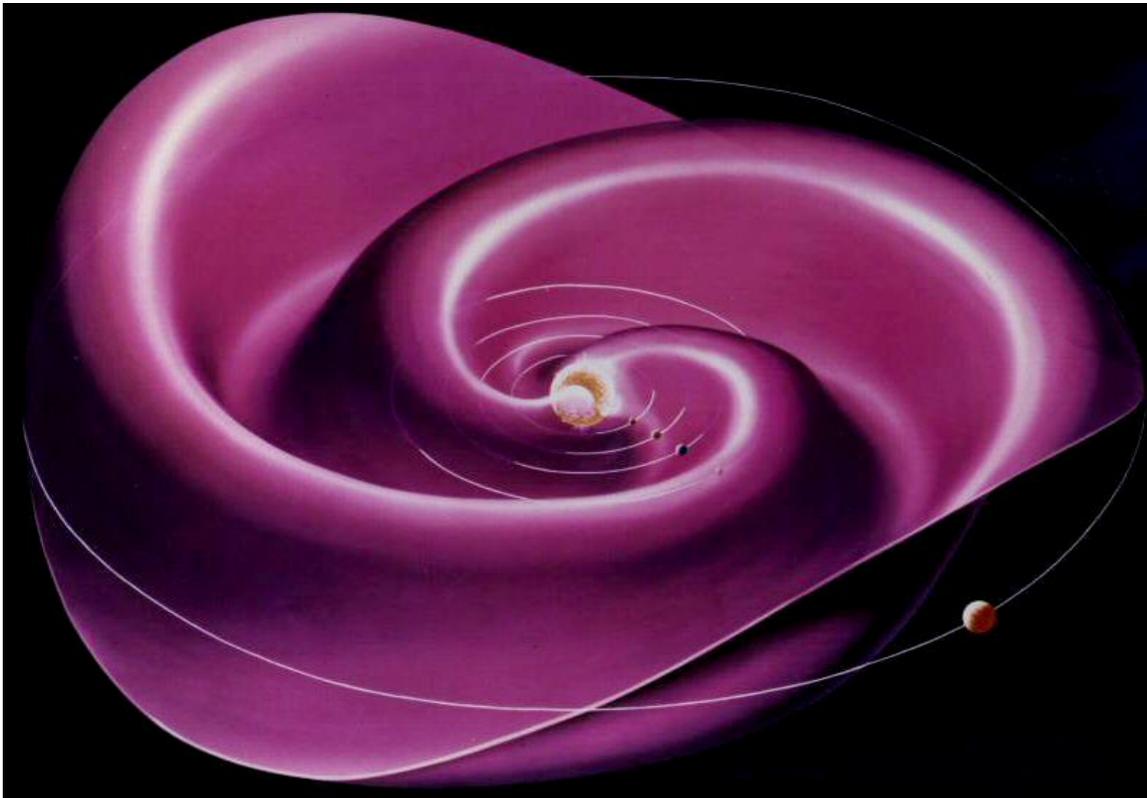
$N = 8,8 \text{ см}^{-3}$, $V = 300\text{-}400 \text{ км/с}$.

Солнечный ветер - вакуум по земным меркам. Плотность атмосферы – 10^{19} см^{-3} .

Межпланетное магнитное поле – магнитное поле Солнца.

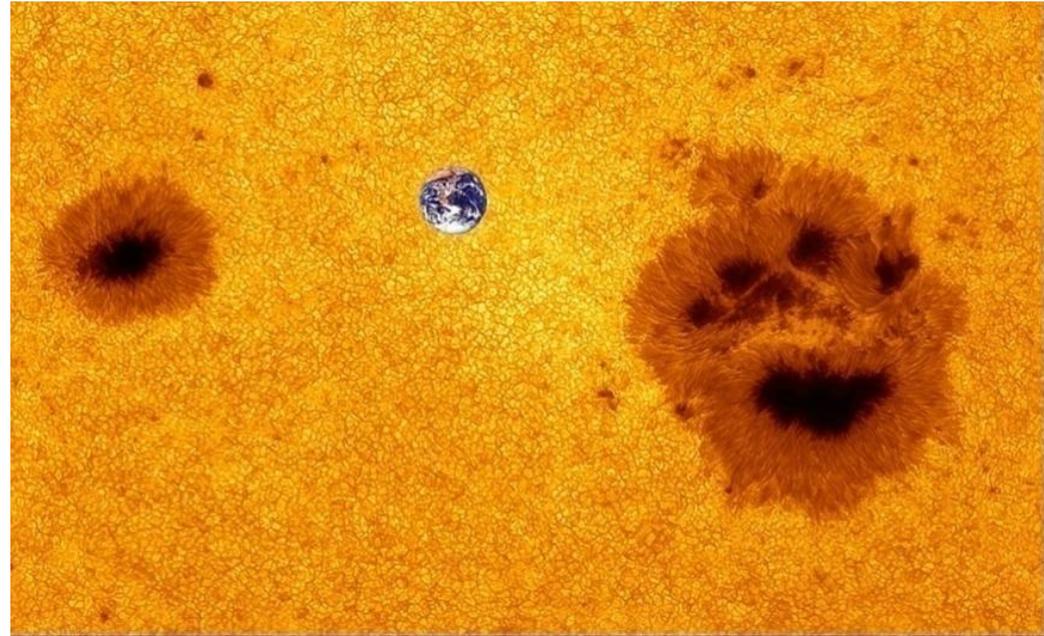
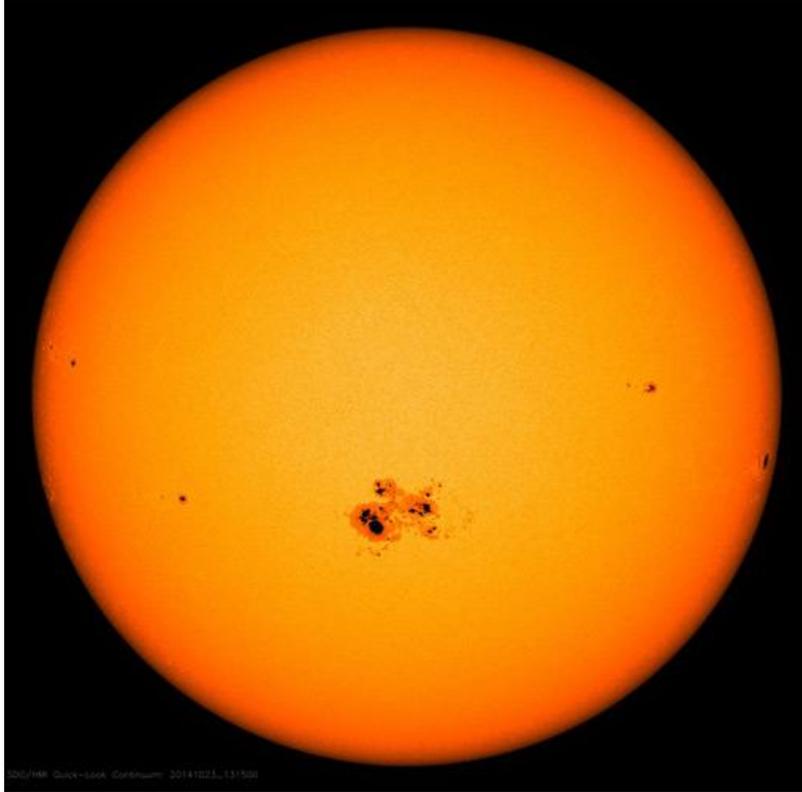
Силовые линии магнитного поля **“вморожены”** в плазму (“приклеены”)

Плазма **бесстолкновительная**



Спираль Паркера
 (“юбка балерины”)

Солнечные пятна – основной источник солнечной активности



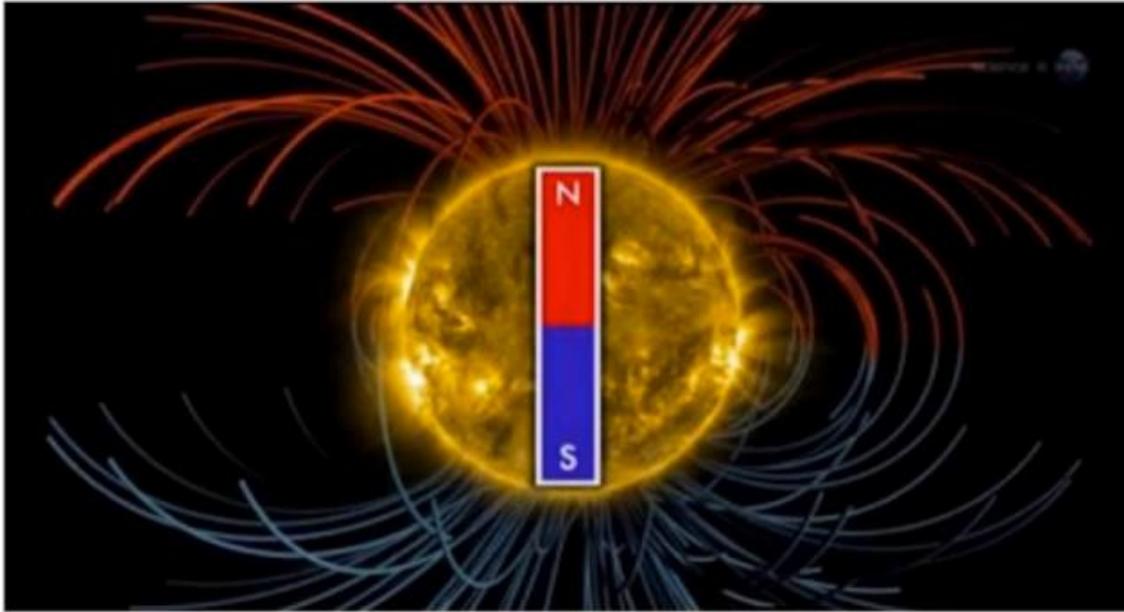
Пятна наблюдаются парами

Пятна наблюдал еще Галилео Галилей (1612 г.).

Солнечные пятна – темные области на Солнце (более низкая температура), области повышенного магнитного поля.

числа Вольфа W – число пятен.

Магнитное поле Солнца



Период обращения Солнца вокруг собственной оси – примерно **27 дней**.

При этом **экватор вращается быстрее, чем полюса**.



Солнечные пятна образуются из-за вращения Солнца

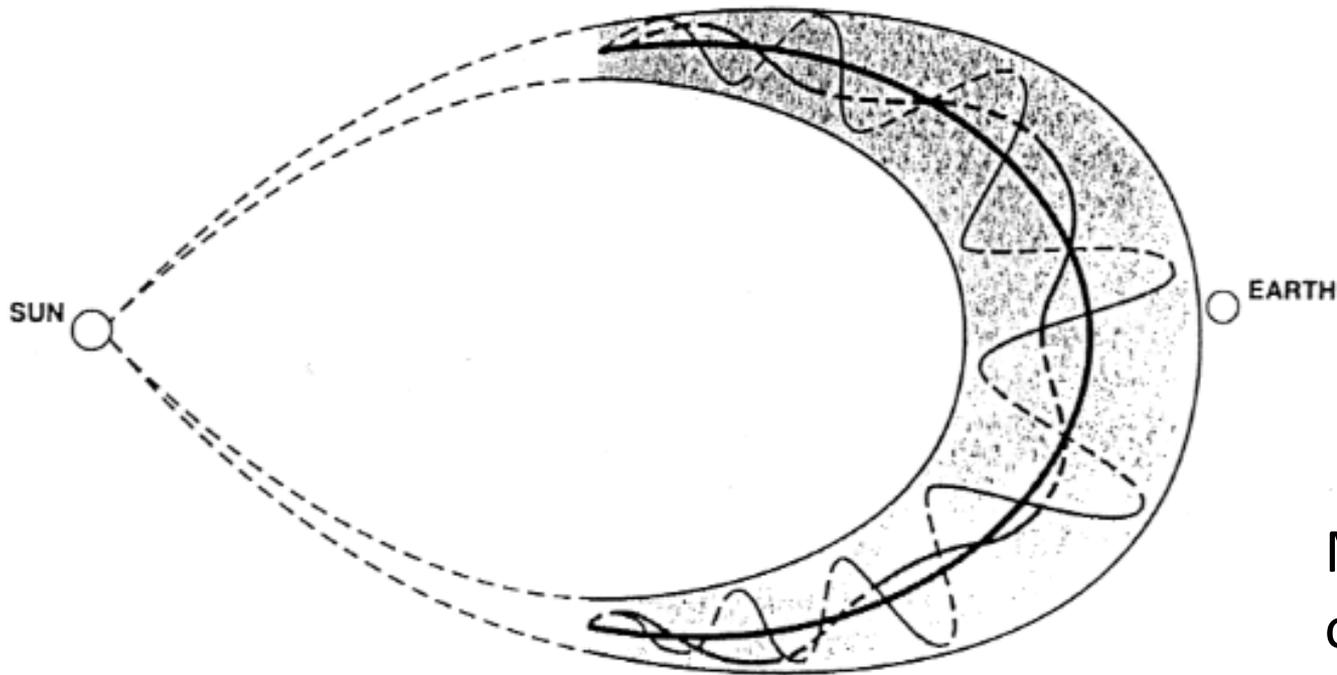
Вспышка → Корональный выброс массы (СМЕ) → Магнитное облако



Арка,
петля

Солнечная вспышка – сброс магнитной энергии пятна (минуты – десятки минут).

Магнитное облако



Магнитное облако может и не встретиться с Землей

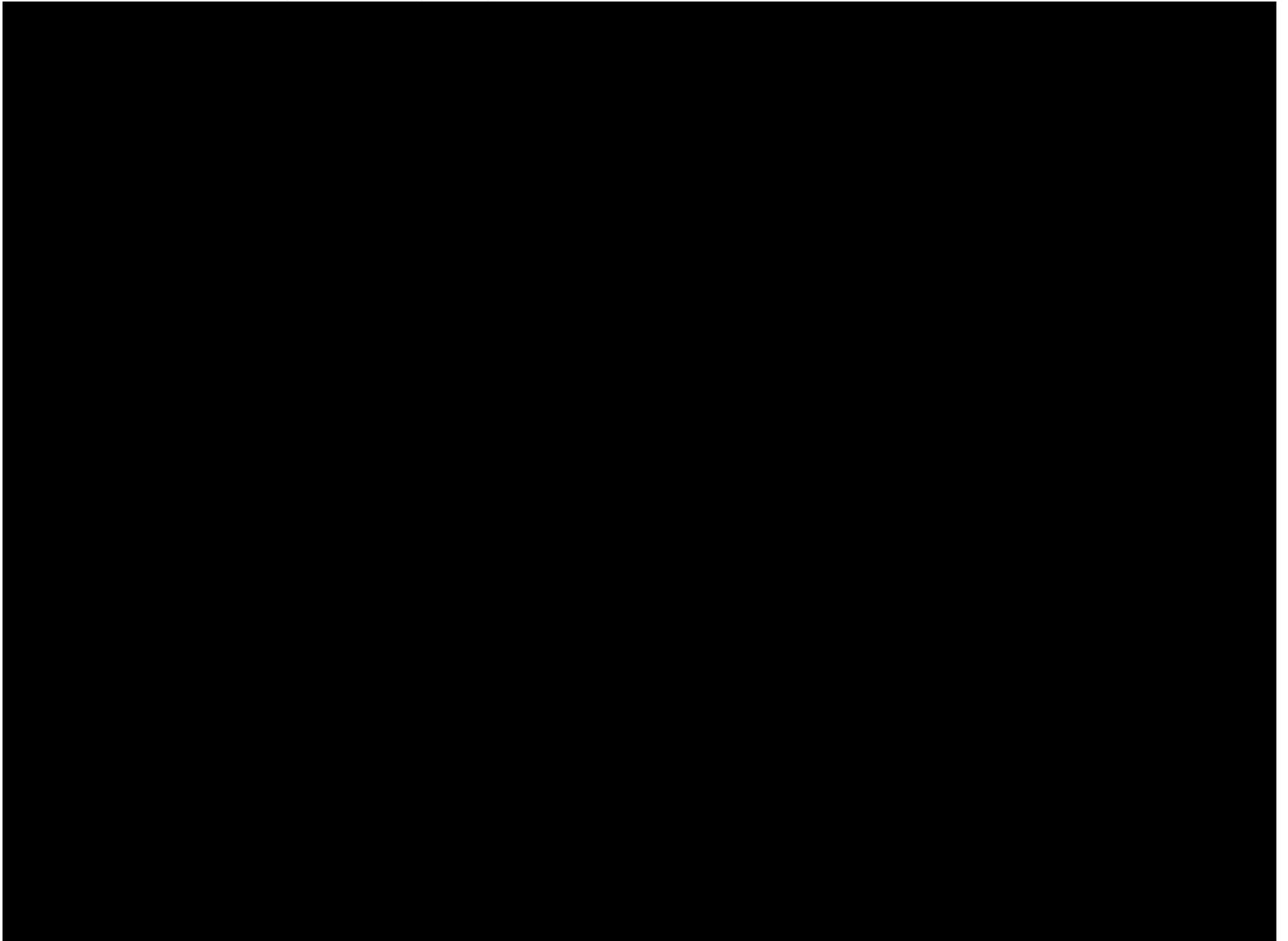
Эмиссии Солнца:

- Электромагнитное излучение (8 минут)
- Солнечный космические лучи (40 минут)
- Солнечный ветер (2-4 суток)

