



Российский
научный фонд

Влияние космической погоды на функционирование транспортных и инженерных систем в высоких широтах РФ

*А.А. Соловьев, В.А. Пилипенко, Н.В. Ягова,
А.В. Воробьев, Д.В. Кудин*

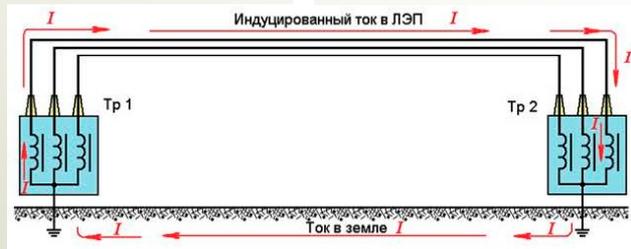
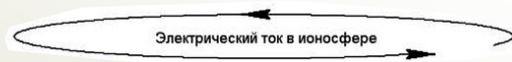
Геофизический центр РАН,
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

Уязвимость технологических систем воздействию космической погоды

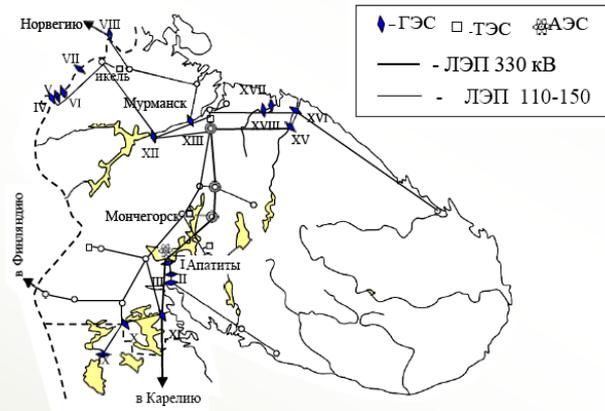


Возбуждение ГИТ в ЛЭП при разных типах геомагнитных возмущений (1)

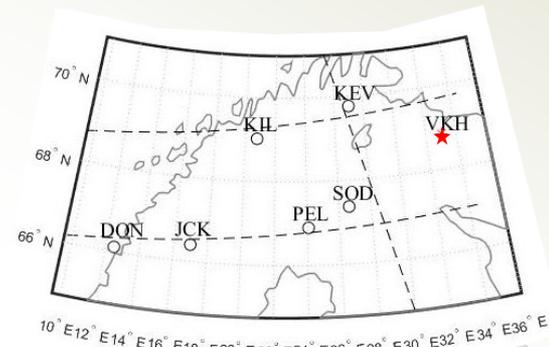
- Возбуждение ГИТ в нейтралях трансформаторов → отказы электрооборудования (отдельные элементы, лавинное отключение целых регионов)
- Магнитные бури – наиболее исследованный источник ГИТ
- Исследуются ГИТ вне бури (изолированные суббури, геомагнитные пульсации)



Качественная схема формирования геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ)



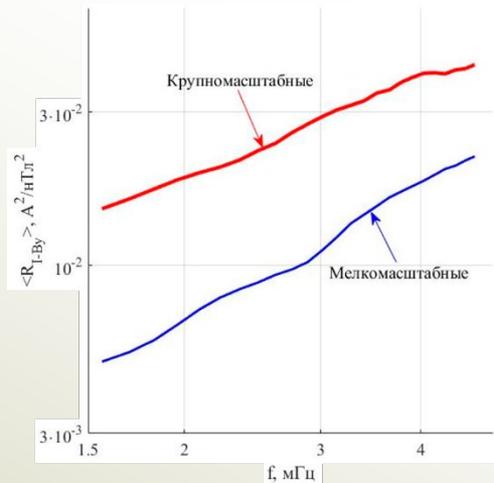
Система регистрации ГИТ в нейтралитрансформатора на ЛЭП «Северный транзит» (Кольский п-ов, Карелия)



Геомагнитные измерения 2014-2018 гг. на близлежащих станциях (Россия, Финляндия)

Возбуждение ГИТ в ЛЭП при разных типах геомагнитных возмущений (2)

Факторы, влияющие на ГИТ-эффективность пульсаций:



Влияние пространственного масштаба на ГИТ-эффективность

1. Пространственный масштаб

Yagova et al., Earth Planets Space 2021

2. Форма спектра

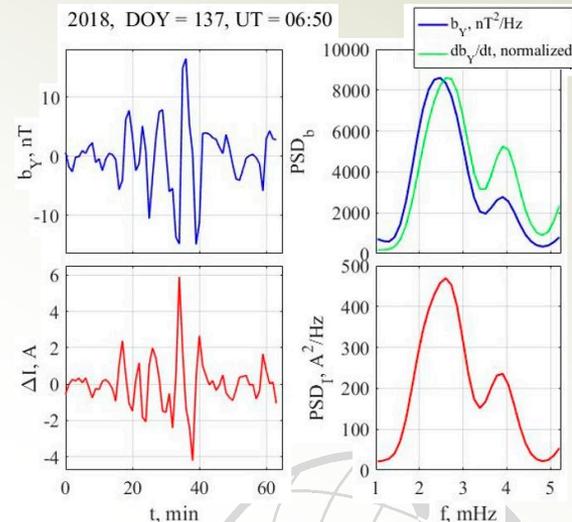
Sakharov et al., Russ. J. Earth. Sci. 2022

3. Поляризация

Сахаров и др., Известия РАН. Серия физическая 2021

Опасность вызывают:

1. Разовые ГИТ $\gg 10$ А в нейтрали (бури/суббури)
2. Длительное (часы) воздействие ГИТ в ~ 10 А (пульсации ~ 10 нТл) статистически более опасно



Пример точного совпадения временной формы и спектров пульсаций магнитного поля (сверху) и ГИТ (снизу)

Прототип автономной градиентной установки для дистанционной регистрации ГИТ в ЛЭП (1)

- Прямые измерения тока в нейтрали являются технически сложными, требуют больших затрат и физического подключения к трансформаторному оборудованию
- Дистанционные наблюдения – предпочтительный способ оценки величины ГИТ. Эта задача решается градиентными магнитными измерениями (закон Био-Савара)

Прибор физически связан с трансформатором



Схема измерения ГИТ в нейтрали Баранник и др., Труды КНЦ РАН. Энергетика 2011



Рис. 1. Структурная схема системы регистрации градиентного тока. АЦП – аналого-цифровой преобразователь, АПУ – автономный источник питания, ДТ – датчик тока, ПЭ – персональный компьютер, GSM – система сотовой связи.

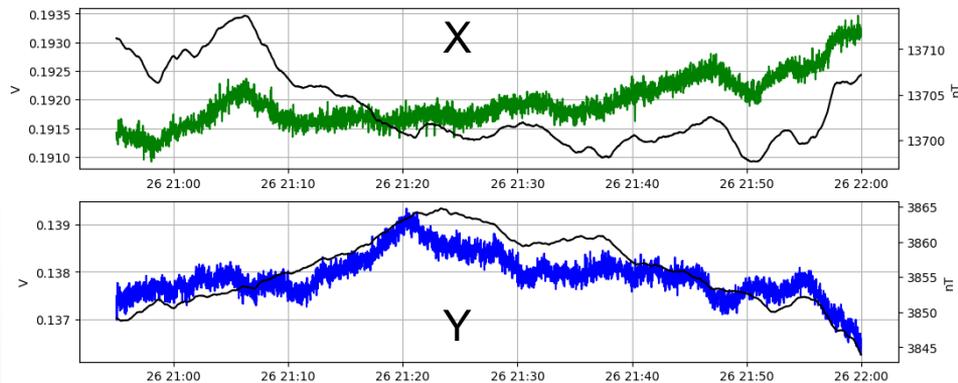


Прототип автономной градиентной установки для дистанционной регистрации ГИТ в ЛЭП (2)

- Собран на основе сборок датчиков слабых магнитных полей типа И (Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН)
- Испытан на магнитной обсерватории стандарта ИНТЕРМАГНЕТ «Климовская» (Архангельская обл.)



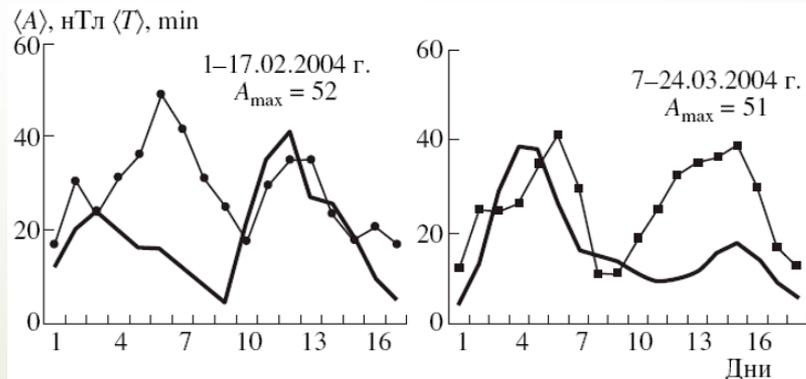
Записи градиентной установки (цветные кривые) и обсерваторского магнитометра (черные)



Итог: чувствительность и точность достаточны для фиксации $dB_H \geq 10$ нТл (потенциально опасные ГИТ)

Сбои в работе железнодорожной автоматики и геомагнитная активность (1)

- Лучше всего изучены ГИТ в ