

Электромагнитный аспект технологической безопасности

Пилипенко В.А.

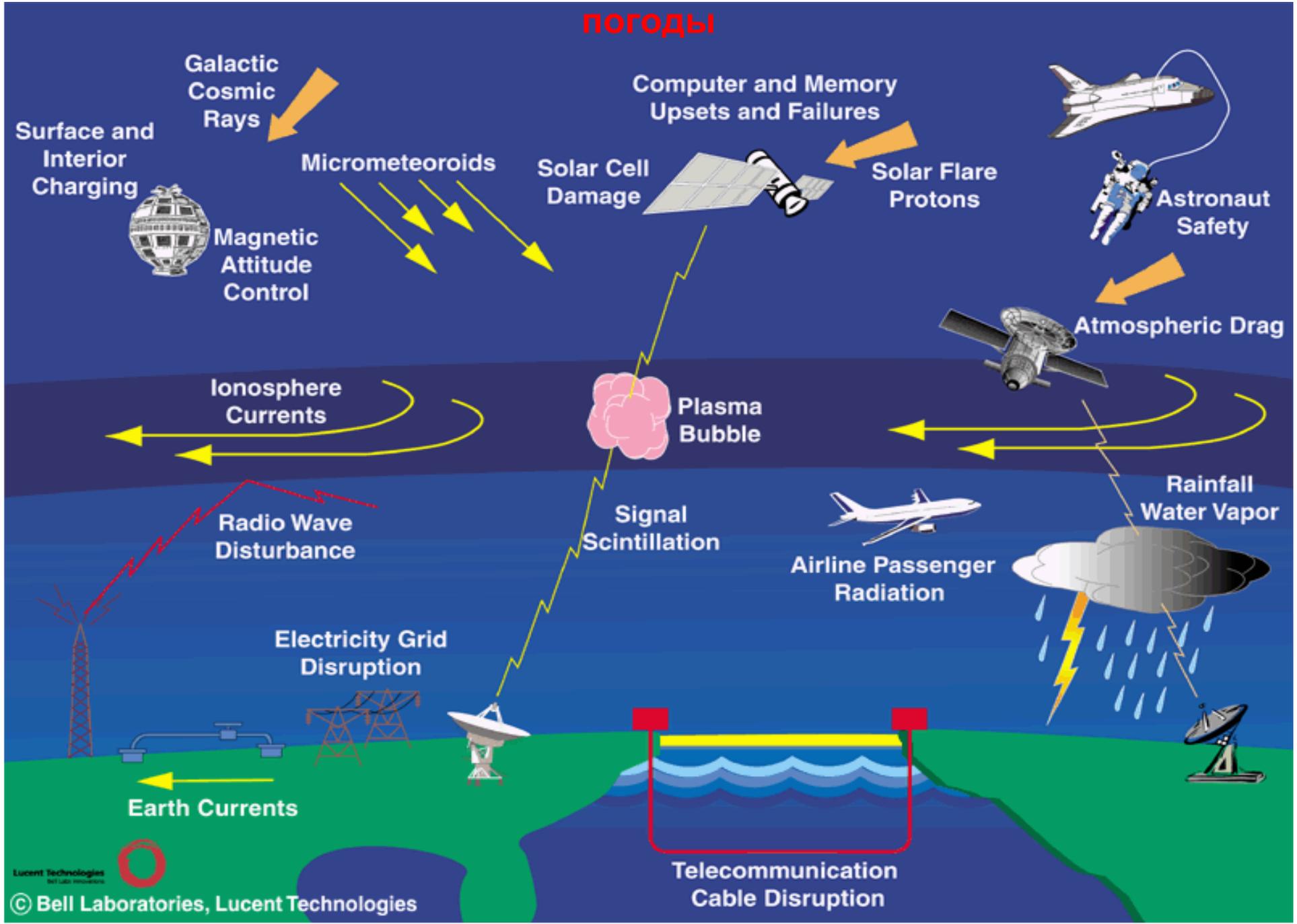
Институт космических исследований

Институт физики Земли

pilipenko_va@mail.ru

Исследования состояния околоземной космической среды, для кратко именуемое “космическая погода”, выходят за рамки чисто академического интереса. Чем шире внедряются передовые технологии, тем чувствительнее для экономики становятся их сбои и выходы из строя. Возмущающее воздействие факторов космической погоды на окружающую среду являются естественной нормой, и их невозможно избежать, но необходимо знать и учитывать.

Уязвимость технологических систем воздействию космической погоды



Geomagnetic Induced Currents (GIC)

Электрические токи, индуцируемые в поверхностных слоях Земли при резких изменениях ионосферных токов и геомагнитного поля, опасны для:

- протяженных трубопроводов,
- магистральных кабельных линий,
- высоковольтных линий электропередач,
- железнодорожного оборудования,
- морских коммуникационных кабелей, телефонных и телеграфных линий, особенно если эти системы вытянуты в долготном направлении.



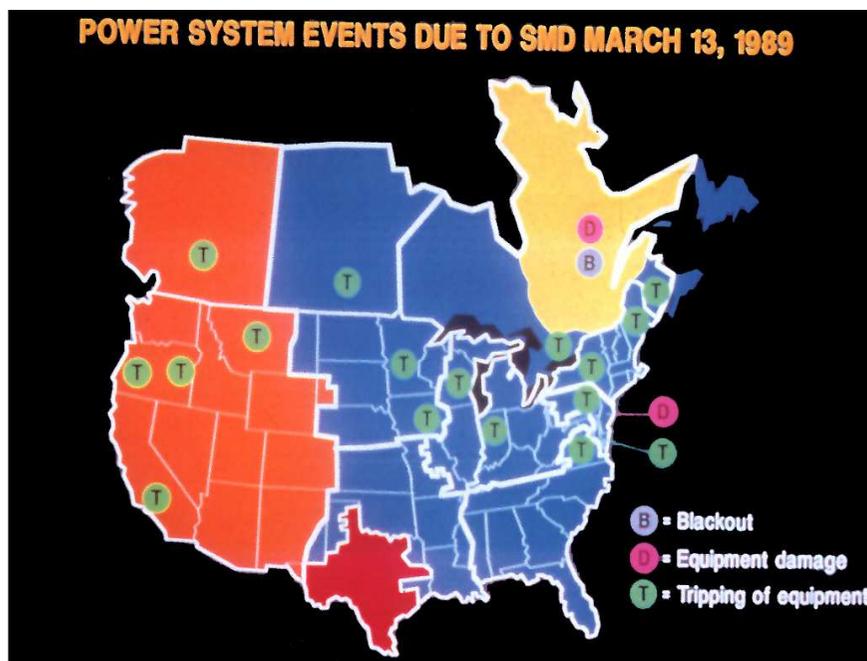
Наиболее интенсивные токи (до сотен ампер) возбуждаются на авроральных широтах при магнитных бурях и суббурях. Количество энергии, выделяющейся при магнитной буре средней интенсивности ~1400 ГВт, что почти вдвое превышает мощность всех электростанций США.

Воздействие GIC на линии электропередач, особенно высоковольтные и низко-резистивные, зависит не только от величины возмущения, но и от геометрии сети. Оценка возможных эффектов для каждой конкретной системы представляет собой отдельную задачу.



Квази-постоянные GIC вызывают насыщение, перегрев и даже повреждение высоковольтных трансформаторов на электрических подстанциях.

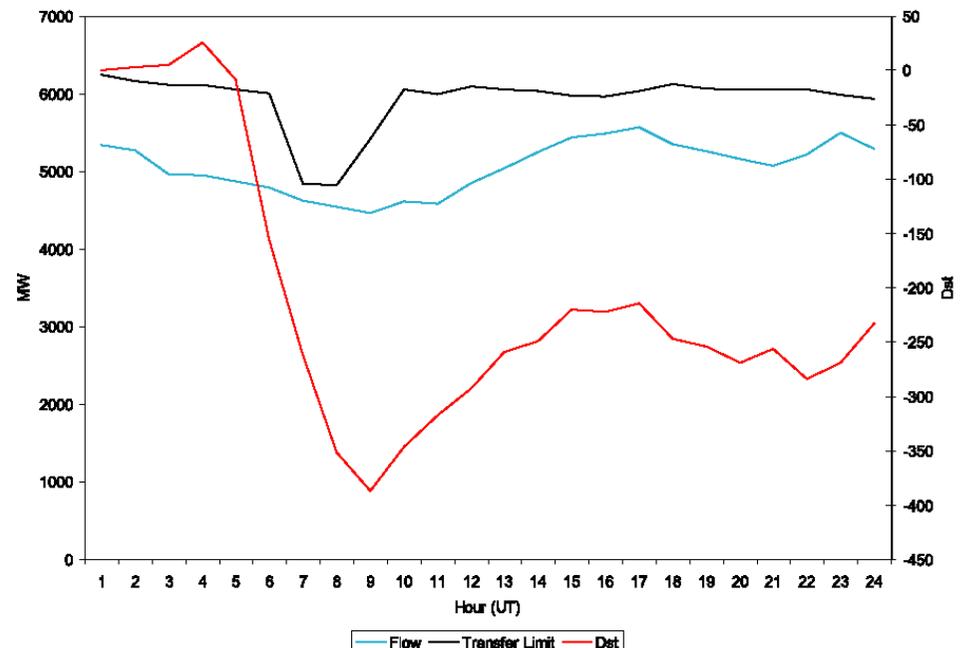
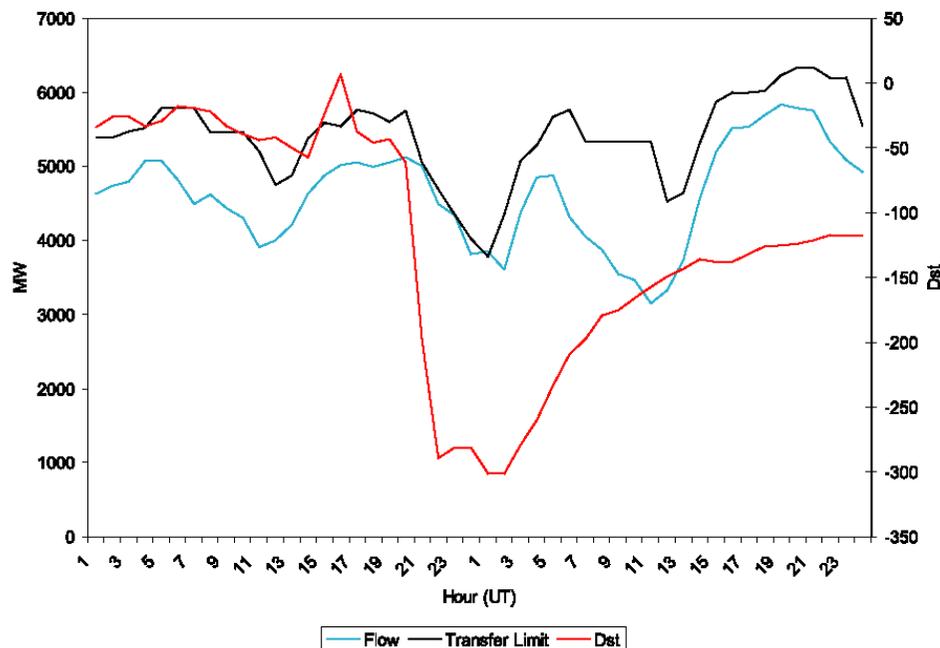
Во время аварии трансформатора в системе Hydro Quebec 6 млн. человек остались полностью без электричества более чем на 9 часов.