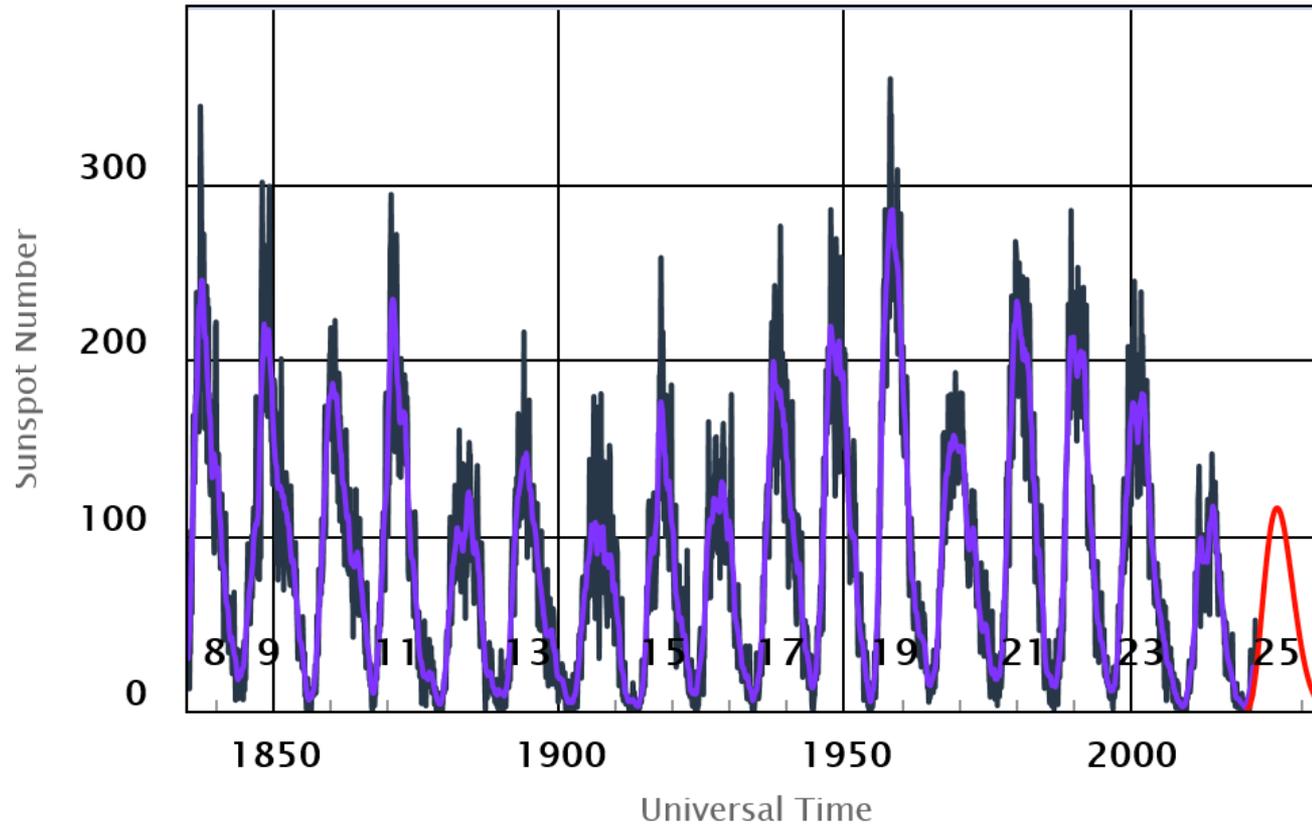
SDO (Solar Dynamic Observatory), 28.10.2021



SOHO, коронограф LASCO – 28.10.2021



11 –летний цикл солнечной активности



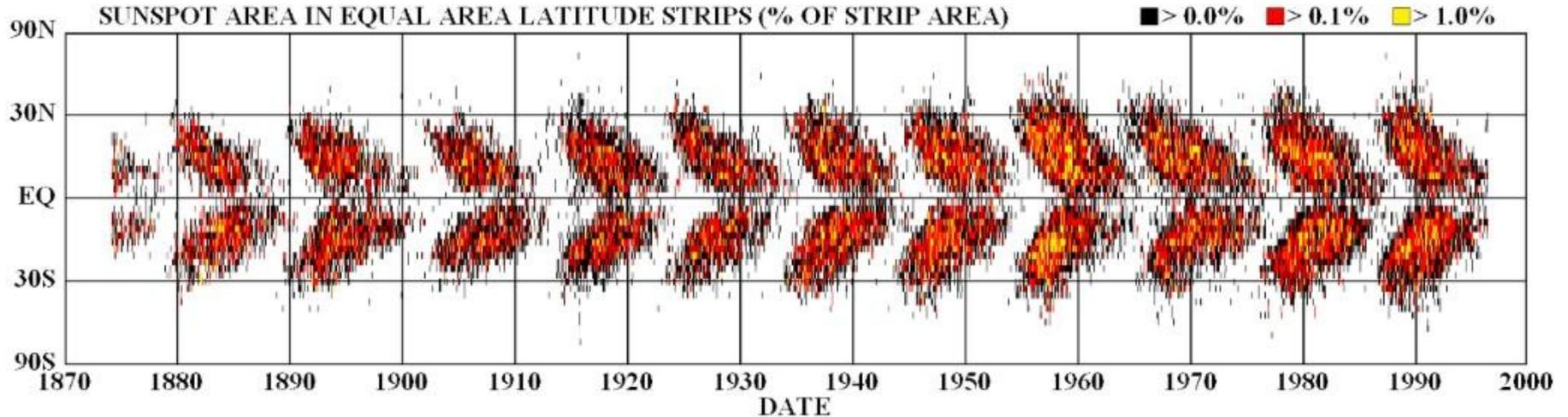
1760 г. – первый цикл

Минимум, максимум солнечной активности

Разные амплитуды циклов

Сейчас идет **25-ый цикл** солнечной активности

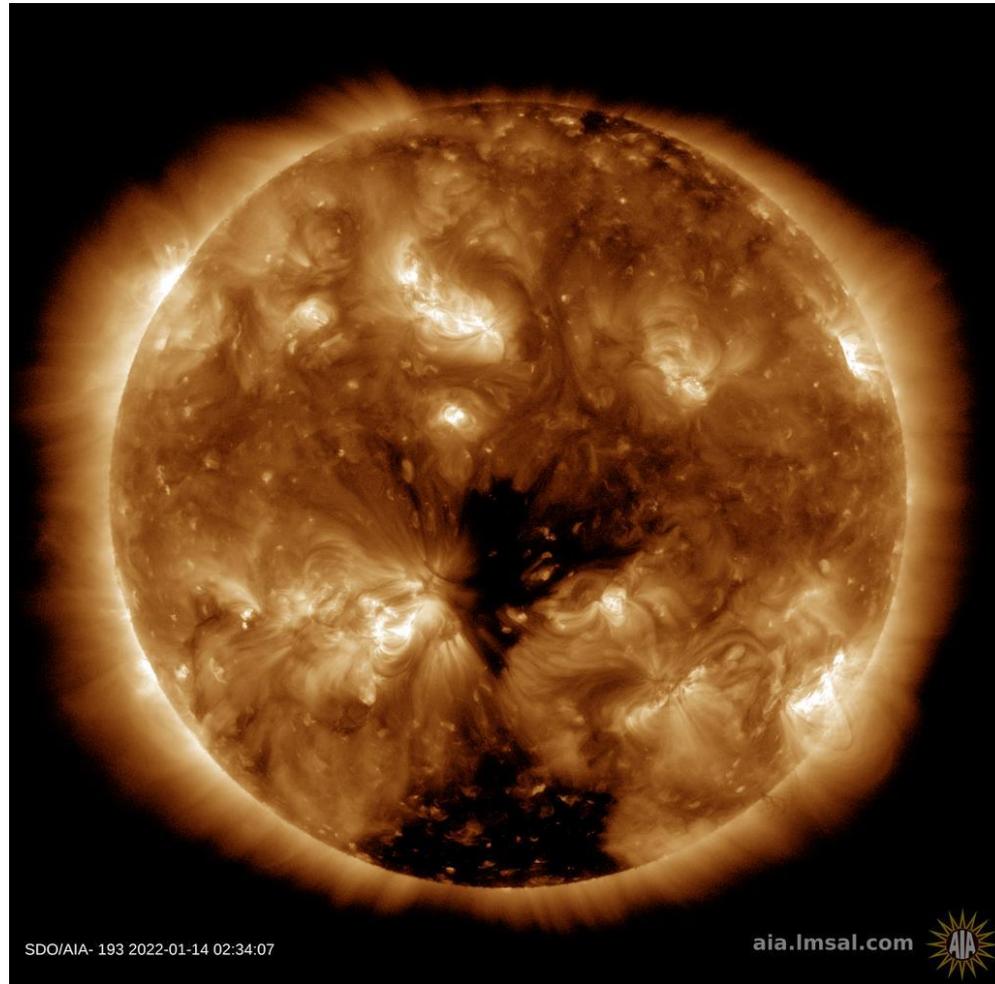
Бабочки Маундера



В минимуме солнечной активности пятна появляются ближе к полюсу, в максимуме – ближе к экватору

Корональные дыры

14 января 2022



Источник геомагнитных бурь в минимуме солнечной активности
Более слабые, но более продолжительные магнитные бури

Нейтронный монитор, г. Апатиты



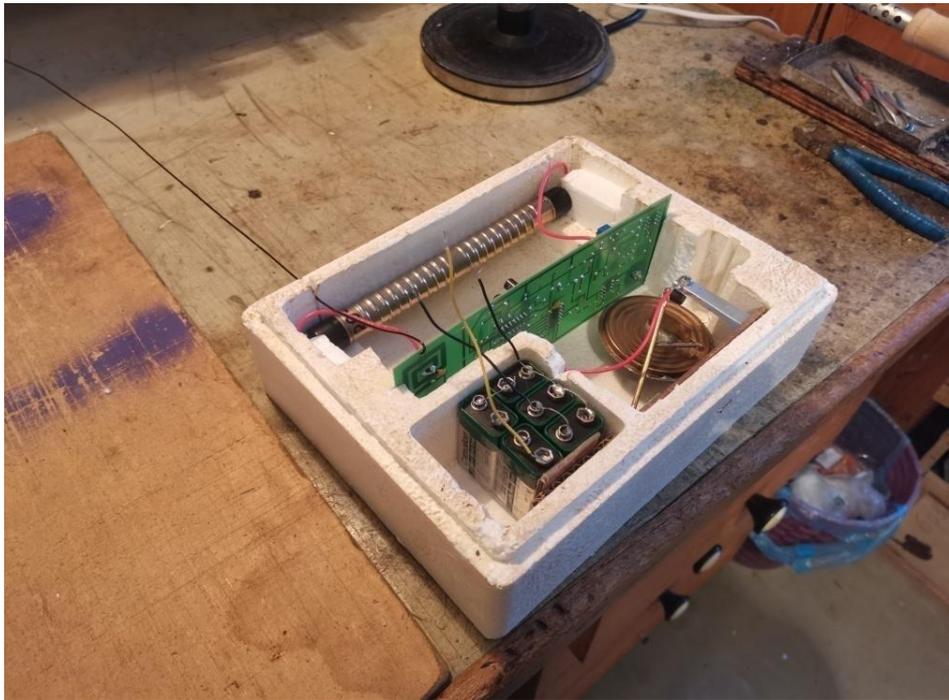
Баренцбург, арх. Шпицберген



Мюонный телескоп



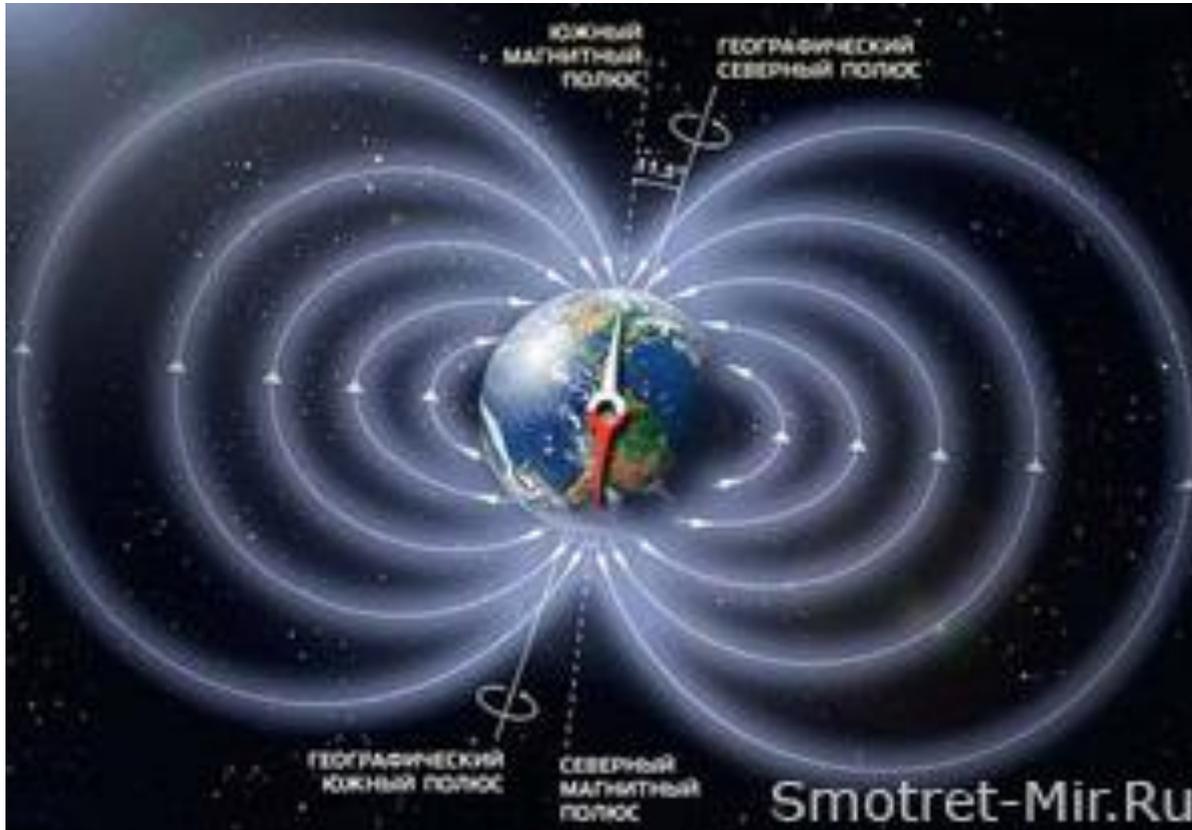
Запуск баллонов



- рядом с г. Апатиты, с 1957 года (МГГ)
- счетчик Гейгера – газоразрядный прибор
- до высоты 30 км



Магнитное поле Земли



Магнитное поле Земли имеет дипольную структуру, средняя величина – 50 000 нТл.

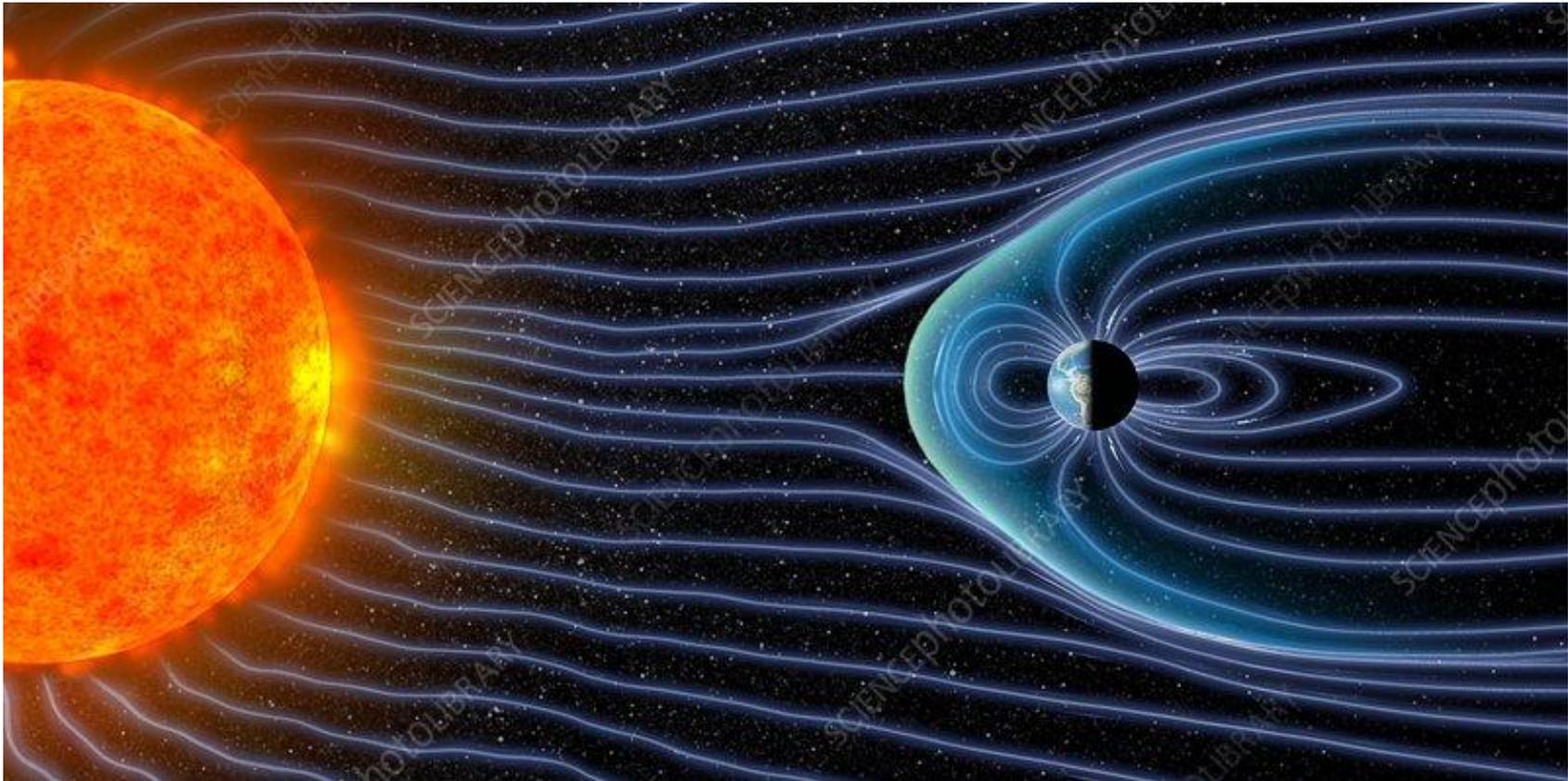
$$B_{\text{Земли}} = B_{\text{вн}} + B_{\text{внеш}}$$

$B_{\text{вн}}$ – постоянное (главное) поле

$B_{\text{внеш}}$ – переменное поле

Магнитное поле защищает от солнечных и галактических заряженных частиц

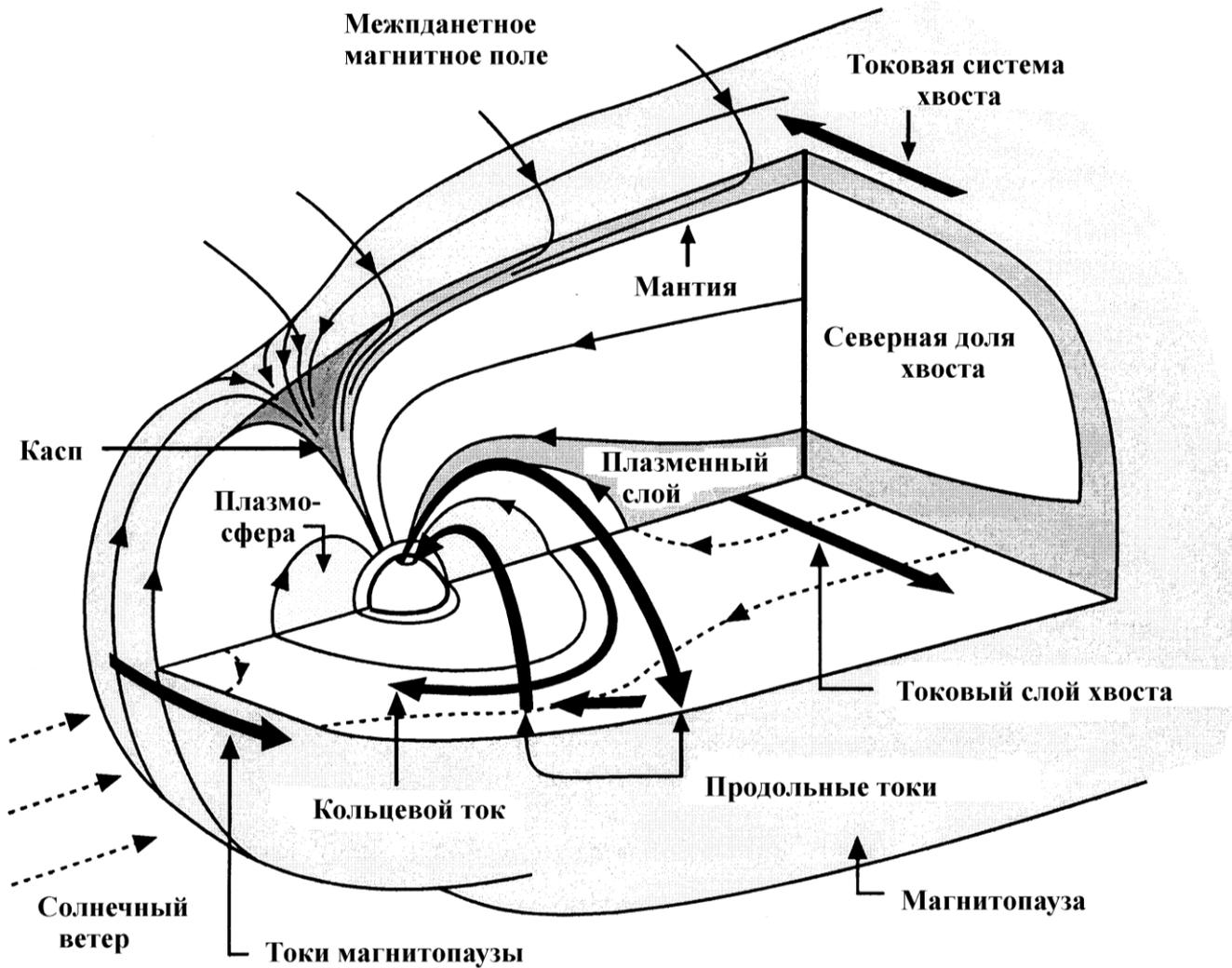
Магнитосфера Земли – магнитное поле Земли, ограниченное потоком солнечного ветра



Магнитосфера сжата на солнечной стороне, вытянута в “хвост”.

Размеры магнитосферы: 10 R_e на дневной стороне, 200 R_e на ночной стороне, R_e (Radius of Earth) = 6 400 км.

Магнитосфера – самая внешняя оболочка Земли

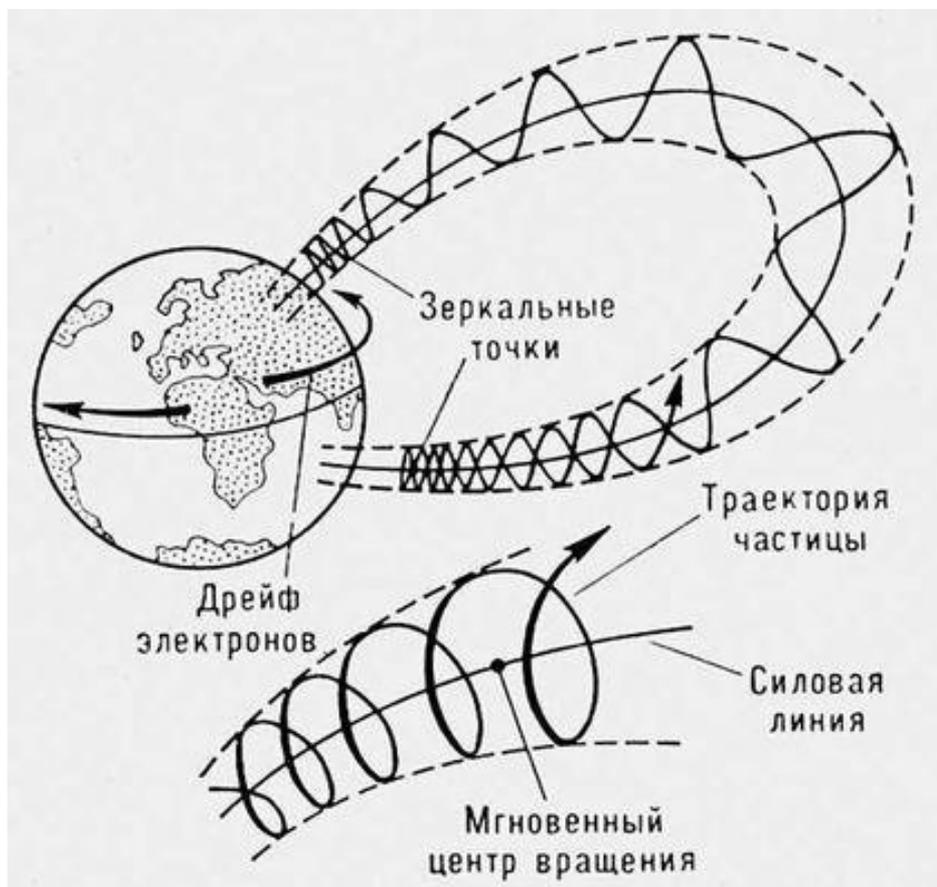


$$\mathbf{B}_{\text{magnetosphere}} = \mathbf{B}_{\text{ring}} + \mathbf{B}_{\text{tail}} + \mathbf{B}_{\text{magnetopause}} + \mathbf{B}_{\text{field-aligned}}$$

Магнитная ловушка

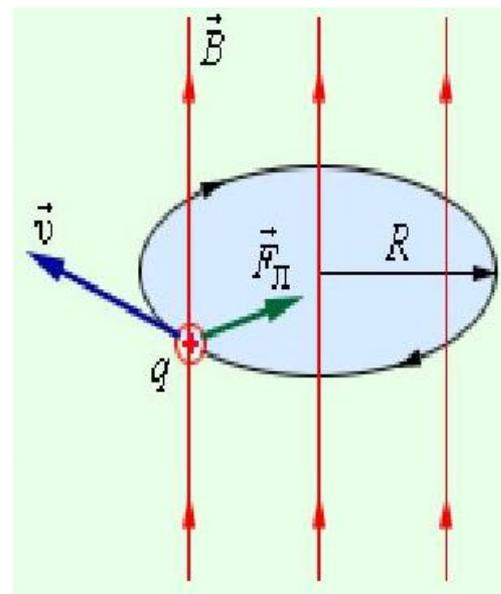
Заряженная частица совершает 3 вида движения в магнитном поле Земли:

- циклотронное вращение вокруг силовой линии
- отражение от сопряженных ионосфер
- дрейф вокруг Земли



$$F_L = q[\mathbf{V} \times \mathbf{B}] \quad - \text{сила Лоренца}$$

$$\omega = \frac{eB}{mc} \quad - \text{циклотронная частота}$$

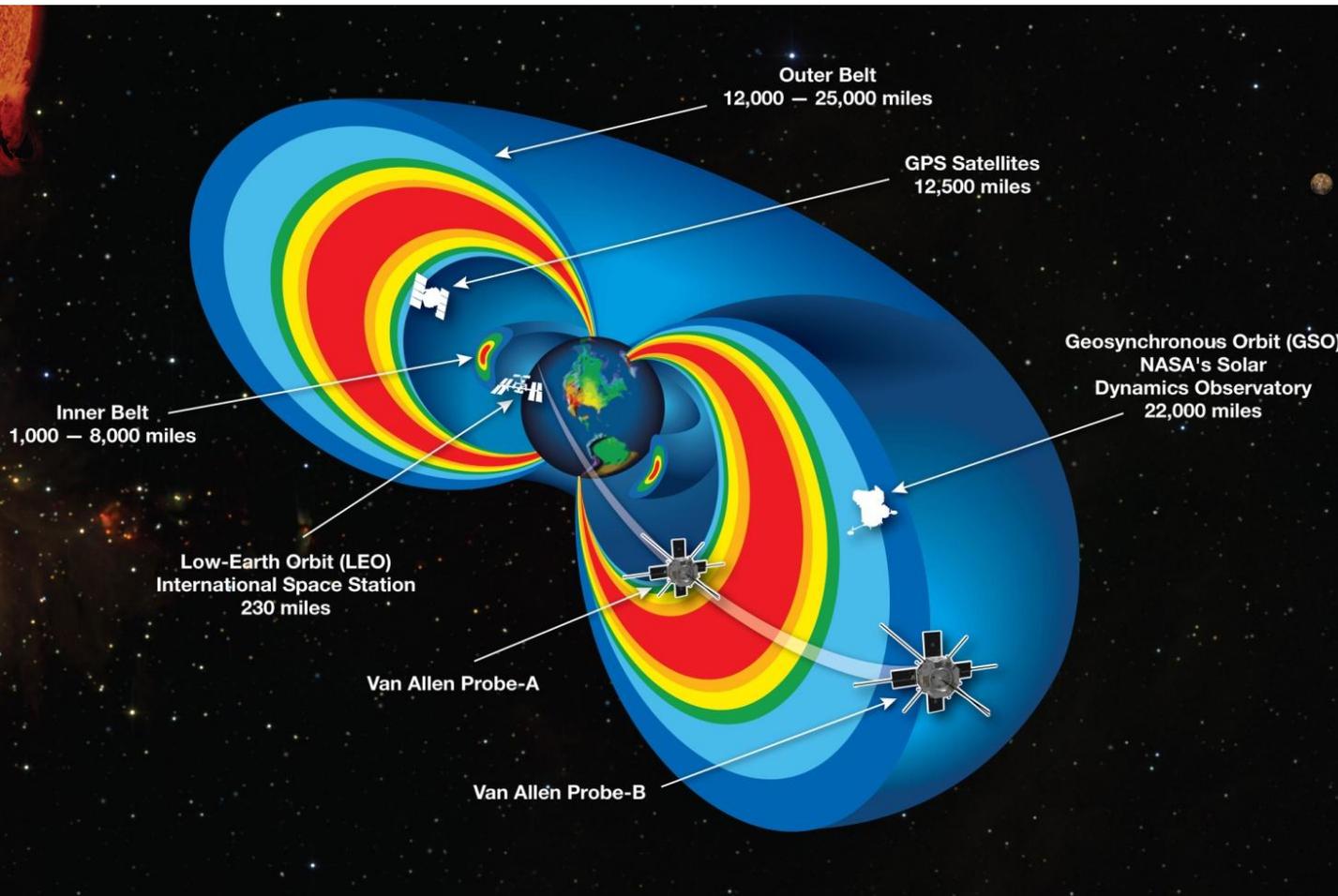


Радиационные пояса Земли

Область захвата заряженных частиц в магнитном поле (“захваченная радиация”).

Были открыты независимо Верновым и Ван-Алленом в 1958 году.

Внутренний (протоны, 4000-12000 км) и **внешний** (электроны, 17000-57000 км).



релятивистские электроны (МэВ) опасны для спутниковой аппаратуры

люди пролетали РП только во время полетов на Луну

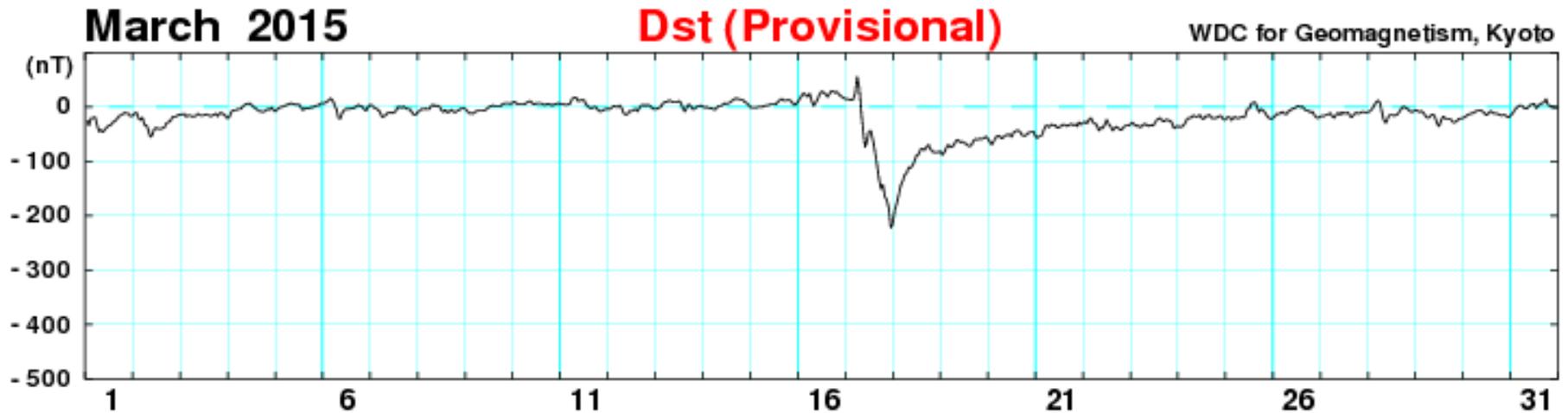
во время магнитных возмущений происходит высыпание частиц РП

Искусственные РП

Магнитные бури

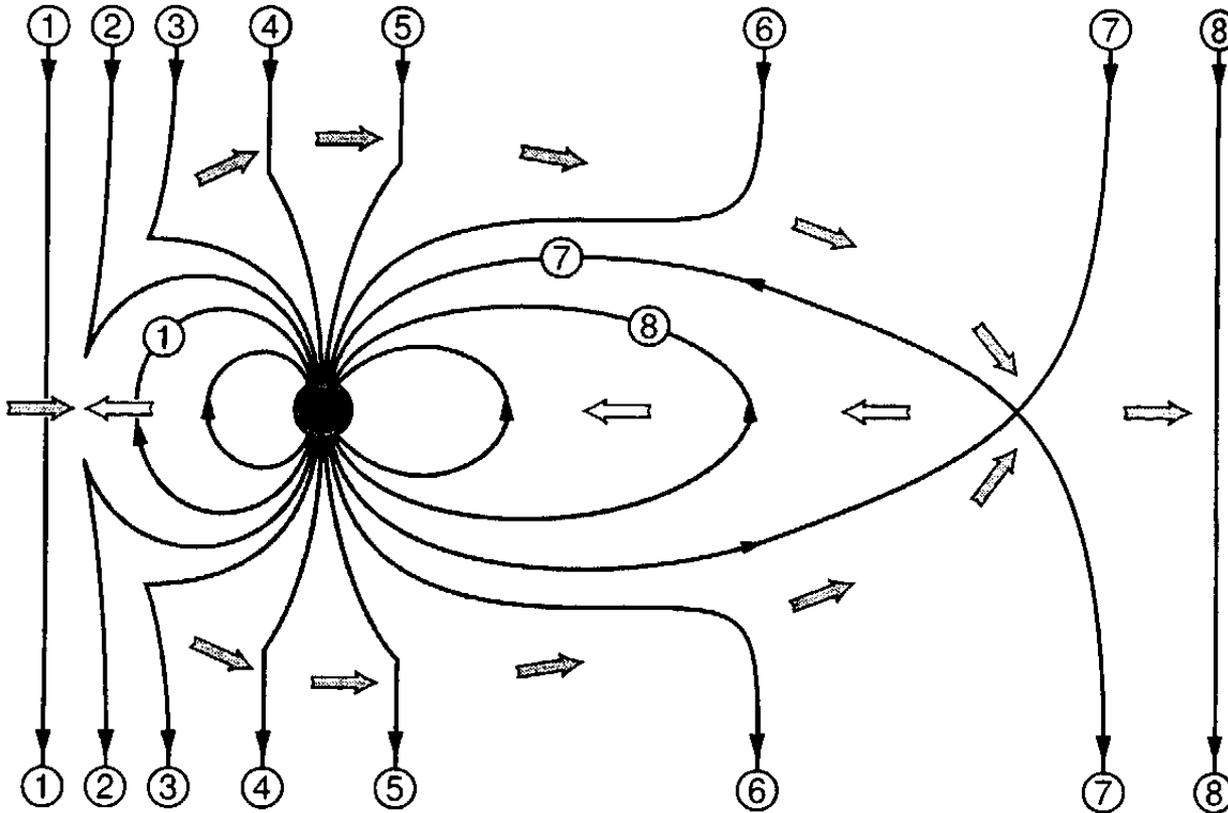
Это возмущение магнитного поля Земли длительностью 1-3 дня.

Dst индекс, Кр индекс (0-9).



Магнитная буря <math><1\%</math> изменения магнитного поля Земли

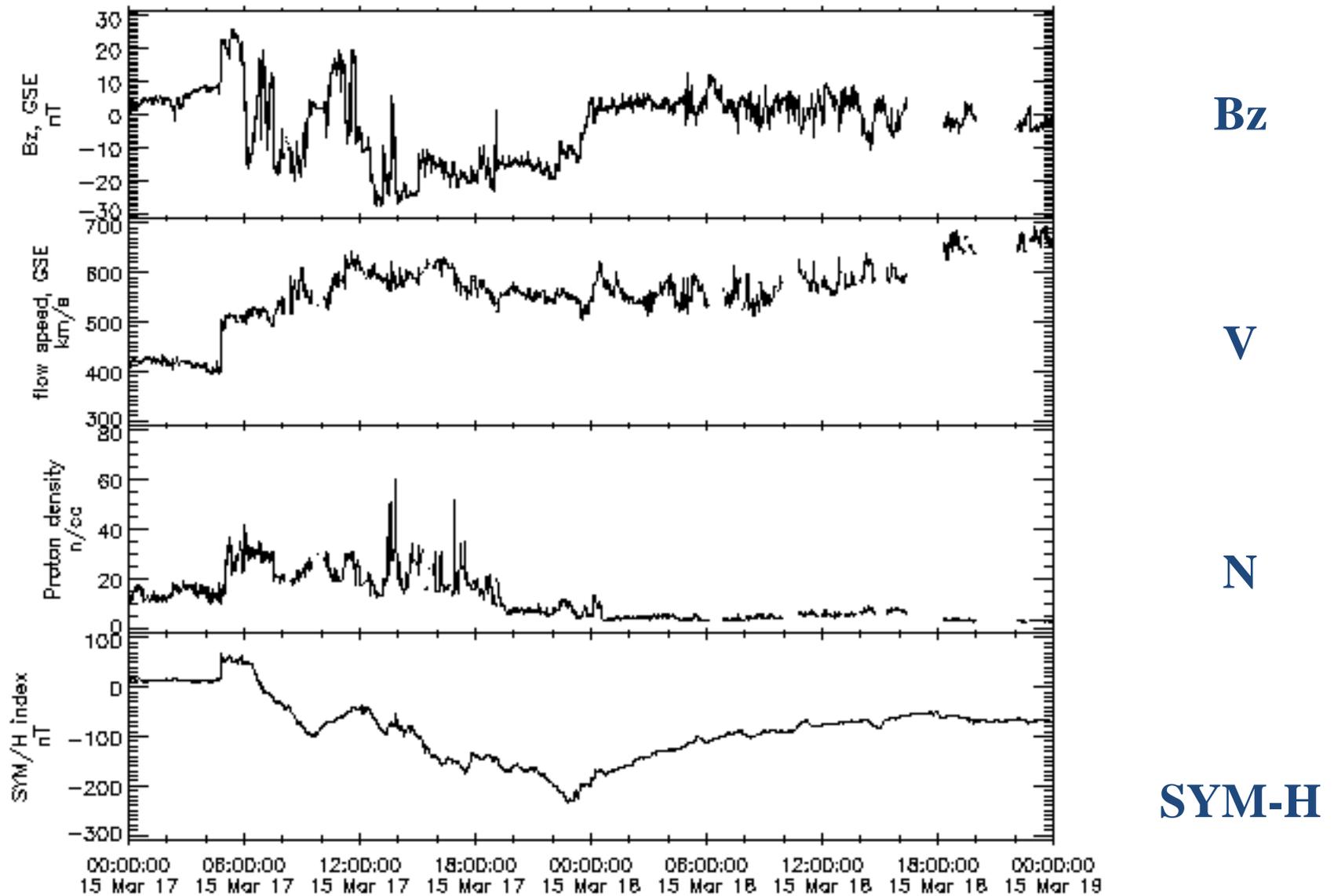
Механизм возникновения магнитных бурь вызван “Магнитным пересоединением”



Vz-компонента ММП – ключ к открытию магнитосферы

Развивается *кольцевой ток* (р, ионы), проводящий к уменьшению магнитного поля на низких широтах

Магнитная буря 17-19.03.2015, OMNI

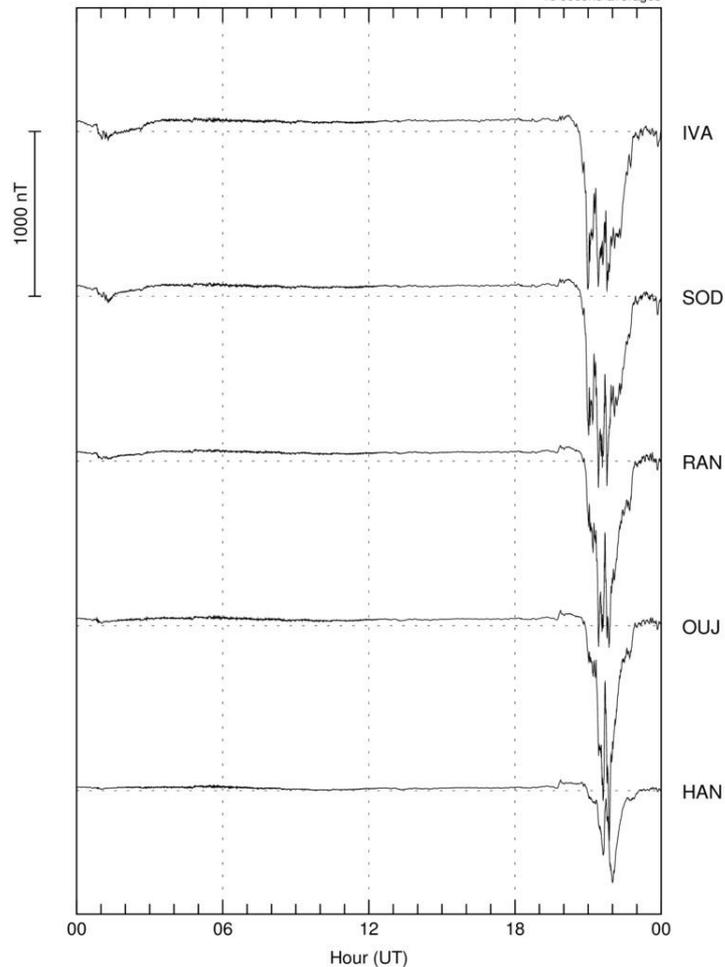


Суббурия

- Высокоширотное возмущения магнитного поля продолжительностью 2-3 часа, бухта.
- Суббурии могут происходить и без магнитных бурь.
- Ночной, вечерний сектор

X component 2021-11-03

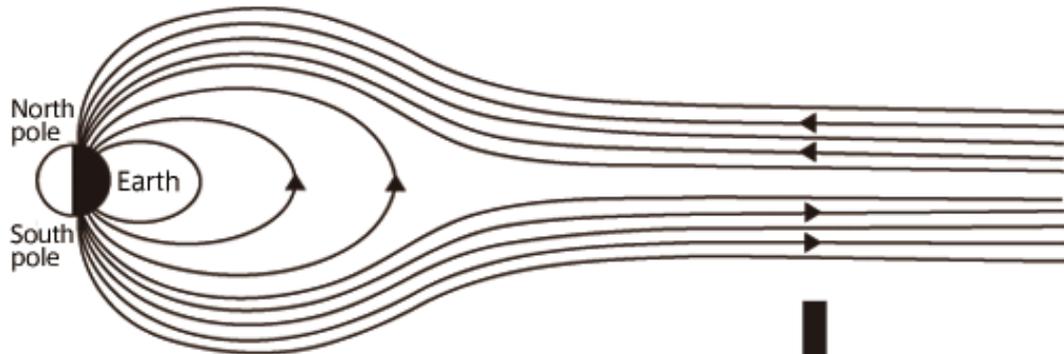
10 second averages



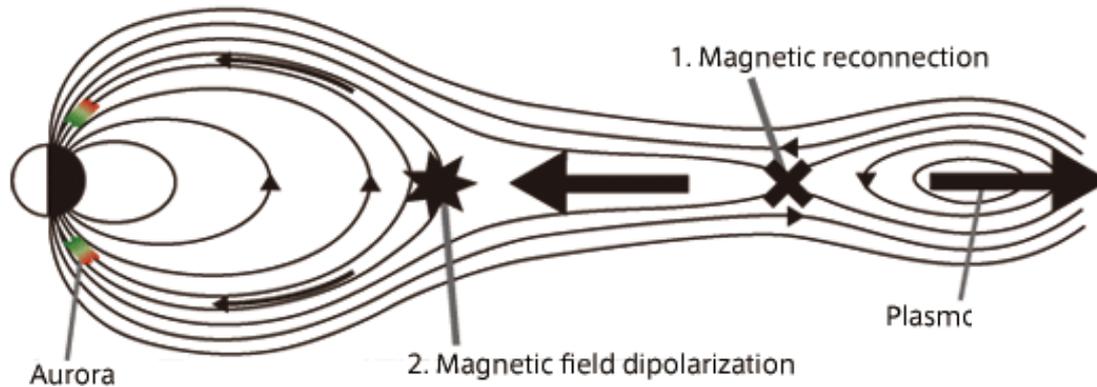
$\Delta B = 1000 - 2000$ нТл

$B = 65\,000$ нТл

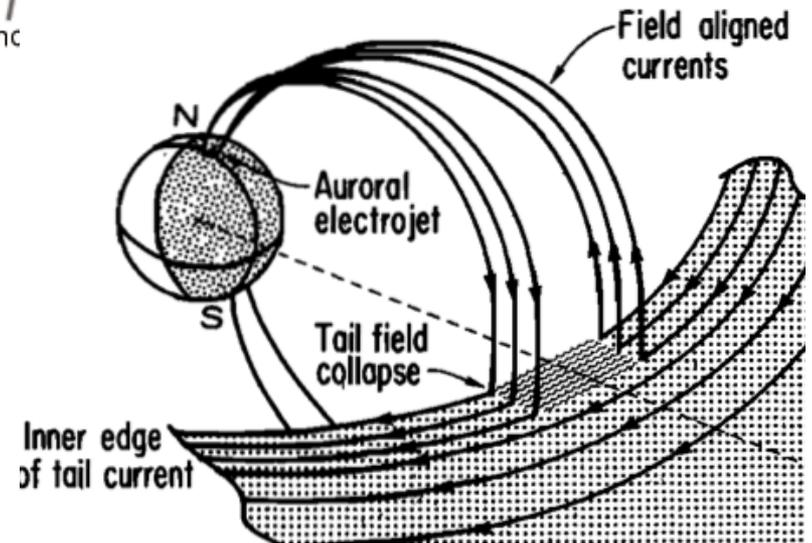
Before substorm onset



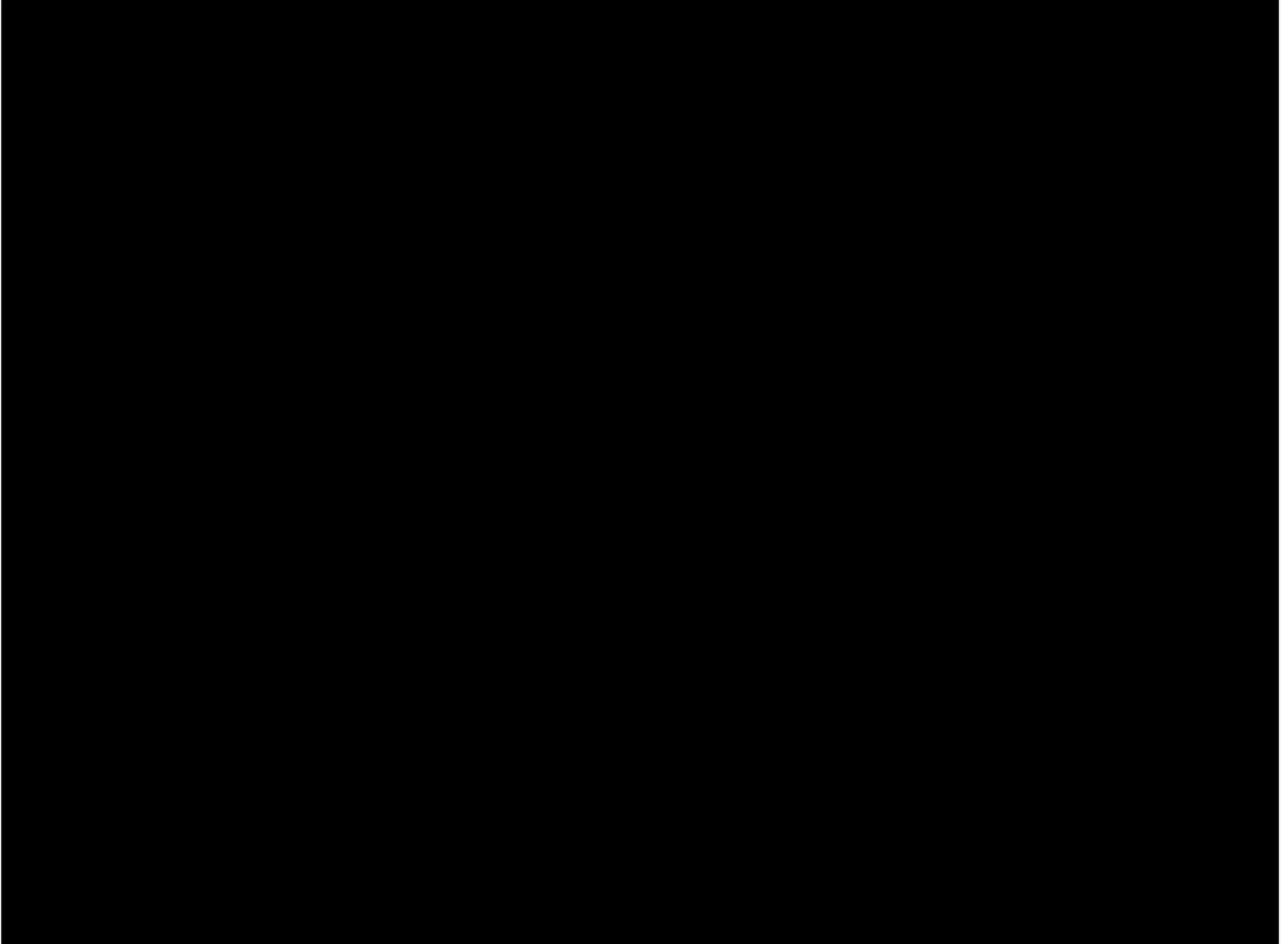
Just after substorm onset



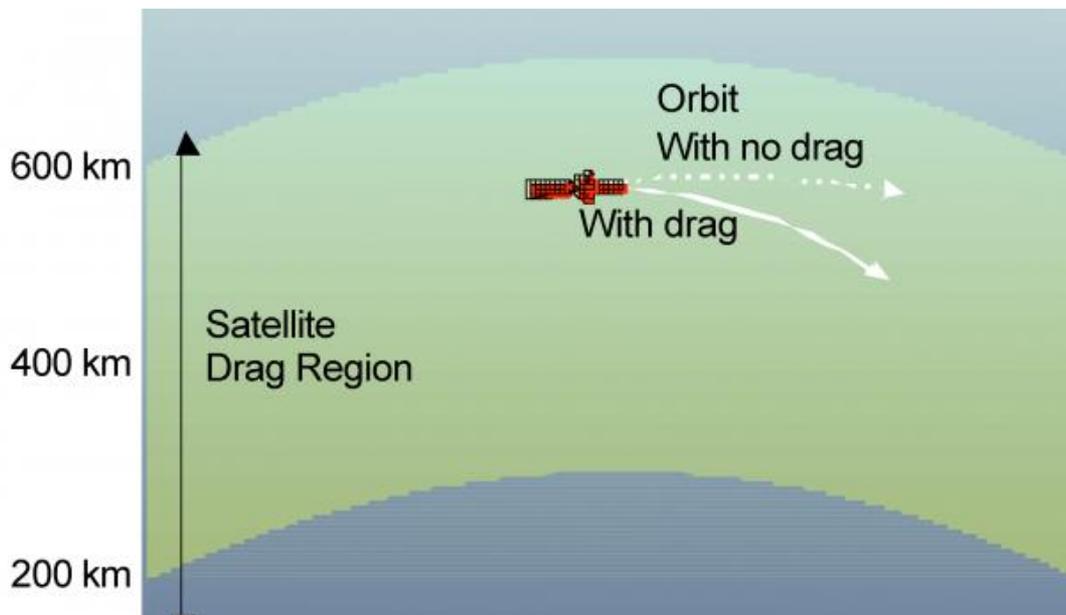
Магнитосфера
“теряет хвост”



Геомагнитные бури



Торможение спутников



из-за нагрева и расширения атмосферы (ионосферы) вследствие увеличения солнечной активности.

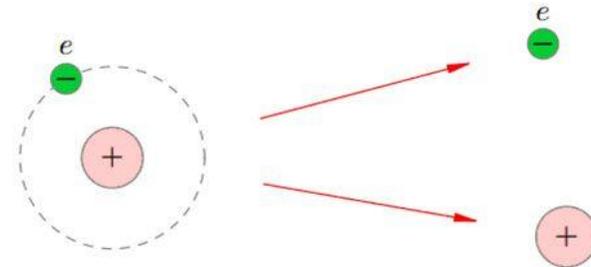
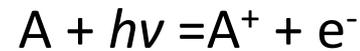
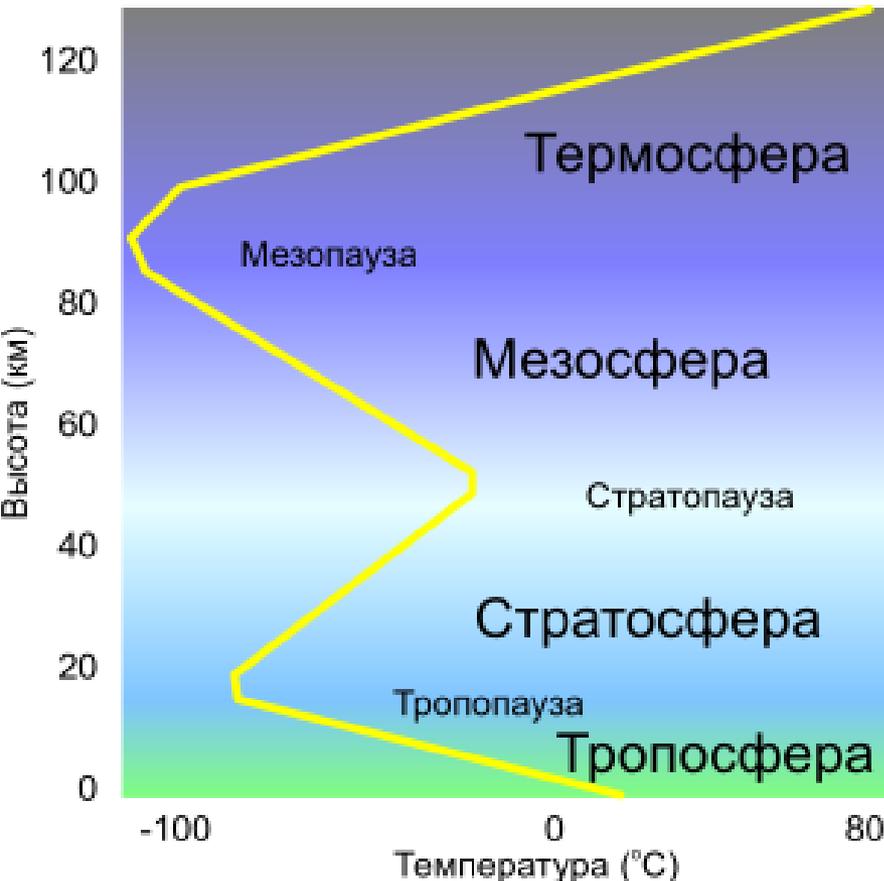
Skylab, 1979 – неконтролируемый спуск станции

3 февраля 2022 года около 40 спутников Starlink компании SpaceX уничтожены магнитной бурей

Атмосфера Земли

Под действием солнечного излучения (УФ, рентгеновского) происходит **ионизация** верхних слоев атмосферы выше 60 км.

