

Что такое космическая погода и какое нам до нее дело?

Пилипенко Вячеслав Анатольевич

ИФЗ РАН, ГЦ РАН

pilipenko_va@mail.ru

геофизика - «физика более низкого уровня»?

Бытует представление, что настоящие физические открытия делаются на мощных установках mega-science, а геофизики только натягивают открытые законы на природные явления.

На самом деле природа не знает, что мы ее поделили на разные научные дисциплины, и никто не знает, где удастся открыть принципиально новые физические явления – в лабораторных экспериментах или геофизических наблюдениях.

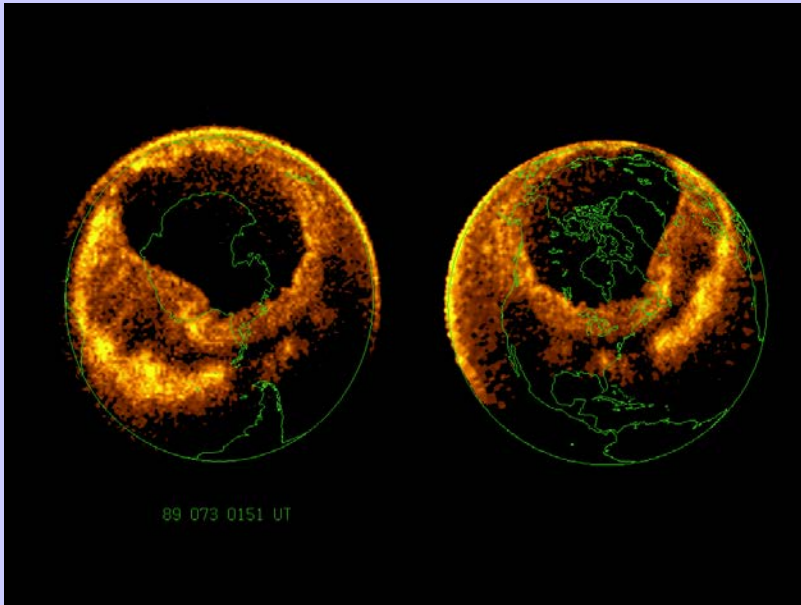
Мы это увидим на примере изучения солнечно-земной физики.

Когда говорят о воздействии Солнца на Землю, неявно предполагают, что при солнечной вспышке «выбрасывается» поток частиц, который затем «ударяет» по нашей планете, что приводит к вспышке полярных сияний.



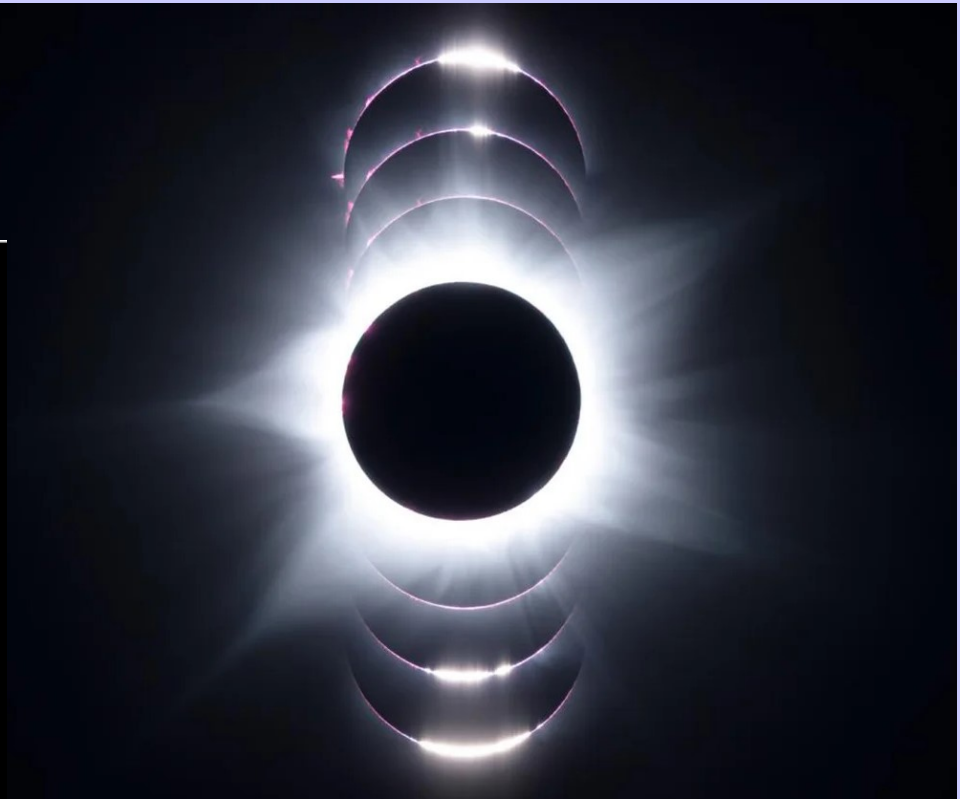
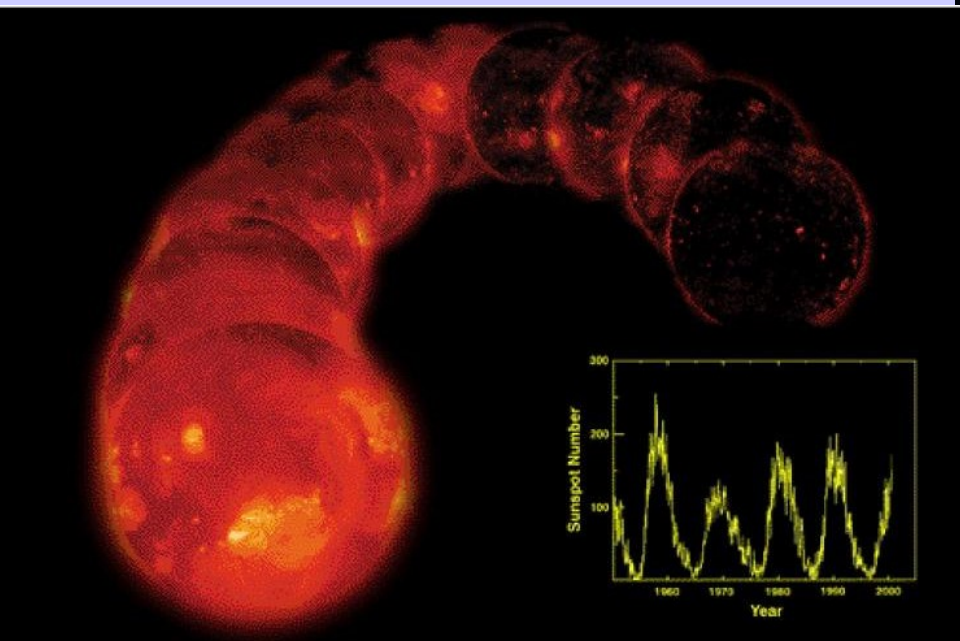
Такое упрощенное представление о солнечно-земных связях казалось бы, подтвердилось экспериментами с «тереллой»?

Простое, наглядное и неверное объяснение!



На самом деле, солнечно-земные связи включают цепь фундаментальных физических явлений, понимание которых потребовало немало усилий, и многие из которых до конца так и не выяснены.

Изменчивость солнечной постоянной – в оптическом диапазоне $\sim 0.01\%$. Как же 11-летний солнечный цикл?



Диапазон солнечного излучения очень широк – от космических лучей, гамма-вспышек, радиоизлучения, УФ, до **потоков низкоэнергичных частиц**. Вариации плазменных процессов и э/м излучения –на порядки!

Эти потоки мы видим при солнечных затмениях как **солнечную корону**. Как далеко расширяется корона? Оптические наблюдения помочь не могут, но есть такая практическая вещь как теория.

Солнечный ветер

- Задача о равновесном состоянии нагретого газового шара ($\sim 10^6$ K).

учет гравитации $\dots + \rho \gamma \frac{m_i M_{\odot}}{R}$

Ищем равновесное состояние при $\mathbf{V}(R) = 0$

Если пренебречь изменением гравитации с удалением

$$p = p_0 \exp\left(-\frac{r}{H}\right) \quad \text{где } H = \frac{2T}{m_i g} \quad \text{высота атмосферы}$$

But : $F_g \propto R^{-1}$

решение $p(R) \Rightarrow p(\infty) \neq 0!$

- Проблема со стационарным решением – ненулевое давление на бесконечности?

Решение Паркера – стационарное состояние возможно только при постоянном истечении вещества! Причем это истечение становится сверхзвуковым – **солнечный ветер**.

Мы живем в короне Солнца! фоновый солнечный ветер

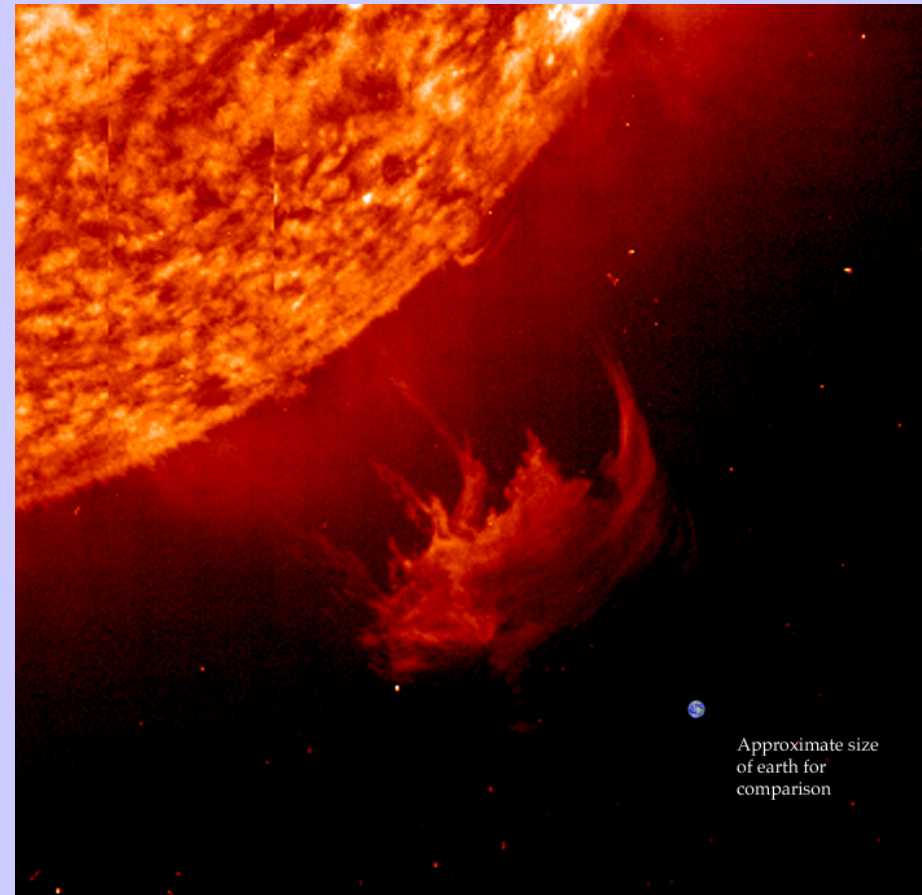
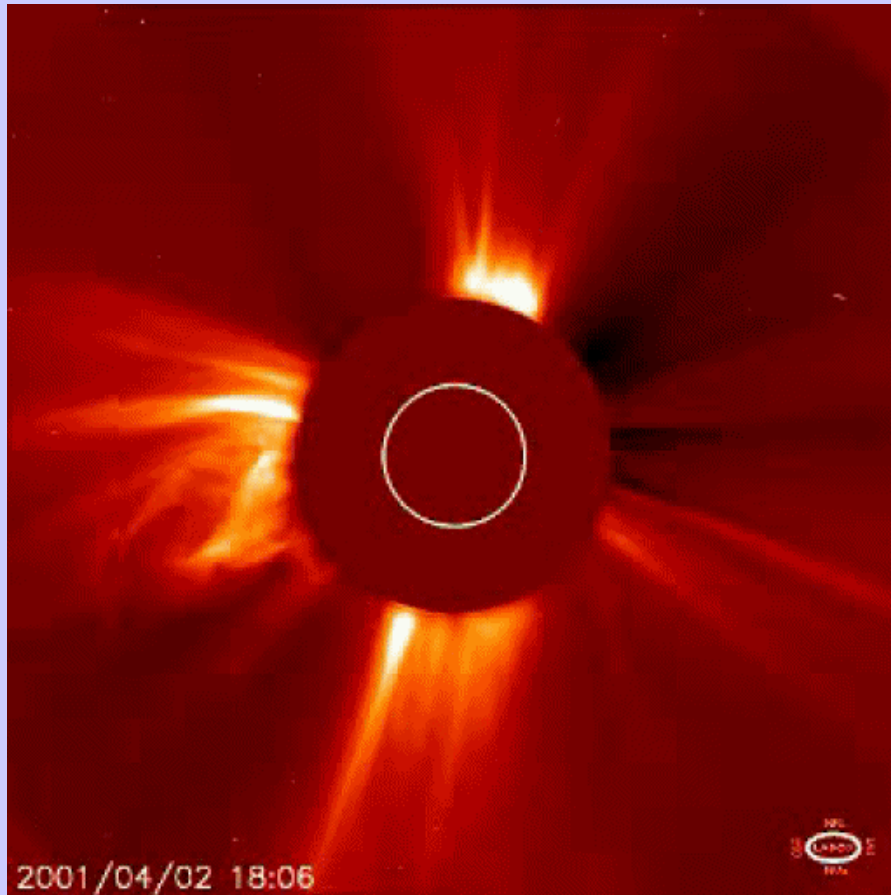
Статья 1958 г в AJ была отвергнута, а сейчас именем Паркера названа космическая миссия к Солнцу.