Воздействие космической погоды на рынок электроэнергии

GIC вызывает насыщение трансформатора, и нарушает управление напряжением. Растут и потери в трансформаторе, и перегрузки при передаче.

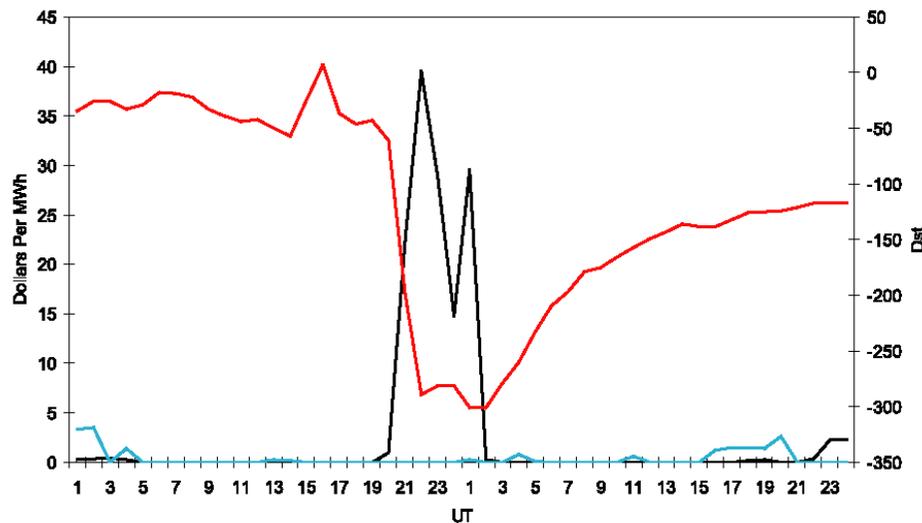
Для примера приведем одну из крупнейших электрических сетей в мире PJM (США), включающей более 8000 миль передающих линий (500 кВ) и 560 генераторов (*Forbes et al., 2004*). Во время магнитных бурь 15-16 июля 2000 и 31 марта 2001 лимит на передачу энергии был понижен операторами до 900 МВ, т.е. на 20%. Одновременно упал и фактический объем передаваемой энергии.



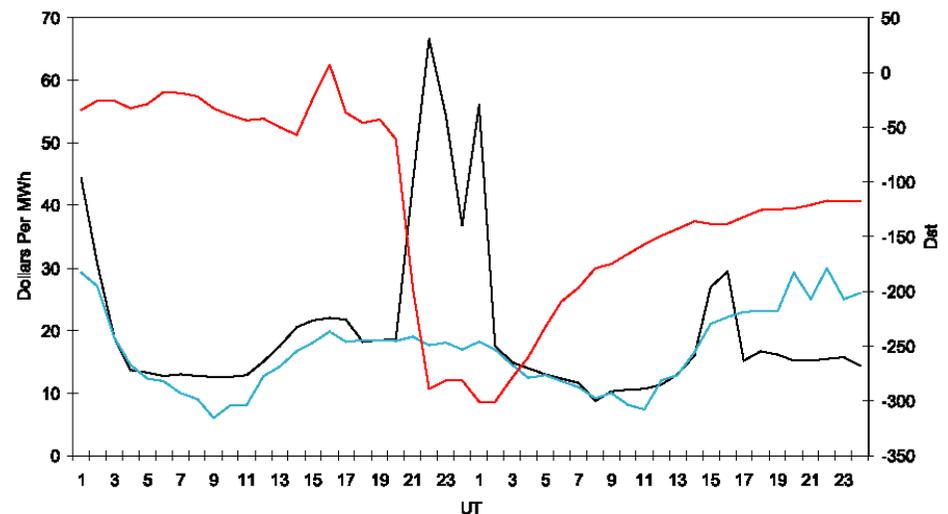
Экономический аспект

Недостаток энергии приводит к повышению текущих региональных цен. Причем цены на завтра не меняются, т.к. влияние магнитных бурь не предвиделось. Например, для бури 15-16 июля 2000 текущие цены подпрыгнули с \$18 до \$66, т.е. почти в 4 раза.

Хотя Dst индекс - отнюдь не лучшая характеристика GIC, эконометрический анализ, учитывающий влияние всех возможных факторов, показывает, что даже относительно небольшие бури влияют на текущие цены. За анализируемые 1,5 года (июнь 2000 - декабрь 2001) экономическое влияние космической погоды составил \$500 миллионов.



— Standard Deviation In the Real-Time Price Across Zones
— Standard Deviation In the Day-Ahead Price Across Zones
— Dst



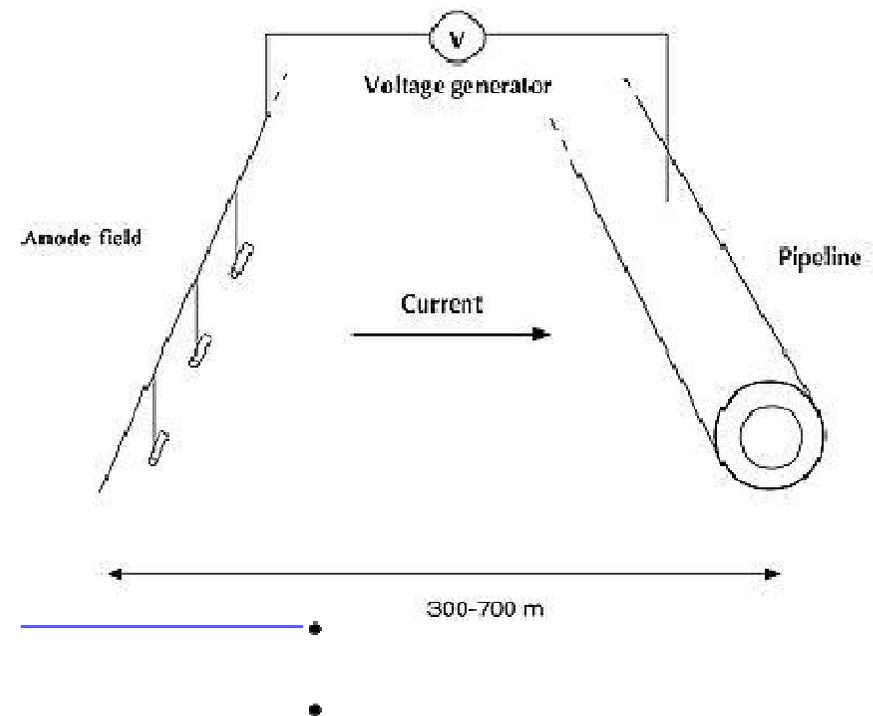
— Real-Time Price — Day-Ahead Price — Dst

Опасность космической погоды для трубопроводов в Арктике

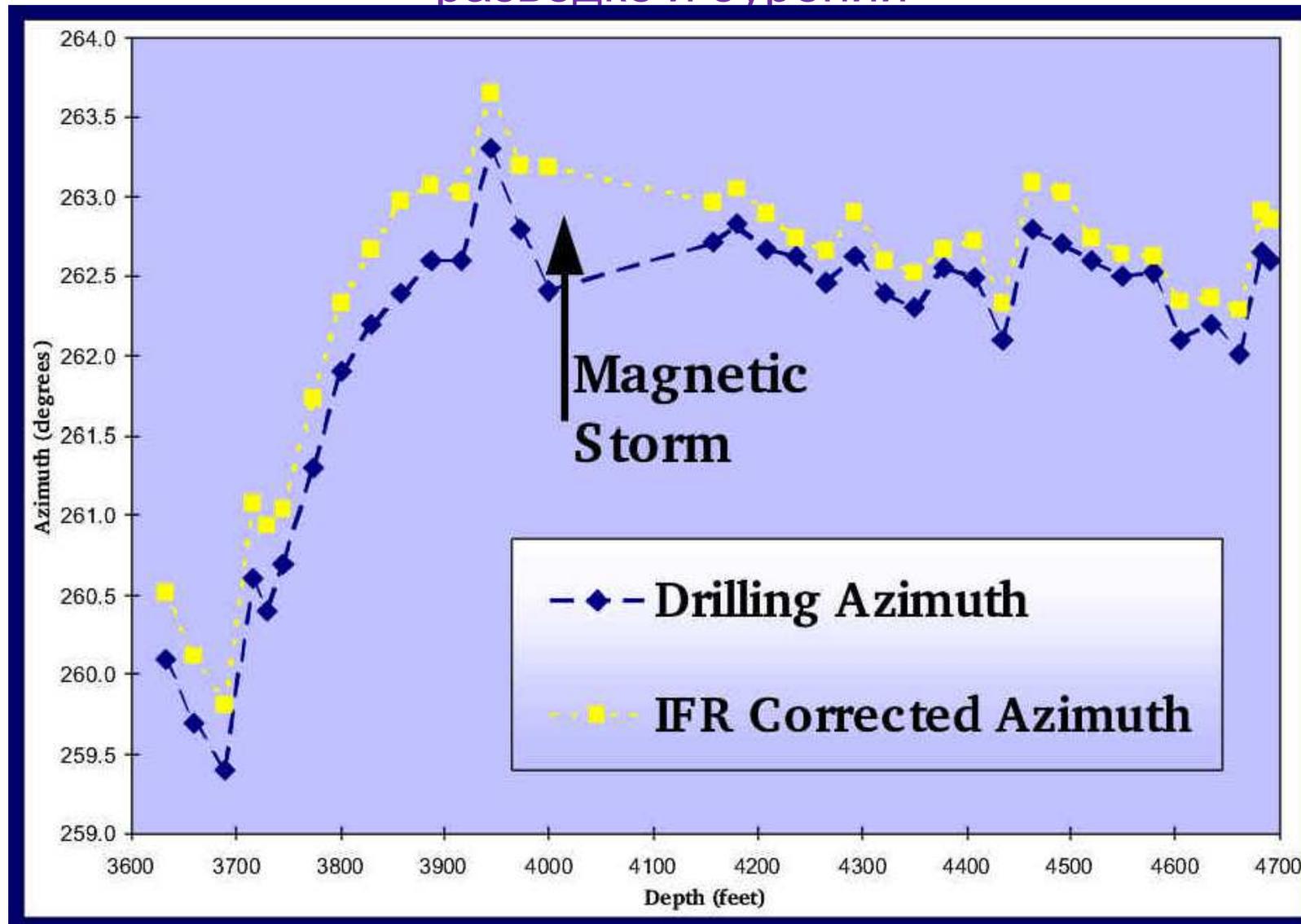
Космическая погода и вызванные ей глобальные электромагнитные возмущения представляют опасность для трубопроводов в Арктике, т.к. большая их часть имеет глобальную протяженность в долготном направлении. GIC вызывают кумулятивный эффект, приводящий к ускоренной коррозии трубопроводов. Для защиты от коррозии используется катодная защита, поддерживающая отрицательный потенциал трубы относительно земли. Под действием токов GIC это распределение потенциала сильно искажается, что резко увеличивает скорость коррозии во время геомагнитных бурь, и приводит к сокращению срока эксплуатации трубопровода.