В результате ионизации нейтральных молекул и атомов происходит образование **ионосферы** (60-1000 км).



Ионизация – рекомбинация

Это слабоионизированная плазма – доля заряженных частиц <1% даже на высоте максимума (около 270 км).

Ионосфера

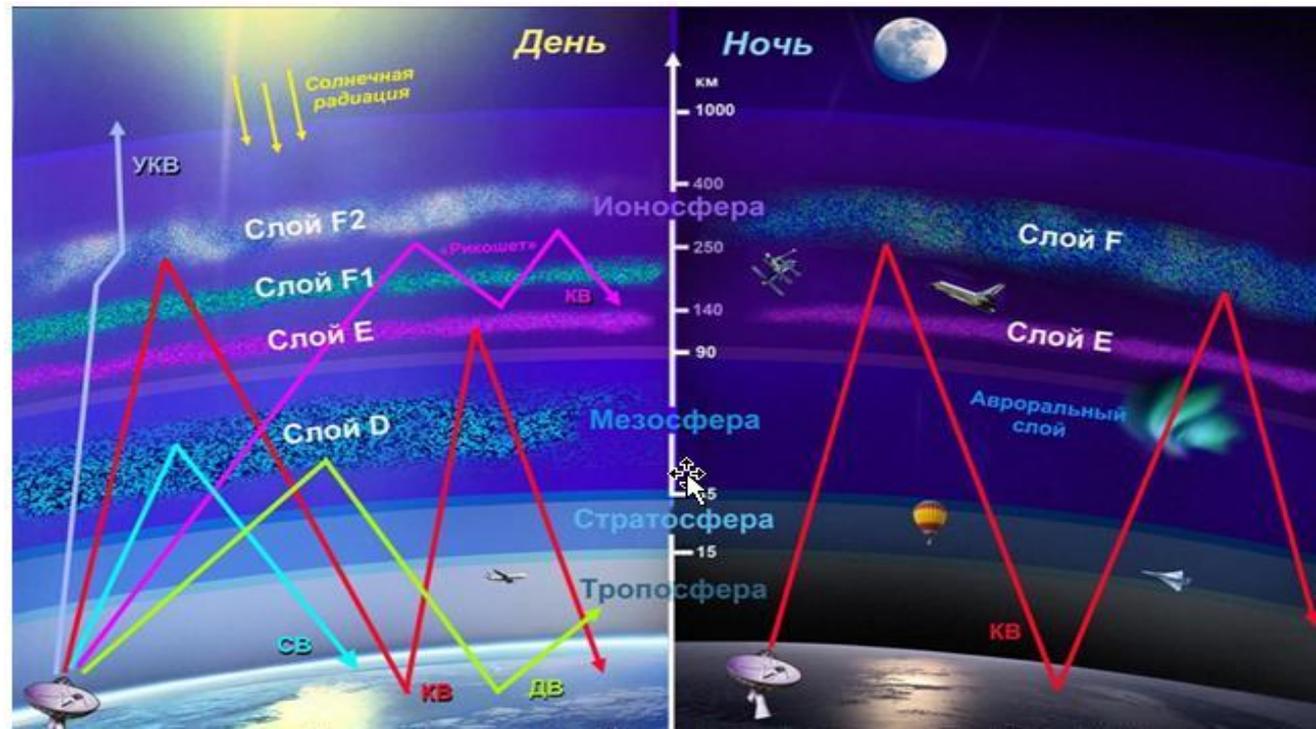
Первое экспериментальное подтверждение существования ионосферы – эксперименты Гульельмо Маркони по радиосвязи через Атлантику (1901 год).

Ионосфера оказывает существенное влияние на распространение радиоволн.

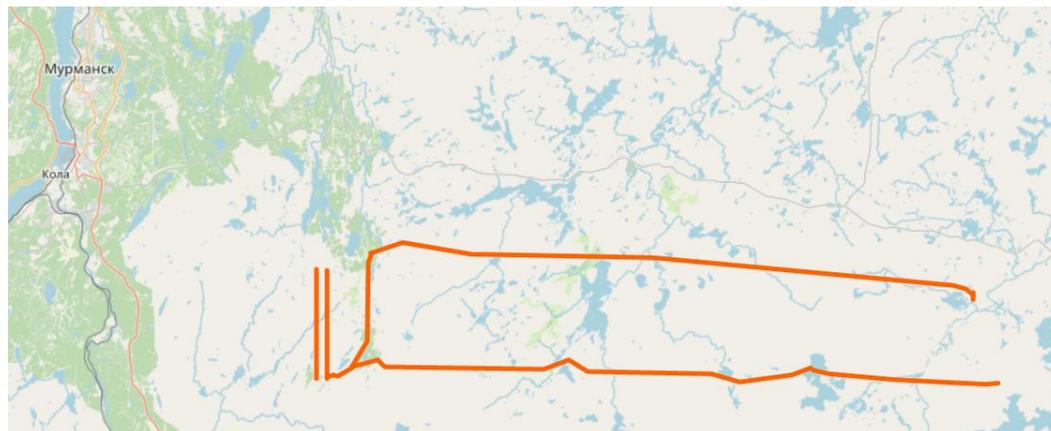
Для коротких волн (3-30 МГц, 100-10 м) ионосфера является “зеркалом”.

Критическая частота:

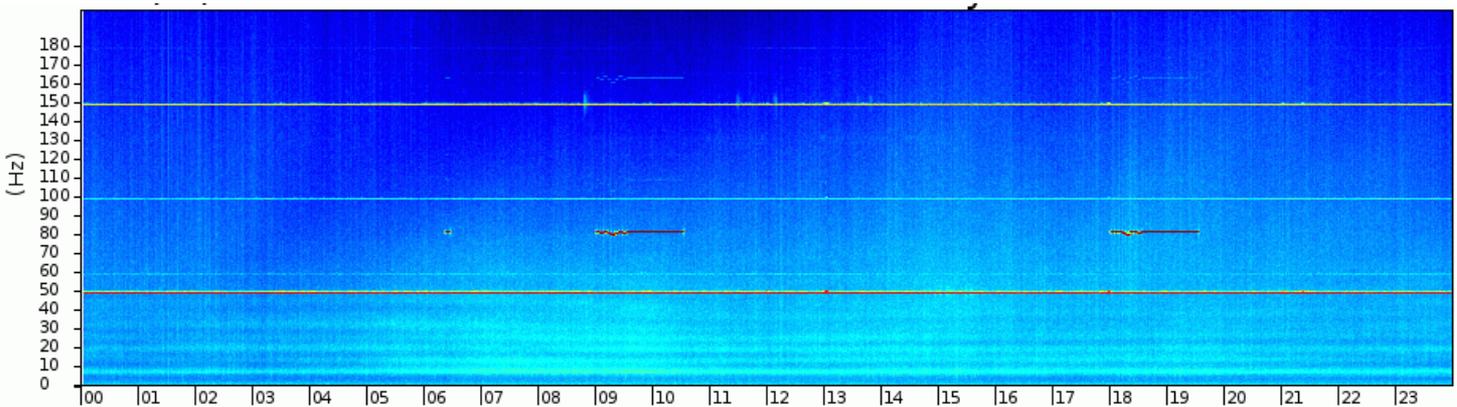
$$f = \sqrt{\frac{e^2 N_e}{\pi m_e}} \approx 9\sqrt{N_e}$$



Связь с подводными лодками

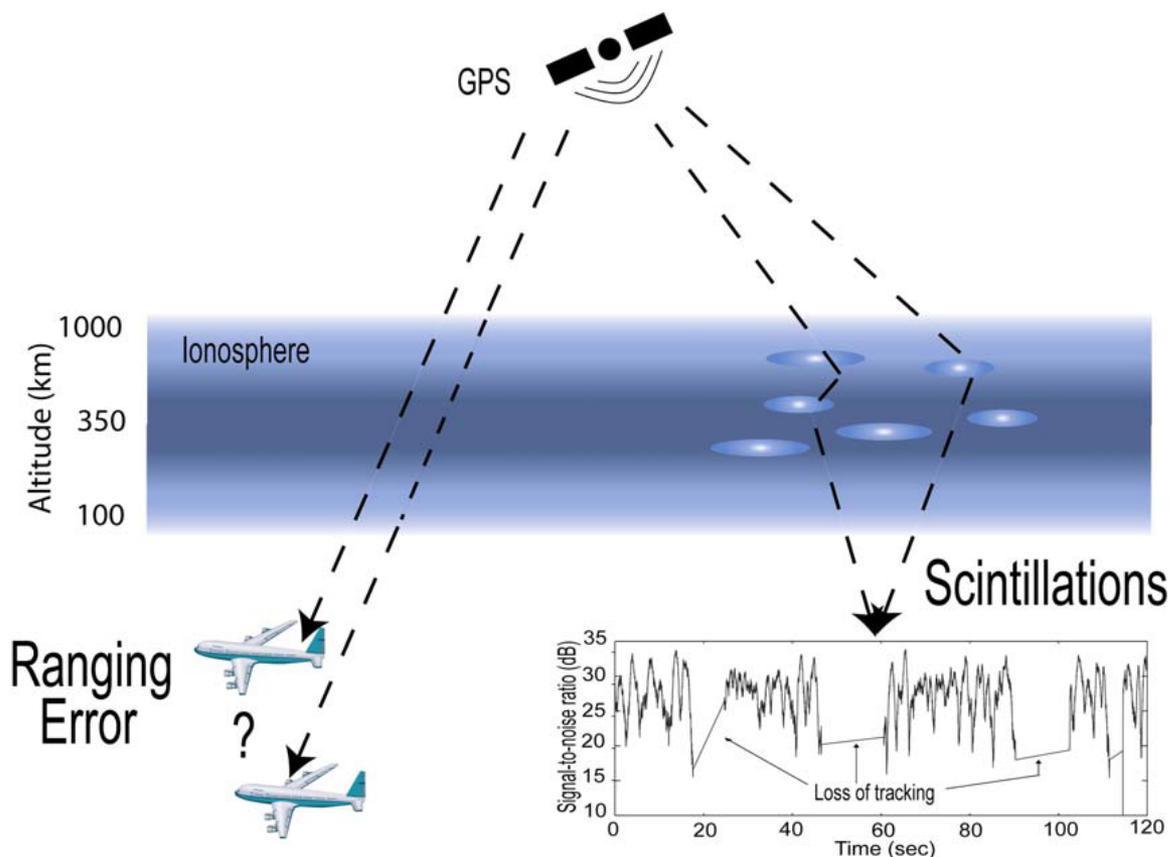


60 км



система “Зевс” на Кольском п-ве, 82 Гц, длина волны – более 3 500 км.

Возмущения ионосферы влияют негативным образом на связь, локацию, навигацию, особенно в высоких широтах



Глобальные навигационные спутниковые системы (GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou) – ГГц

На высоте ~20 000 км

Ошибки в навигации, локации в десятки метров существенны для самолетов, беспилотного транспорта

Неоднородности в распределении ионосферной плазмы приводят к появлению сцинтилляций (мерцаний) сигналов вследствие дифракции, рефракции

Russia blocked GPS data during NATO exercises: Norway



Issued on: 13/11/2018 - 18:08



Norway: GPS jamming during NATO drills in 2018 a big concern

The Norwegian Intelligence Service says GPS signal disruption as seen during major NATO drills in Norway last year "is of particular concern" for the military and "is also a threat to civil aviation in peacetime."

BBC

Sign in

Home

News

Sport

Reel

Worklife

Travel

NEWS

Home | Coronavirus | Climate | Video | World | UK | Business | Tech | Science | Stories | Entertainment & Arts

World | Africa | Asia | Australia | Europe | Latin America | Middle East | US & Canada

Ads by Google

Send feedback Why this ad? @

Russia suspected of jamming GPS signal in Finland

12 November 2018



AEROSPACE AND DEFENSE NOVEMBER 13, 2018 / 8:01 PM / UPDATED 3 YEARS AGO

Joining Finland, Norway says Russia may have jammed GPS signal in Arctic

By Gwladys Fouché, Nerijus Adomaitis

3 MIN READ



OSLO (Reuters) - Russia was the likely culprit behind the disruption of GPS navigation signals over northern Scandinavia during recent NATO military exercises, Norway's defense minister said on Tuesday.

U.S. MILITARY

Russia jammed GPS during major NATO military exercise with US troops



By Ryan Browne, CNN

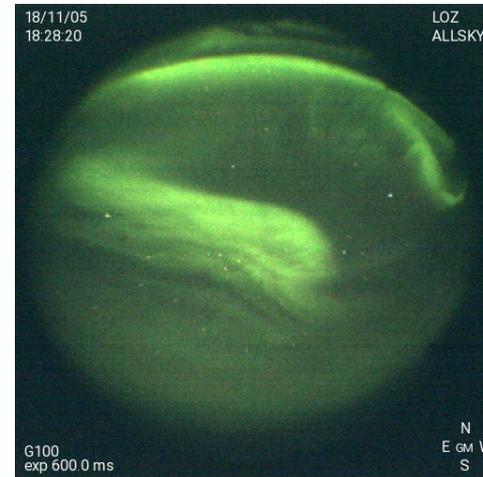
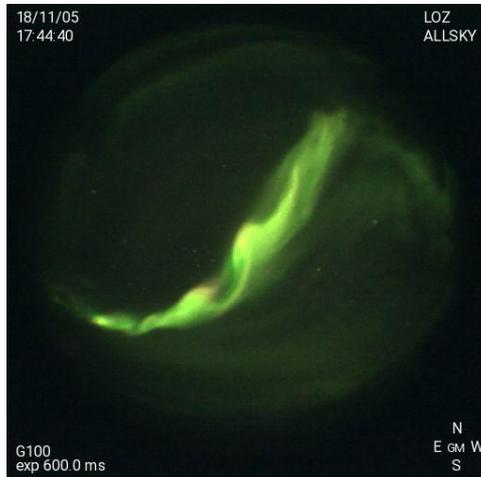
Updated 1648 GMT (0048 HKT) November 14, 2018

Учения НАТО Trident Juncture 2018 («Единый трезубец-2018»)

25 октября – 7 ноября 2018 года на севере Норвегии.

Самые масштабные маневры на северном фланге НАТО после окончания холодной войны: 50 тысяч военных, 250 самолетов, 65 кораблей, 10 тысяч единиц боевой техники из 31 страны.

"Министерство обороны Норвегии заявляет, что российские военные в Арктике нарушили работу систем GPS во время недавних больших учений НАТО в Норвегии".



“Блокировка охватывала обширную территорию и часто в отдалении от российских границ, указывает на то, что источник не находился в России”.

Космическая погода влияет на политику

- Б.В. Козелов, С.А. Черноус, И.И. Шагимуратов, М.В. Филатов, И.И. Ефишов, Н.Ю. Тепеницина, Ю.В. Федоренко, С.В. Пильгаев. Гелиогеофизические факторы, влияние которых могло обусловить ошибки в работе GPS в период военных учений НАТО «Trident Juncture» с 25/10/2018 по 7/11/2018 // Physics of Auroral Phenomena, Proc. XLII Annual Seminar, Apatity, pp. 48-52, 2019.

Поглощение полярной шапки



Polar cap absorption (PCA)

Вторжение солнечных космических лучей в полярные области

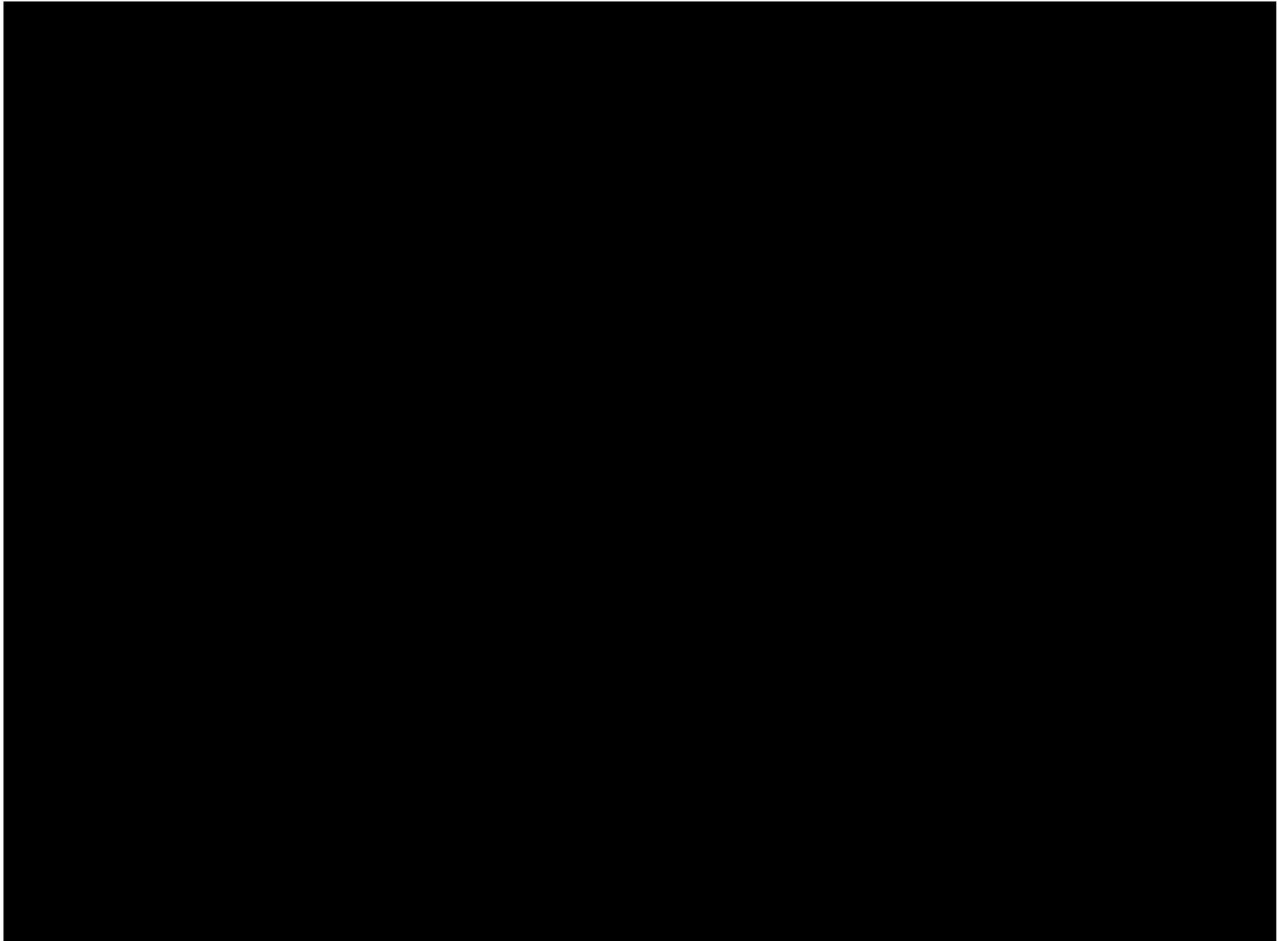
Поглощение КВ радиоволн (1-30 МГц) на дневной стороне из-за увеличения N_e

Длится несколько дней

23 мая 1967, $Dst = -400$ nT

[Knipp et al., 2016, Space weather] – угроза ядерной войны между США и СССР.

Радар в обсерватории Туманный



Полярные сияния – визуальный индикатор состояния космической погоды

Северные или полярные сияния?

Почему сияния чаще видны на Кольском п-ве, чем в Москве и Санкт-Петербурге?
Магнитное поле более вертикально в высоких широтах.

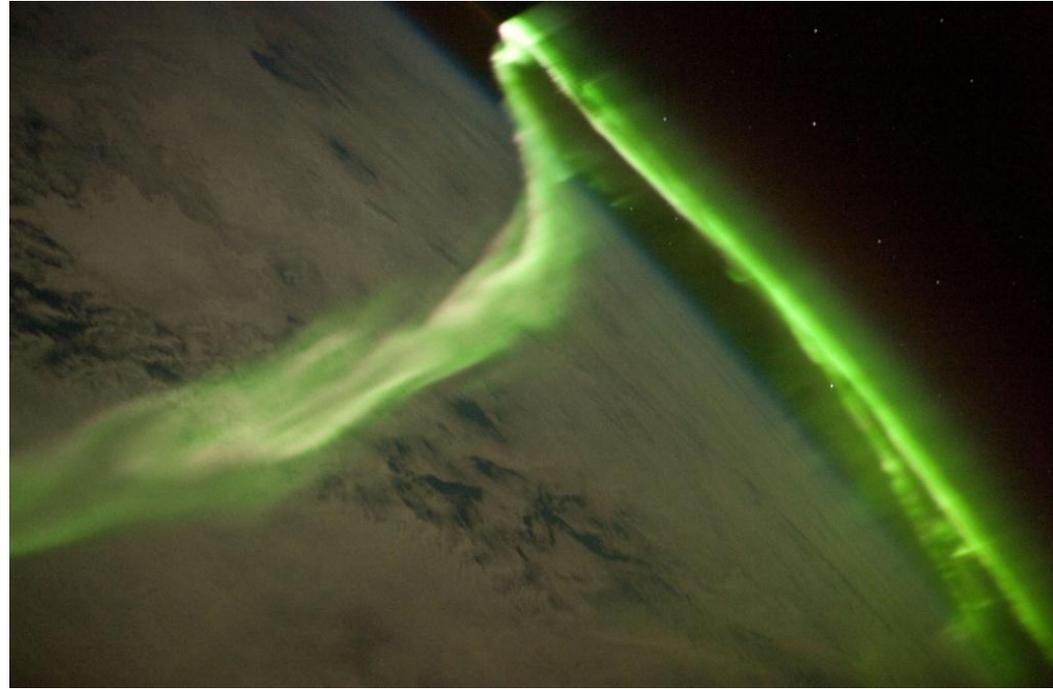
Но при сильных геомагнитных возмущениях могут наблюдаться в Москве и даже вблизи экватора!



Стрелка компаса и сияния.

Вопреки народным приметам не связаны с холодной погодой, а вызваны возбуждением, ионизацией нейтральных атомов и молекул высыпающимися электронами и протонами.

Сияния происходят и летом, и в дневное время!

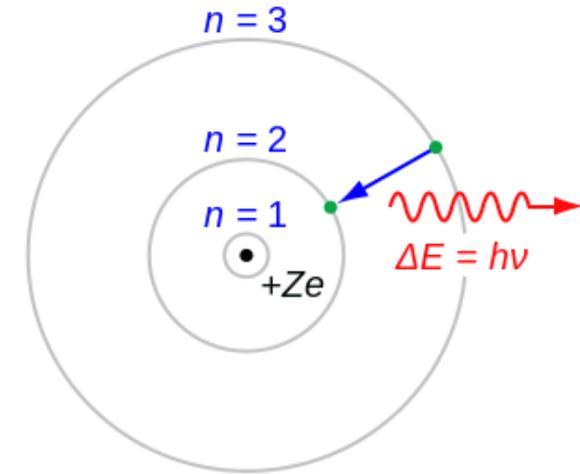
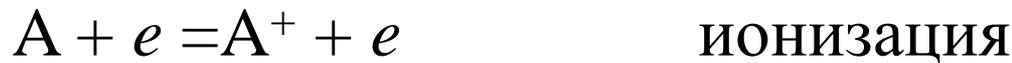
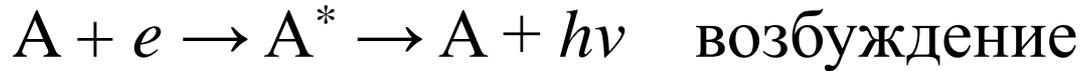


Формы сияний:

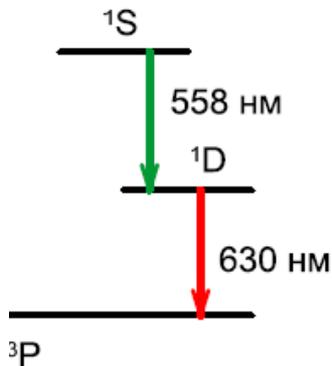
диффузные и дискретные сияния (дуги, корона, полосы, пятна)

Электронные, протонные сияния

Возбуждение, ионизация атомов и молекул



Вторичные электроны, до 10 актов ионизации



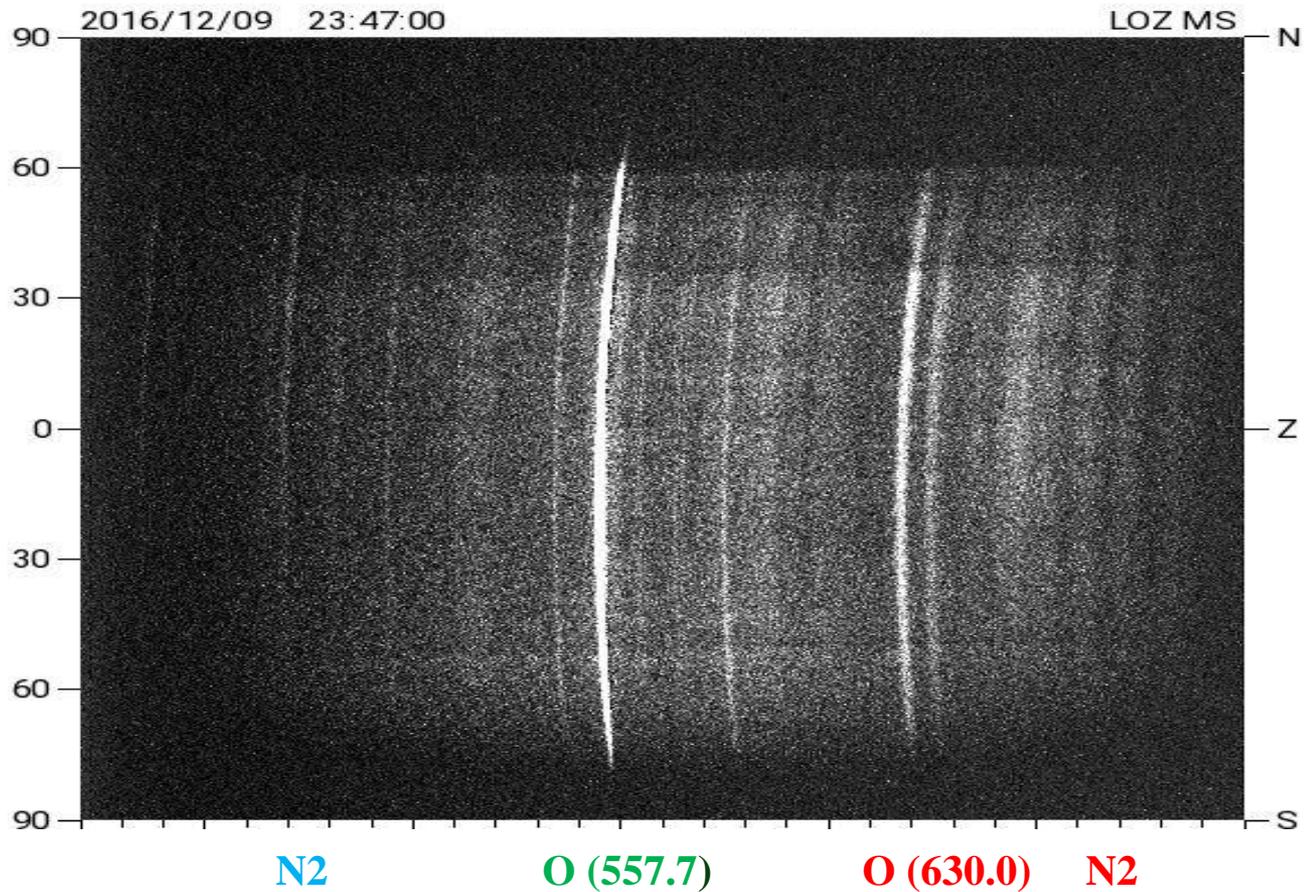
630.0 нм, O(¹D), 1.9 эВ, 100 с – 250 км

427.8 нм, N₂⁺, 18.8 эВ, 10⁻⁴ с – 150 км

557.7 нм, O(¹S), 4.17 эВ, 0.7 с – 120 км

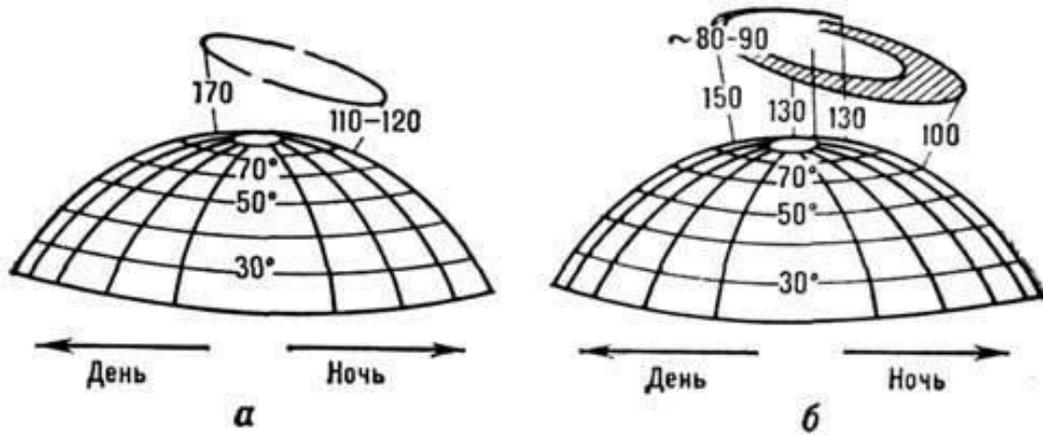
Запрещенные линии, метастабильное состояние

Спектр полярного сияния



Спектральный анализ, химический состав атмосферы

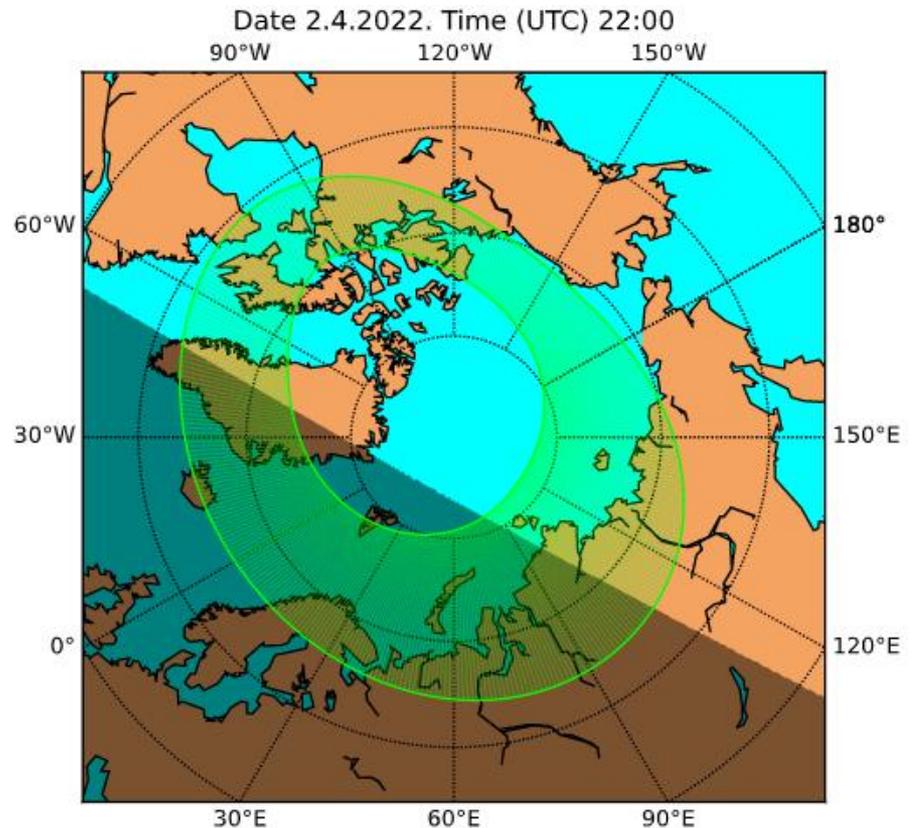
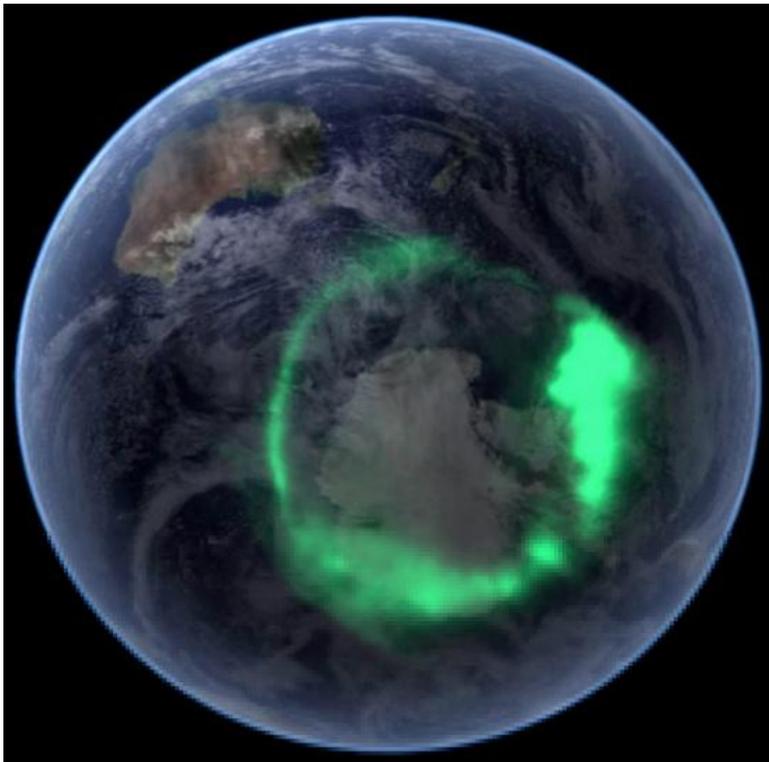
Авроральный овал



Овал Фельдштейна, Старкова

Географические и геомагнитные полюса не совпадают

Ускорение частиц в магнитном поле Земли



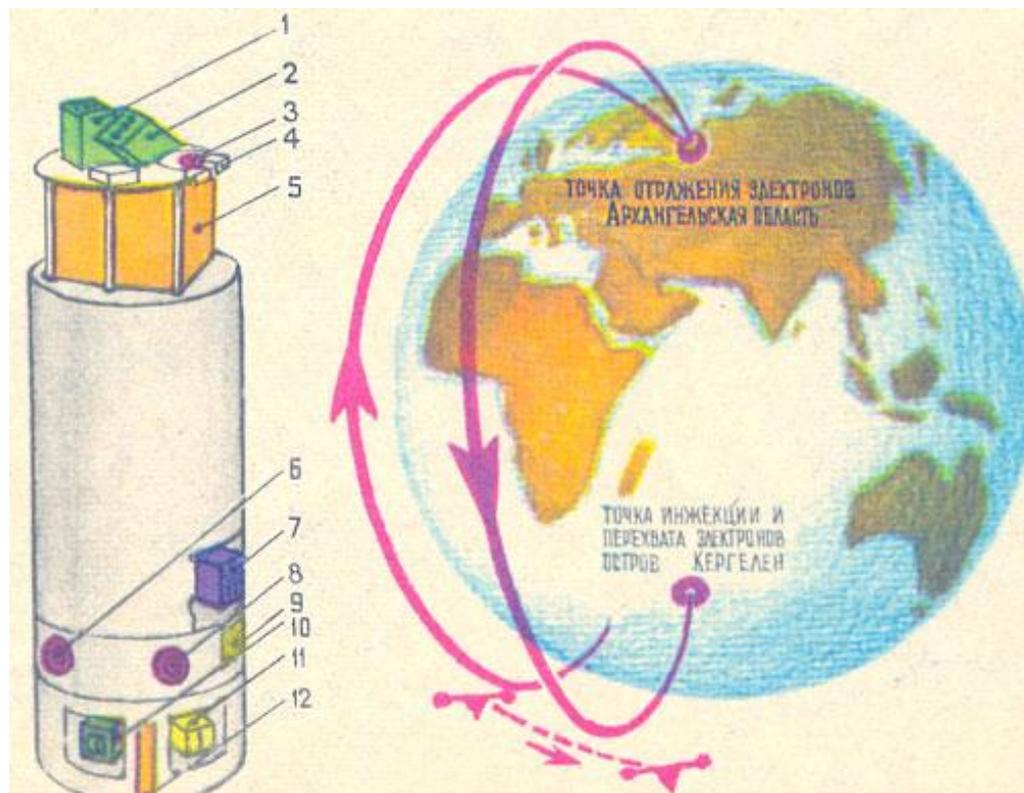
Эксперимент “Аракс”