На фоне постоянного солнечного ветра возникают **высокоскоростные потоки**:

- **корональные дыры** (рекуррентные 27 дневные потоки) – *рекуррентные бури*
- **корональные выбросы массы** (не то же самое, что солнечные вспышки!) – *сильные бури*

10^6 тонн/с

$M=10$ миллиардов тонн $V=1-2$ тыс км/с $W>$ тысячи ядерных бомб



Особенности плазмы солнечного ветра

- бесстолкновительная
- низкоэнергичная с энергией частиц ~сотни эВ
- разреженная $N \sim 10 \text{ см}^{-3}$.
- поток сверхзвуковой $V \sim$ несколько сотен км/м. До Земли такой поток доходит $1 \text{ ае} = 150 \text{ млн. км}$ за 2-3 суток.
- перед облаком плазмы приходит ударная волна (в бесстолкновительной среде?)

Пока не появилось понятие плазмы, понять механизм СЗ связей было невозможно

Что будет когда солнечный ветер достигнет Земли?

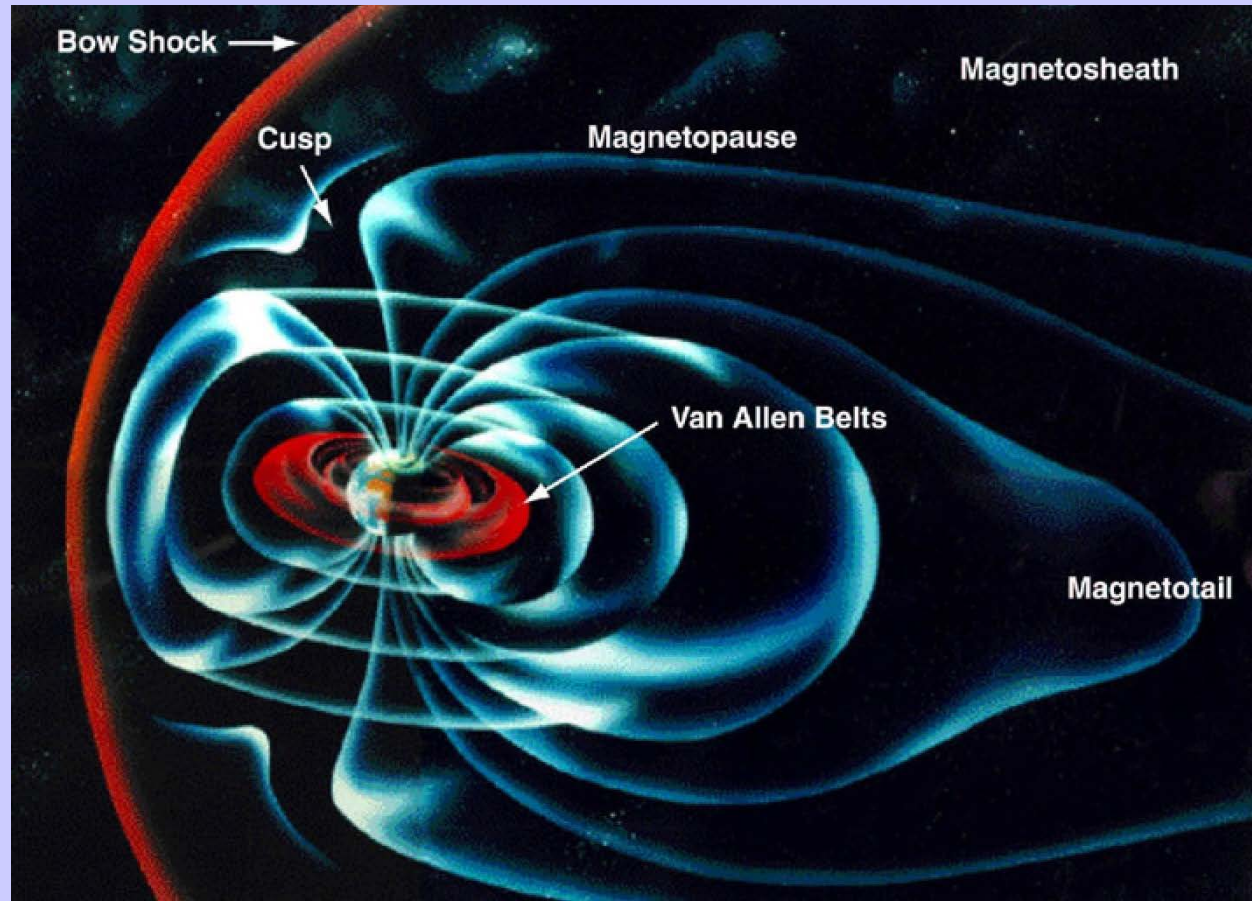
Постепенное сдувание атмосферы, как на Марсе

Почему это не грозит Земле? Магнитное поле!

Гидромагнитное динамо, создающее квази-дипольное поле: $\sim 30\,000$ нТл на экваторе.

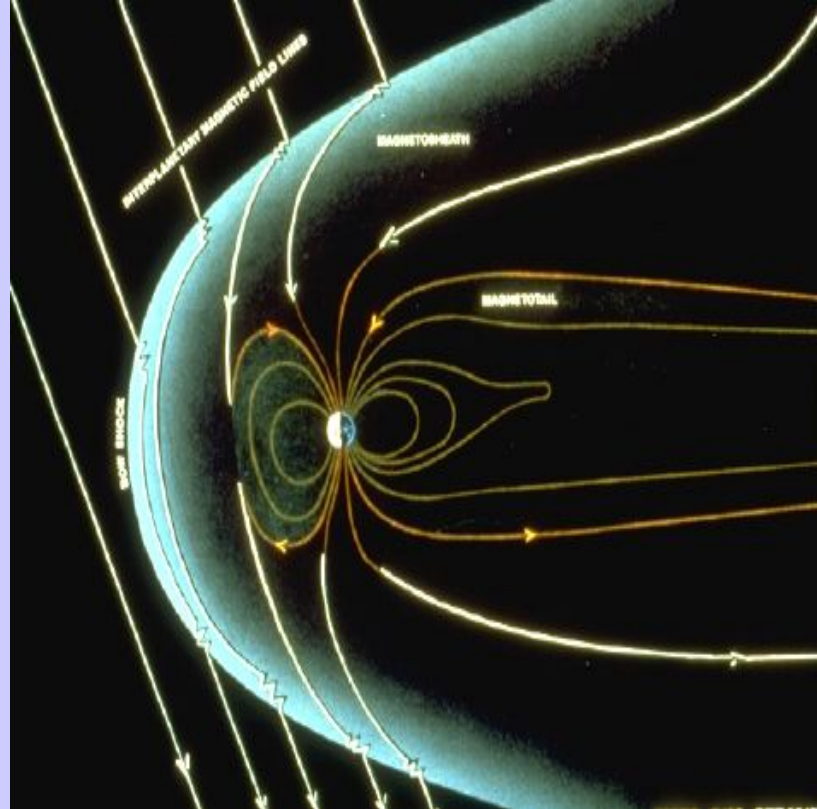
Магнитное поле не проникает в высокопроводящую среду (плазму)

Взаимодействие потока плазмы с
геомагнитным полем –
образование магнитосферы

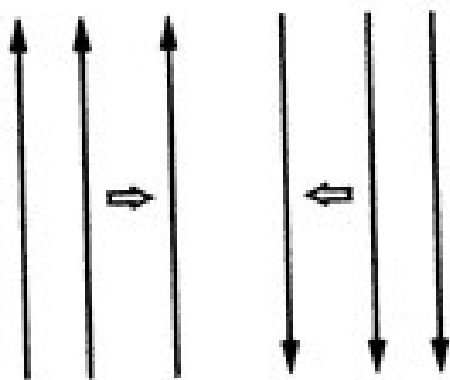


Как энергия потока и ММП может передаться
внутри магнитной полости?

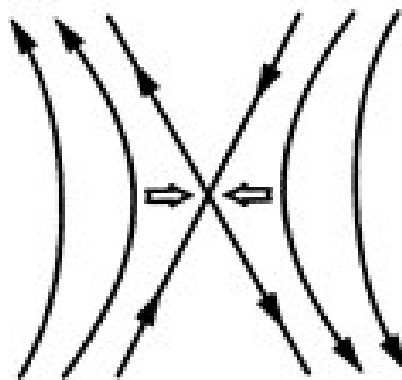
Диффузия? Более быстрый процесс (**открыт
в геофизике!**) – **пересоединение магнитных
полей** (не-МГД процесс!)



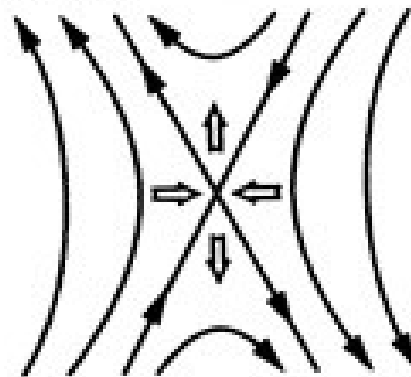
Пересоединение межпланетного и геомагнитного полей



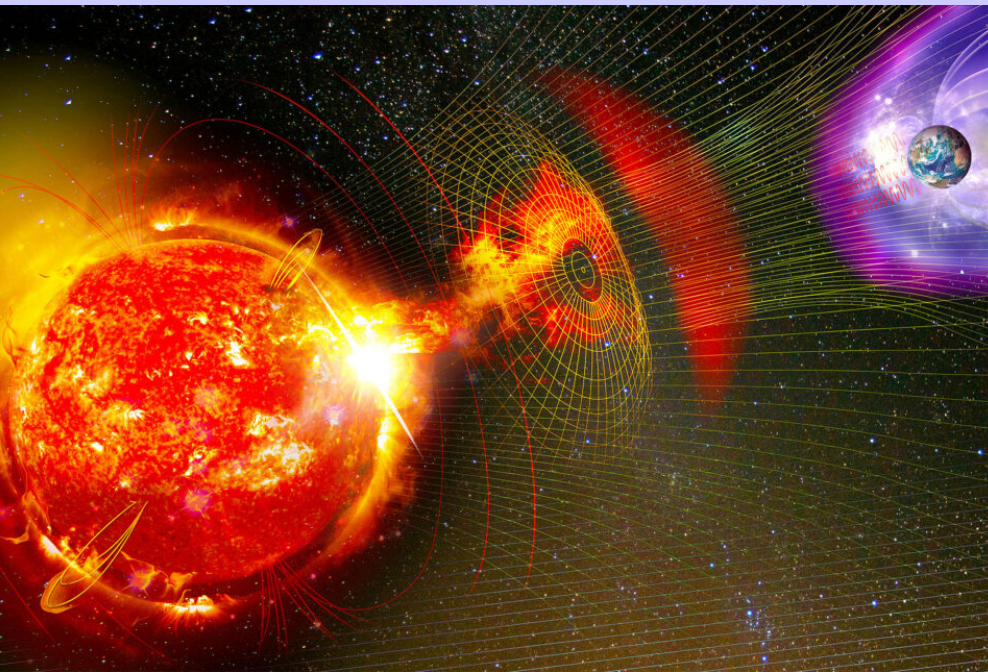
$t < 0$



$t = 0$



$t > 0$

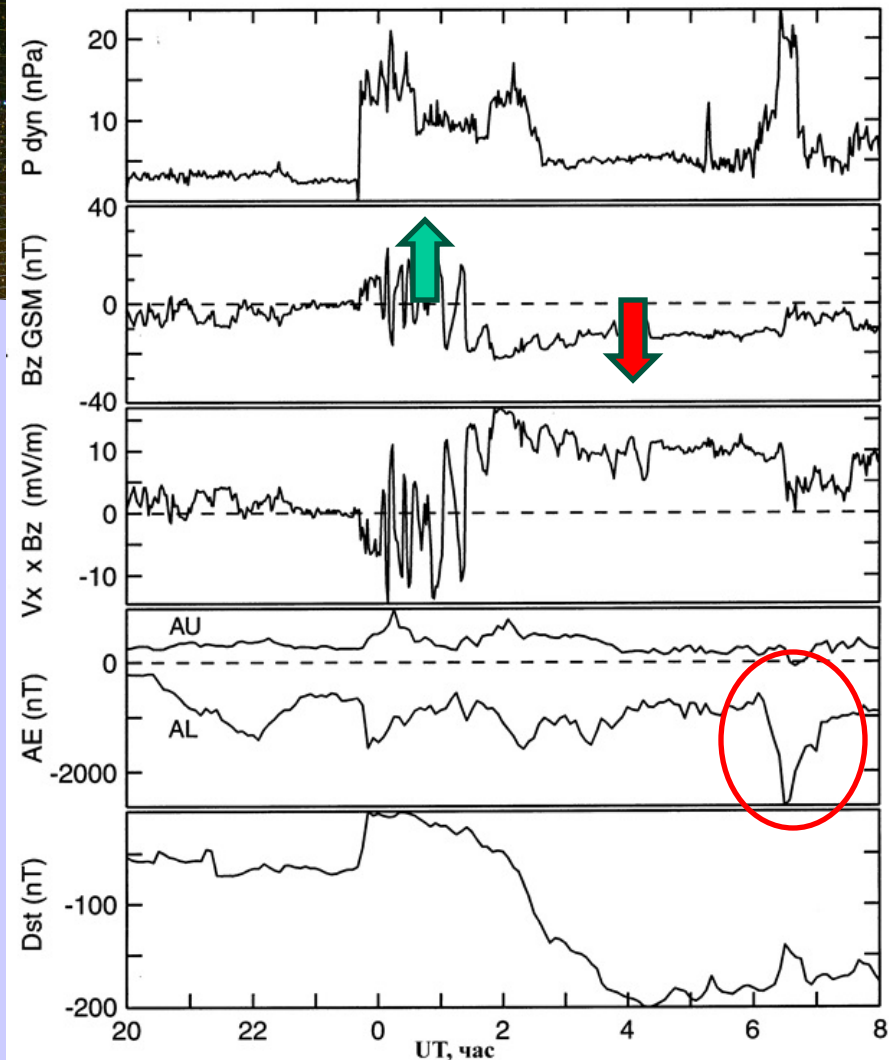


Возмущения СВ – КВМ или
высокоскоростные потоки!
Источник магнитных бурь!

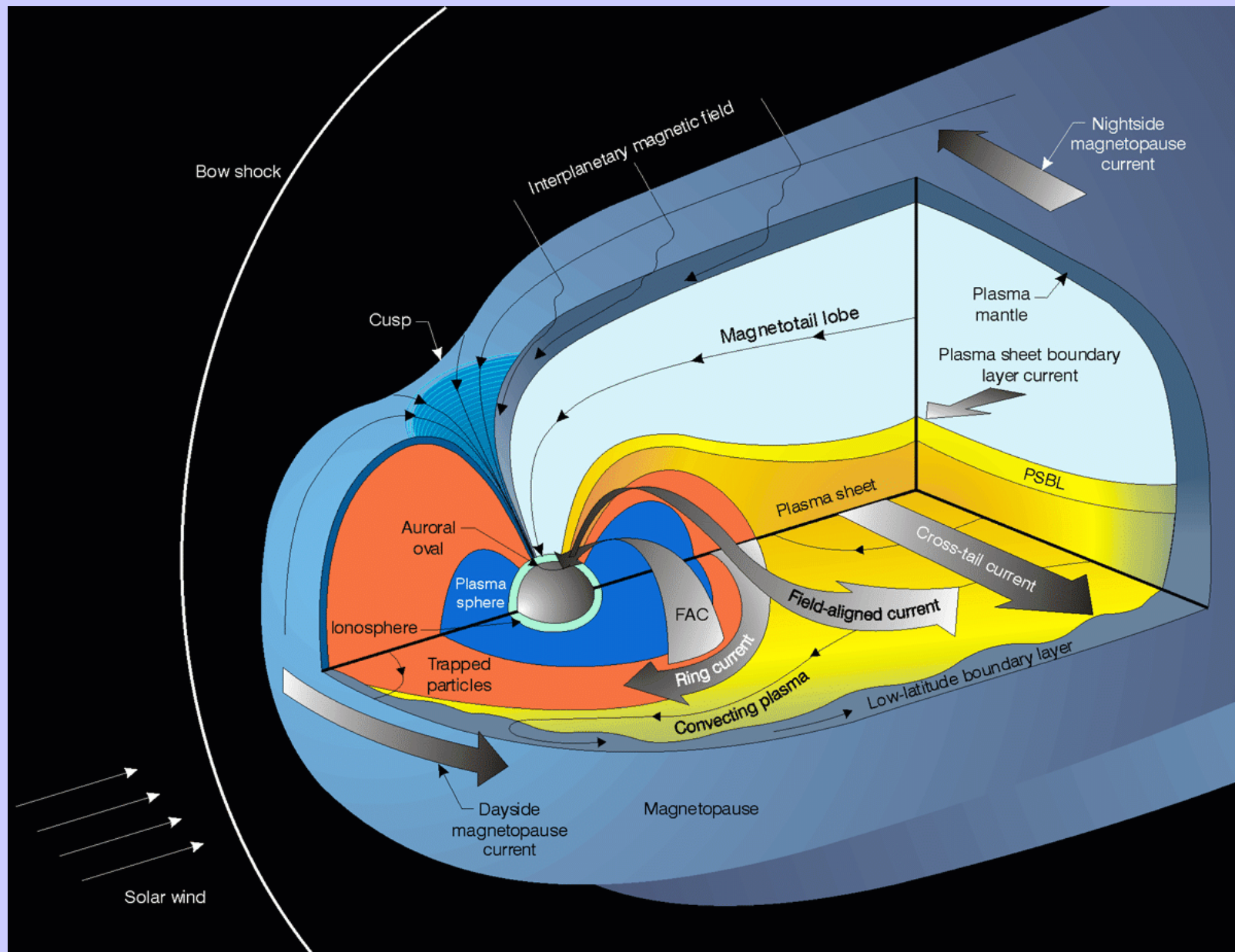
Пример триггерного (транзисторного) поведения
природных систем: Изменение ММП на ~ 10 нТл
вызывает возмущение поля > 2000 нТл на Земле!

при сильной буре в магнитосферу передается
 $\sim$ нескольких тысяч ГВт (сравнимо со всем
энергопотреблением США!)

Как сделать ММП и геомагнитное
поле антипараллельными?



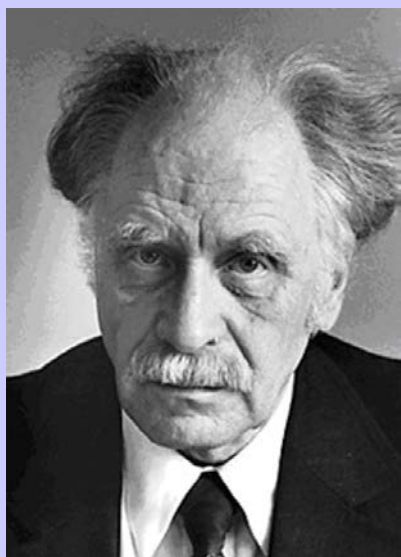
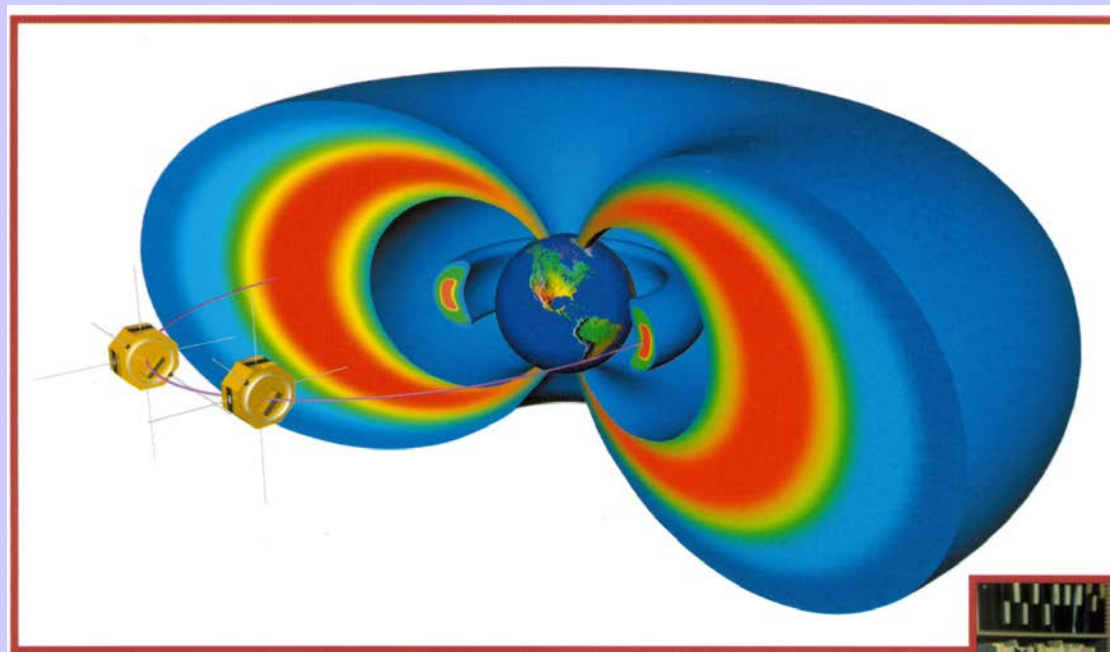
В магнитосфере самосогласованно работает система из генераторов токов, конвекции тепловой плазмы, ускорителей горячих частиц, и возбуждения волн широкого диапазона частот
Вся динамическая система резко усиливается во время магнитных бурь



Магнитосфера как ускоритель и ловушка для захвата и удержания энергичных частиц

До запуска спутников полагали, что в космосе только низкоэнергичная плазма и КЛ, т.к. солнечный ветер – низкоэнергичная плазма.

Оказалось, что космос радиоактивен! Он заполнен высокоэнергичной радиацией!



Радиационные пояса **Ван-Аллена**, открытые **Верновым**

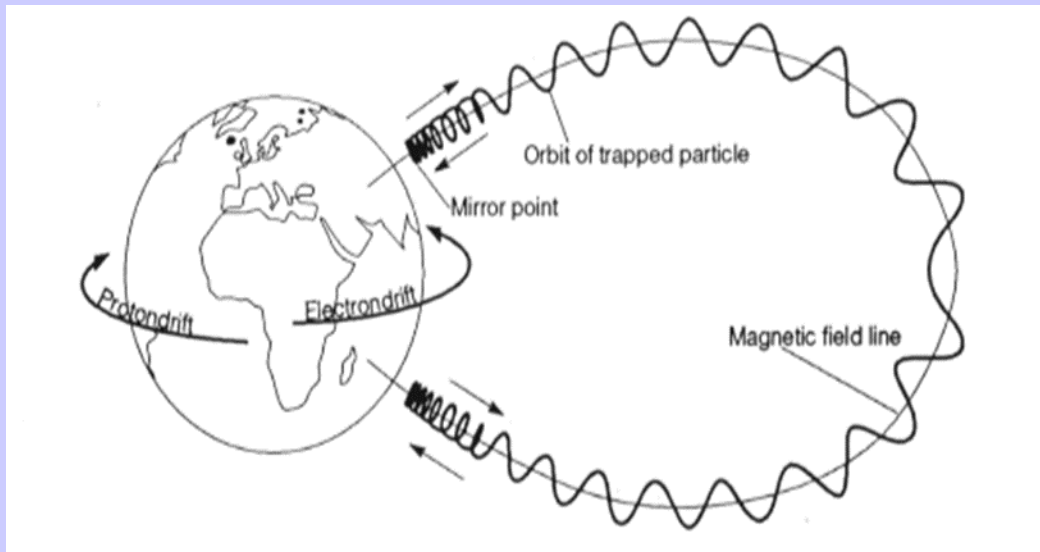


Чтобы понять, как это работает – дрейфовая теория!

Вращение с циклотронной частотой (гирочастота) с Ларморовским радиусом ρ

$$\Omega_{e,i} = \pm \frac{eB}{m}$$

$$\rho_{e,i} = \frac{V_{\perp}}{\Omega_{e,i}}$$

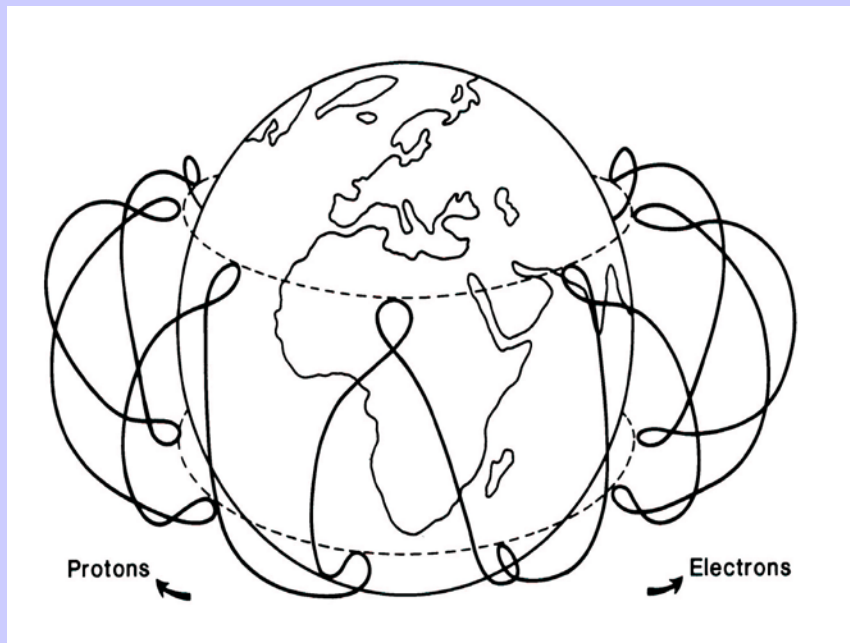


Characteristic times:

$$\tau_c \approx \Omega_i^{-1} \quad (\sim 1\text{s})$$

$$\tau_b \approx \frac{LR_E}{u_i} \quad (\sim 1\text{min})$$

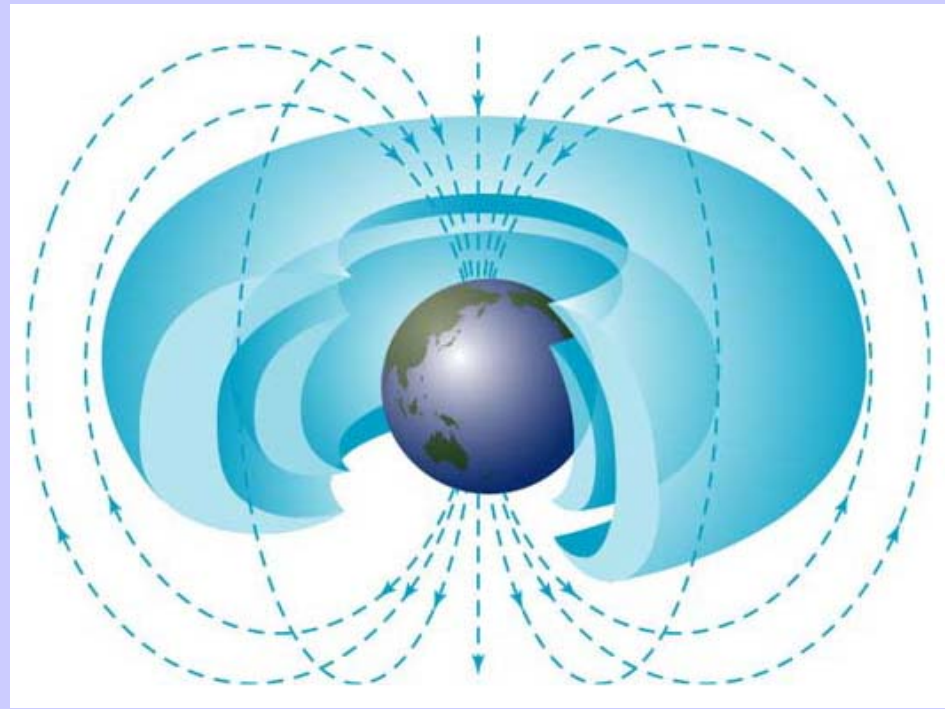
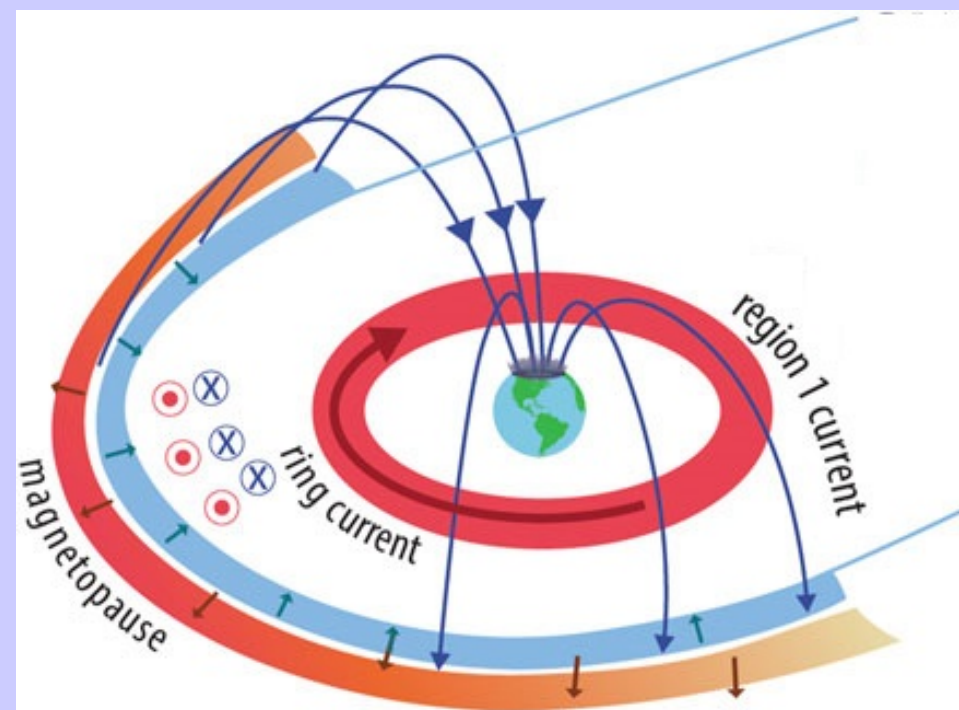
$$\tau_c \approx \frac{2\pi LR_E}{V_M} \quad (\sim 10\text{min})$$



Благодаря периодическим орбитам происходит удержание частиц в магнитной ловушке

При резонансном воздействии происходит высыпание частиц из ловушки, ускорение и радиальная диффузия

Образование кольцевого тока и радиационных поясов



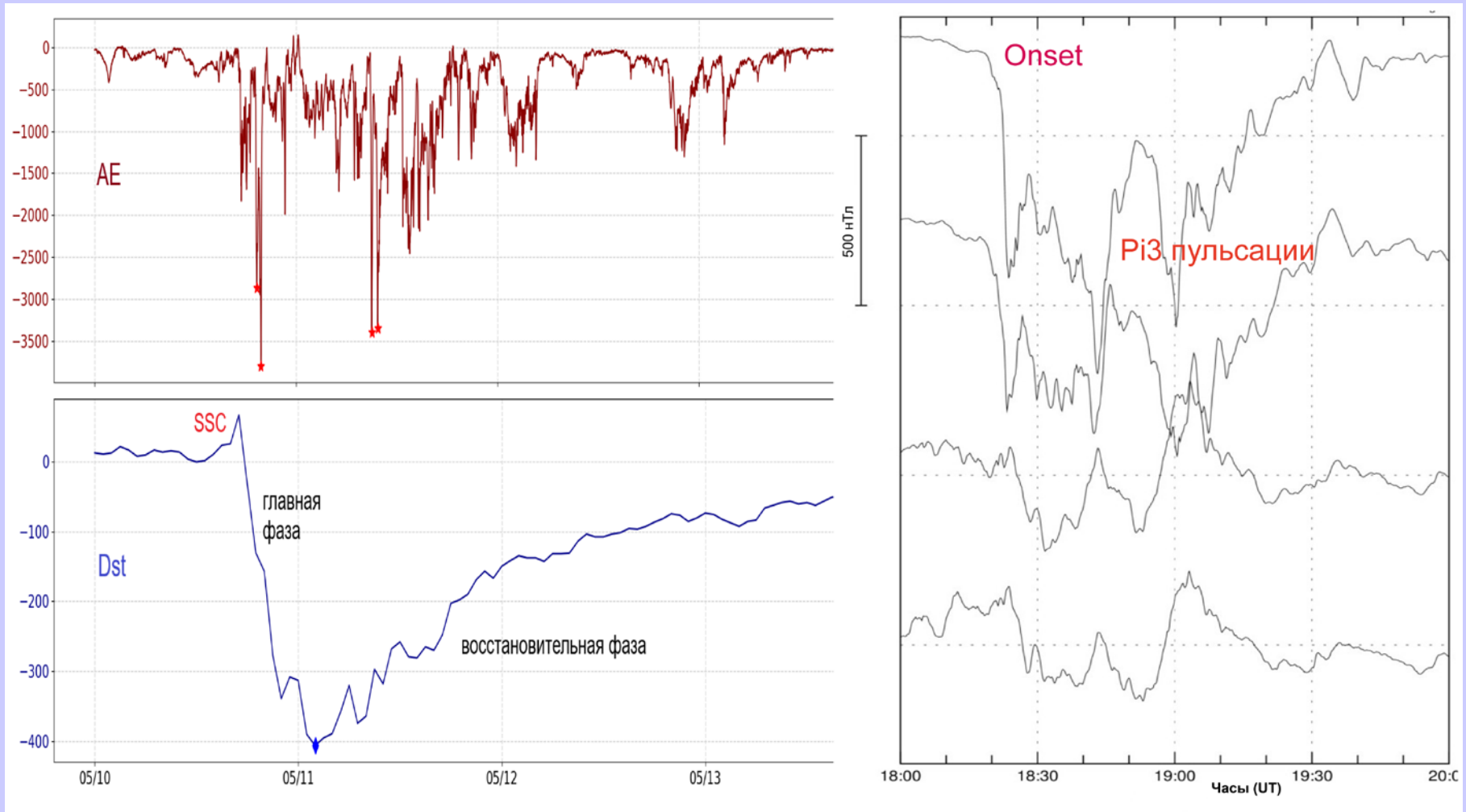
Околоземное пространство – природная ловушка и ускоритель энергичных частиц:

- **внутренний** радиационный пояс – МэВ протоны
- **внешний** радиационный пояс – релятивистские электроны (>0.5 МэВ) – «убийцы» спутниковой электроники
- кольцевой ток во время магнитной бури – энергичные протоны и электроны (десятки-сотни кэВ)

Надо не только удерживать частицы, но и ускорить их до наблюдаемых энергий?

Вопреки термодинамике: перенос энергии к группе электронов вверх по энергетическому спектру, до 4-5 порядков!? При этом сами частицы в разреженной околоземной плазме не сталкиваются.

Магнитные бури и суббури



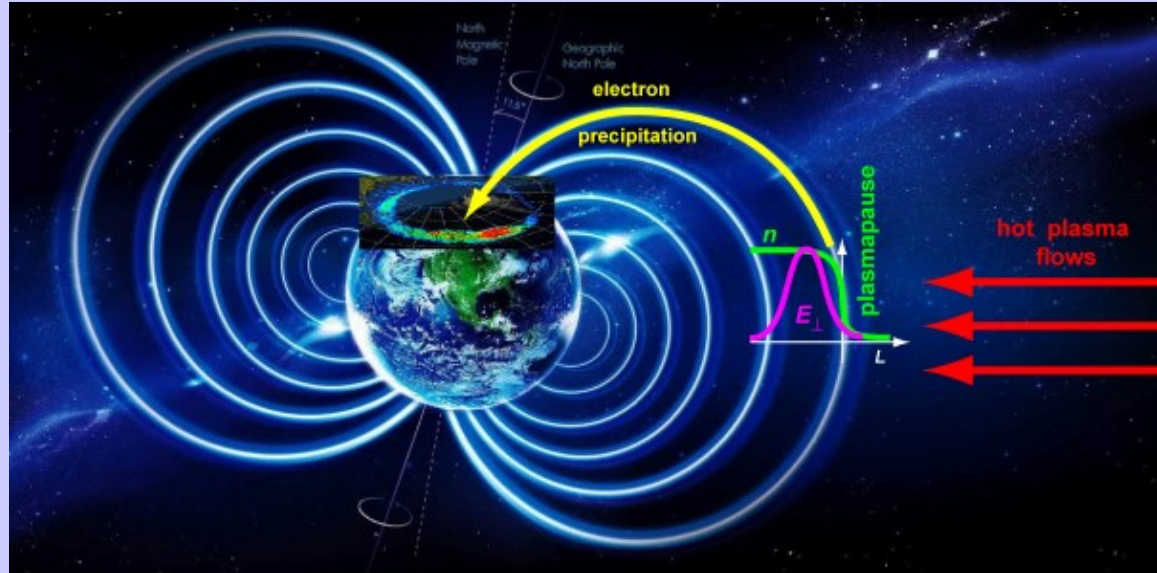
Как измеряется интенсивность бури и суббури? Общепланетарные геомагнитные индексы:

Dst – индекс – магнитное поле, создаваемое кольцевым током

AE-индекс – интенсивность аврорального электроджета

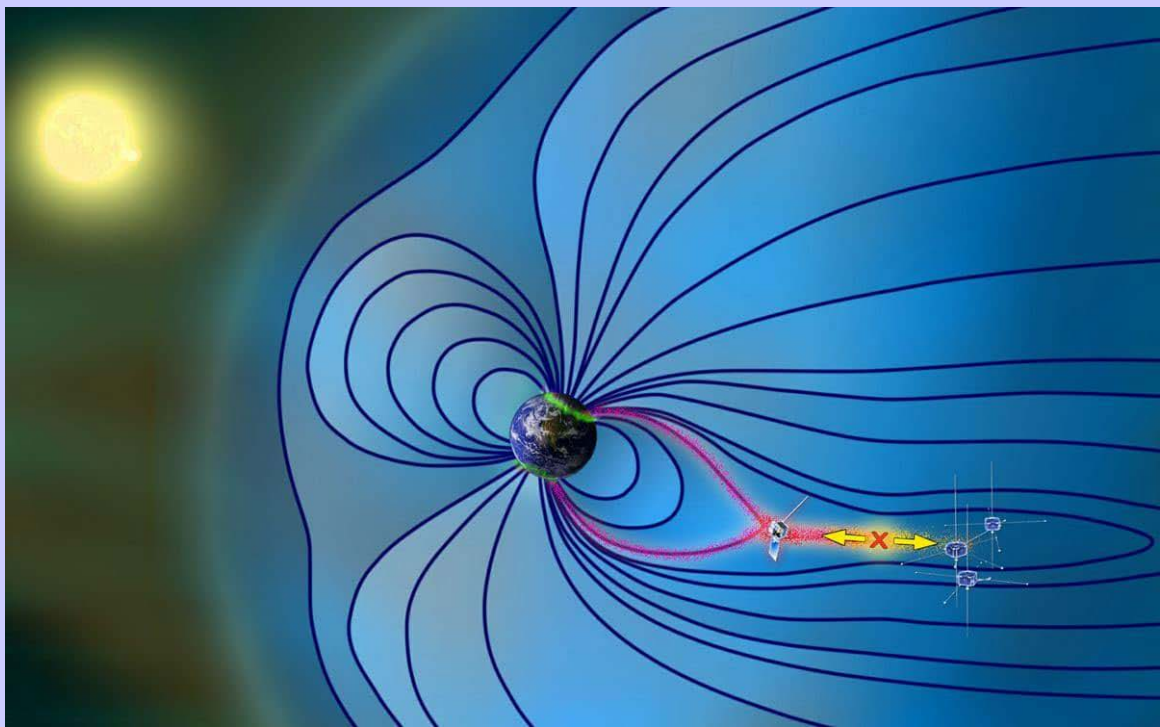
«Космотрясения» - суббури

В отличие от магнитных бурь охватывают только ночной сектор и авроральные широты



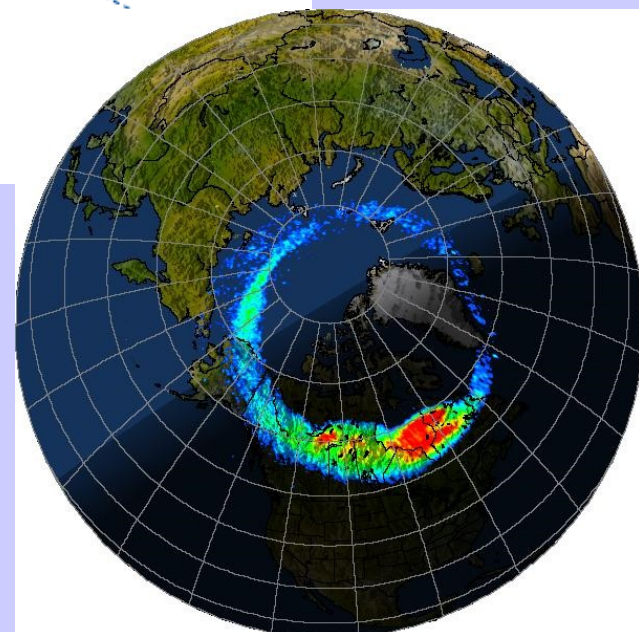
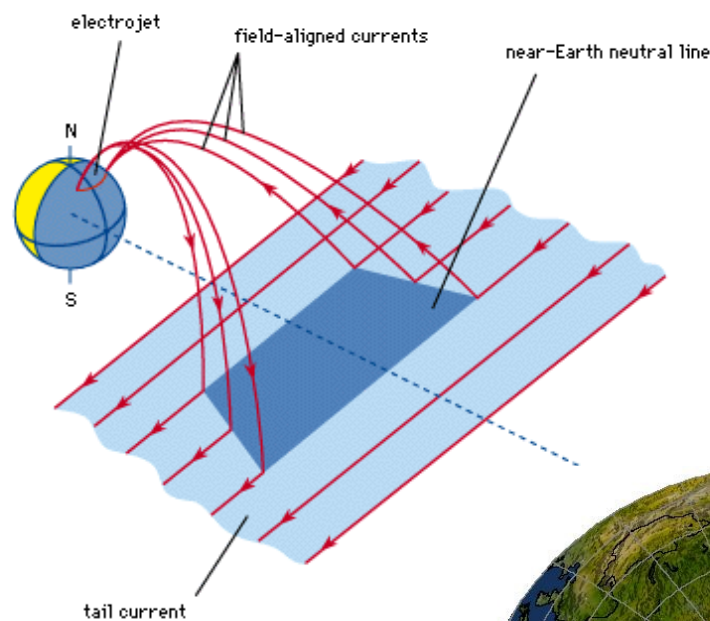
Возможный механизм – пересоединение магнитных полей в хвосте магнитосферы

Удивительная особенность геофизических процессов – накопление и спонтанное взрывное выделение энергии, а не регулярное выделение энергии от внешнего драйвера?





Полярные сияния = работа гигантского ускорителя электронов продольным E в ночной магнитосфере
 Атмосфера как газоразрядная трубка (цвет сияния зависит от энергии)



При мощной суббуре выделяется $\sim 100 \text{ ТВт} \cdot \text{ч}$. Для сравнения потребление электроэнергии во всей РФ $\sim 900 \text{ ТВт} \cdot \text{ч}$.

Как процессы в околоземном пространстве влияют на нашу жизнь?

Только красивые картинки в небе – полярных сияний?

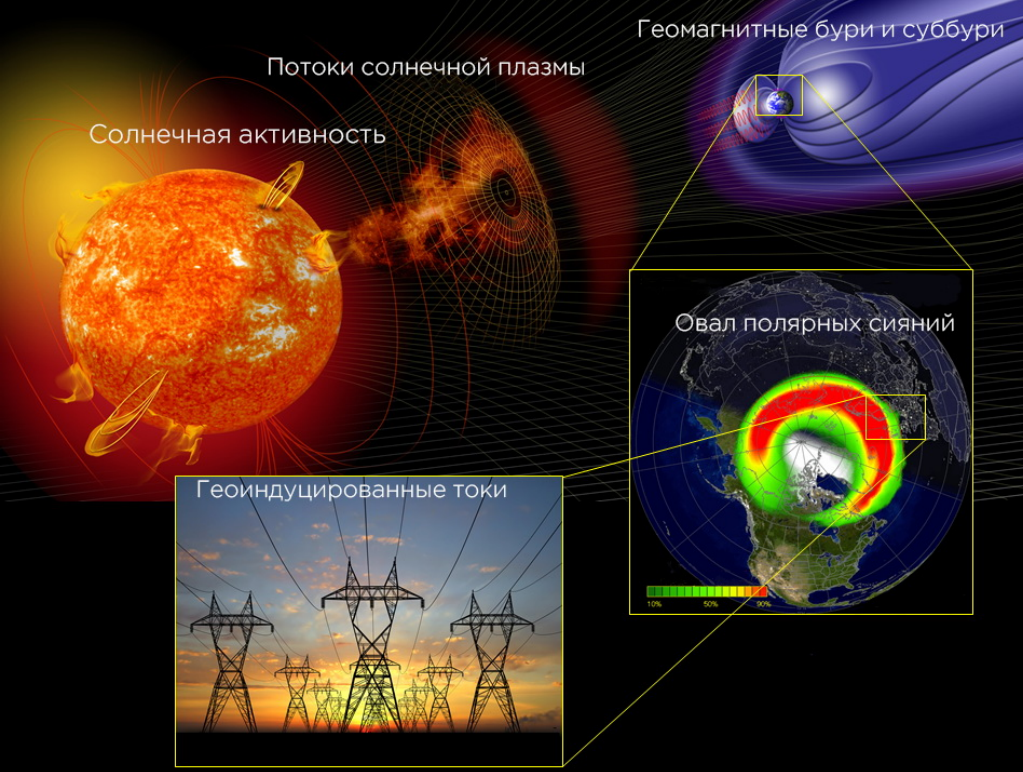
На нас - ??? Вопрос к гелиобиологам!

Серьезная угроза технологическим системам как в космосе:

- Электроны внешнего радиационного пояса - «убийцы» спутниковой электроники. Потоки релятивистских электронов (>0.5 Мэв) возрастают на 2-3 порядка через 1-2 дня после начала магнитной бури и вызывают сбои в БИС, что может приводить к полной потере многотонных КА.
- Высыпания частиц в ионосферу приводят к усилению ионосферных неоднородностей и турбулентности, создающей помехи радарам и радиосвязи, сбои сигналов ГНСС.
- Джоулев нагрев верхней атмосферы авроральными токами (до нескольких миллионов Ампер!) приводит к расширению и увеличению плотности термосферы, что вызывает усиленное торможение спутников. Пример – потеря 40 спутников STARLINK

Уязвимость технологических систем воздействию космической погоды



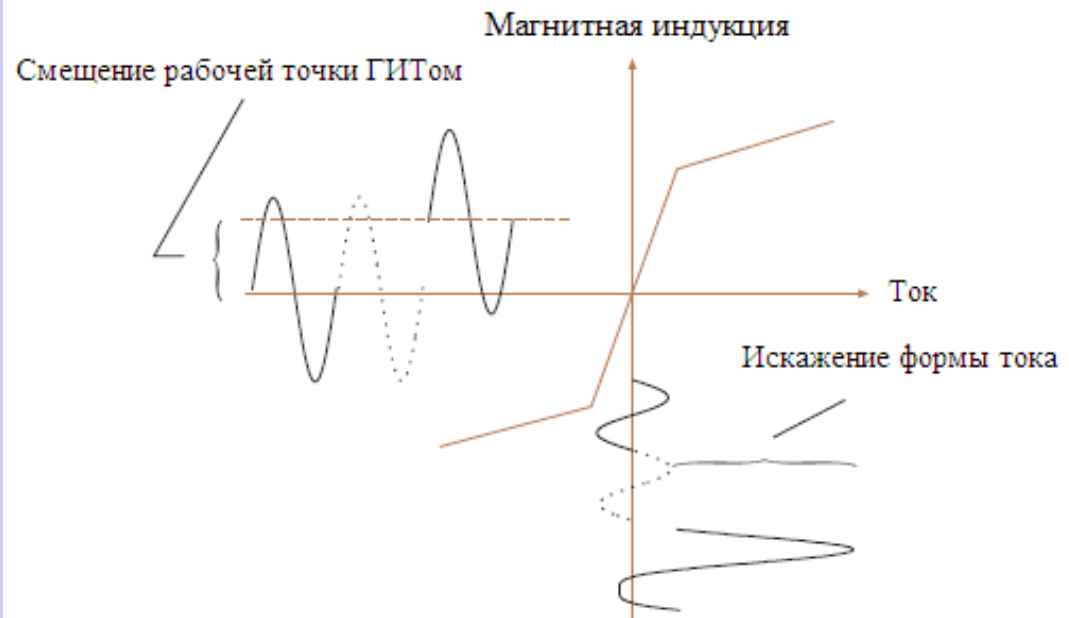


Геоиндуцированные токи (ГИТ) - **Geomagnetically Induced Currents**, индуцируемые в проводящих заземленных технологических системах при резких изменениях геомагнитного поля, опасны для:

- ЛЭП (особенно высоковольтные и низко-резистивные)
- протяженных трубопроводов
- железнодорожного сигнального оборудования



Почему трансформаторы
так чувствительны к ГИТ?

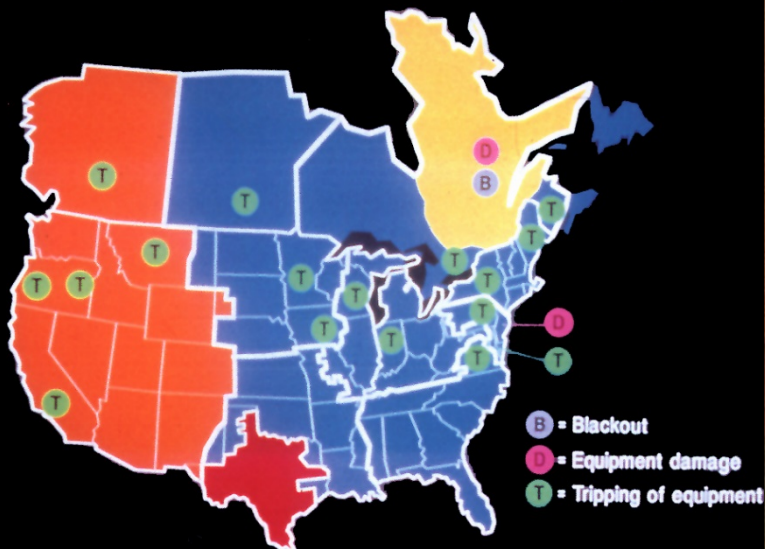


Geomagnetic Storm Effects March 1989

Hydro Quebec Loses Electric Power for 9 Hours



POWER SYSTEM EVENTS DUE TO SMD MARCH 13, 1989



Transformer Damage

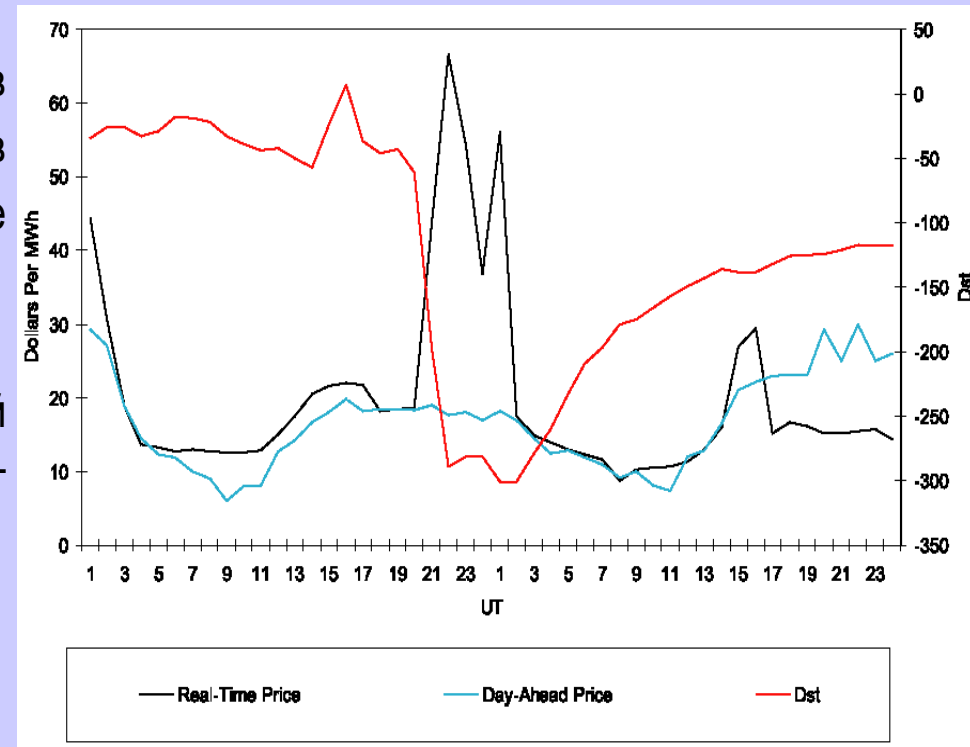
Экономические эффекты ГИТ

Не обязательно требуются катастрофические сбои для того, чтобы оказать ощутимое экономическое влияние на оптовые рынки электроэнергии. Даже при отсутствии повреждений трансформаторов ГИТ вызывают их насыщение, рост потерь, перегрузки при передаче электроэнергии. При этом лимит на передачу энергии невольно понижается операторами электрической сети.

Недостаток энергии на 20% в сети PJM (США) привел к повышению цен почти в 4 раза. Только за 1,5 года экономическое влияние космической погоды на энергетику США составило 0.5 миллиарда \$.

Самая мощная буря с $|Dst| \sim 960$ нТл, произошла в 1859 г. и неизбежно, что подобное событие в конце концов произойдет. Вероятность в течение следующего десятилетия $\sim 12\%$

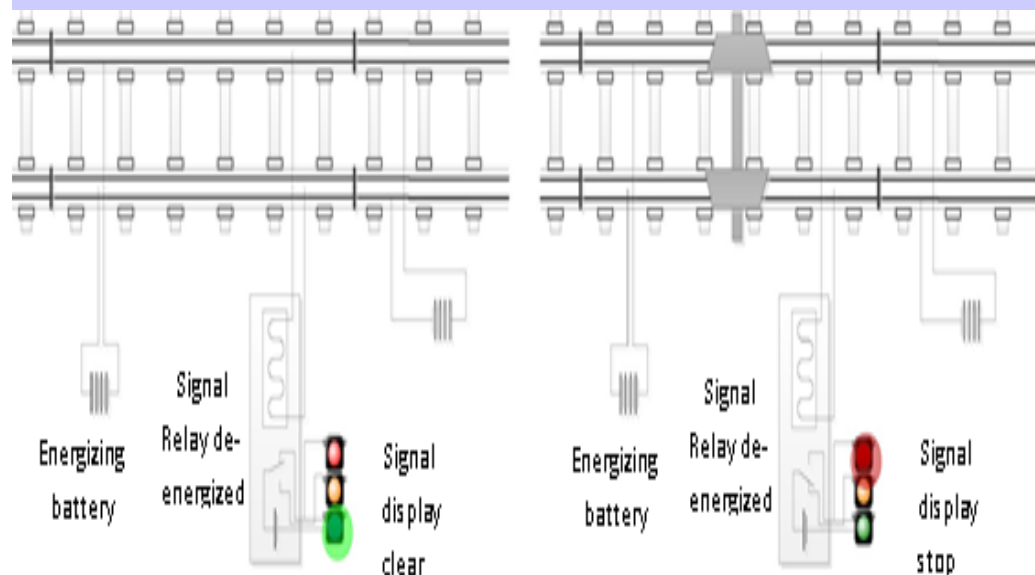
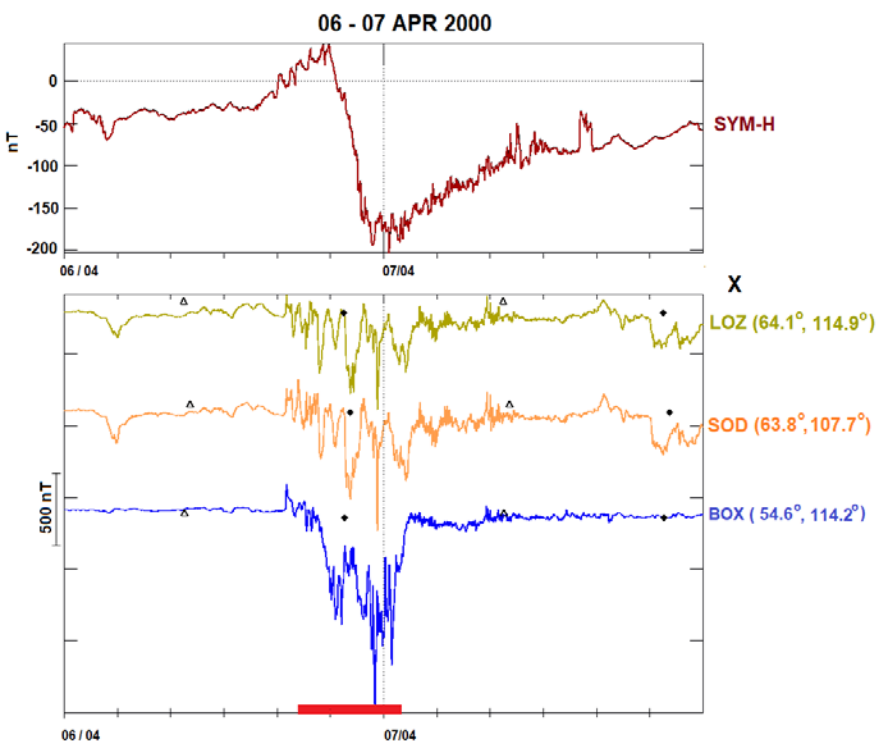
Ежедневный потерянный ВВП США при такой буре, охватывающей широты $50 \pm 7,75^\circ$, приведет к экономическим потерям >40 млрд \$.





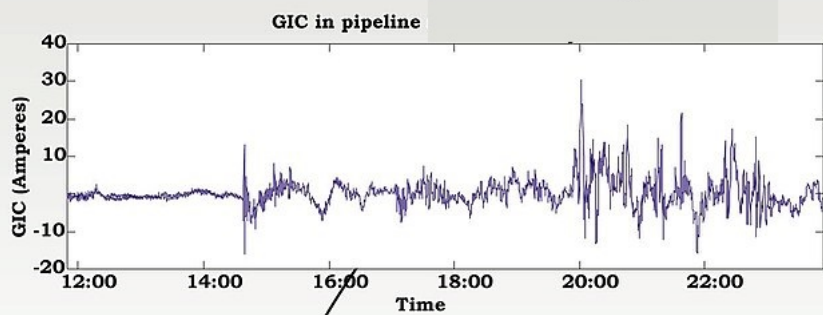
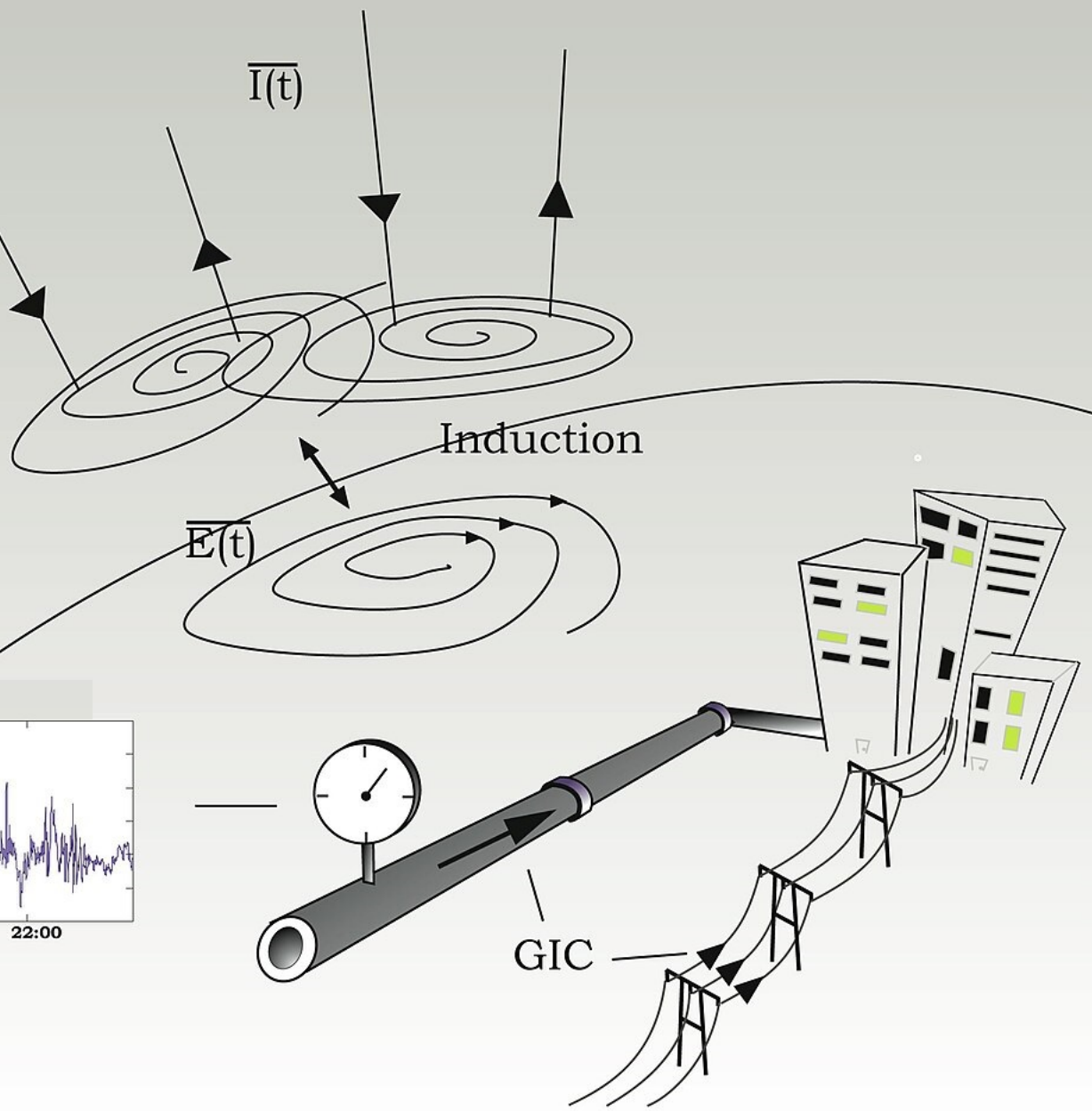
Сбои в работе ж-д сигнализации во время сильных магнитных бурь

