

Оценка влияния частоты геомагнитных возмущений на рост геомагнитно-индуцированных токов в ЛЭП

**Белаховский В.Б.¹, Пилипенко В.А.^{2,3}, Сахаров Я.А.¹,
Селиванов В.Н.⁴**

¹ – Полярный геофизический институт, г. Апатиты

² – Институт физики Земли им О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

³ – Институт космических исследований РАН, г. Москва

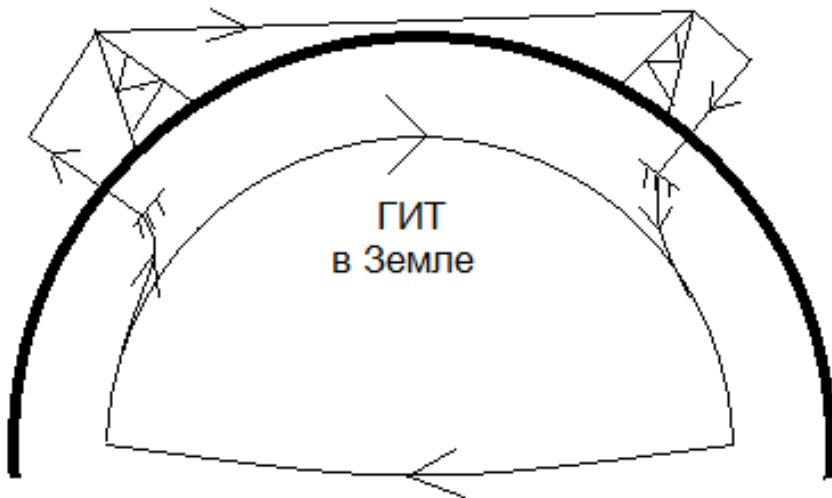
*⁴ – Центр физико-технических проблем энергетики Севера ФИЦ КНЦ РАН,
г. Апатиты*

Рост геомагнитно-индуцированных токов (geomagnetically induced currents, GIC) в протяженных технологических системах – важнейший фактор космической погоды.

Наведенные ГИТ опасны для трубопроводов, высоковольтных линий электропередач, железнодорожного оборудования, морских коммуникационных кабелей, телеграфных линий, трансформаторов.

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt}$$

ГИТ в ЛЭП





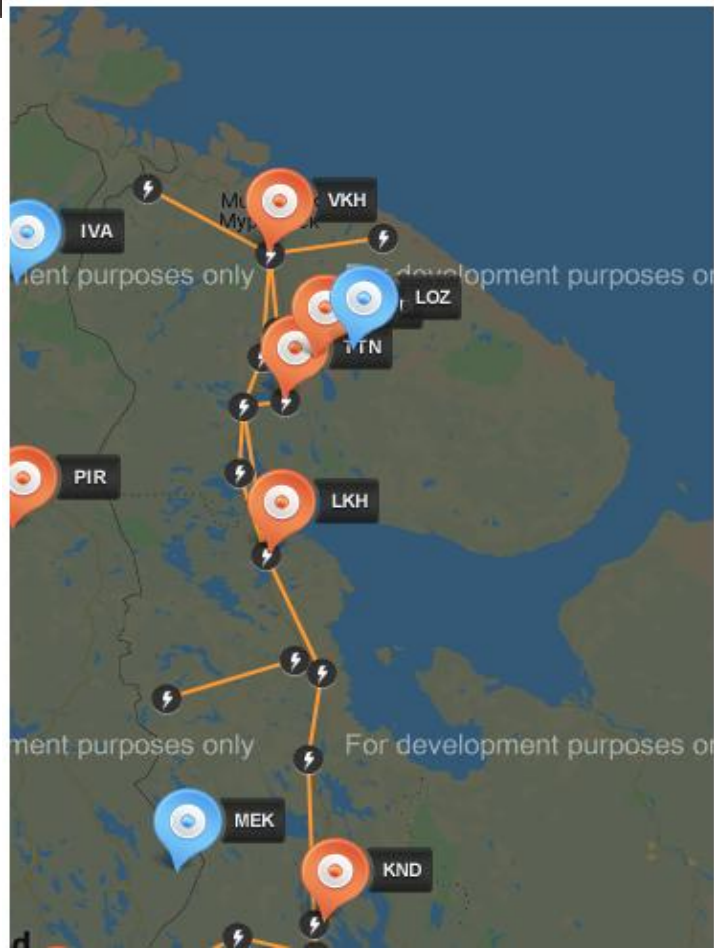
ПГИ и ЦЭС ФИЦ КНЦ РАН создана
единственная в России система
регистрации ГИТ в линиях электропередач
Мурманской области и Карелии

EURISGIC (European Risk for Geomagnetically Induced Currents)