Косвенно, геомагнитные возмущение могут повлиять на измерения катодного потенциала защиты, и тем самым привести к работе при неоптимальных параметрах защиты.

Cathodic protection system of the pipeline

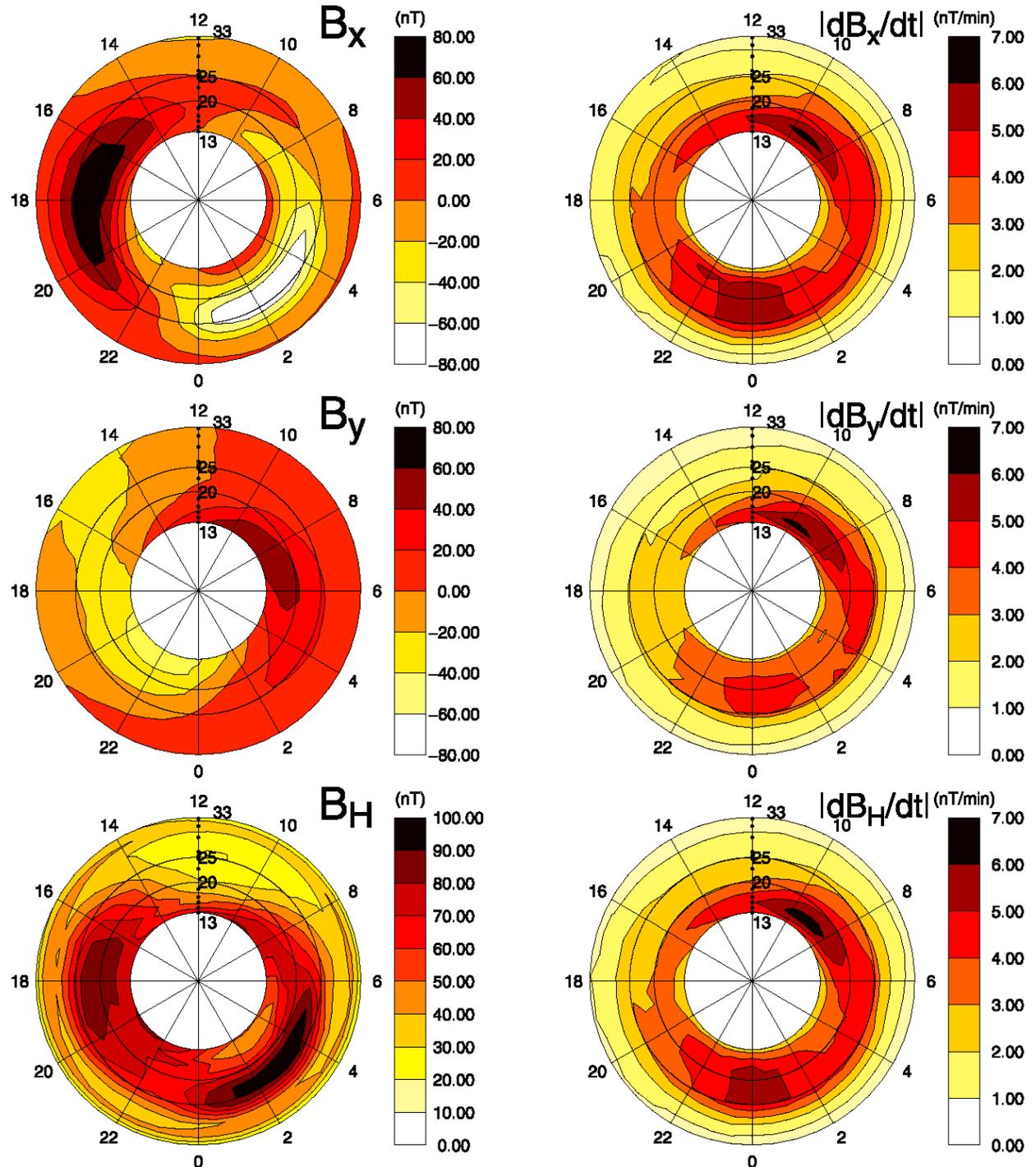


Западные нефтяные и газовые компании учитывают помехи, вносимые геомагнитными возмущениями, при геофизической разведке и бурении



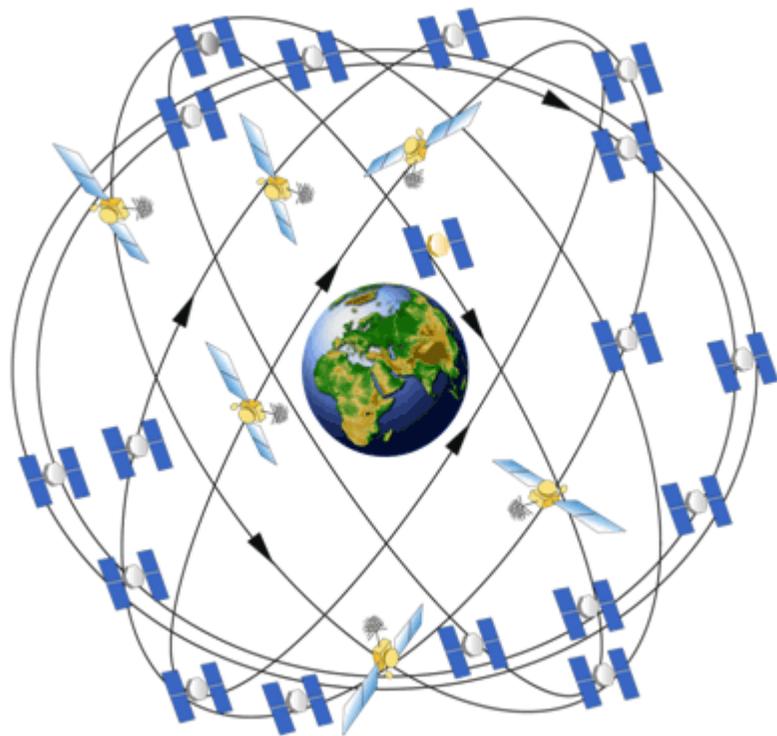
Статистическое распределение магнитных возмущений и variability магнитного поля на земной поверхности

Интенсивность ожидаемых GIC резко неоднородна в пространстве и не совпадает с областью максимальных магнитных



Возмущающее воздействие физических процессов в околоземном космосе на спутниковые навигационные системы

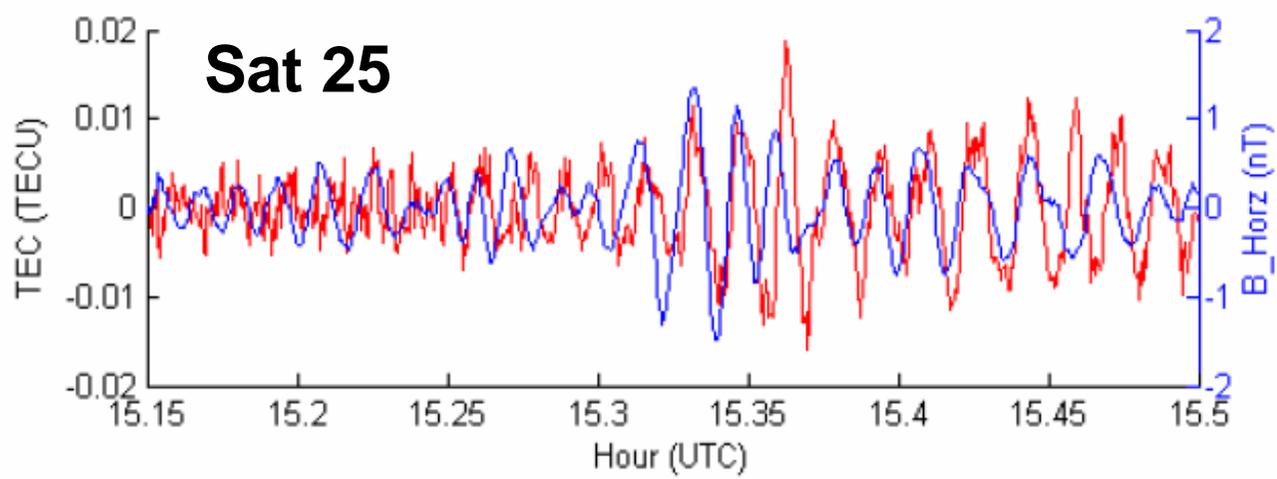
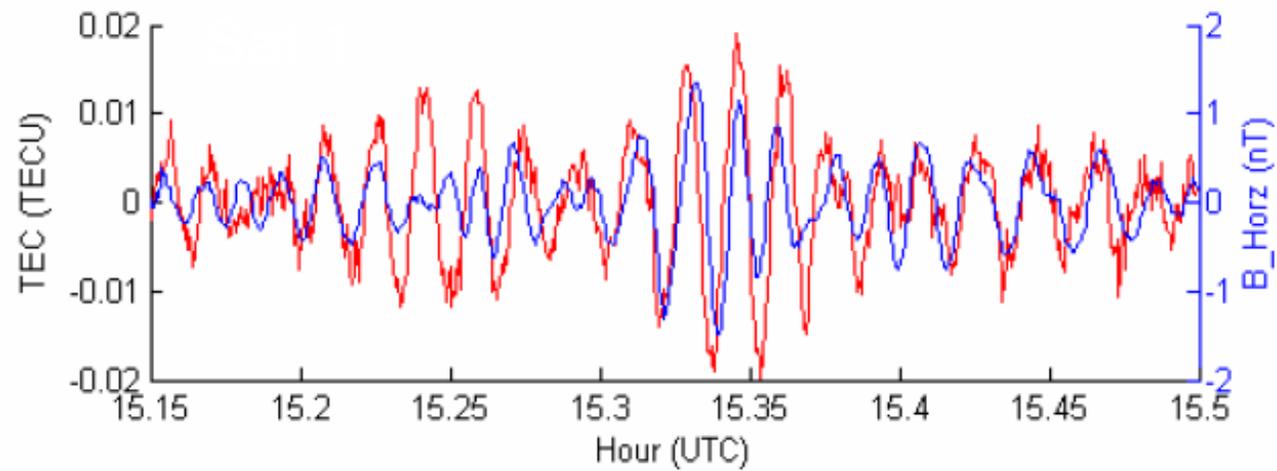
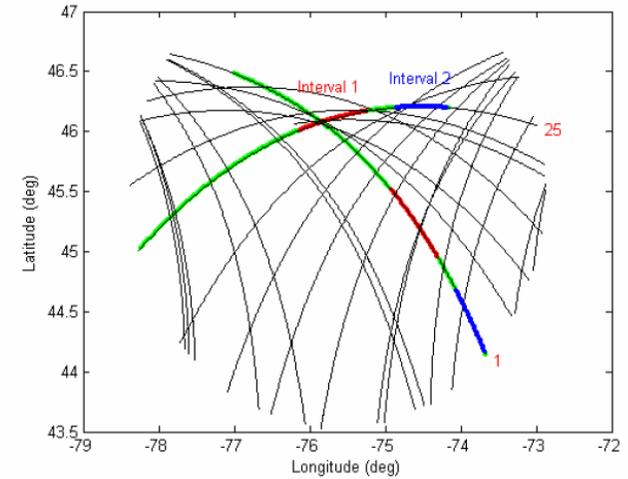
Точность систем навигации, использующих ОНЧ сигналы (LORAN, OMEGA) зависит от знания действительной высоты нижней границы ионосферы. Быстрые вертикальные изменения этой границы во время солнечных вспышек и магнитных бурь могут внести ошибки порядка нескольких км в определение местоположений.