Советско-французский эксперимент, январь-февраль 1975 года

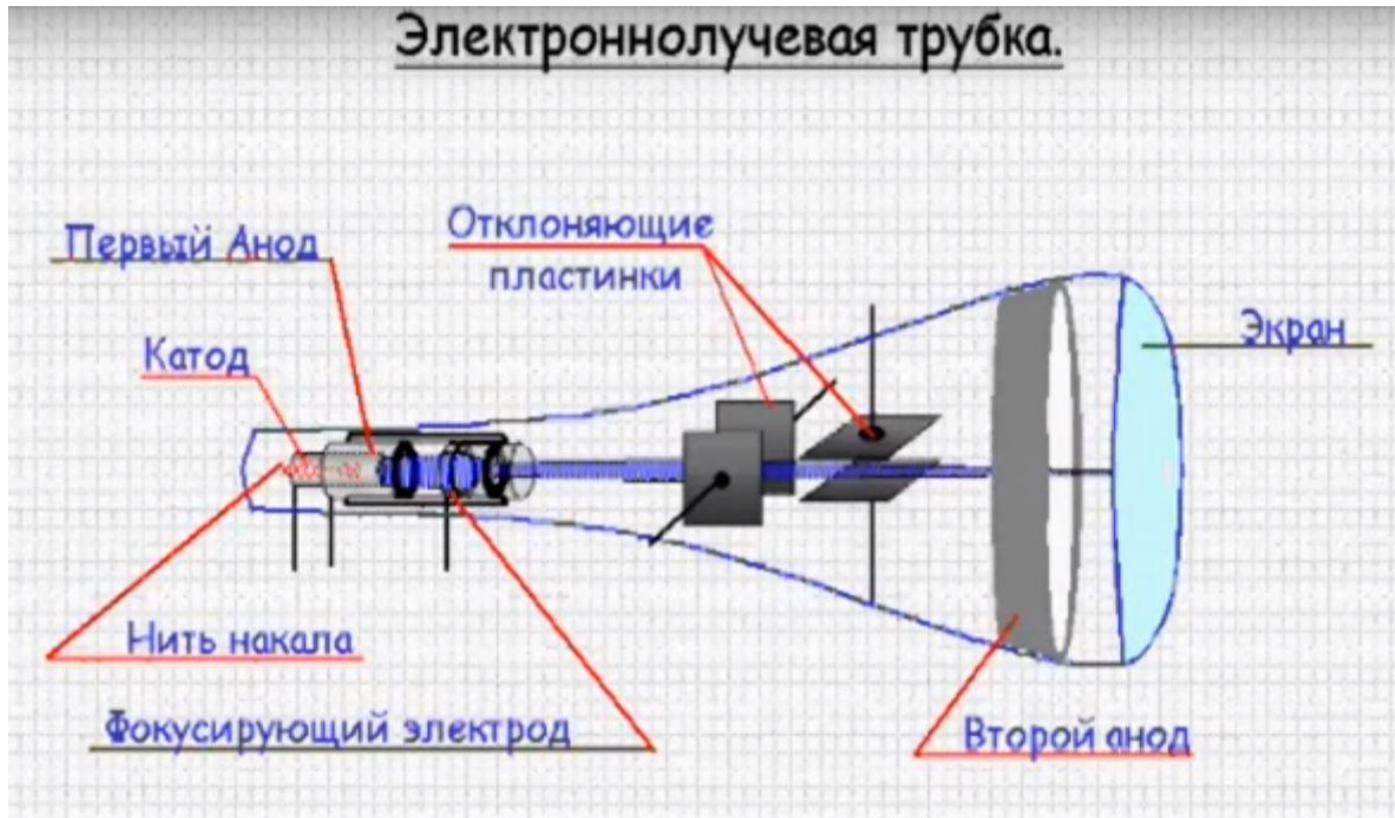
Согра (Архангельская область) – Киргилен (остров в Индийской океане)

Запускались геофизические ракеты и на высоте несколько сотен км инжестировались электроны

Сопряженной полярных сияний



Аналогия механизма возникновения полярных сияний с электронно-лучевой трубкой



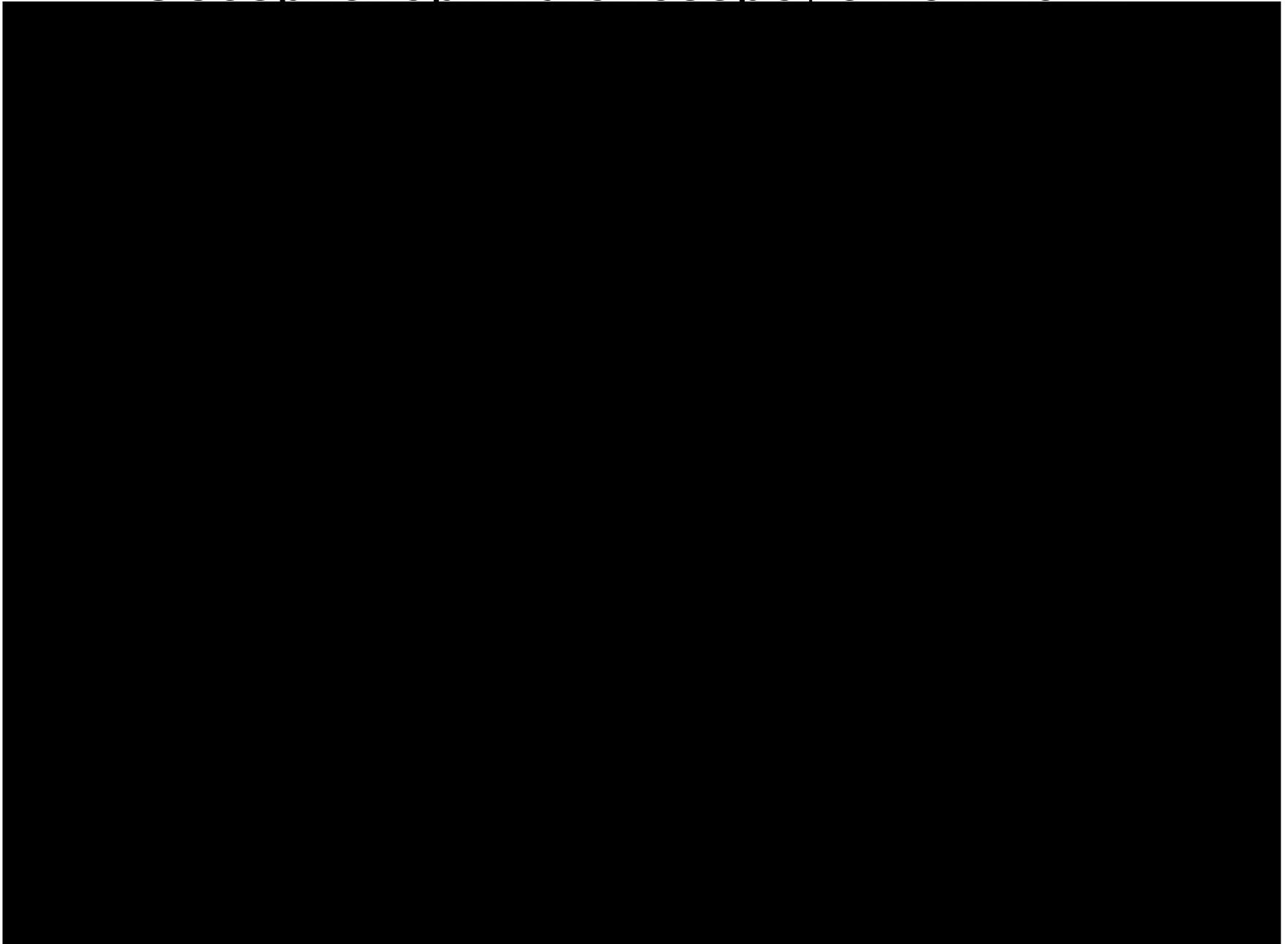
Оптические приборы по регистрации полярных сияний



Магнитометры в обсерватории Ловозеро



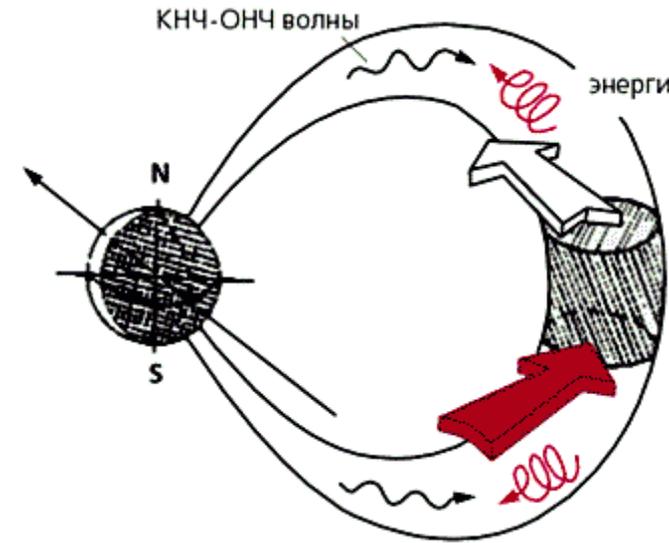
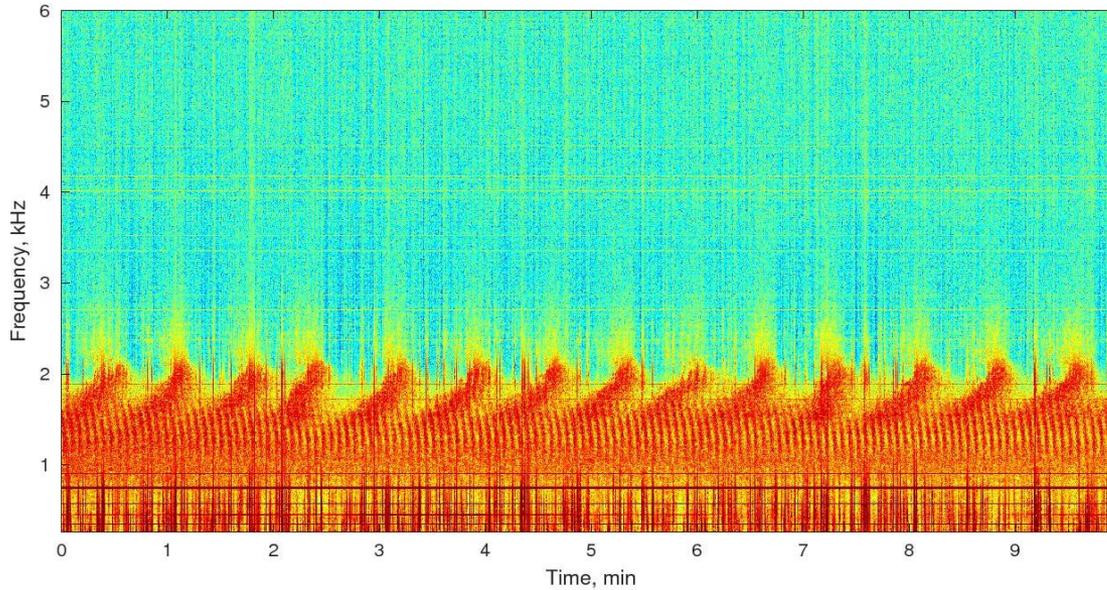
Обсерватория Ловозеро, 01.04.2022



Звуки сияний?

Сияния не издают звуков.

Плотность атмосферы у поверхности Земли в несколько миллионов раз выше, чем на высоте 100 километров. Поэтому слабые звуковые волны, если и возникают при появлении сияний, то быстро затухают в плотной атмосфере.



Искусственное полярное сияние?

- Запуски ракет, март 2018 – Azure (Auroral Zone Upwelling Rocket Experiment), Nasa, Андо́йа.
- Барий, стронций.



Нагрев ионосферы

Воздействие на ионосферу мощным КВ (2-10 МГц) электромагнитным излучением.
Высыпание электронов из радиационных поясов.

HAARP, США, Аляска



СУРА, Россия, Нижегородская обл.



EISCAT, Норвегия, Тромсе



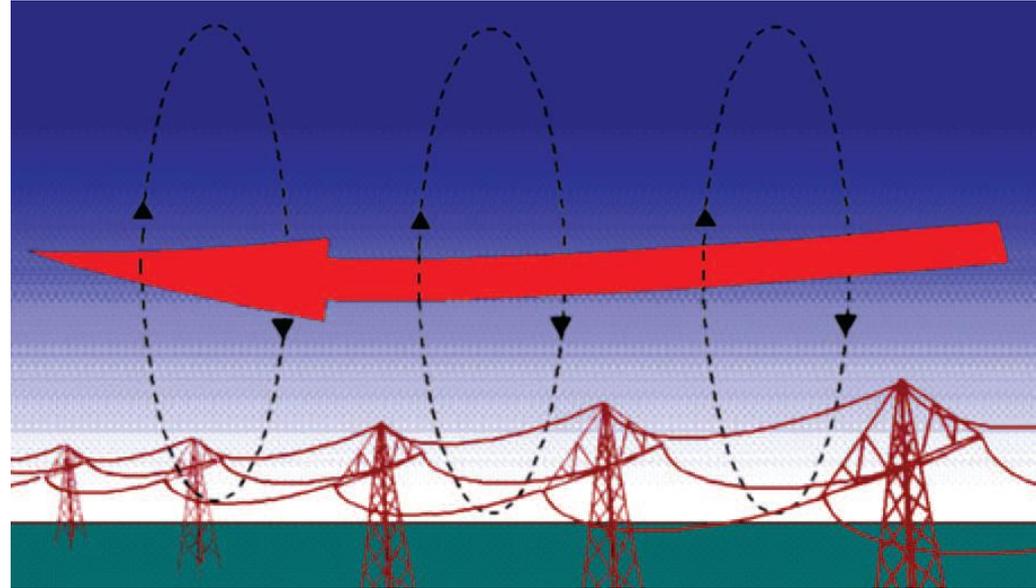
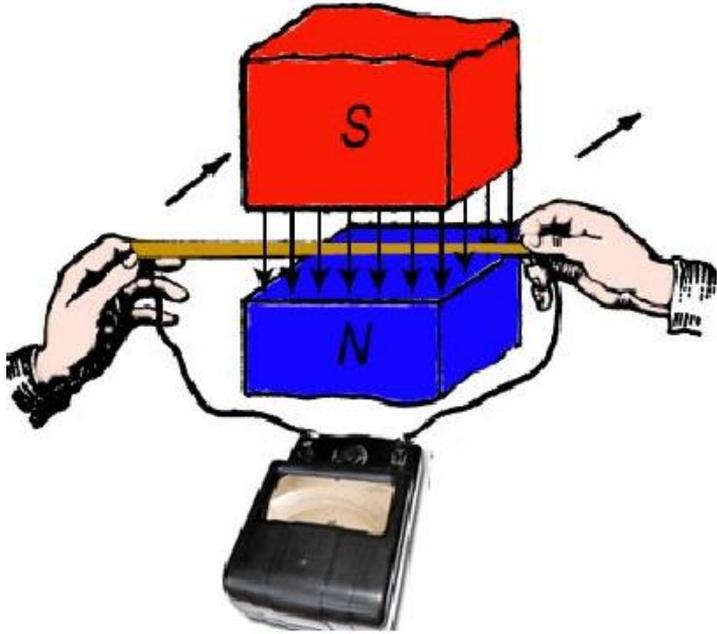
Arecibo, Пуэрто-Рико



Геомагнитно-индукционные токи

Закон электромагнитной индукции (закон Фарадея)

$$\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

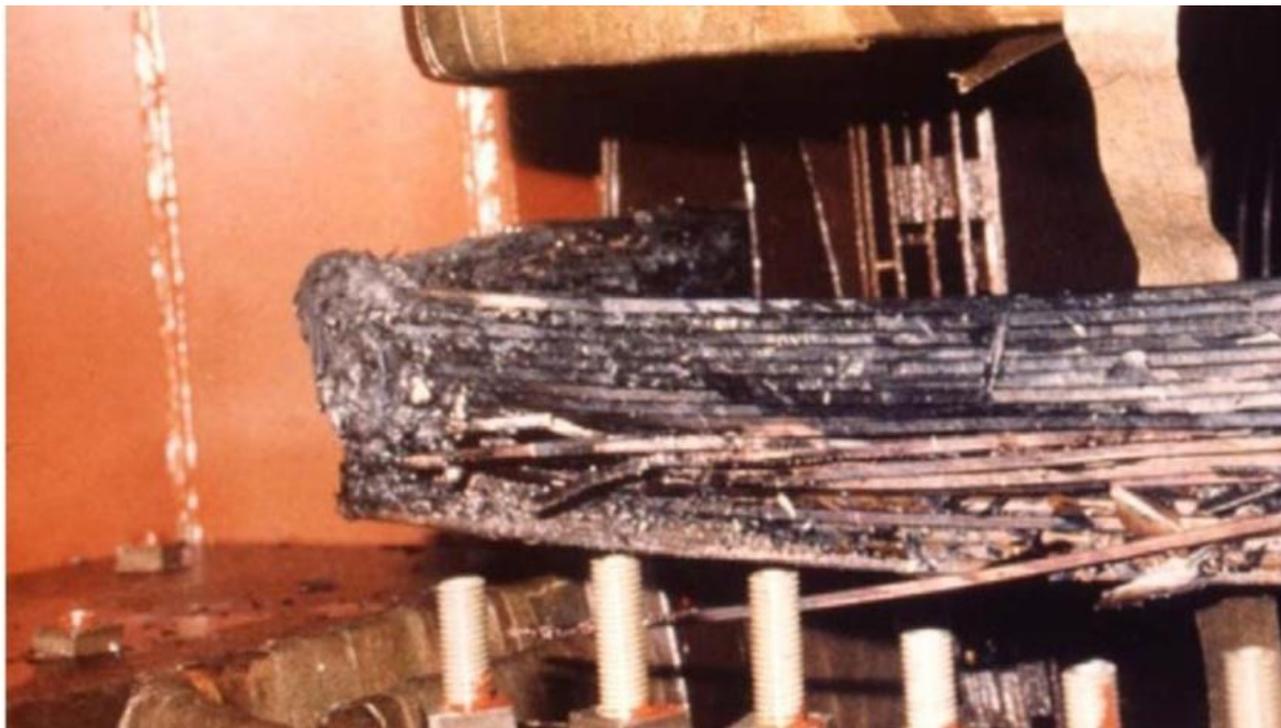


Токи в ионосфере (авроральный электроджет) на высоте 100 км наводят в земной коре и в технологической линиях паразитные ГИТ.