Регистрация ведется непрерывно с конца 2011 года

ГИТ в нейтрали автотрансформатора

ЛЭП преимущественно ориентирована в
направлении север-юг



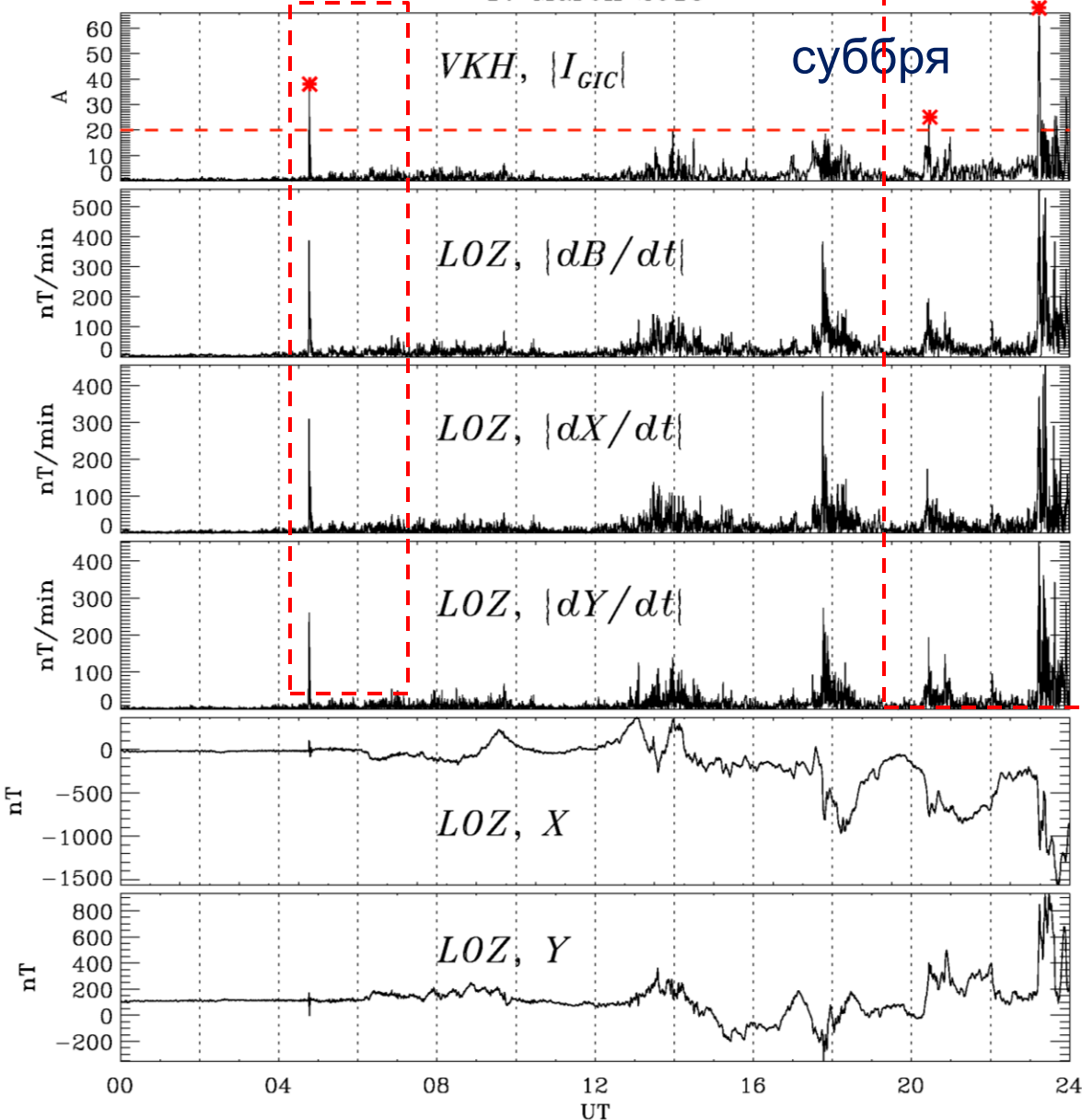
Станция	код	Lat , °	Long, °	Напряж.
Vykhodnoj	VKH	68.83	33.08	330 кВ
Revda	RVB	67.77	34.99	110 кВ
Titan	TTN	67.56	33.62	330 кВ
Loukhy	LKH	65.77	31.08	330 кВ
Kondopoga	KND	62.21	34.28	330 кВ

SSC

17 March 2015

Суббуря
(Різ пульсаци)

суббуря



Скачок ГИТ
происходит в момент
резкого роста dB/dt

$$dB/dt = \sqrt{(dX/dt)^2 + (dY/dt)^2}$$

$$dX/dt = (X_{i+1} - X_{i-1})/2\Delta t,$$

$$dY/dt = (Y_{i+1} - Y_{i-1})/2\Delta t$$

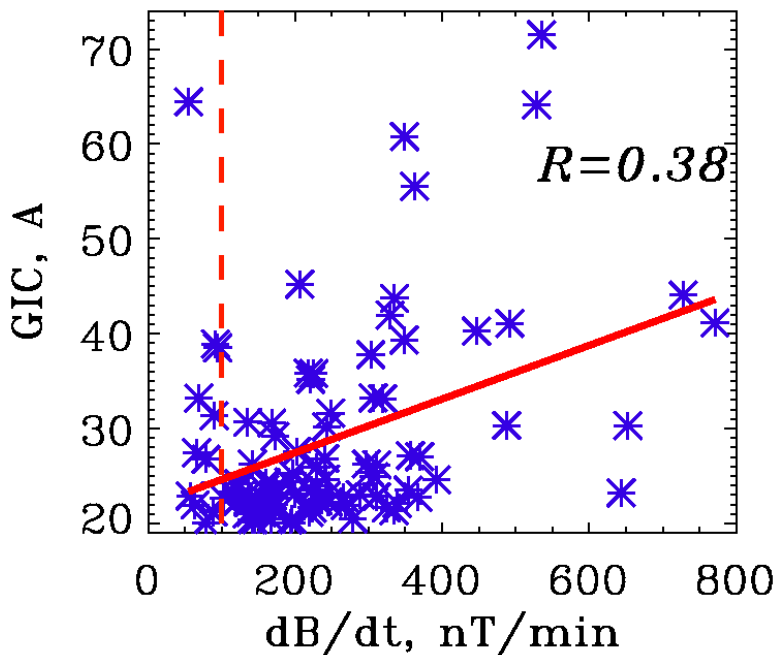
dB/dt очень часто используется как “прокси” роста ГИТ

В реальности амплитуда ГИТ зависит от многих факторов:

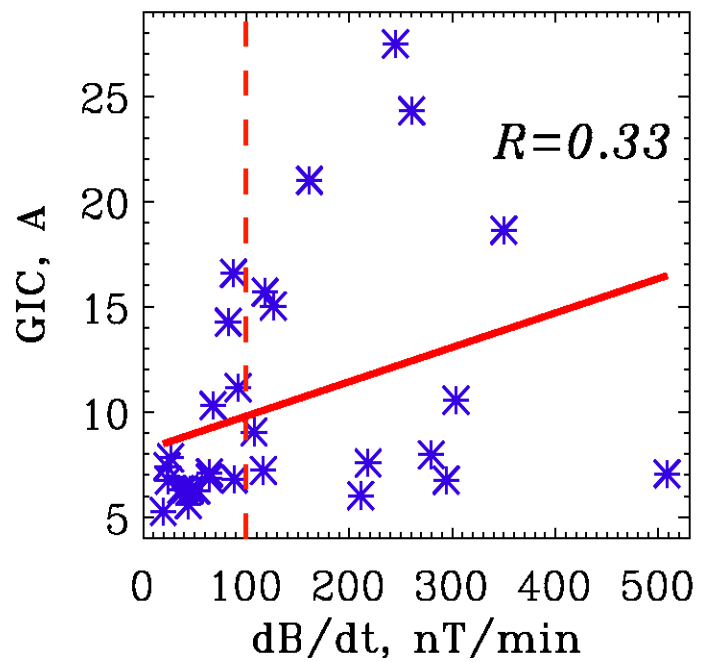
- конфигурации ионосферных токовых систем;
- конфигурации ЛЭП;
- проводимости земной коры;
- частоты геомагнитных возмущений?
- ...