В возмущенной ионосфере может происходить потеря сигнала глобальной системы местоопределения GPS.



Modulation of GPS signal (TEC) by ULF waves

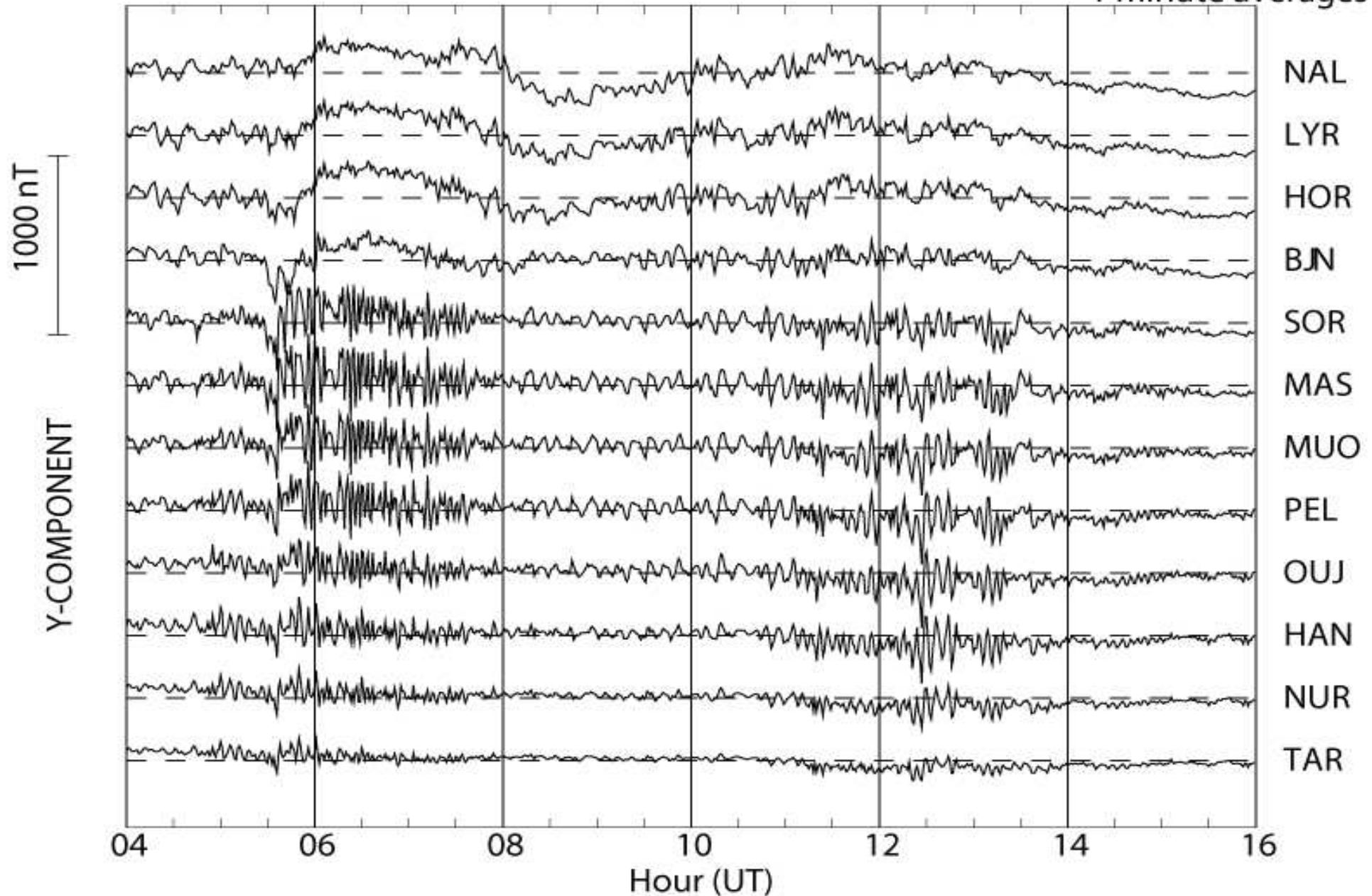


Skone, 2006

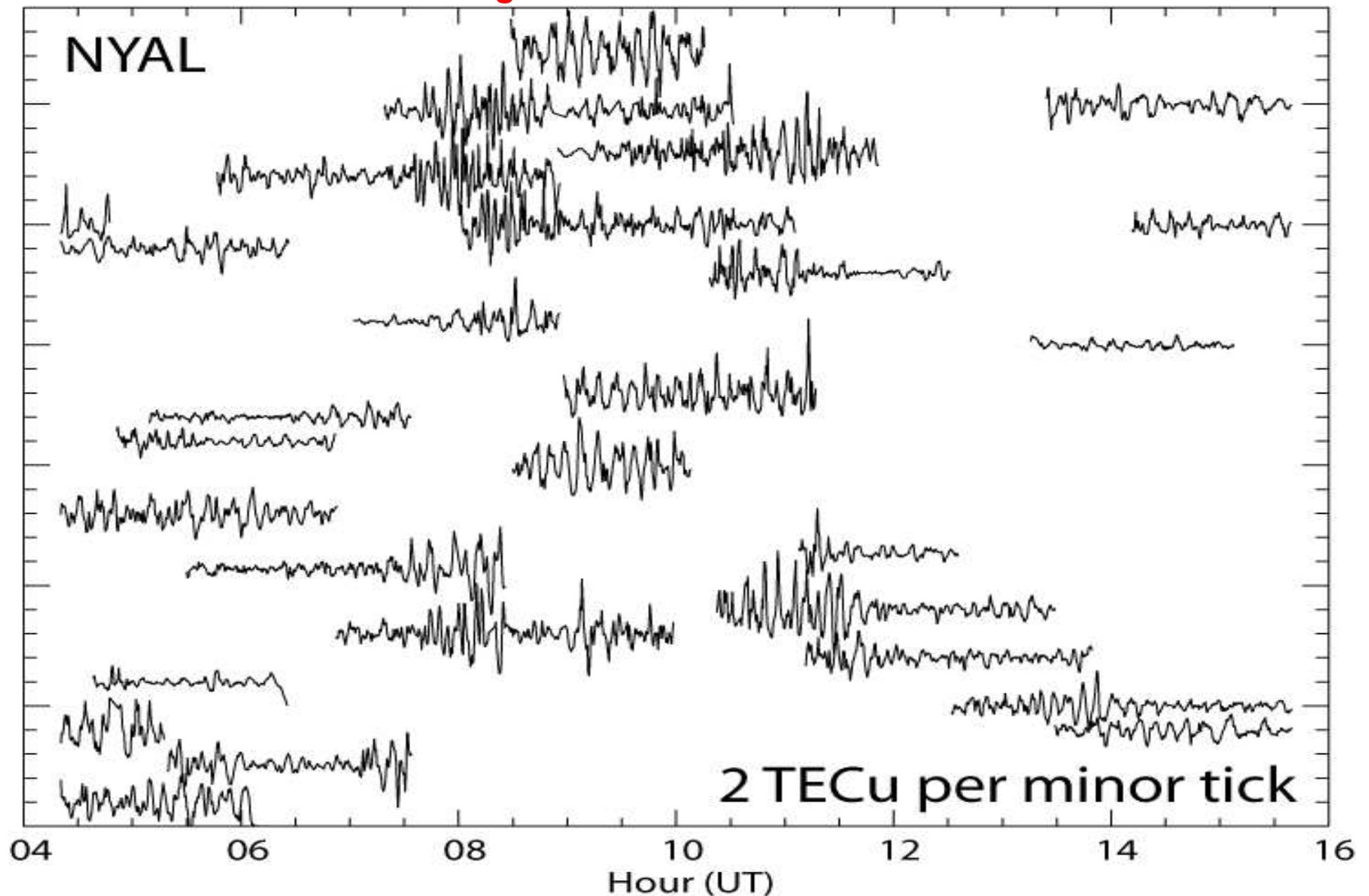
Global Pc5 waves during Halloween Storm of 2003