Квазипостоянный ток, мГц. Сотни А.

Линии электропередач, ж/д, морских коммуникационных кабелей, телефонных линий.

Паразитные ГИТ приводят в высоких широтах к выходу из строя трансформаторов, коррозии трубо-, нефте- газопроводов.



1 сентября 1859 – телеграф вышел из строя в Европе и США.

13-14 марта 1989 – Квебек, Канада.

4 августа 1972 года – самопроизвольное срабатывание мин во Вьетнаме.

30 октября 2003 – Мальме (Швеция)

ГИТ ~ dB/dt

ГИТ зависит от проводимости земной коры, от конфигурации технологических линий

$$E(\omega) = Z(\omega)H(\omega)$$

Проблема предсказания ГИТ не сводится только к предсказанию dB/dt

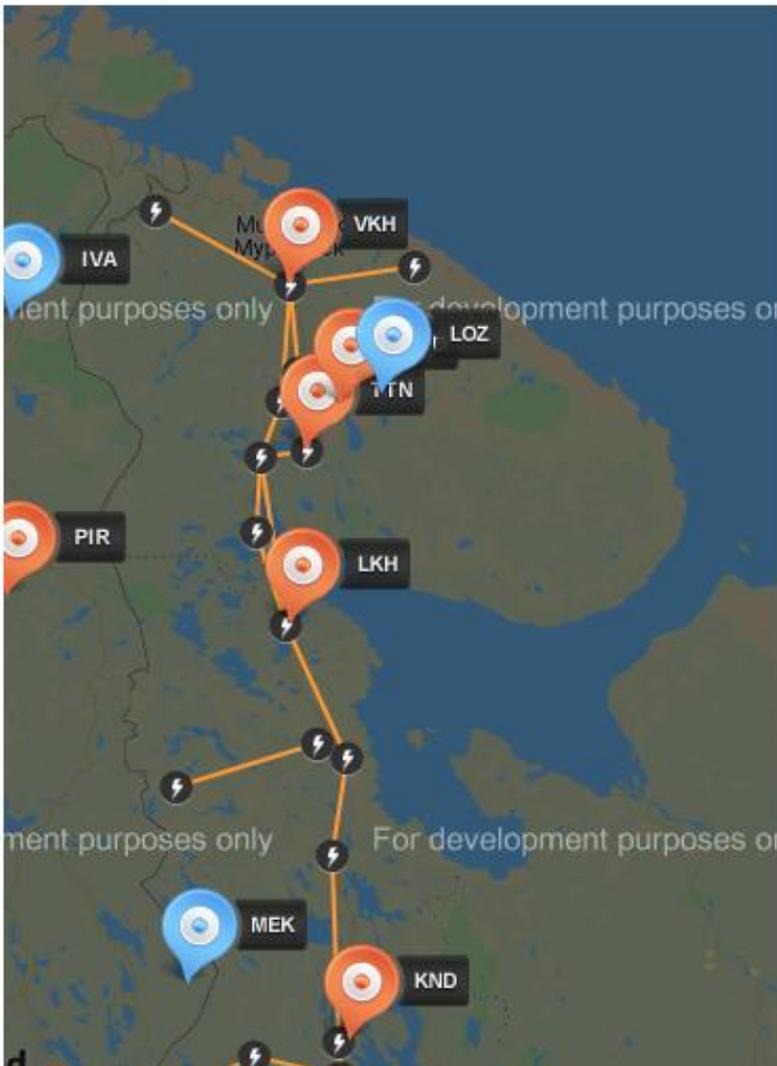
ГИТ смещает рабочую точку трансформатора и приводит к появлению более высоких гармоник в сети.

Наиболее подверженными воздействию ГИТ являются тупиковые и узловые подстанции.

ГИТ приводят к перепадам напряжения, перегреву силовых трансформаторов и потере реактивной мощности в высоковольтных ЛЭП.

Кумулятивное воздействие.

EURISGIC (European Risk from Geomagnetically Induced Currents)



ПГИ совместно с ЦФТПЭС КНЦ РАН создана единственная в России система регистрации ГИТ в линиях электропередач Кольского полуострова и Карелии.

Система включает в себя 5 станций.
Регистрация ведется непрерывно с 2011 года.

Нейтраль трансформатора.

STATION SELECTION

Vykhodnoy

Select GIC station

Lovozero

Select MAGNETIC station

CALENDAR

Previous day Next day

Use ← and → keys to navigate using keyboard

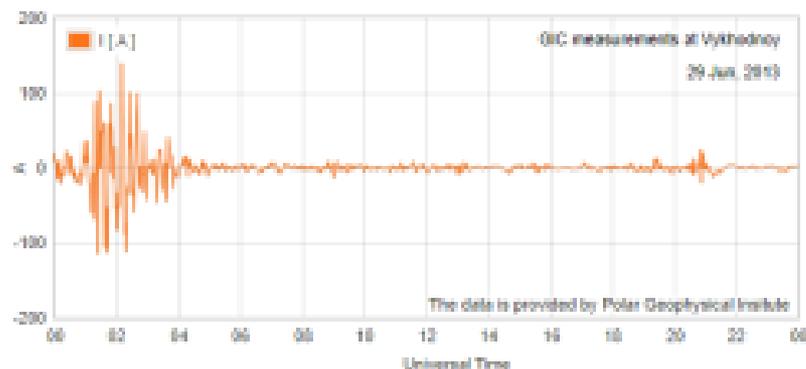
Jun 2015

Sa	Mo	Tu	We	Th	Fr	Sa
						1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30						

Calendar colors description :

- 31 - GIC & magnetic data is available
- 31 - GIC data is available (magnetic - not)
- 31 - Magnetic data is available (GIC - not)
- 31 - GIC & magnetic data is not available

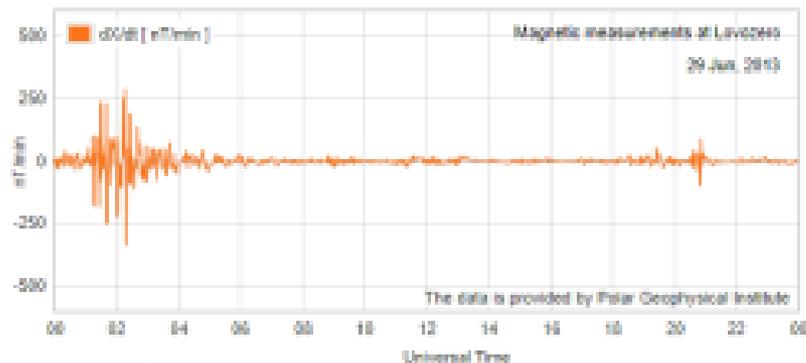
GIC MEASUREMENTS



Save As PNG

MAGNETIC FIELD MEASUREMENTS

Time derivative of **Bx** **By**



Save As PNG

GIC PLOT ADJUSTMENTS

Y-axis range: **Auto** **Manual**



Move slider to adjust the y-axis range

Curve color:



Use color picker to adjust curve color

MAGNETIC PLOT ADJUSTMENTS

Y-axis range: **Auto** **Manual**



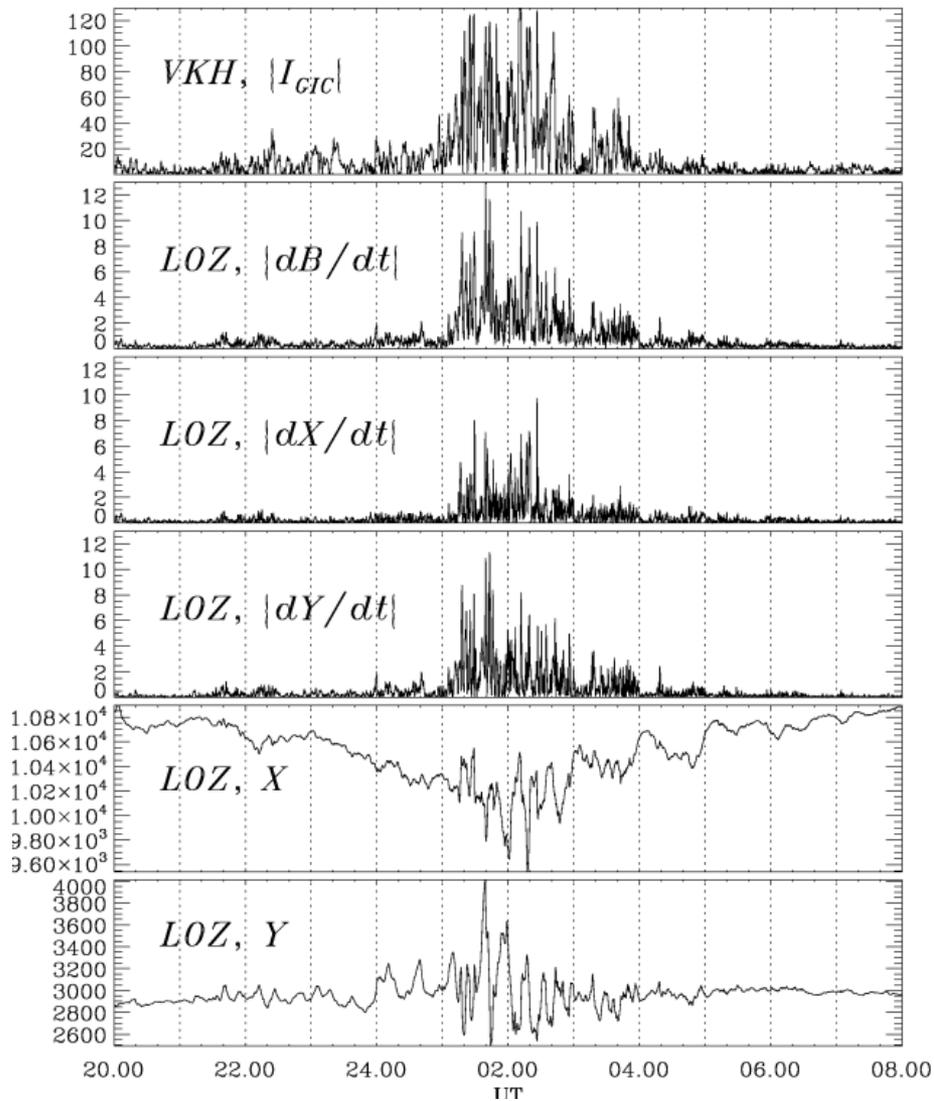
Move slider to adjust the y-axis range

Curve color:

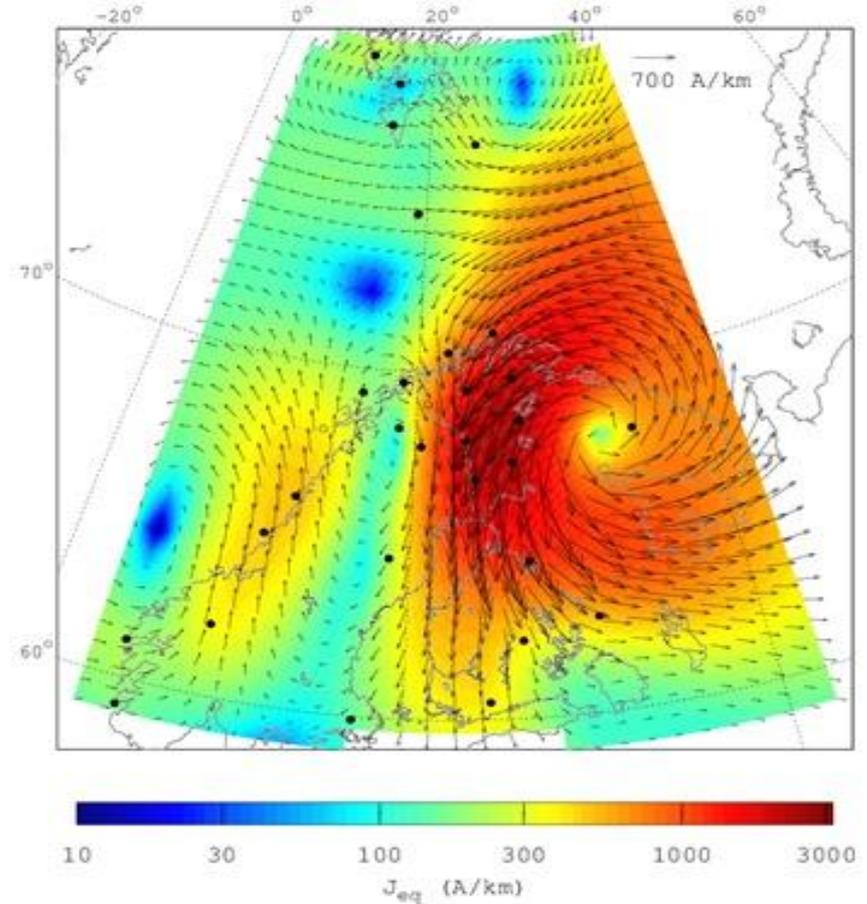


Use color picker to adjust curve color

28–29 June 2013



GIC = 120 A

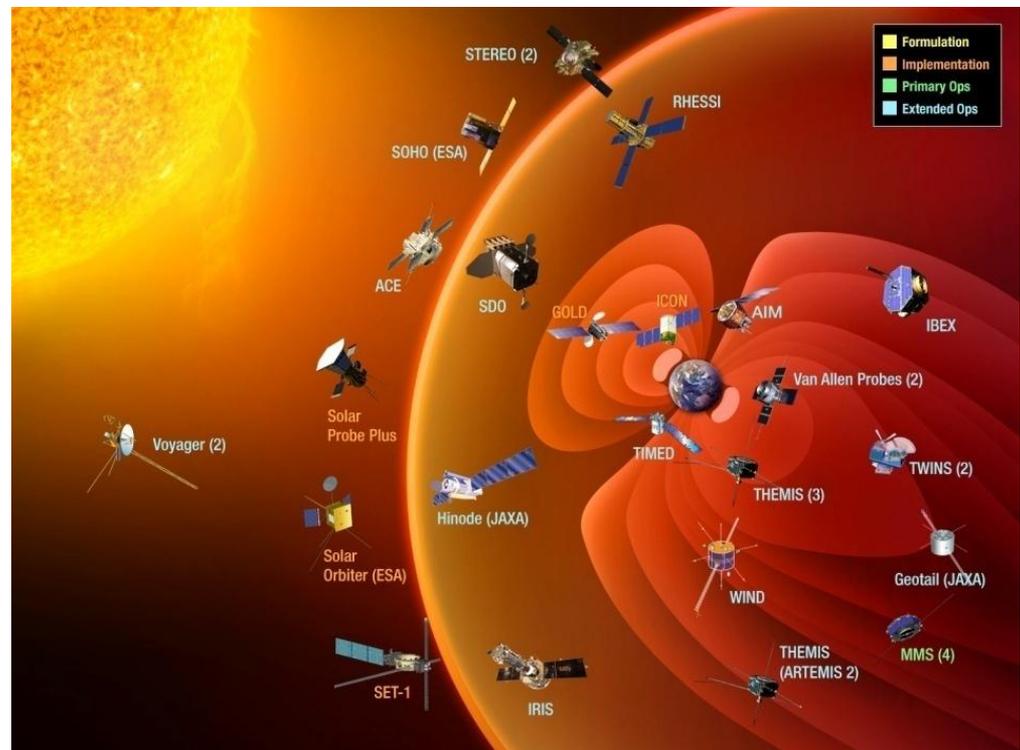
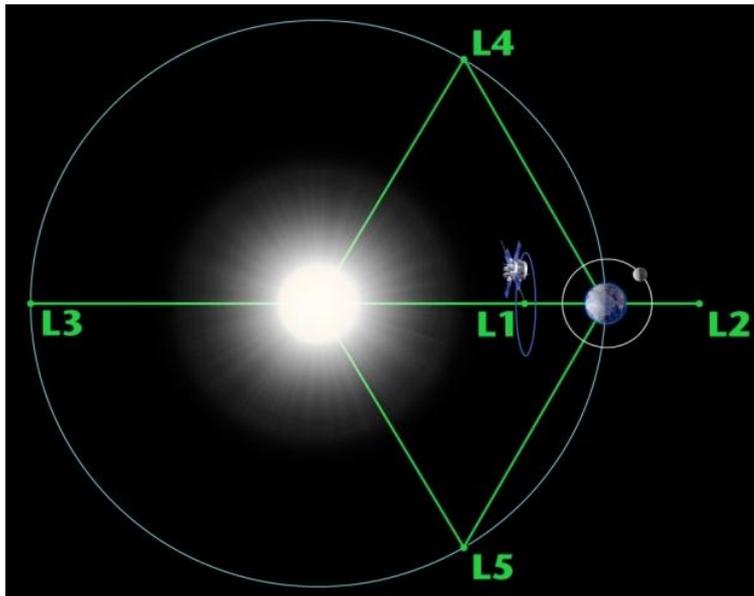


- Belakhovsky Vladimir, Pilipenko Vyacheslav, Engebretson Mark, Sakharov Yaroslav, Selivanov Vasily. Impulsive disturbances of the geomagnetic field as a cause of induced currents of electric power lines // Journal of Space Weather and Space Climate. A18. DOI: 10.1051/SWSC/2019015. 2019.

Прогноз космической погоды

Десятки спутников наблюдают за космической погодой

Точка L1 – 1 256 768 км



Долгосрочный прогноз – по появлению пятен на Солнце. Группа солнечных пятен по центру или правее.

Среднесрочный прогноз – появление вспышки

Краткосрочный прогноз – спутниковые наблюдения в точке **либрации L1** (точка Лагранжа, точка гравитационного равновесия). ACE, DSCOVR.

spaceweather.com

spaceweather.ru

aurora.pgia.ru/oval

aurora.pgia.ru:8071

swpc.noaa.gov/

space.fmi.fi/image/

swx.sinp.msu.ru/

spaceweather.izmiran.ru/

cdaweb.gsfc.nasa.gov/

intermagnet.github.io/

www.sgo.fi

kho.unis.no/

www.carisma.ca/

eurisgic.ru/

vk.com/aurora.pgia

Технологические эффекты воздействия космической погоды



Вывод

Для развития инфраструктуры в Арктике и для освоения околоземного космического пространства необходимо учитывать такой важный природный фактор как космическая погода.

Белаховский Владимир Борисович

Кандидат физико-математических наук

Старший научный сотрудник лаборатории атмосферы Арктики Полярного геофизического института (г. Апатиты)

belakhovsky@mail.ru