Воздействие теллурических полей на рельсовую автоматику приводит к хаотическому чередованию запрещающего и разрешающего сигналов семафора на Северной ж.д. Работа участка оказывается парализованной.



Нарушения в работе системы катодной защиты трубопроводов

Для предотвращения электрокоррозии трубопроводы поддерживаются под отрицательным потенциалом ~ 1 В относительно Земли. Под действием ГИТ катодная защита искажается, что резко увеличивает скорость коррозии и приводит к сокращению срока эксплуатации трубопровода.



Какие вариации геомагнитного поля создают наибольшие ГИТ?

Наибольшие магнитные возмущения вызываются авроральным электроджетом, создающим во время бури/суббури магнитные возмущения ΔB в С-Ю направлении. Однако в быстрые изменения поля dB/dt , вызывающие ГИТ, основной вклад вносят мелкомасштабные структуры:

- дневные внезапные импульсы
- взрывное начало суббури,
- геомагнитные пульсации типа P_i3
- волны P_c5.

Энергия таких импульсных или периодических возмущений много ниже, чем энергия бури/суббури, однако быстро меняющиеся поля таких возмущений могут вызывать всплески ГИТ значительной величины.



Межпланетные ударные волны (SSC)

Внезапное начало бури (storm sudden commencement, SSC) - предвестник магнитной бури.

Проявляется как резкий скачок геомагнитного поля, который может вызывать всплеск ГИТ до нескольких десятков Ампер. Хотя возмущение, связанное с SSC, мало по сравнению с возмущением во время бури/суббури, величина dB/dt может быть достаточно большой, чтобы индуцировать опасные ГИТ.

Пример: разрушение трансформатора энергосистемы Новой Зеландии совпало с SSC.

Для операторов ЛЭП SSC проявляется как короткое замыкание в линии.

Взрывное начало суббури (onset)

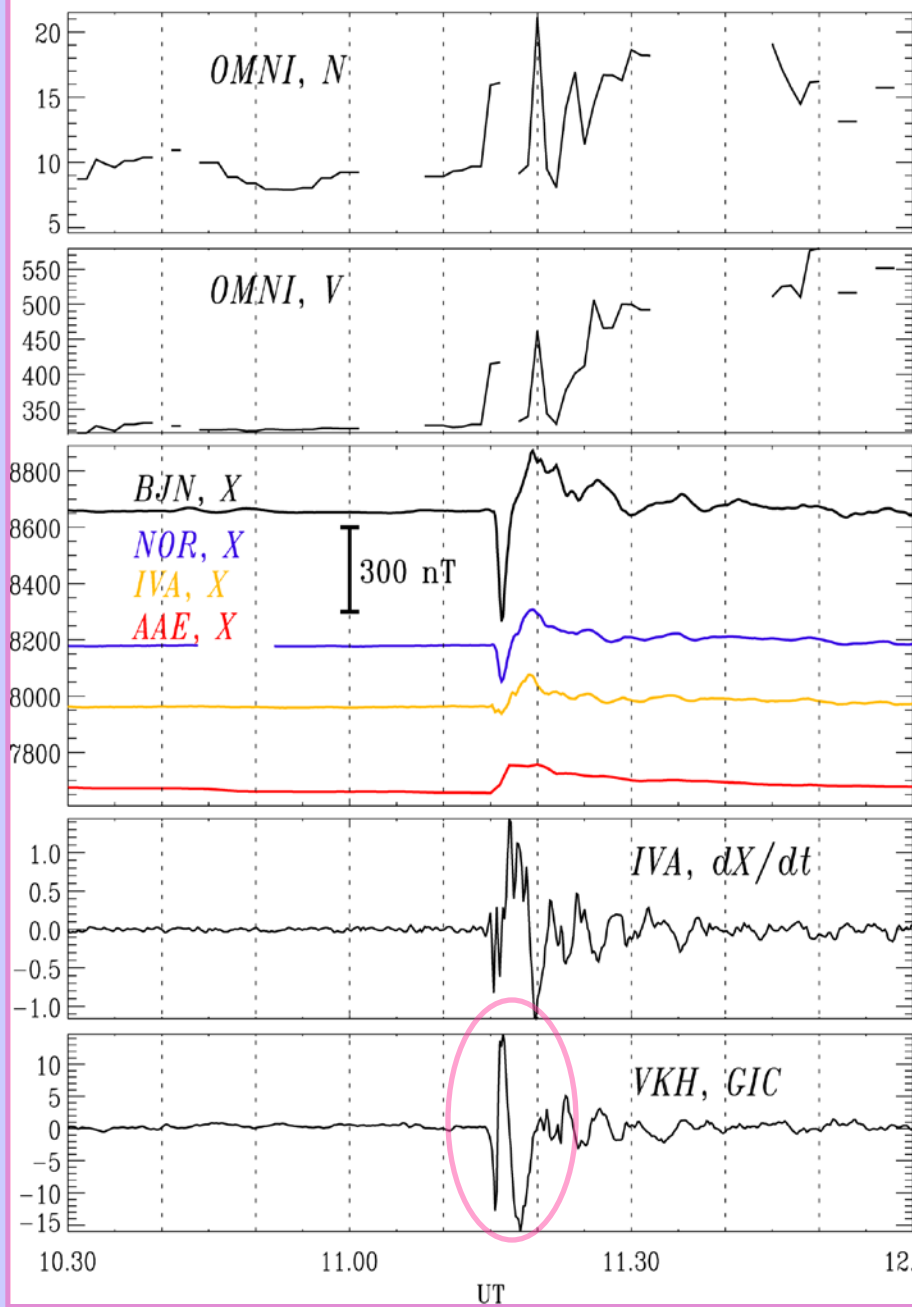
Начало суббури и выделение накопленной энергии происходит взрывным образом. Основная энергия выделяется при пересоединении в глубине хвоста ($>20 R_E$), но затравочное возмущение возникает относительно близко от Земли $\sim 6-8 R_E$. Взрывное начало суббури проявляется в виде резкого падения AL индекса и C-Ю компоненты поля авроральных станций.

Механизм взрывной неустойчивости, ответственный за развитие суббури, надежно не установлен.

Большое dB/dt вызывает всплеск ГИТ до нескольких десятков Ампер, к счастью кратковременный.