Зависимость ГИТ от dB/dt за 11 лет наблюдений (2012-2022 г.г.)

VKN-LOZ (92 события)



KND-МЕК (32 события)



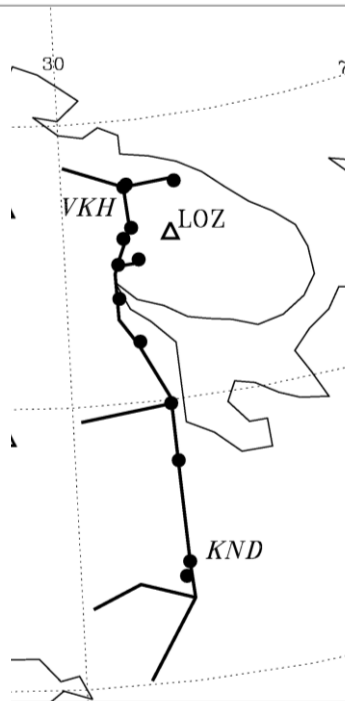
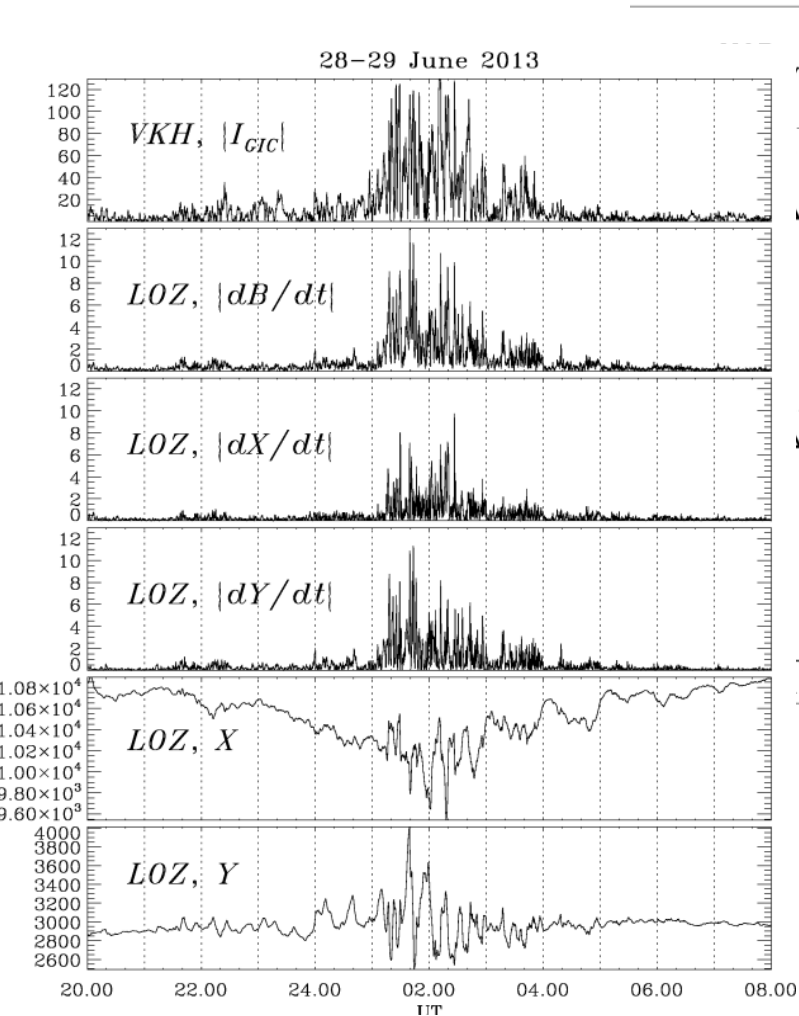
В среднем амплитуда ГИТ растет с ростом dB/dt, но связь очень нелинейная

Сложность прогноза ГИТ только на основании информации о dB/dt

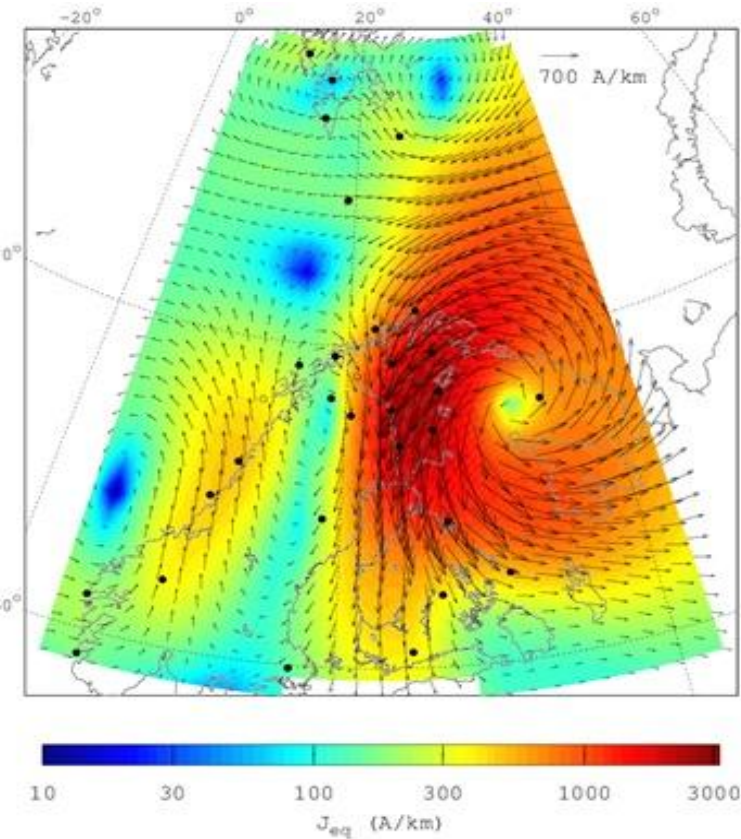
- Belakhovsky V.B., Pilipenko V.A., Selivanov V.N., Sakharov Y.A., Zhang J.J., Kolobov V.V.
The Extreme GIC occurrence during 11 years of observations in the north-west of Russia // Space Weather, 24, 5, e2025SW004575. 2026.

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.

$I \approx 125$ A – рекордное значение ГИТ



01.25 UT



Pi3 пульсации на фоне суббури

В рост величины ГИТ заметный вклад вносит не только авроральный электроджет, но и вихревые токовые системы, связанные с продольными токами в магнитосфере

**Как частота геомагнитных вариаций
влияет на рост геомагнитно-
индуцированных токов?**

**В работе рассмотрено влияние P_g и P_{c6}/P_{i3}
пульсаций на рост ГИТ**

Pg (pulsations giant) пульсации

$T \approx 1.5\text{-}2.5$ минуты (Pc4 диапазон)

$\Delta B \sim 10\text{-}20$ нТл

Очень монохроматичная форма

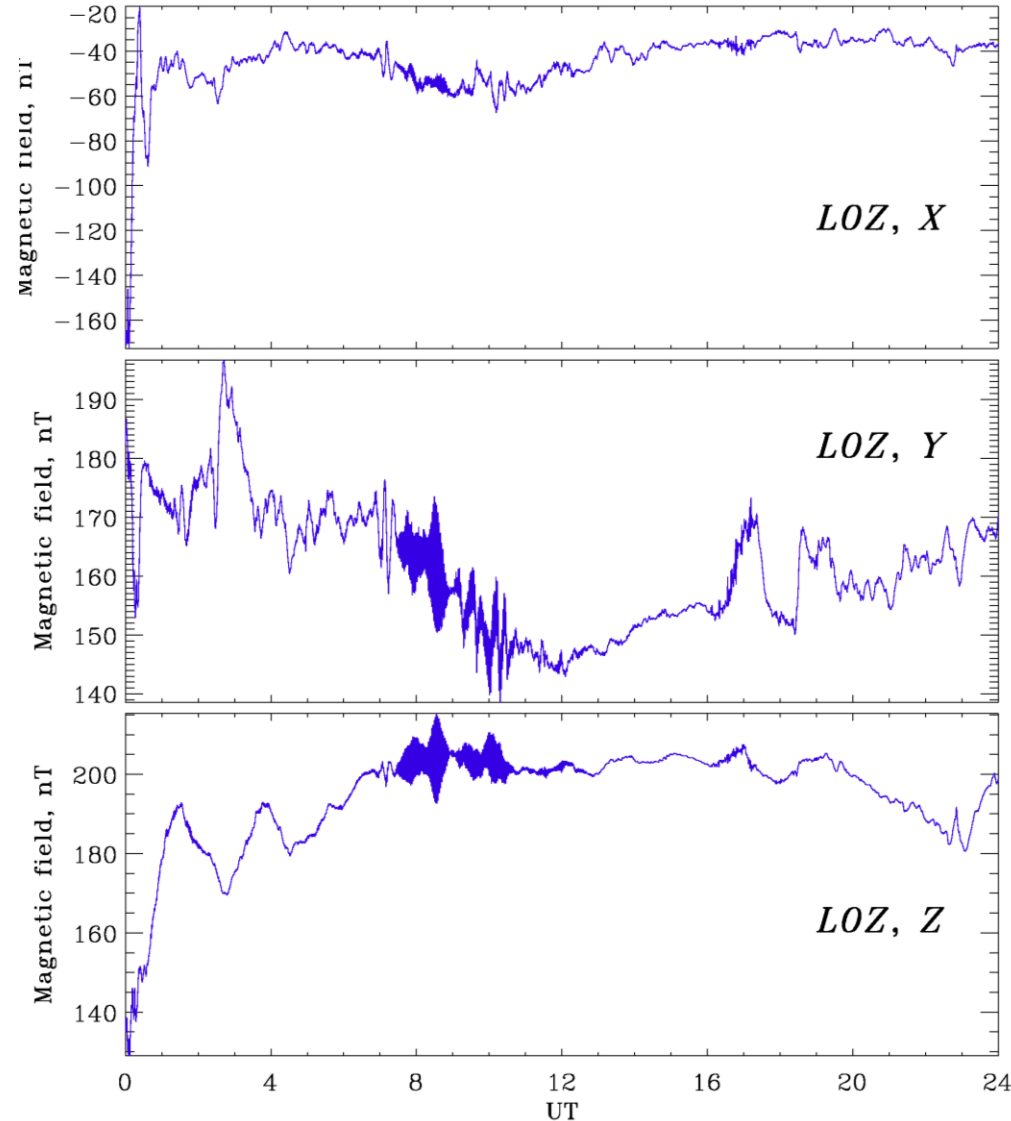
Преимущественно выражены
в Y, Z-компонентах магнитного поля

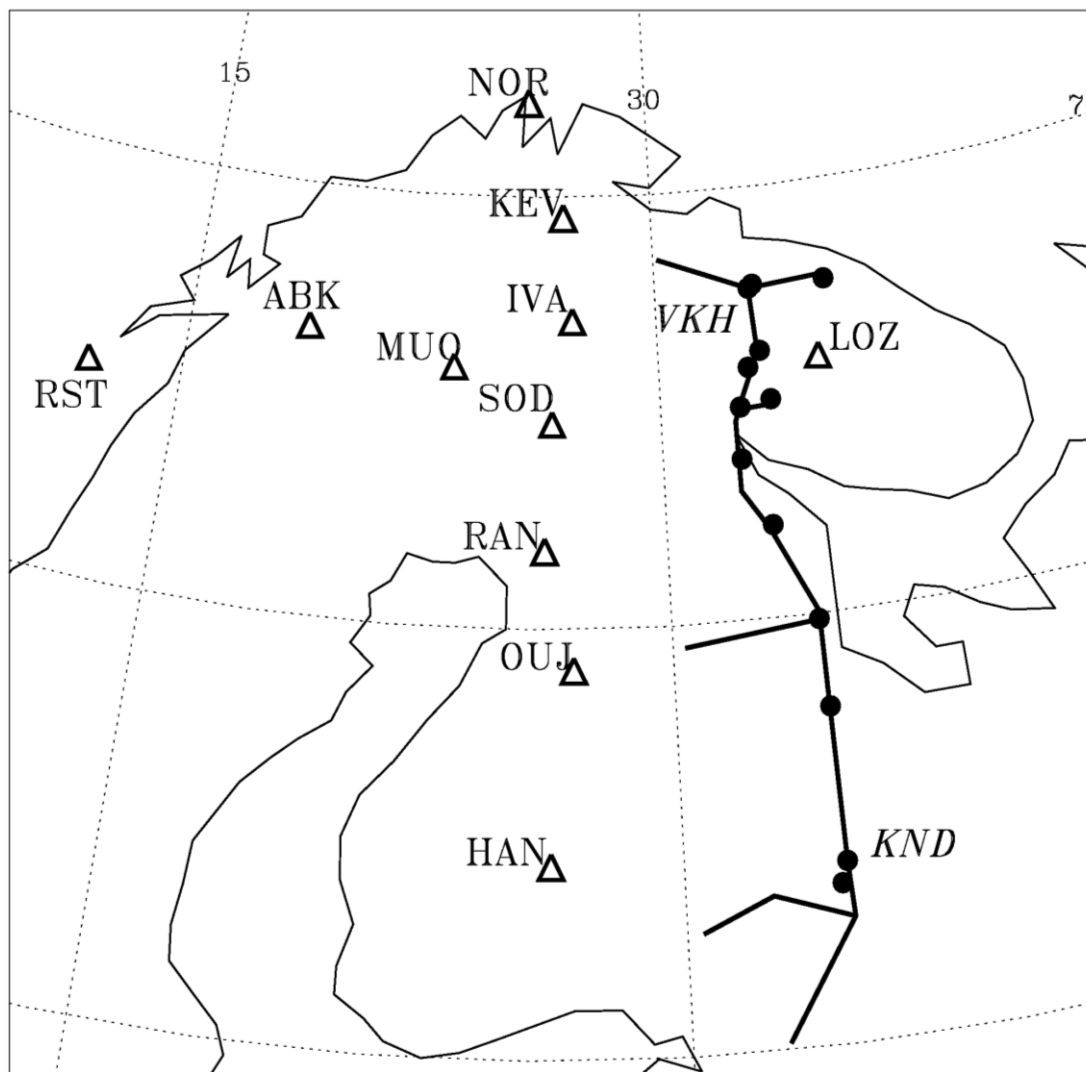
Возбуждаются протонами
кольцевого тока в результате
развития кинетических
неустойчивостей

**Pg пульсации могут быть
использованы в качестве маркера
для оценки влияния частоты
возмущения на рост ГИТ**

Обсерватория «Ловозеро ПГИ

25 September 2017





- Данные ГИТ с подстанции
VKH (Выходной)

- Данные магнитометра с
обсерватории ПГИ
“Ловозеро”

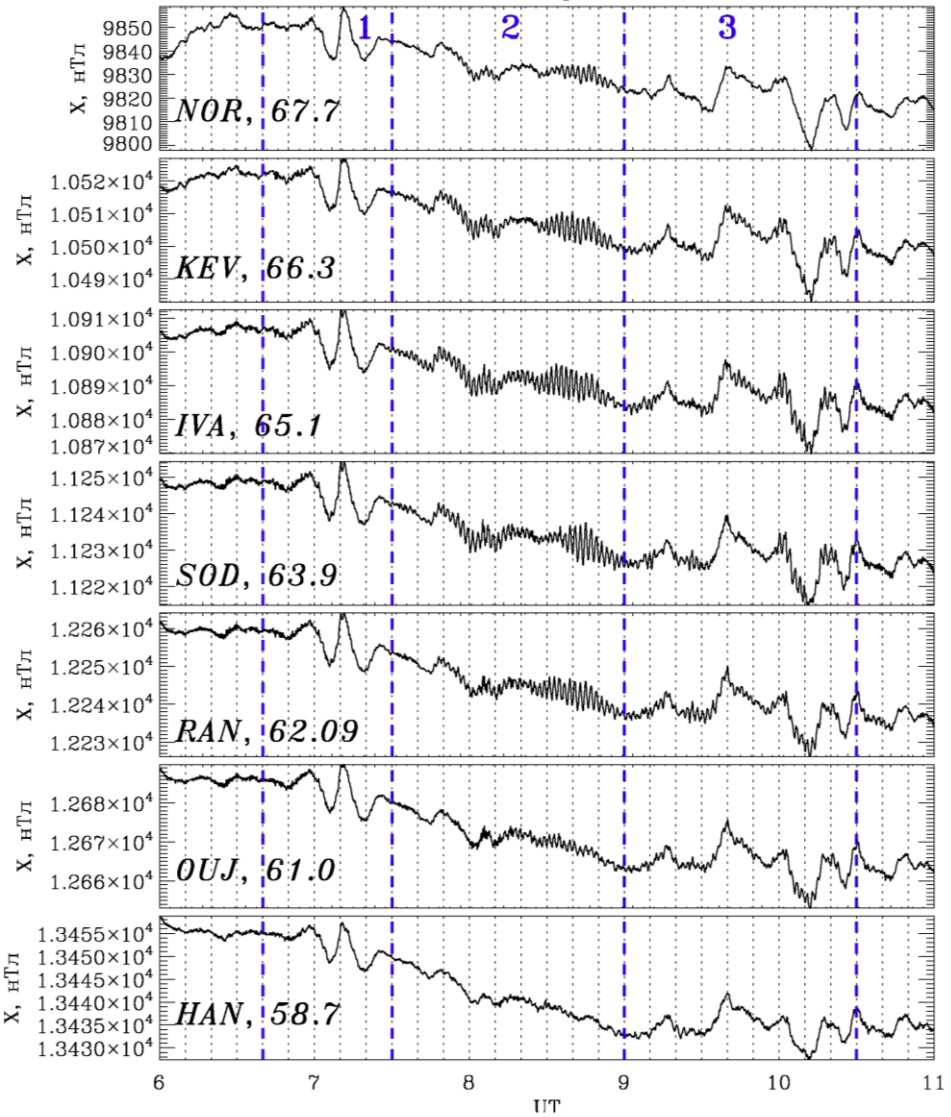
- 10-секундное временное
разрешение

Точки на карте —
трансформаторные
подстанции

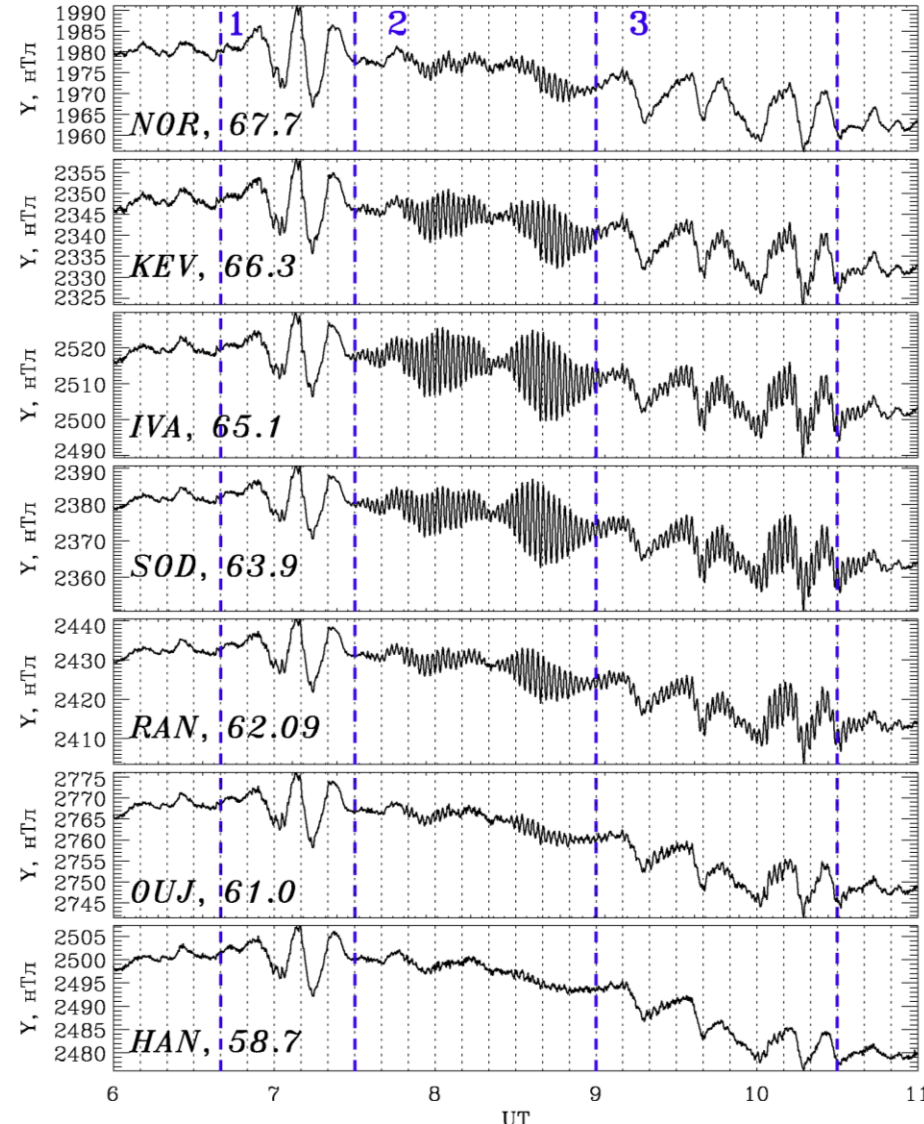
Широтный профиль пульсаций по данным магнитометров сети IMAGE

Масштаб Pc6 пульсаций по широте больше

25 сентября 2017

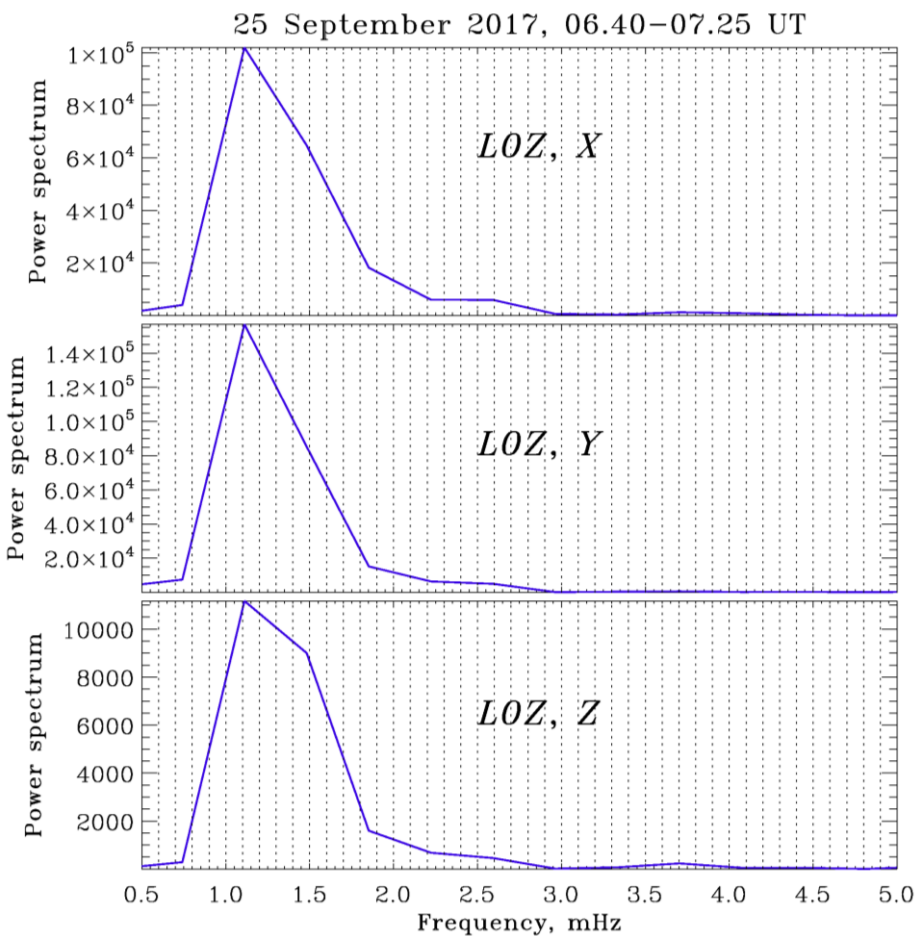


1 – Pc6 2 – Pg 3 – Pg+Pc6



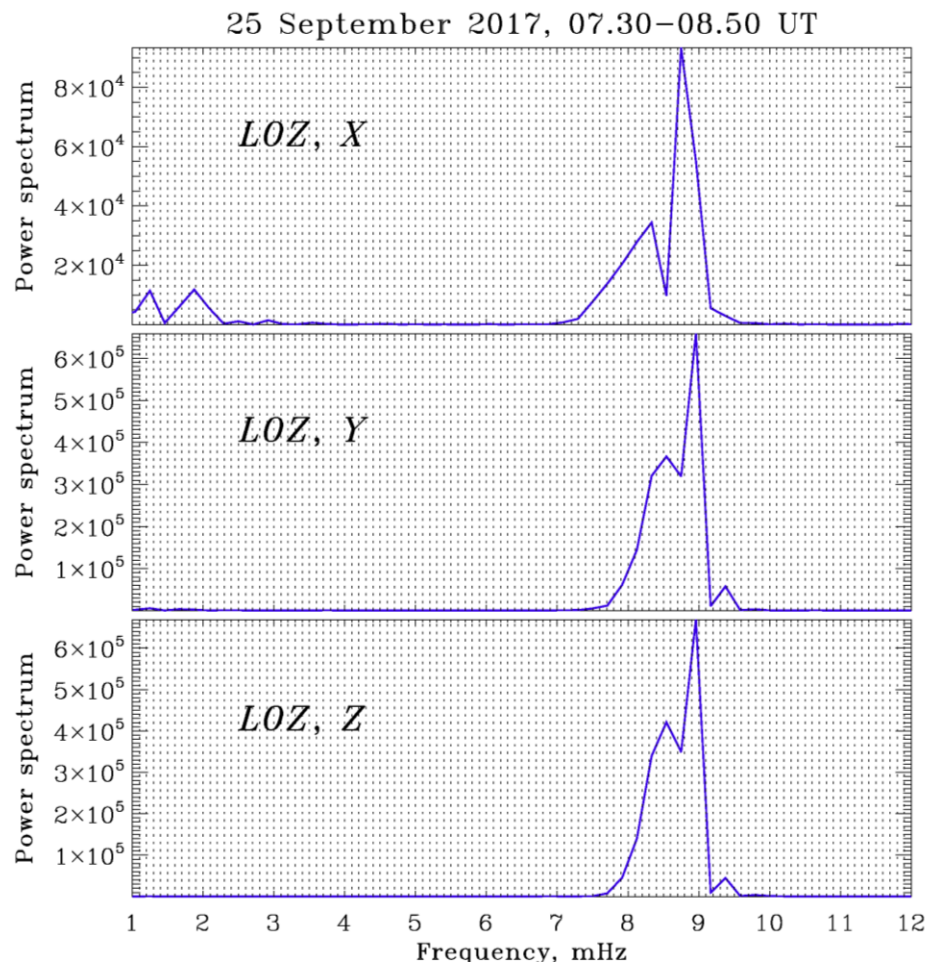
Примерно одинаковая амплитуда Pc6 и Pg пульсаций в Y-компоненте

Рs6 пульсации



$$f \approx 1.1 \text{ мГц}$$

Рg пульсации

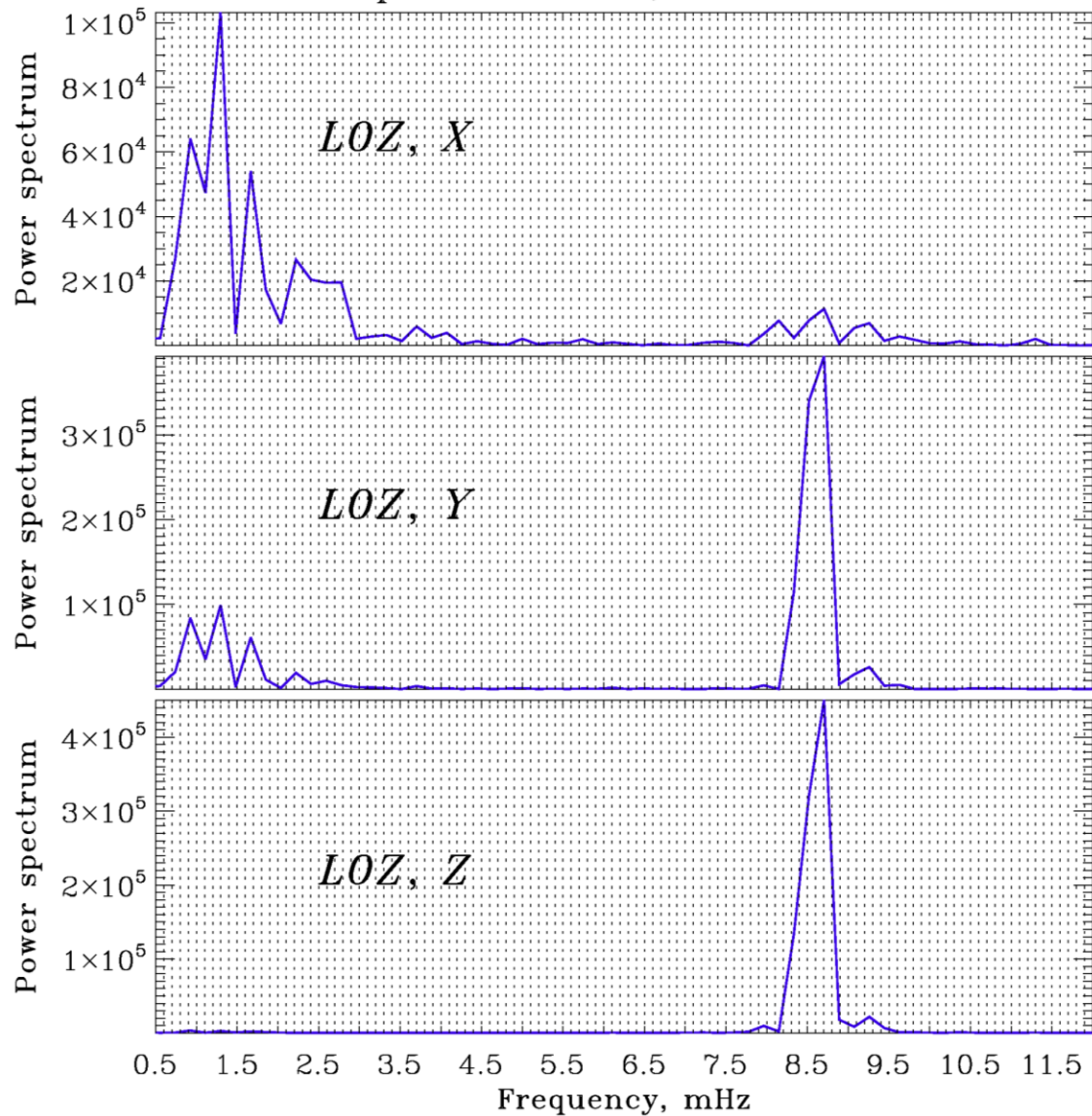


$$f \approx 8.8 \text{ мГц}$$

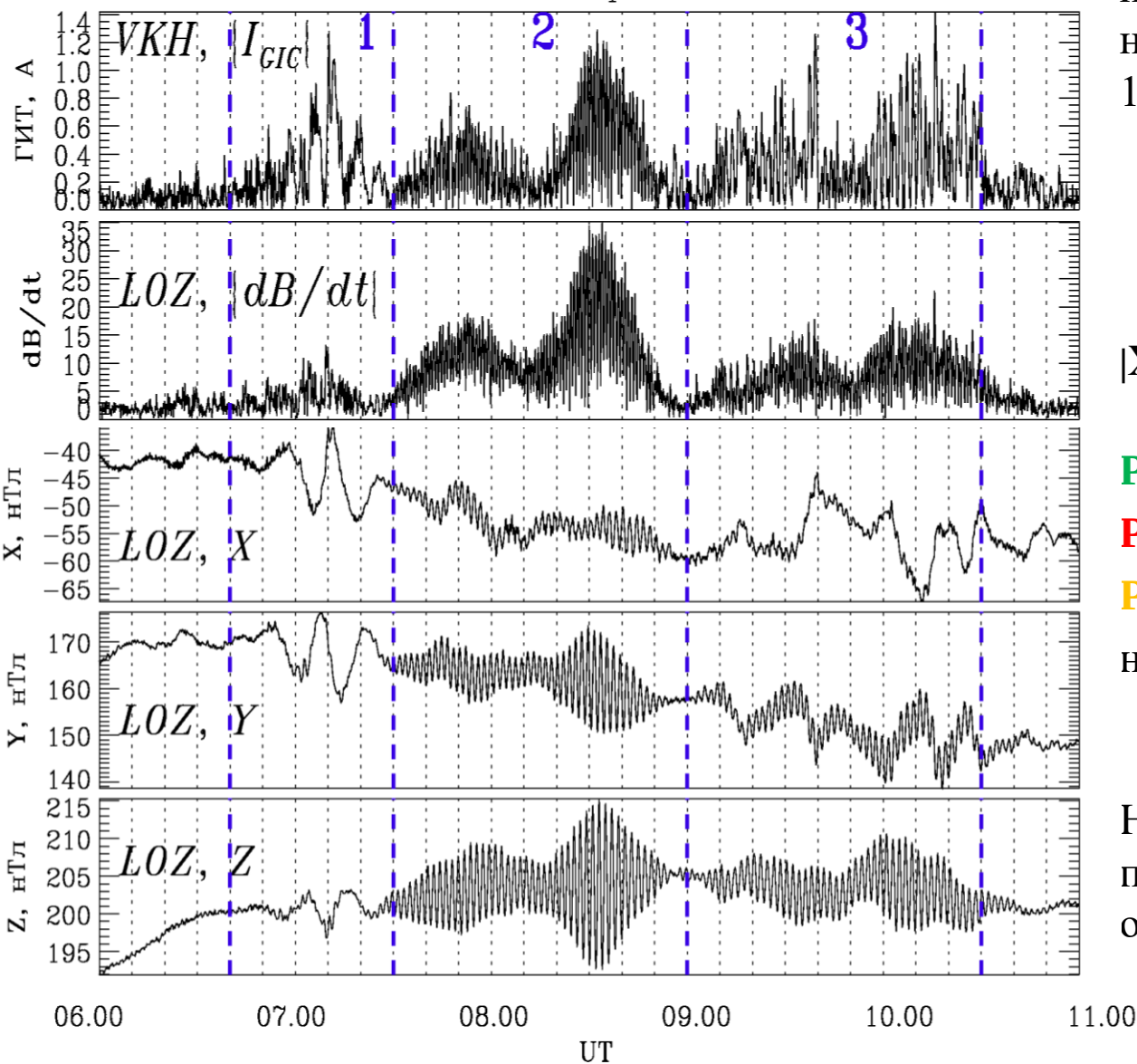
Частота пульсаций отличалась в 8 раз!

Pg +Ps6 пульсации

25 September 2017, 09.00–10.30 UT



25 сентября 2017



Pg пульсации привели к незначительному росту ГИТ на станции Выходной (VKH) – 1.3 Ампера

$|X| \approx |Y| \approx 15-20$ нТл

Pg – $|dB/dt| \approx 35$ нТл/мин!

Pc6 – $|dB/dt| \approx 12$ нТл/мин

Pc6+Pg – $|dB/dt| \approx 16-20$ нТл/мин

Но $|ГИТ|$ для всех видов пульсаций была примерно одинаковой – 1.3-1.4 Ампера

$$\varepsilon = -d\Phi / dt \quad \Phi = \int \vec{B} dS \quad \varepsilon - \text{ЭДС индукции, } B - \text{магнитное поле, } S - \text{площадь контура}$$

$$\delta = \sqrt{2 / \mu_0 \sigma \omega} \quad - \text{толщина скин-слоя}$$

В среднем проводимость земной коры на Кольском п-ове $\sigma = 10^{-2}$ См/м [Grayver et al, GRL, 2017],

$$f_1 = 1.1 \text{ мГц} - \delta_1 = 151 \text{ км}$$

$$f_2 = 8.8 \text{ мГц} - \delta_2 = 53 \text{ км}$$

Расстояние между трансформаторами – ~50-70 км.

Увеличение δ на 100 км (с ~50 до 150 км) $\rightarrow$ S увеличивается ~ в 3 раза.

dB/dt для P_g-пульсаций примерно в 3 раза больше, чем для P_{c6}-пульсаций

Поэтому более низкие значения dB/dt для P_{c6}-пульсаций компенсируются большей глубиной скин-слоя, что приводит к примерно одинаковым значениям ГИТ на станции VКН для разных типов пульсаций.

Выводы

Проанализировано влияние P_g и P_{c6}-пульсаций примерно одинаковой амплитуды (15-20 нТл), частота которых отличалась в 8 раз, на рост ГИТ.

Показано, что P_g-пульсации приводят к незначительному росту ГИТ (~1.3 А). Влияние P_g пульсаций на рост ГИТ рассмотрено впервые.

P_g пульсации приводят к более высоким значениям dB/dt (~35 нТл/мин), чем P_{c6}-пульсации (~12 нТл/мин). Мощность P_g пульсаций была даже немного выше мощности P_{c6}-пульсаций. Однако P_{c6}-пульсации наводят в ЛЭП сопоставимый и даже больший по амплитуде ГИТ (~1.3-1.4 А), чем P_g-пульсации.

Предполагается, что в результате скин-эффекта низкочастотные сигналы (P_{c6}) проникают на большую глубину в литосфере Земли. Это приводит к увеличению площади контура и созданию большего магнитного потока, что приводит к большей ЭДС индукции и соответственно большему ГИТ в ЛЭП. Проведенные оценки толщины скин-слоя для P_g и P_{c6}-пульсаций показывают согласие данного механизма с экспериментальными наблюдениями.

Таким образом, при прогностической оценке ГИТ в ЛЭП необходимо учитывать не только dB/dt , но и частотный состав сигнала.