IMAGE magnetometer network 2003-10-31

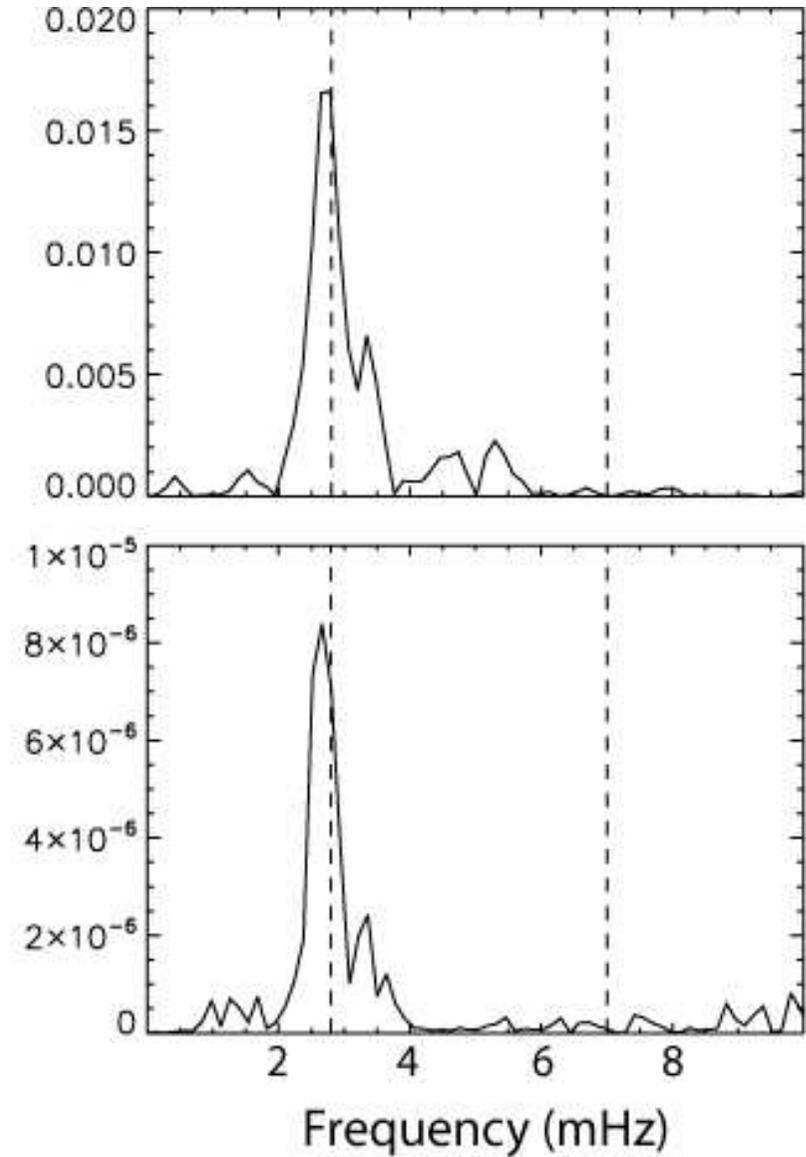
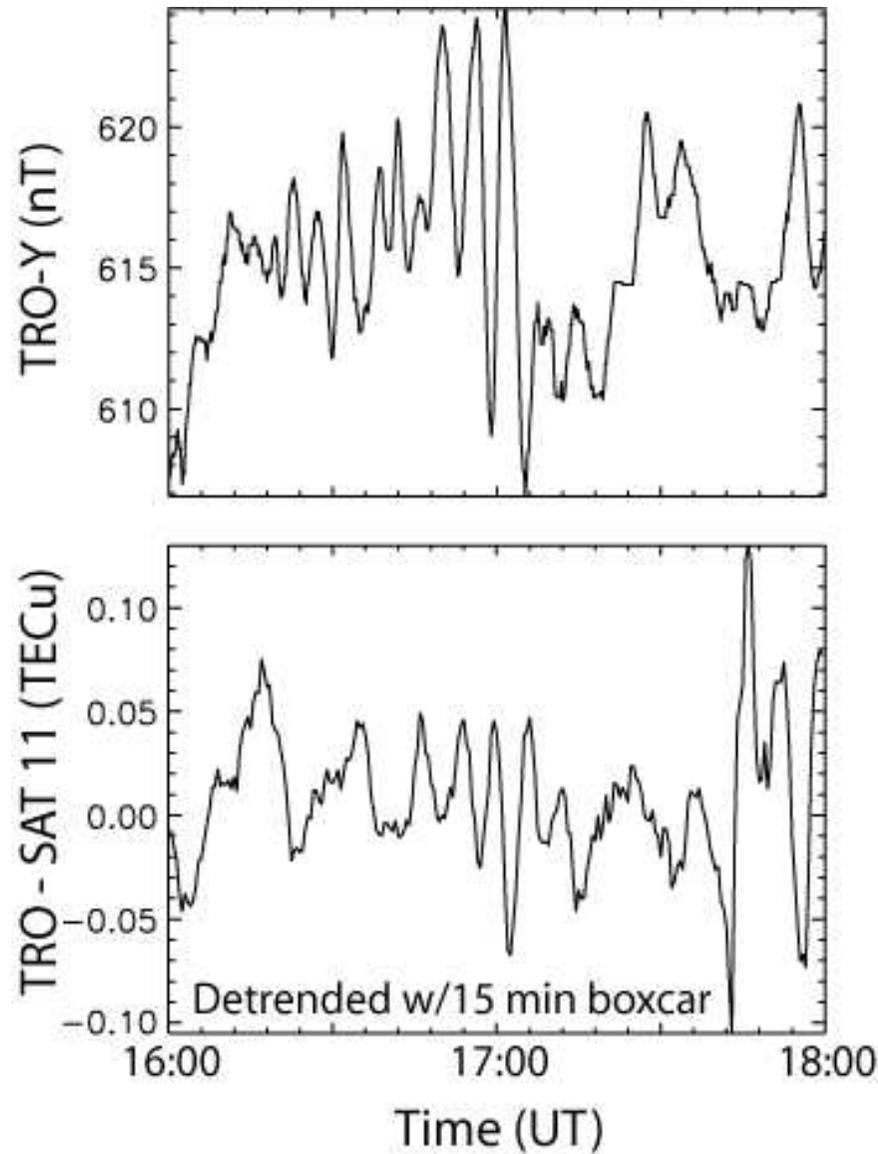
1 minute averages



Modulation of GPS signal (TEC) by global Pc5 waves during Halloween Storm of 2003

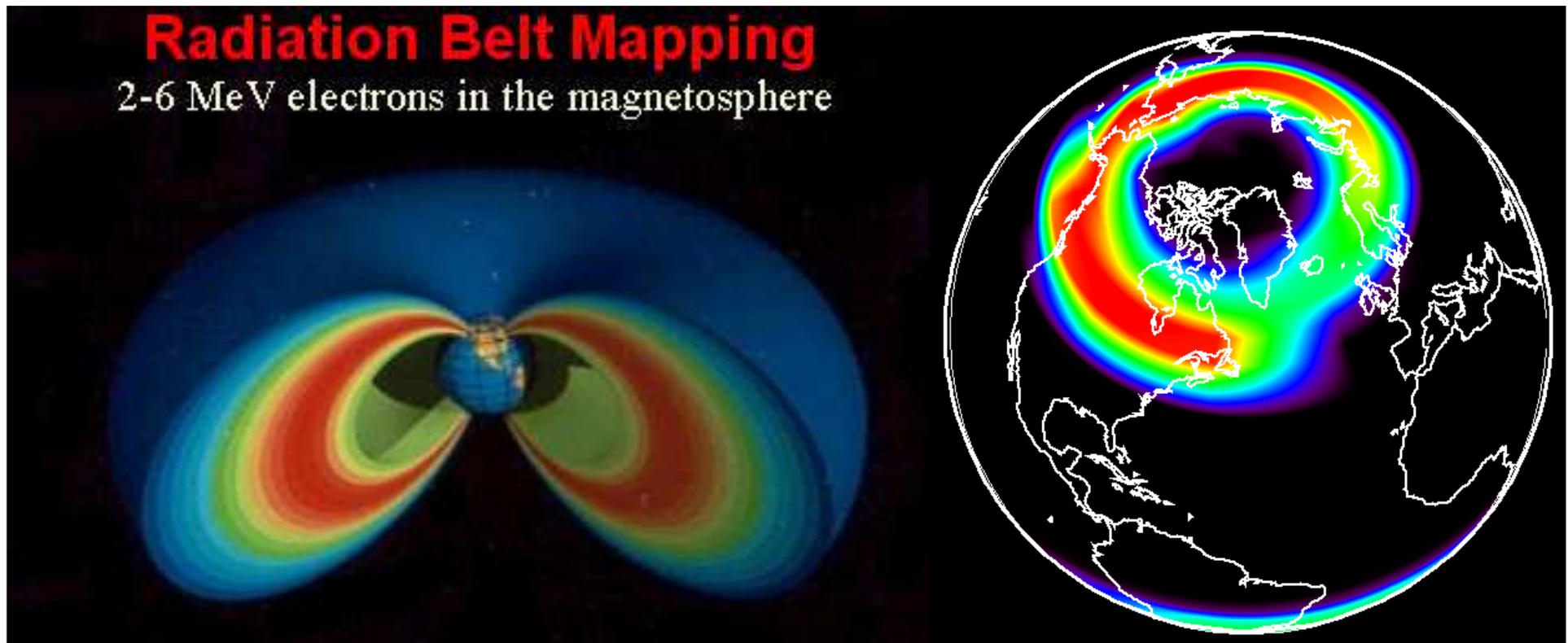


Comparison of Tromso TEC from SAT 11 and ground magnetometer



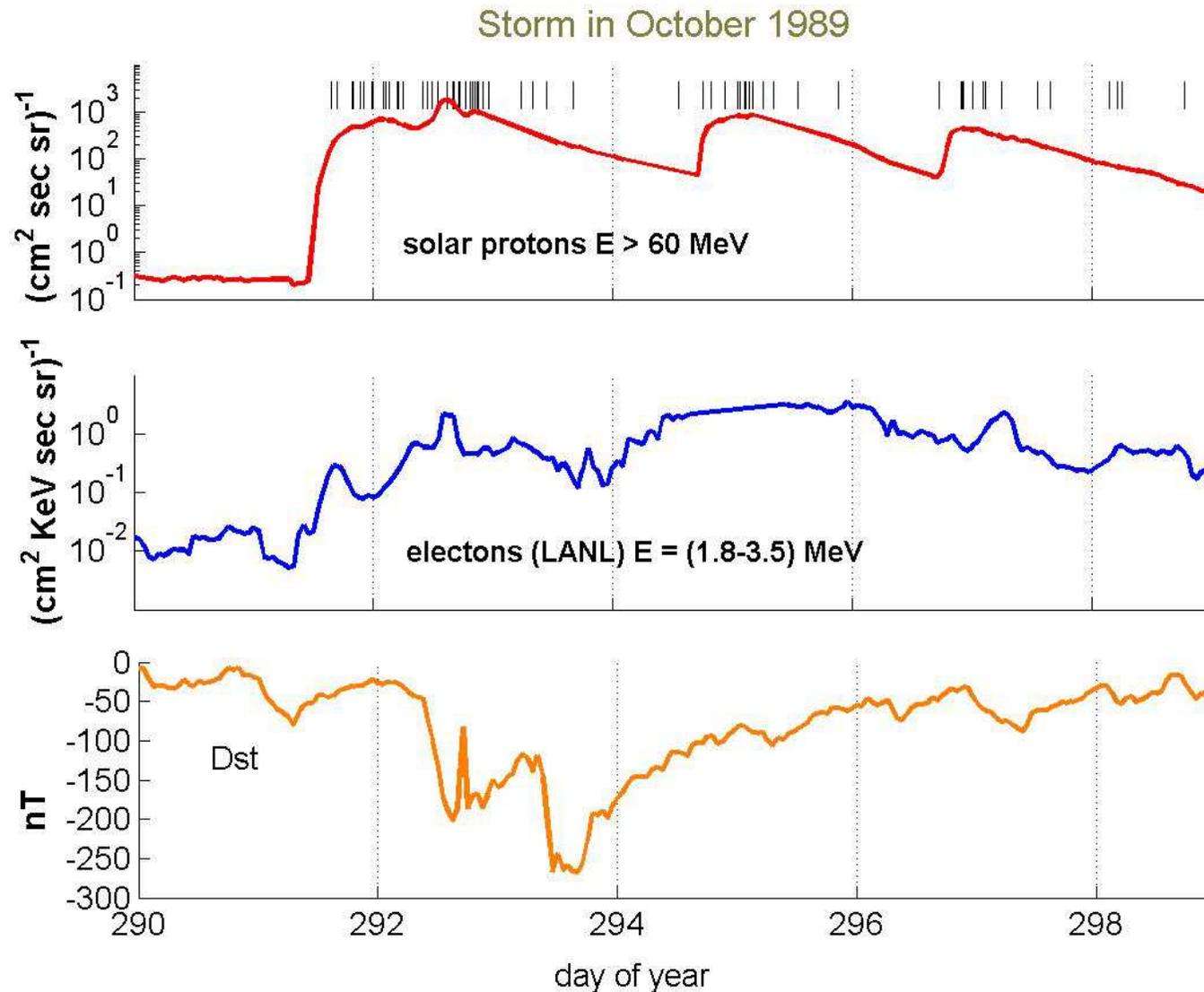
Воздействие космической погоды на работу спутниковых систем

- ❑ Количество сбоев в работе КА, вплоть до их полной потери, возрастает после солнечных вспышек и во время магнитных бурь, когда на несколько порядков увеличиваются потоки частиц разных энергий.
- ❑ Протоны солнечных вспышек вызывают разрушение солнечных панелей, нарушения в работе датчиков ориентации, создают объемных заряд в КА.
- ❑ Потоки магнитосферных электронов приводят к дифференциальной зарядке поверхности КА, пробоям диэлектриков, повреждают интегральные схемы.
- ❑ Миниатюризация электроники подвергает опасности пагубного воздействия на ее компоненты высокоэнергичных частиц.



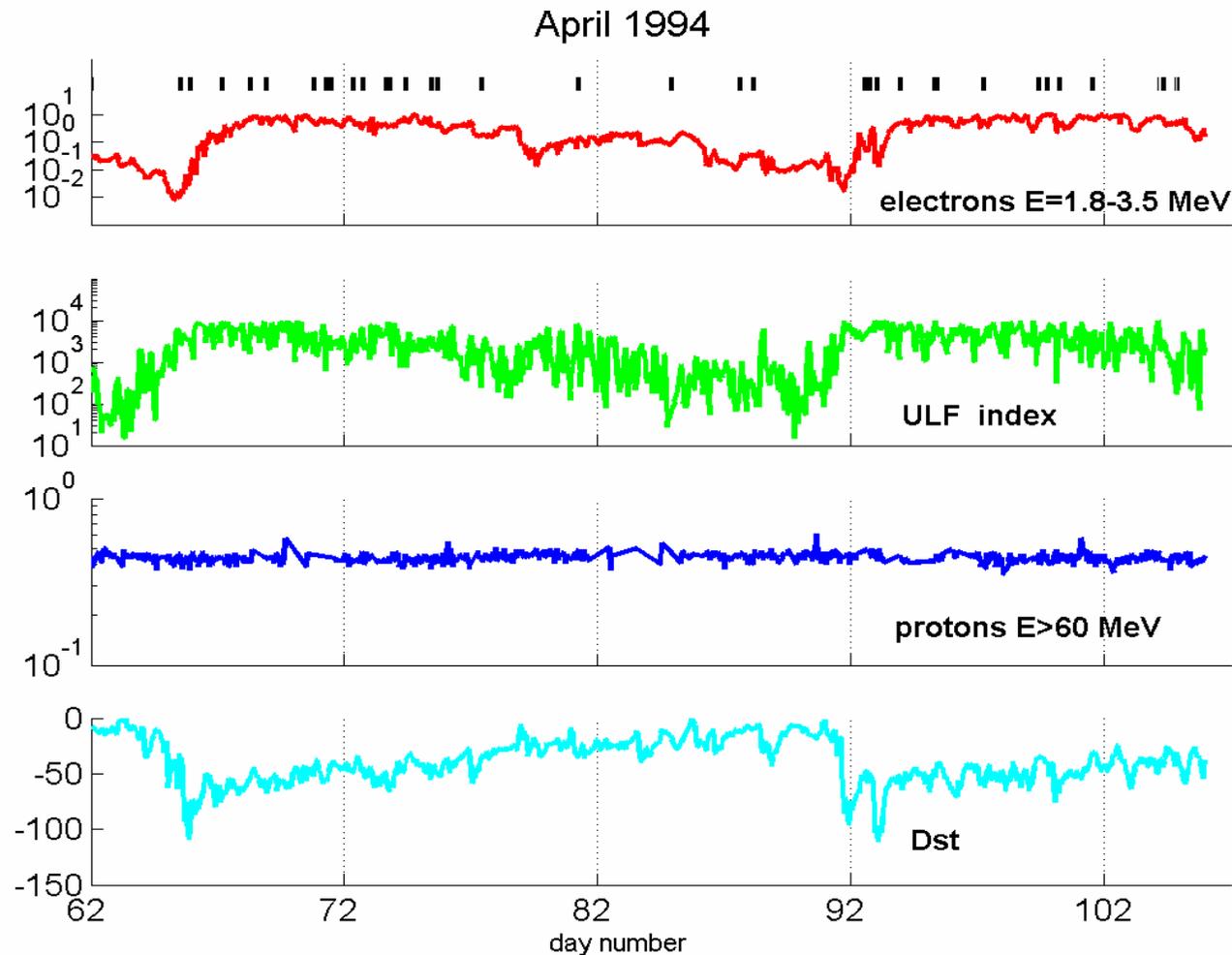
Solar flare protons as a cause of satellite anomalies

Solar flares produced strong magnetic storms and bursts of high-energy protons. Each burst caused a swarm of satellite anomalies.



“Killer” electrons and satellite anomalies

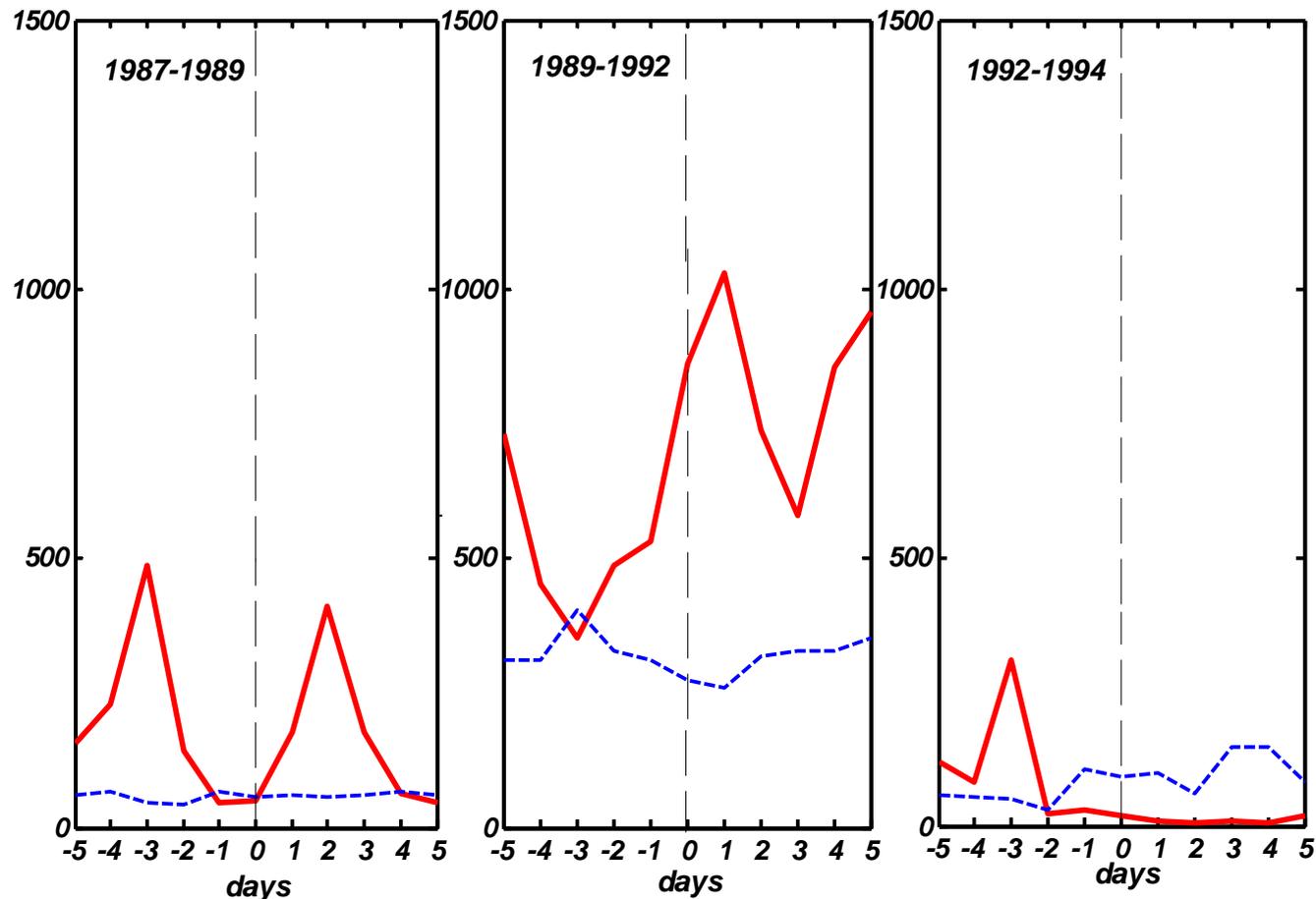
Since 1993 – decline of solar activity, no SPE, but satellite anomalies have not disappeared!
The main menace - from relativistic electrons! Increases of LANL electrons with $E=1.8-3.5$ MeV produce swarms of malfunctions



ULF wave activity – a driver of relativistic electrons?! ULF wave index appears to discriminate better than Dst or AE between those storms that do and do not produce relativistic electrons.

Superposed epoch analysis of solar protons for various phases of solar activity

SE analysis for solar protons (>2MeV) at different phases of solar activity



Solar maximum: satellite malfunctions occur even before the peak solar proton intensities (~3 times higher than during randomly selected days).

Correlation of protons with anomaly probability function $P(t)$: during the solar maximum is noticeable, ~0.3, but during the declining phase it is below a statistically significant level.

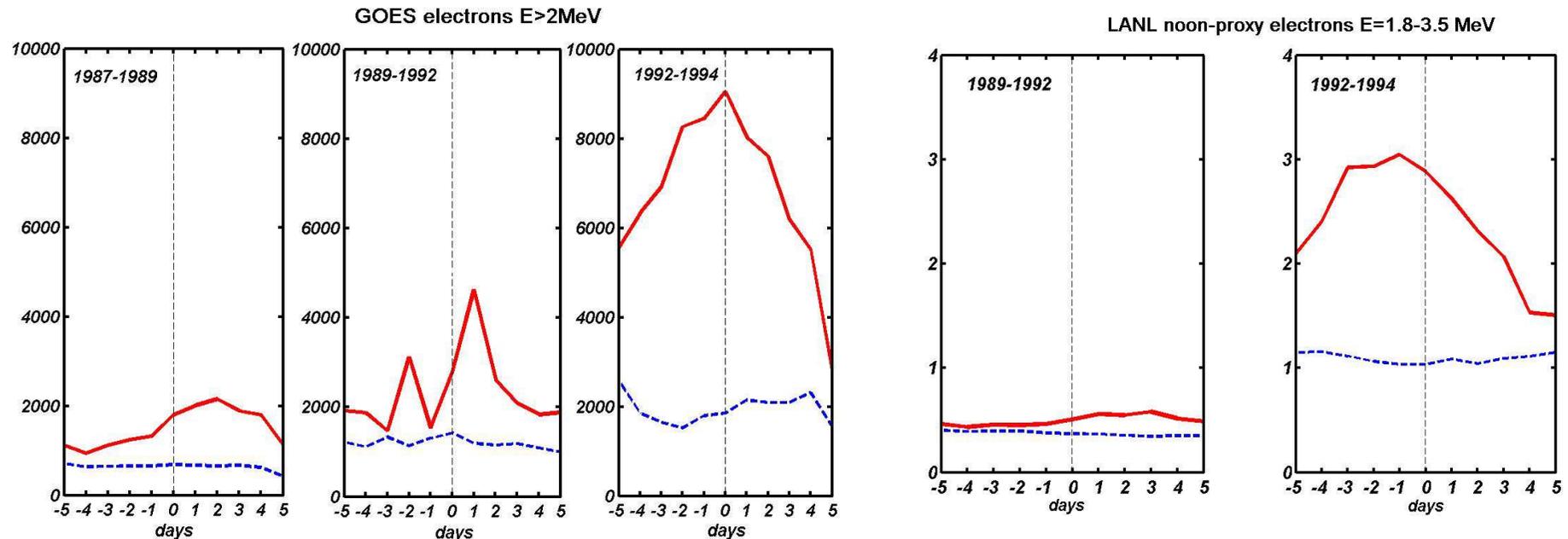
Superposed epoch analysis of “killer” electrons and satellite anomalies

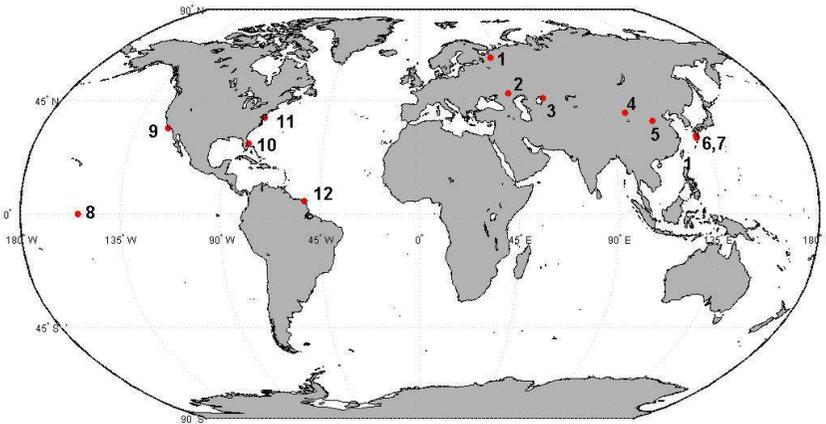
During maximum or increasing solar activity: rather weak impact (anomaly days are only ~20% above randomly selected days).

During decreasing solar activity: electron fluxes for a day of an anomaly exceed ~4.5 times the background level.

Correlation of relativistic electrons with the anomaly probability function $P(t)$: ~0.64 for declining solar activity, and ~0.3 for solar maximum.

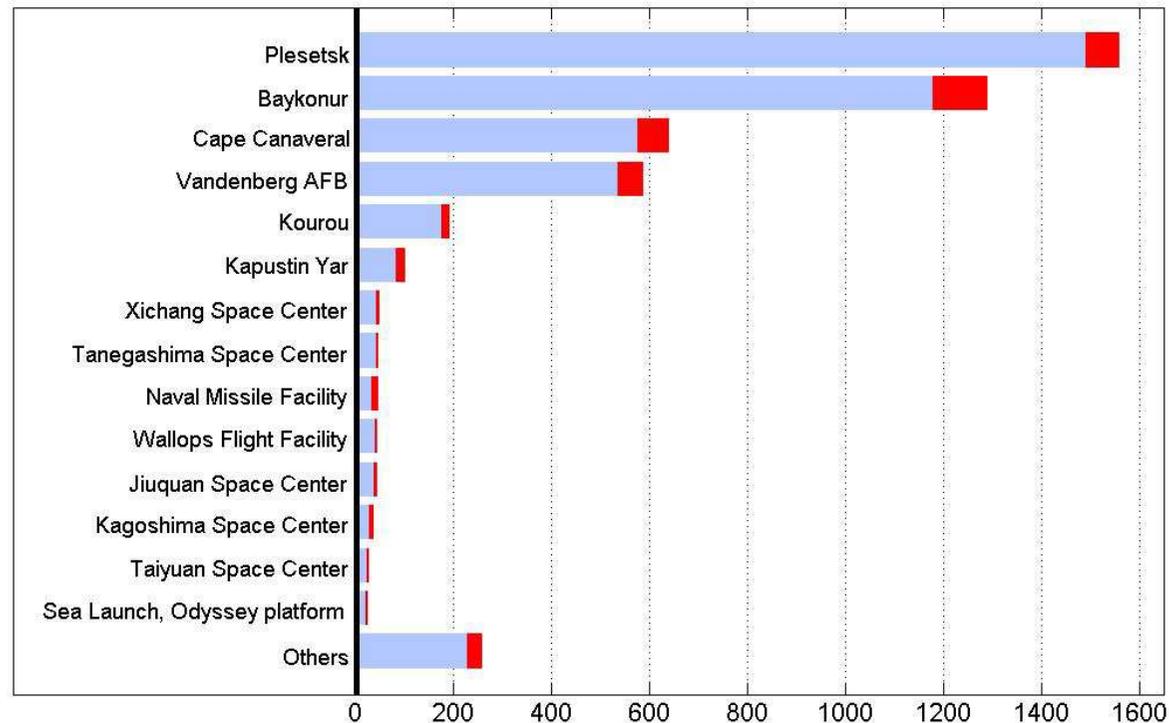
Verification with the noon-reconstructed data: During declining solar activity a satellite malfunction occurs statistically ~1 day after the peak intensities of relativistic electrons.