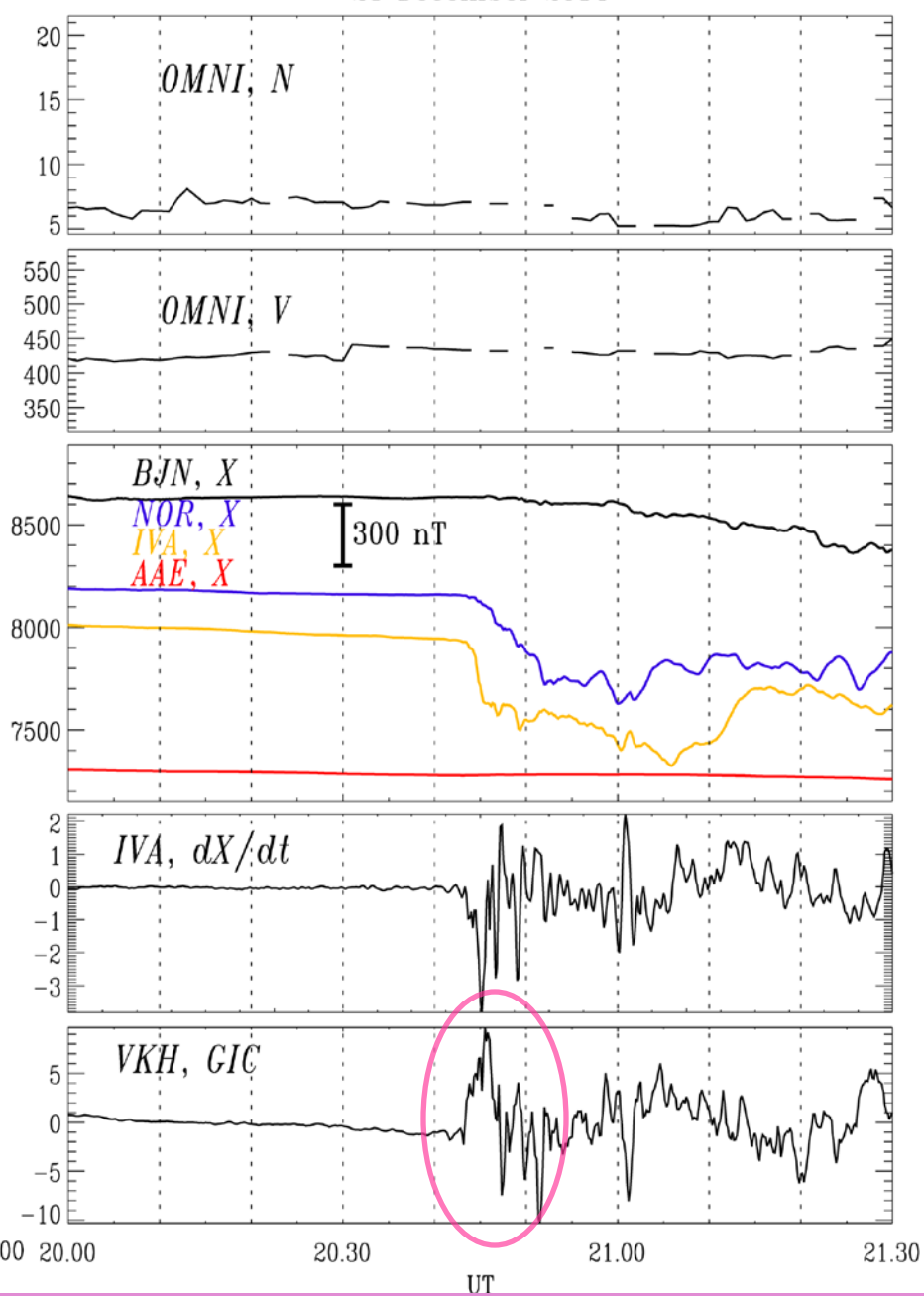
SSC

23 December 2014



onset

23 December 2014

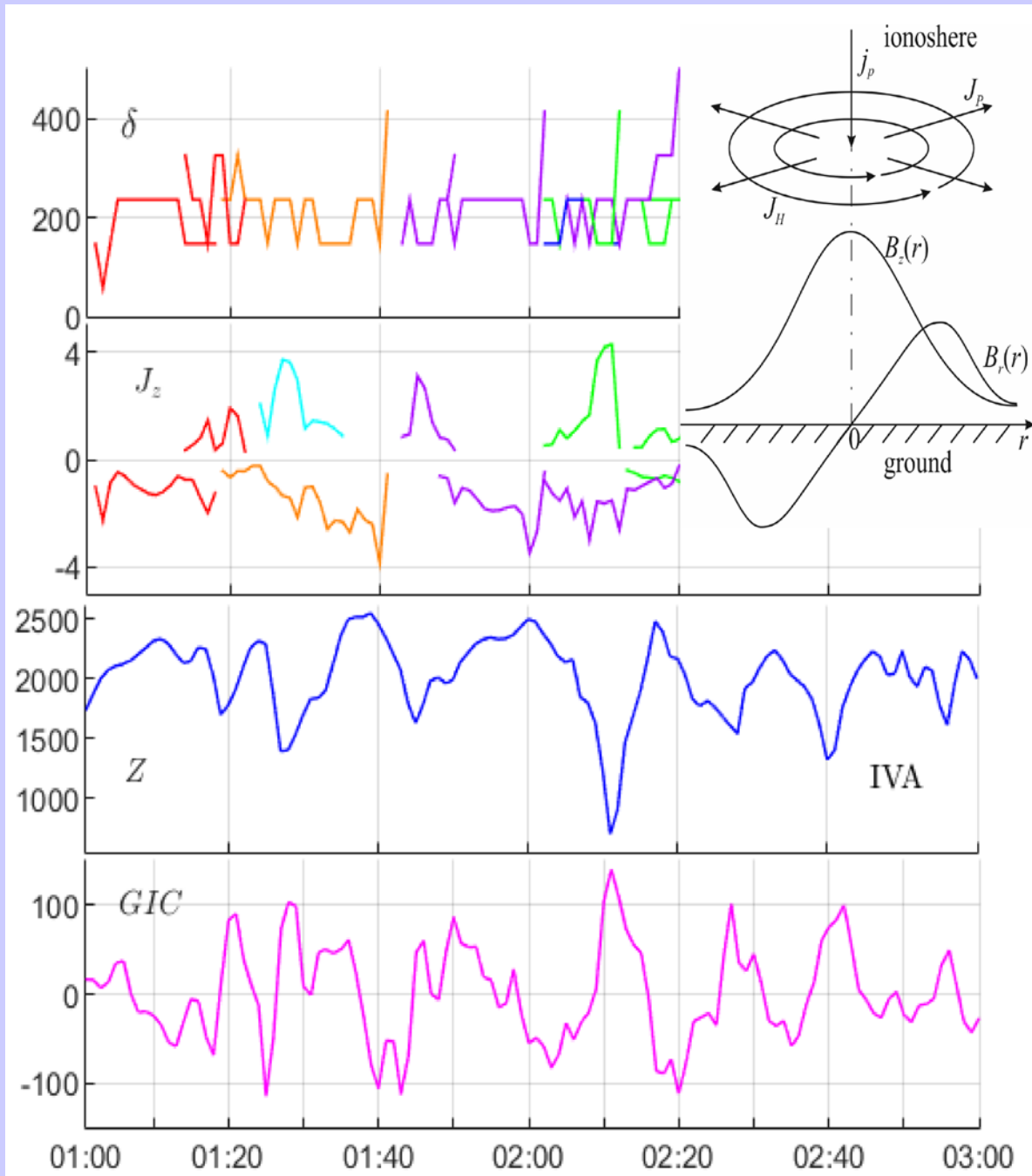


Тонкая структура суббури: P_i3 пульсации

P_i3 пульсации после взрывной фазы суббури – квазипериодические 5-20 мин импульсы. Благодаря крутым фронтам dB/dt до ~ 20 нТл/с.

Эти локализованные возмущения можно представлять как «космические торнадо»

Экстремальные всплески ГИТ (>100 А) в ЛЭП однозначно связаны с серией «косм. торнадо» – локализованных ($\rho \sim 250$ км) ионосферных вихрей, поддерживаемых струями продольных токов поперечного направления ~ 5 А/км².



Альвеновские Pc5 волны

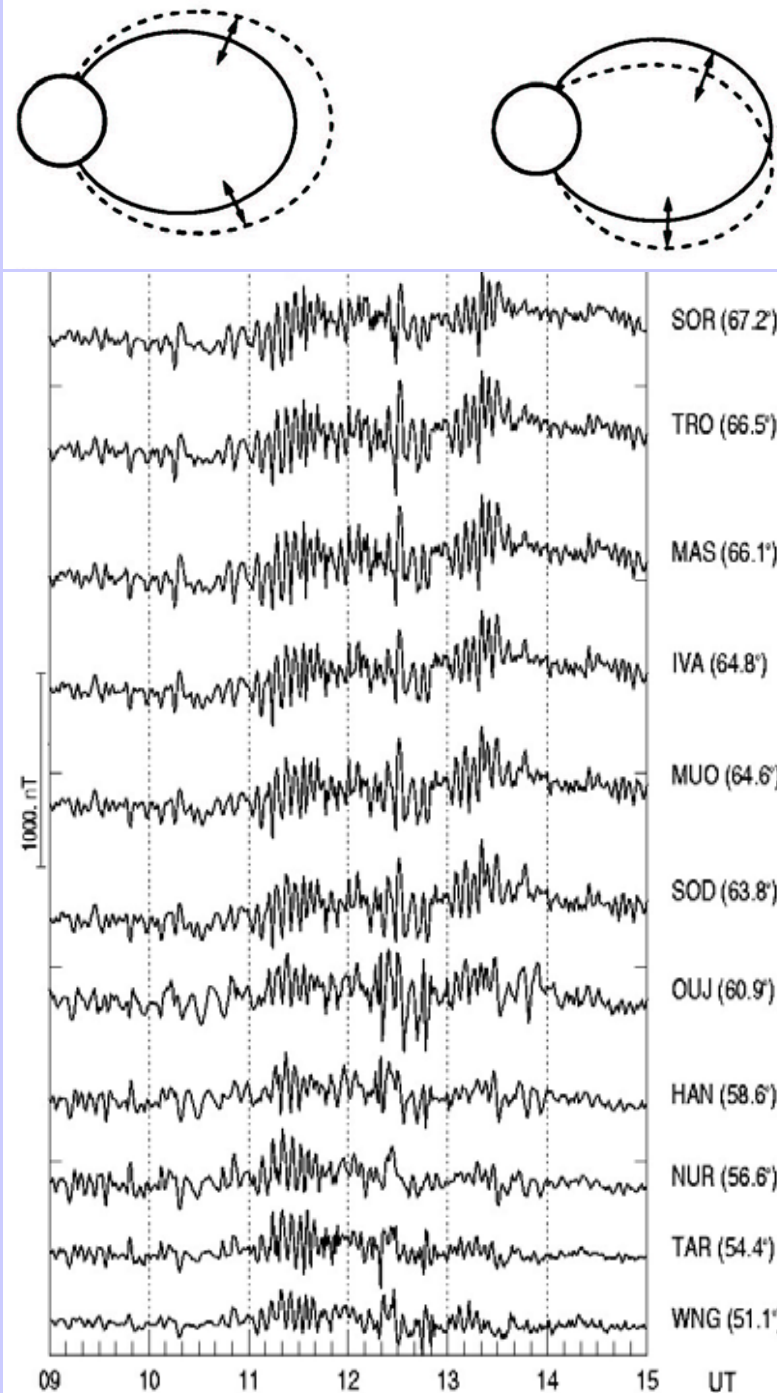
Монохроматические пульсации Pc5 ($T \sim 3-5$ мин) длительностью до нескольких часов являются наземным откликом на резонансные альвеновские колебания в магнитосферном резонаторе, образованном силовыми линиями между сопряженными ионосферами.

Геофизики, зарегистрировавшие геомагнитные пульсации, первые из человечества обнаружили э/м волны!

За создание МГД, предсказавшей альвеновские волны, Альвен получил Нобелевскую премию!

Идея альвеновского резонанса вначале возникла в геофизике, а затем начала применяться для альвеновского нагрева плазмы

Благодаря высокой вариабельности поля величина ГИТ достигает ~ 12 А. Длительные ГИТ умеренной интенсивности, вызванные Pc5 пульсациями, могут быть даже более опасными для долговременной эксплуатации сетей, чем кратковременные всплески ГИТ во время начал суббурь или SSC!



В чем задача прогноза ГИТ?

Как именно события на Солнце приводят к появлению интенсивных ГИТ - остается нерешенной проблемой. Необходимая для оценки влияния геомагнитной активности на технологические системы прогнозная модель должна описывать не только динамику крупномасштабной магнитосферно-ионосферной системы, но и уровень спорадически возникающих быстропеременных локализованных продольных токов.

На языке метеорологов задача стоит не только в том, чтобы предсказать наступление космической «непогоды», но и оценить вероятность появления космических «торнадо».

Даже сверхсложная (более миллиона операторов) глобальная компьютерная модель Space Weather Modeling Framework для расчета отклика околоземного пространства на возмущения параметров межпланетного пространства, которая используется для оперативного прогноза в Центре космической погоды NOAA, не может предсказать вариабельность магнитного поля dB/dt !

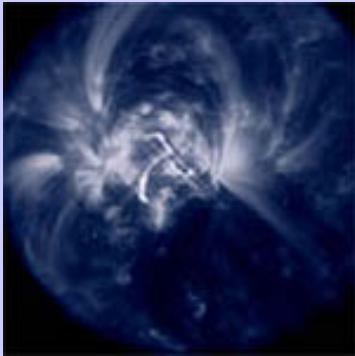


Должны ли военные знать о космической погоде?

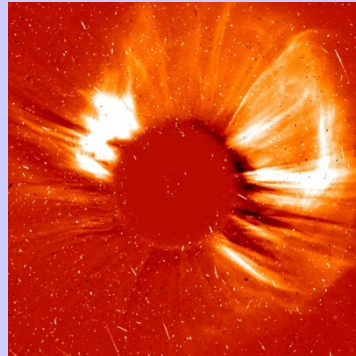
- В мае 1967 г. радары NORAD предупреждения о ракетном нападении начали испытывать сильные помехи, которые были восприняты командованием США как попытка глушения системы перед ядерным ударом. Ядерные силы США были приведены к наивысшему уровню готовности «дельта». К счастью для человечества, в аэрокосмических войсках США начали внедряться системы слежения за Солнцем и космической погодой, которые сообщили о двух сверхсильных вспышках на Солнце и начале сильной магнитной бури ($|Dst| \sim 387$ нТл). Мощность радиоизлучения Солнца была необычайно высокой, что и вызвало сильные помехи в системе NORAD.
- Во время маневров NATO United Trident в Балтийском море 2018 г. были отмечены нарушения работы ГНСС GPS - погрешность позиционирования увеличилась почти на два порядка! Эти нарушения в приеме навигационных сигналов совпали с магнитной бурей.
- Во время войны во Вьетнаме ВМФ США попытался организовать морскую блокаду, установив цепь магнитных мин. Однако, произошел несанкционированный подрыв большинства мин, причину которого не удалось установить. Только недавно космофизики установили, что срабатывание мин было вызвано мощной магнитной бурей.
- Применение средств, способных тайно вывести из строя системы электроснабжения и связи целой страны, является весьма заманчивым, если его провести под прикрытием магнитной бури. Например, при высотных (40-450 км) ядерных взрывах обнаружено возникновение э/м импульса (ЭМИ) с поражающим действием на электронную аппаратуру за тысячи км от эпицентра, и сейчас ведутся работы над созданием сверхмощных направленных источников ЭМИ неядерного типа.

Нерешенная задача: проследить космическую погоду "from cradle to grave"

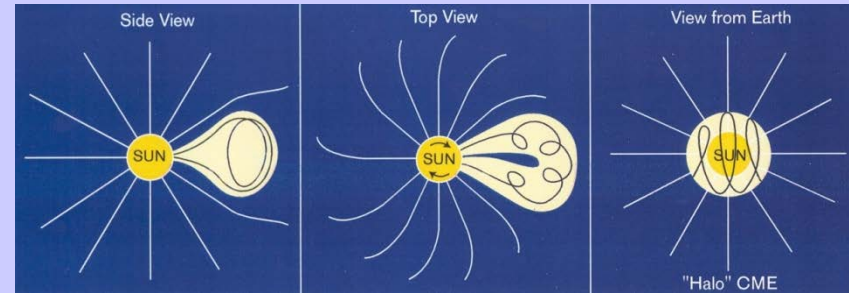
Космическая погода = не просто инженерное приложение, а большая фундаментальная проблема



Ejecta from Sun



Extension into Space



Coronal Mass Ejections

CIHA <https://www.swpc.noaa.gov>

РФ

Human Technology
Consequences

Magnetospheric Interactions

Radiation Belt Enhancement

