



РНФ
Российский
научный фонд



Влияние возмущений космической погоды на технологические системы в высоких широтах

Ягова Надежда

ИФЗ РАН, Москва, Россия, nyagova@ifz.ru

ГЦ РАН, Москва, Россия

Аннотация

- Солнце является источником электромагнитного излучения в широком диапазоне частот. Огромные пространственные масштабы в космосе приводят к тому, что сугубо статические в лабораторных условиях поля проявляют волновые свойства, а глубокий вакуум ($n \approx 1-10 \text{ см}^{-3}$) – свойства сплошной среды. Слабые и медленные изменения магнитного поля порядка нТл/мин вне магнитосферы, возрастают с уменьшением расстояния до Земли. Хотя эти вариации по-прежнему на много порядков меньше обычных в электротехнике полей, они вызывают опасные для бортовой электроники возрастания потоков заряженных частиц и наведение геоиндуцированных токов в протяженных проводниках. Так как эти эффекты практически не известны специалистам «наземных» специальностей, вызываемые ими аварийные ситуации не изучаются и технологические решения принимаются без учета связанных с космической погодой рисков.

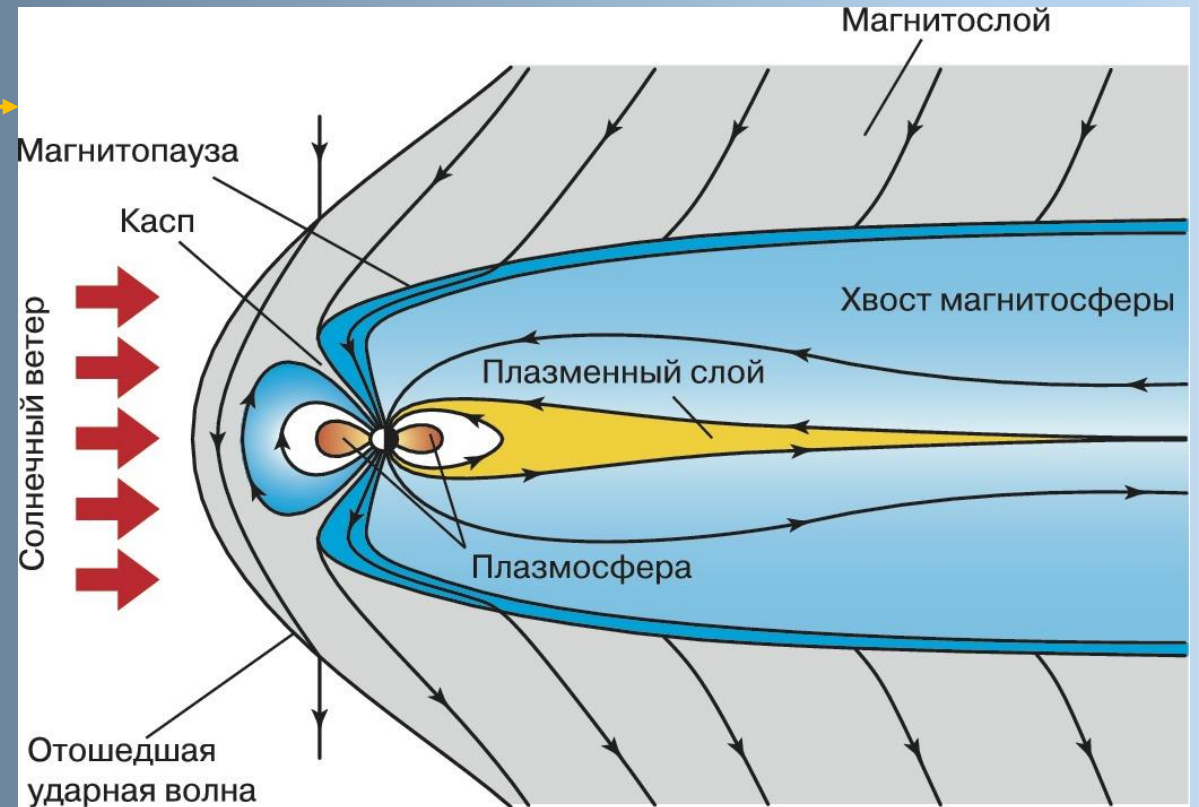
Часть 1-я. Вместо введения. О чем пойдет речь?

- Космическая погода в широком смысле - состояние ближнего космоса
- Более узко – те параметры электромагнитных полей, фоновой плазмы и энергичных частиц, которые важны для технологических систем на Земле и в космосе
- Как и обычная погода, космическая очень изменчива. В космосе бывают как плавные изменения небольшой амплитуды, так и резкие и даже катастрофические. Они и являются наиболее опасными

Элементы солнечно-земных связей

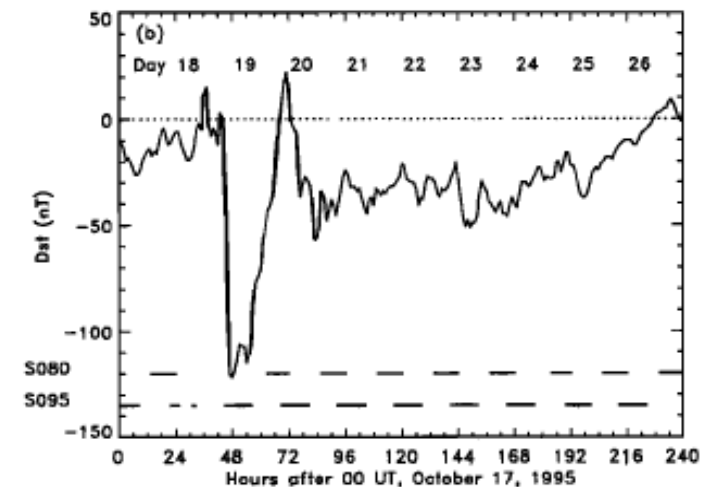
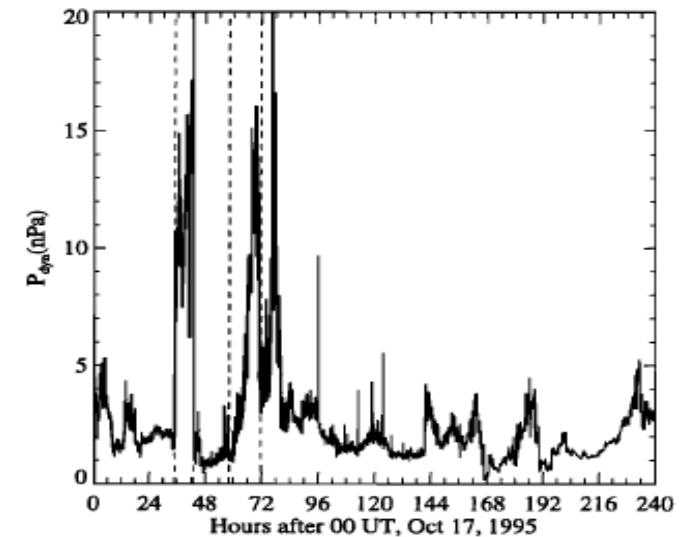


- Параметры в космосе, которые влияют на космические и наземные системы
- Потoki заряженных частиц
- Вариации электромагнитного поля
- Плотность плазмы



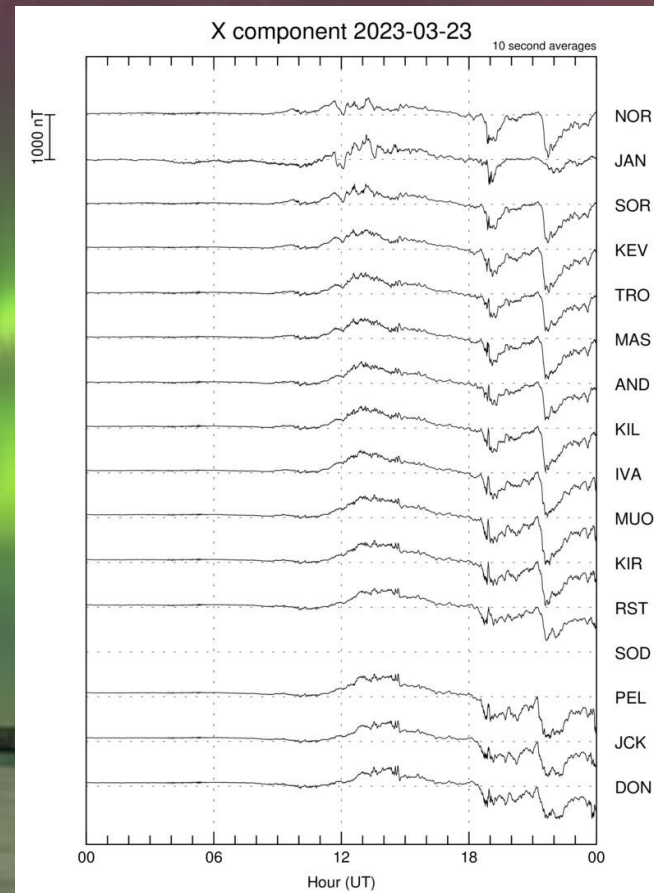
Основные виды возмущений. Буря

- Магнитная буря. Вызывается резкой «ступенькой» в солнечном ветре, наблюдается по всей Земле. В магнитном поле проявляется снижением основного поля на сотни нТл вблизи экватора. Потом в течение нескольких дней по всей Земле наблюдаются магнитные возмущения, мощные полярные сияния на необычно низких широтах
- Внезапное начало или внезапный импульс. Тоже ступенька, но в первом случае она дает старт глобальным возмущениям (буре), а во втором – остается локальным (дневным) возмущением.



Основные виды возмущений. Суббурия

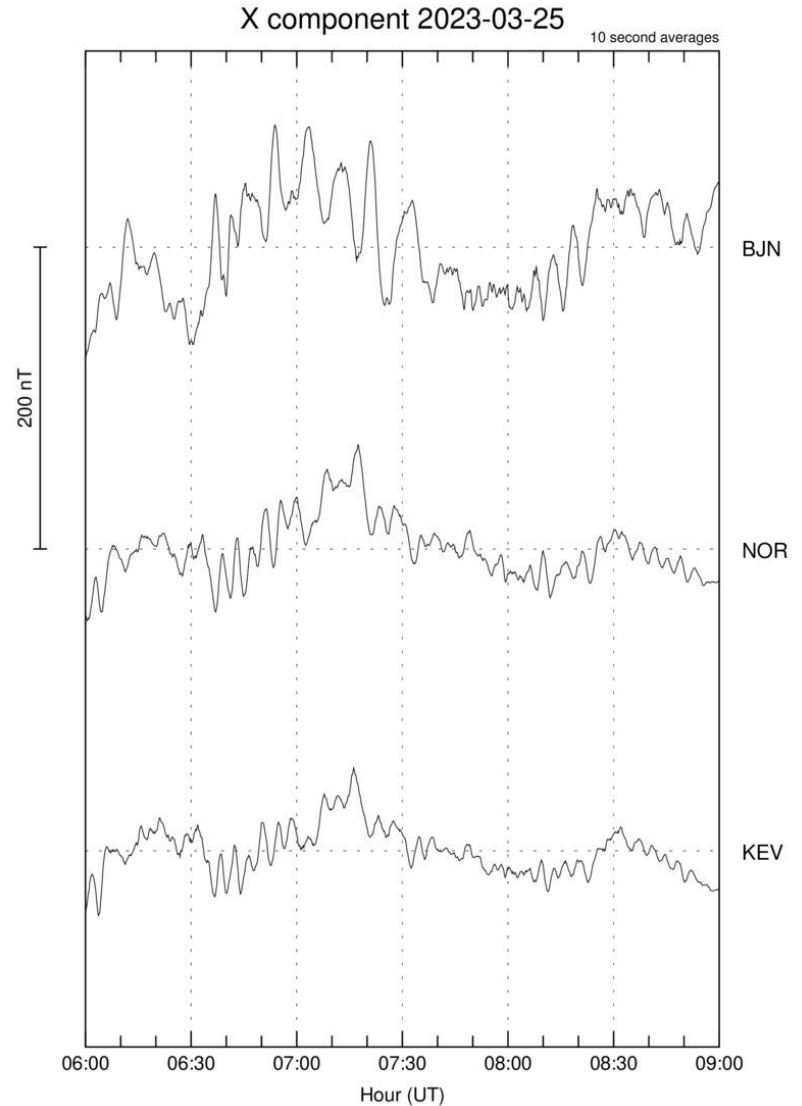
- Суббурия – возмущение на ночной стороне, проявляется бухтой магнитного поля (сотни нТл) и высыпанием электронов в ионосферу, что приводит к резкому уярчению полярных сияний и изменению геометрии овала сияний.



Магнитограммы
авроральных
станций сети
IMAGE 23/03/
2023

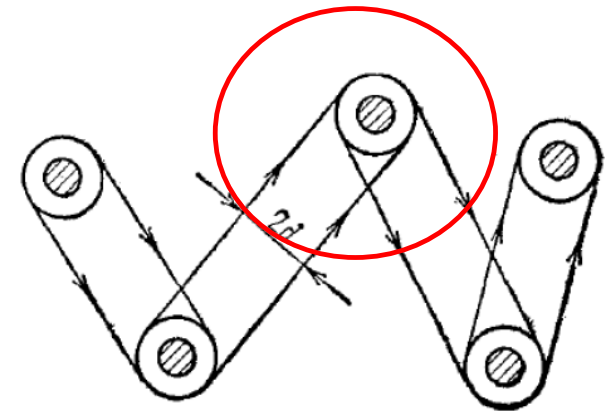
Геомагнитные пульсации

- Геомагнитные пульсации – квазипериодические изменения магнитного поля (самые мощные – до нескольких сотен нТл, периоды минуты) в магнитосфере и на Земле. Могут вызывать ускорение частиц в магнитосфере, возбуждение геоиндуцированных токов, а еще являются инструментом наземной диагностики магнитосферы.



Наивные вопросы и замечания о межпланетной среде

- Какая среда? В космосе всё – глубокий вакуум...
- Чтобы понять, как рассматривать объект, как вакуум или как сплошную среду, надо знать не абсолютные значения плотностей, а отношение пробега между столкновениями и размерами системы (число Кнудсена). Система Солнце-Земля имеет характерные размеры 10^{11} м (расстояние Солнце-Земля - 150 млн км, размеры магнитосферы (в сторону Солнца) – до 100 тыс. км. Кроме того, заряженные частицы в плазме взаимодействуют на более далеких расстояниях, чем нейтралы. В результате отношение характерного расстояния, на котором меняется импульс частицы к полному размеру системы мало, и плазма солнечного ветра проявляет свойства сплошной среды.



Наивные вопросы и замечания о межпланетной среде

Немного арифметики:

- Какой может быть вред от полей, которые надо мерить в нанотесла? Любой магнит на холодильнике сильнее.
- И опять – дело в размерах. Изменения поля на границе магнитосферы (магнитопауза) намного меньше, чем от перемещения магнетика с холодильника, но они возникают на всей границе магнитосферы сразу. А это $> 10^5$ км.

Сравните энергию от скачка магнитного поля 10^{-8} Тл на круге площадью 10^{10} км² и толщиной 10^2 км и энергию промышленного магнита 1 Тл в объеме 1 м³

Плотность энергии пропорциональна B^2 ,

Значит в первом случае она на 16 порядков, меньше, чем во втором.

Объем в первом случае составляет 10^{12} км³ = 10^{21} м³, то есть он на 21 порядок выше, чем во втором.

Таким образом, полная энергия на 5 порядков выше в первом случае, чем во втором.

Таким образом, энергия магнитных возмущений космического происхождения не мала. Она не полностью доходит до Земли, но магнитосфера выступает как своеобразная линза, и дошедшей до Земли энергии оказывается достаточно, чтобы вызвать заметные токи в длинных проводниках.

Наивные вопросы-2 или никакой паники...

- «Ой, мы все тут погибнем, на Солнце вспышка, и у меня уже вчера болела голова» (из интернета)
- Солнечная вспышка и поток ускоренного солнечного ветра действительно являются источниками возмущений и даже магнитных бурь.
- Но не все и не всегда. Чтобы вызвать возмущение им надо долететь до магнитосферы, а не попасть мимо. Опять смотрим геометрию. Солнце испускает плазму во все стороны, так что ветер – не совсем точное слово, а возмущения не возникают сразу на всей поверхности. В результате большая часть не долетает до нас.



- Братцы, вы знаете, какое солнце? Оно больше всей нашей Земли. Вот оно какое! И вот, братцы, от солнца оторвался кусок и летит прямо к нам. Скоро он упадет и всех нас задавит. Ужас что будет! (Н. Носов «Незнайка и его друзья», Москва, Детгиз, 1954)

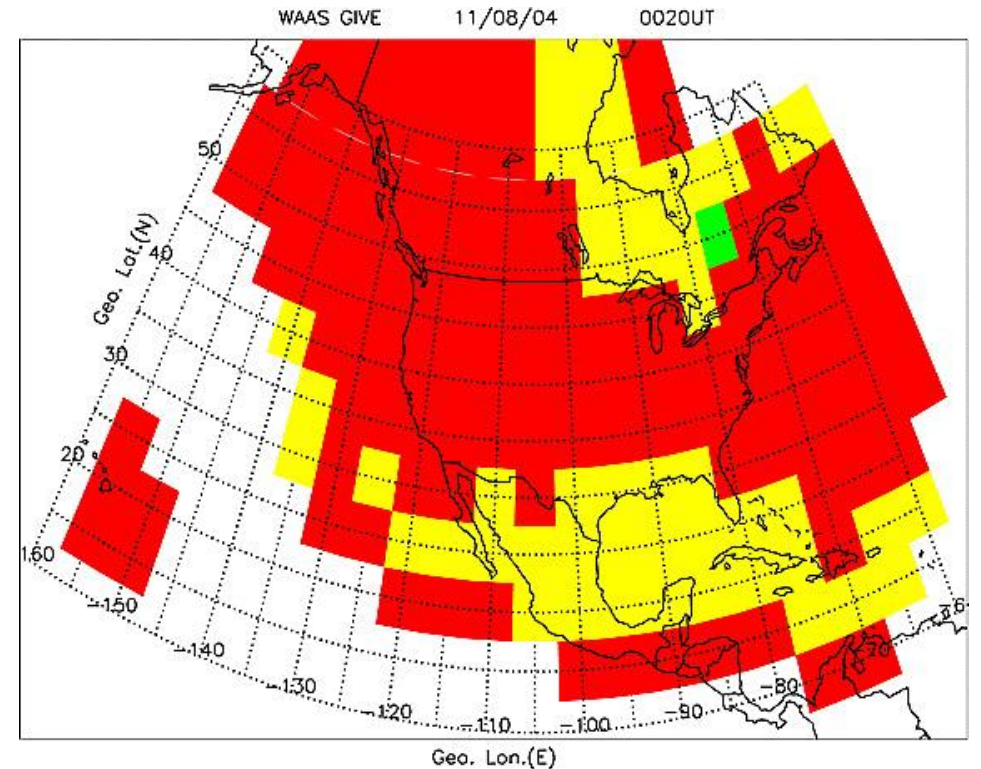
Наивные вопросы-2 или никакой паники...

- Вчера был быстрый солнечный ветер и сияние видели даже в Крыму.
- Частицы в самом солнечном ветре «медленные» < 1000 км/с, они не проникают через магнитопаузу (точнее есть две воронки - каспы, где это не так, но от частиц солнечного ветра ничего страшного не происходит).
- Магнитосфера – наша надежная защита, но если падающее на нее возмущение достаточно сильное, она из защитника может стать источником опасности, как дом защищает нас от дождя и града, но не от землетрясения



Основные технологические эффекты возмущений космической погоды. История и современность

- 1) Сбои магнитной навигации при сильных возмущениях «Когда огни, всегда стрелка гуляет» (Мельников-Печерский, XIX век, рассказ о севере Ярославской губернии).
- 2) Радишумы и пропадание связи (солнечные радиовспышки, ионосферные бури). Нарушения в работе систем позиционирования



Сбои в системах позиционирования для гражданской авиации во время солнечной радиовспышки, США, 2004.

Основные технологические эффекты возмущений космической погоды. История и современность. 2.

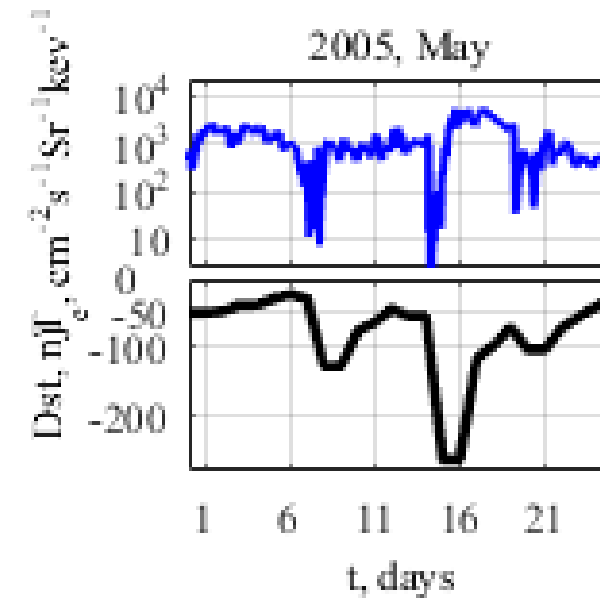
- 3) Повреждение бортовой электроники и опасность для экипажей при резких возрастаниях потоков заряженных частиц
- 4) Сбои в работе электрооборудования при геомагнитных возмущениях
- 5) Усиление коррозии в трубопроводах от наведенных электрических полей

Менее очевидные

- Биологические проявления солнечно-земных связей
- Вариации обычной погоды в солнечном цикле
- Одновременное воздействие нескольких космических и наземных факторов (магнитное возмущение + гроза, отказ электроники на спутнике из-за частиц + ухудшение качества сигнала на работающих и т.д.)

Часть II. Более подробно о некоторых задачах. Быстрые электроны и спутники.

- Радиационные пояса Земли – это область где помимо фоновой плазмы, постоянно существуют потоки быстрых заряженных частиц.
- Внешний (электронный) радиационный пояс с максимумом на $4-5 R_E$.
- При возмущениях происходит
 - 1) резкое на 2-3 порядка возрастание потока
 - 2) смещение его максимума

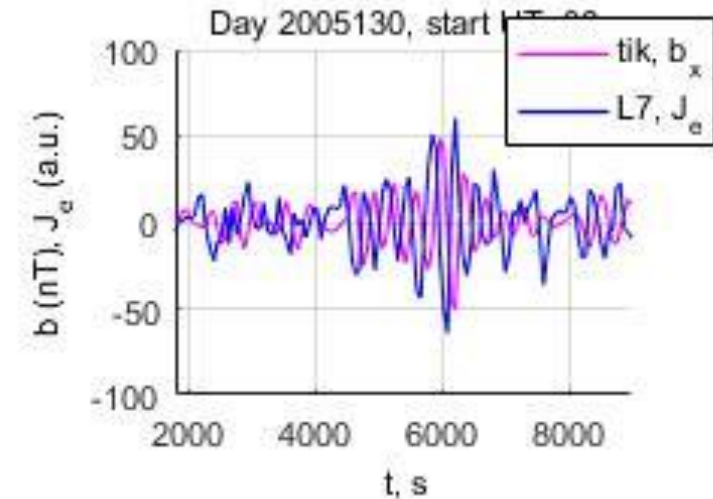


Быстрые электроны и спутники. Возрастания потока. Когда бывают и чем опасны?

- Магнитная буря.
- Вне бури. Быстрый солнечный ветер.
- Последствия
 - 1) релятивистские – проникновение сквозь обшивку
 - 2) 10^3 - 10^5 эВ – дифференциальная зарядка с последующим пробоем
- Можно ли предсказать хотя бы за час-два?

Быстрые электроны и спутники. Возможные причины

- Магнитная буря. Не все бури вызывают рост потока, бывают усиления и вне бури
- Быстрый солнечный ветер. Сам в магнитосферу не проникает. Что непосредственно вызывает рост потока?
- Волны! Резонансное ускорение. Возможные варианты
Геомагнитные пульсации, ионно-циклотронные волны?



Быстрые электроны и спутники. Нерешенные задачи

- Влияющие факторы (мгновенные значения параметров вне и внутри магтосферы, предыстория)
- Возможность прогноза

- Что делать?
- 1. Полное описание с учетом ускорения потерь и переноса. Задача сложная даже для численного счета. Нет полной модели среды
- 2. Создание эмпирической модели. Много новых данных, полностью пока не исследованных

Геоиндуцированные токи (ГИТ) и электрооборудование

- Физика
- $E \sim d\Phi/dt$
- Φ – магнитный поток
- Относительно 50 Гц в сети геоиндуцированный ток квазистатический, так как его частоты 1-10 мГц

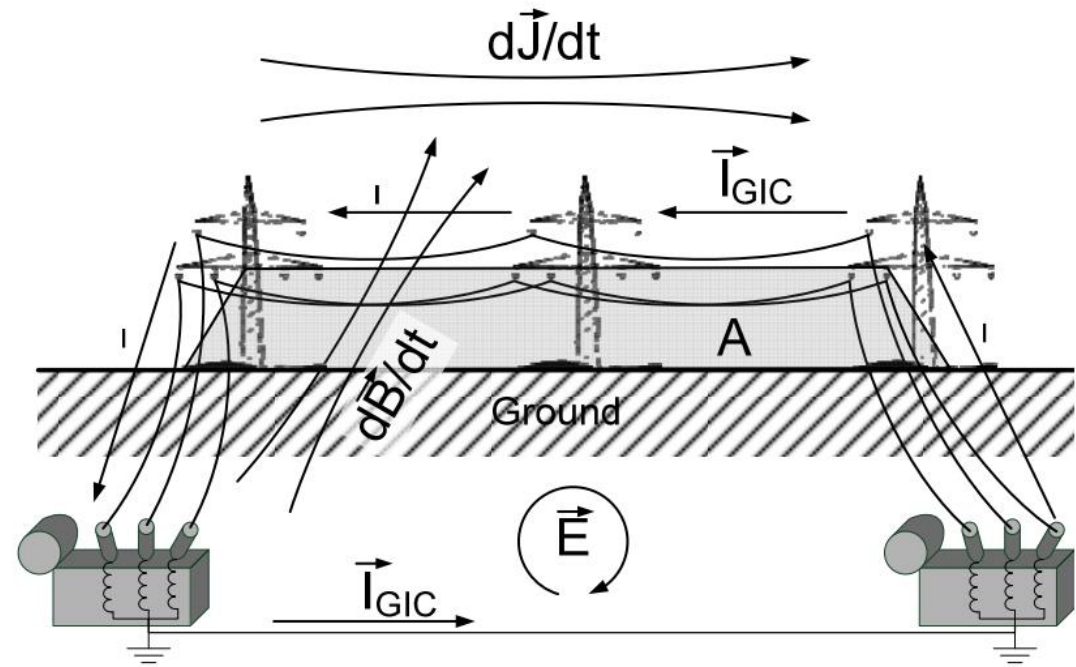
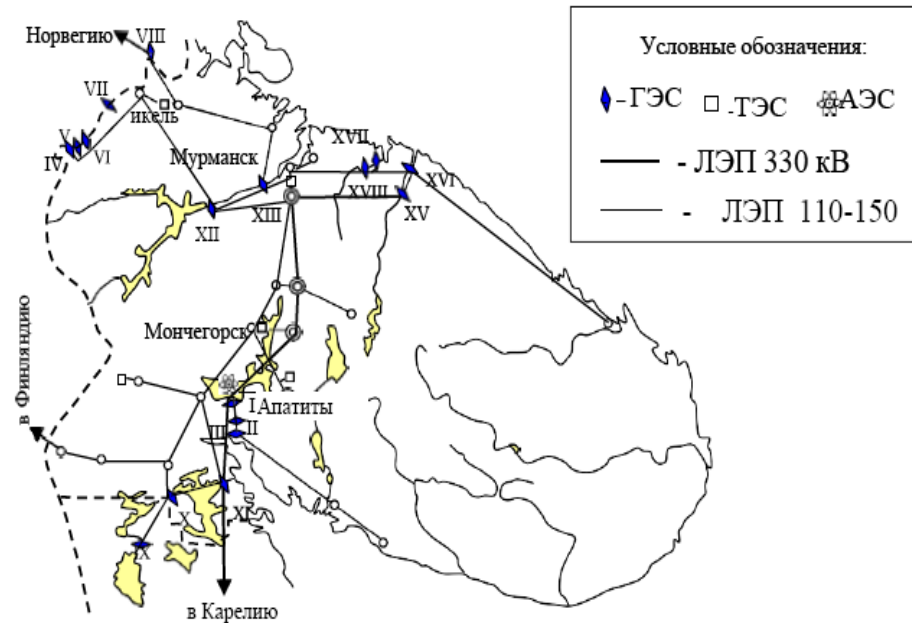


Схема возникновения ГИТа

•

Геоиндуцированные токи (ГИТ) и электрооборудование. 2.

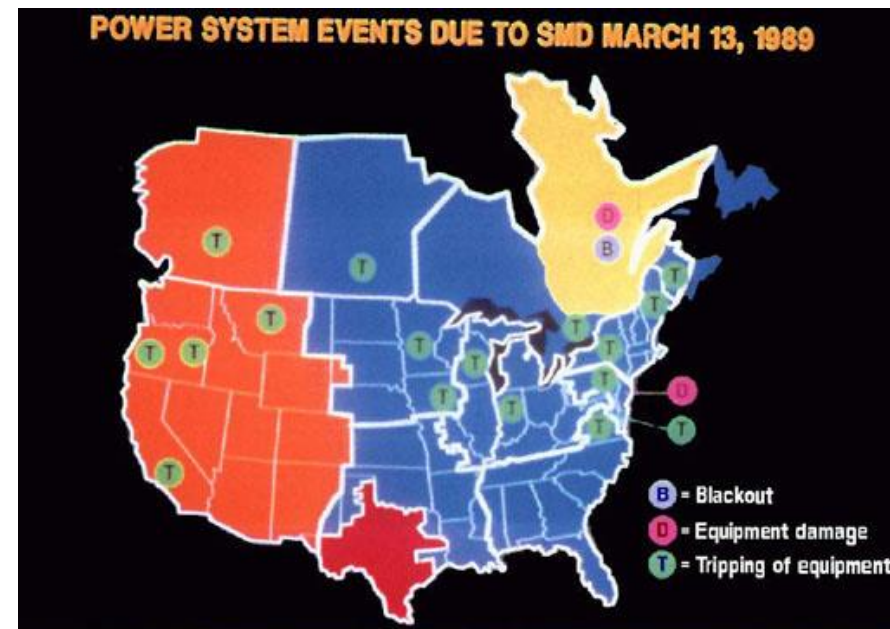
- Промышленный ток – большое dV/dt , малая площадь, ГИТ – наоборот.
- Наибольшая опасность для протяженных сетей



Участок ЛЭП «Северный Транзит»

ГИТы и электрооборудование. Последствия

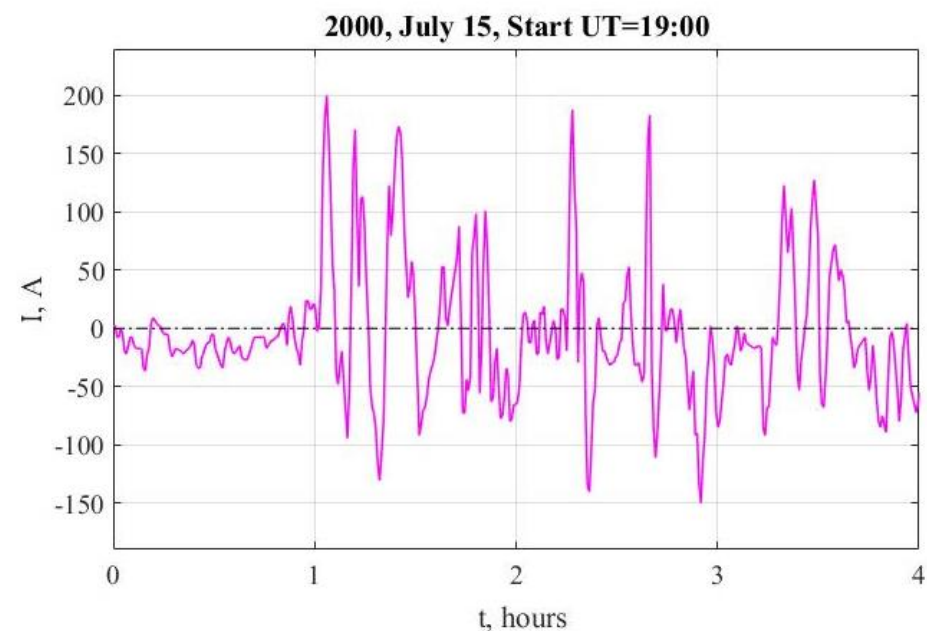
- Максимальные регистрировавшиеся токи – до сотен Амперо
- Самый катастрофический сценарий – буря 1989 года, Канада – отключение целой провинции
- Основной источник опасности – трансформаторы и неправильная работа релейной защиты
- Вред могут нанести даже токи умеренной амплитуды, если они накладываются на переходный режим



Последствия бури 1989 года для электросетей в Северной Америке

ГИТы и электрооборудование. Когда бывают?

- Магнитные бури, особенно экстремальные. Сильная буря – не только рост амплитуды, но и смещение максимума → авроральные явления на более низких широтах, где больше плотность населения, промышленности и т.д.
- Не только главная, но и восстановительная фаза – до недели. Глобальные пульсации высокой амплитуды
- В высоких широтах опасны также суббури и пульсации вне бури.



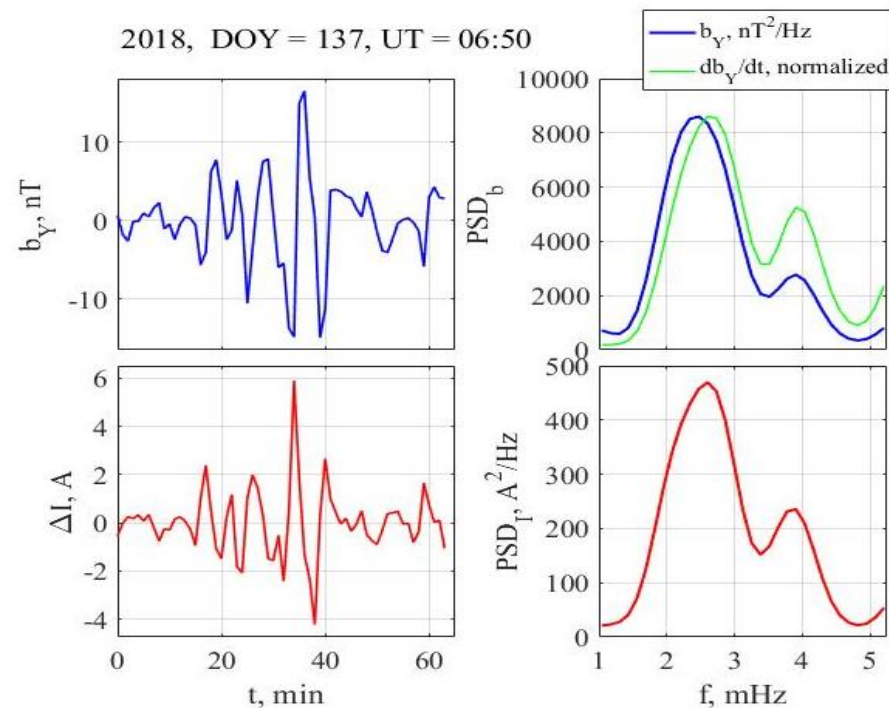
Один из самых сильных зарегистрированных ГИТ – Швеция, буря 2000 г. (Wik et al. (2008), Space Weather, 6, S07005, doi:10.1029/2007SW000343.)

ГИТы и электрооборудование. Нерешенные задачи

- Энергетика. Недостаток прошлого опыта из-за быстрого обновления оборудования
- Геофизика. Количественный анализ. Недостаточность имеющейся измерительной базы для приложений.
- Некорректность интерполяции и экстраполяции из-за конечного пространственного масштаба возмущений, геоэлектрики, уникального для каждой точки сочетания географической и геомагнитной широты

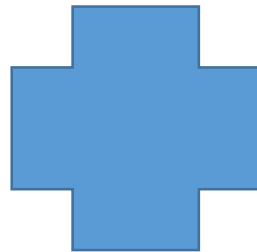
ГИТы и электрооборудование. Нерешенные задачи. 2.

- Максимально неблагоприятный сценарий. Супербуря типа бури 1989 г. на современной технологической базе
- Пульсации. Приложение к реальному оборудованию (численный и физический эксперимент, в том числе для переходных режимов).



ГИТы и электрооборудование. Нерешенные задачи. 3.

- Совместное воздействие факторов обычной и космической погоды
- Возможные резонансные эффекты на более высокочастотных пульсациях и опасности для субавроральных и средних широт



Почти совсем не исследованные задачи

- Влияние космической погоды через обычную: прозрачность атмосферы, грозовая активность, атмосферная циркуляция
- Обратное воздействие атмосферы на ионосферу
- Гелиобиология

Домашнее задание

- Есть ли смысл этим заниматься на фоне более катастрофических явлений?
- Зачем изучать то, на что невозможно повлиять?



Вместо прощания



РНФ
Российский
научный фонд



- Фукусима показала, что катастрофы, в том числе ядерные, возможны от совсем не ядерных причин.
- До встречи с сильными магнитными бурями в условиях новых технологий осталось или 1-2 года или (в лучшем случае) 12-15 лет.
- Существует критический дефицит знаний в области индуцированных космическими причинами земных катастроф



Ждем желающих получить ответы на нерешенные вопросы