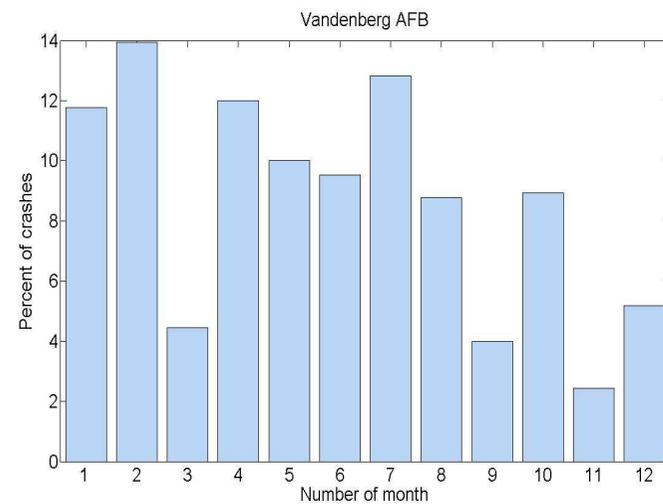
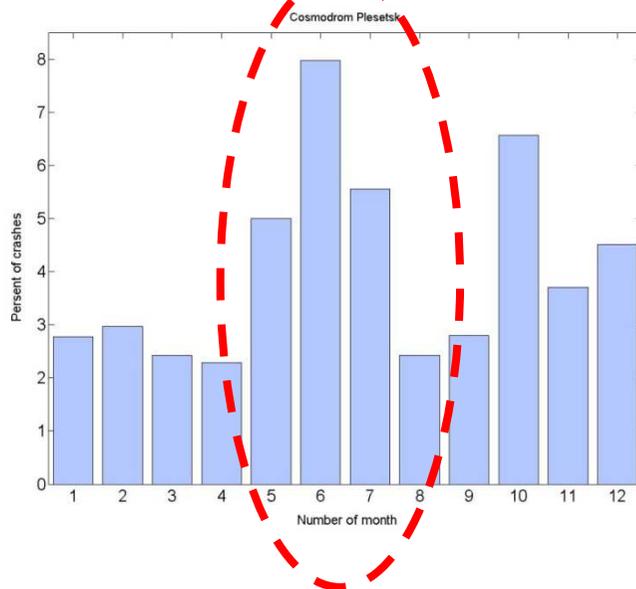
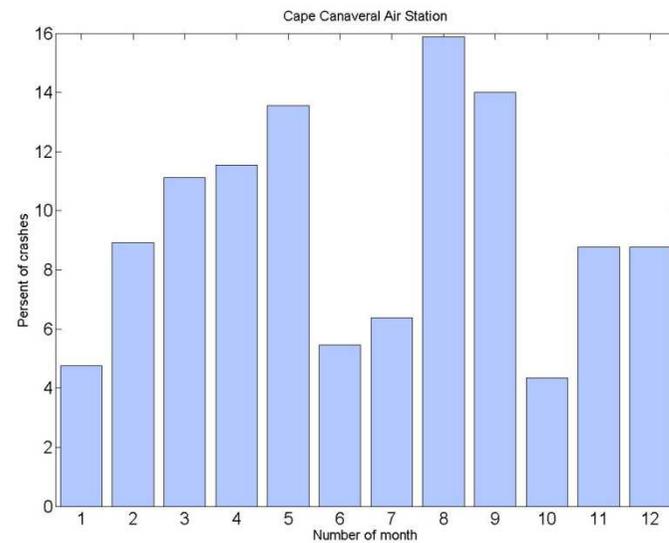
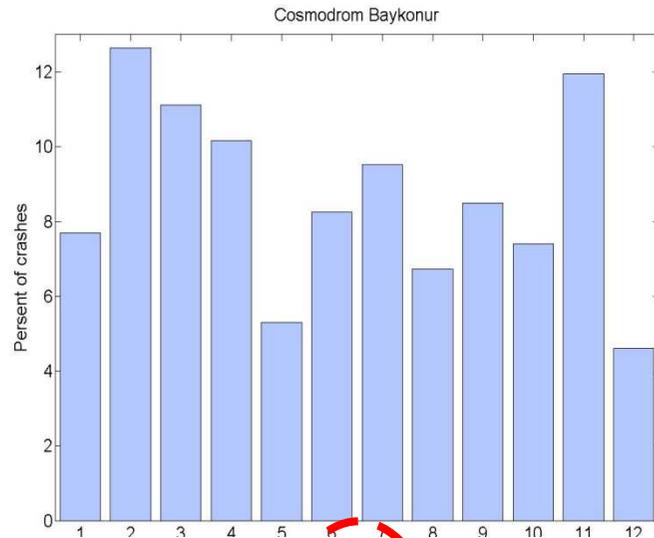


RELATIONSHIP OF WORLD-WIDE ROCKET LAUNCH FAILURES WITH GEOPHYSICAL PARAMETERS

Since 1957 >5000 space vehicles were launched world-wide, but ~400 of them failed. These crashes are commonly attributed to engineering faults in rocket or control systems.



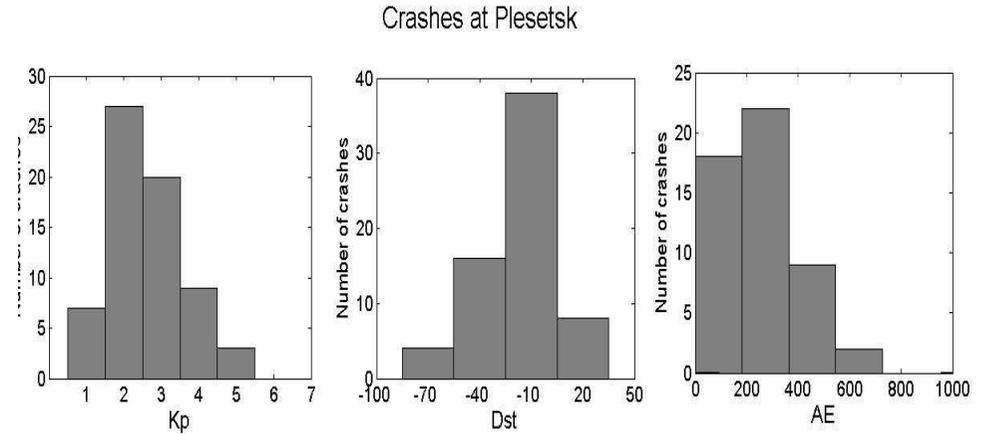
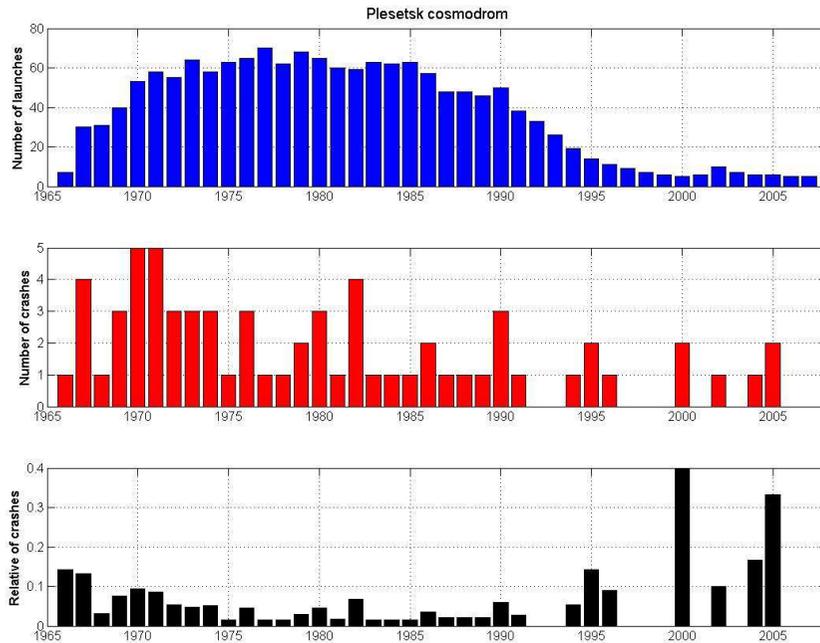
SEASONAL VARIATIONS OF THE LAUNCH CRASH PROBABILITY



At Plesetsk in summertime the percentage of launch failures increases about 2 times!

An additional negative factor which operates most significantly during summer?

High-latitude launching site Plesetsk

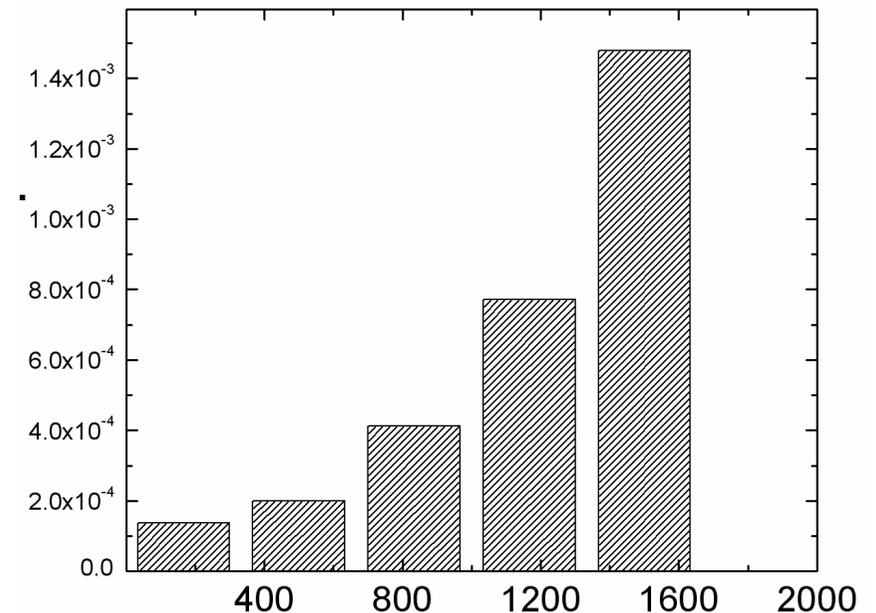


The failure probability for Plesetsk is stable in time, despite that number of launches has decreased & system performance improved.

The relative number of “summer” failures increases with the growth of AE!

(poor statistics: 17 events).

Summer months



Факторы космической погоды предоставляют опасность для безопасной работы технологических систем в Российской Арктике, т.к. Россия располагает самыми протяженными нефтегазопроводами и ЛЭП. Однако размах отечественных исследований явно отстает от работ в других странах.

Расширение высоковольтных энергетических сетей, рост связей между ними, увеличение нагрузки, ведут к повышению вероятности аварийных ситуаций при магнитных бурях. Оперативный прогноз возможности критических уровней GIC может быть использован операторами для снижения риска катастрофических последствий: уменьшения нагрузки, подключения емкостной защиты, и т.п.

Располагая расчетами отклика потенциалов и токов вдоль заданной ветки трубопровода на GIC инженеры смогут полно представить поведение катодной защиты при магнитных бурях.

Наличие численных синтетических моделей основных электрических сетей; для расчета величины GIC в отдельных элементах позволит выявить слабые элементы сети по отношению к GIC
US Aircraft Insurance Group. космическая погода ответственна за страховые выплаты \$ 0,5 млрд в 1996-2000. Хотя относительное число критических ситуаций во время запуска и работы КА невелико, даже единичные события связаны с громадными финансовыми потерями.

Задачи для российского космофизического сообщества:

- Вероятное предсказание магнитной бури с заблаговременностью 1-3 дня на основе спутниковых наблюдений за активностью Солнца;
- Оперативное предсказание момента и интенсивности магнитной бури с заблаговременностью 30-60 мин на основе наблюдений в точке L1;
- Создание математической модели для предсказания уровня потоков релятивистских электронов на геостационарной орбите;
- Создание статистической модели источника переменного магнитного поля, электрических полей и токов в ионосфере, и в конечном счете - наведенных земных токов (GIC) для Российской Арктики;
- Создание численных моделей основных электрических сетей, дополненных моделью проводимости земной коры, для расчета величины GIC в отдельных элементах сети. Выявление с помощью синтетической модели слабых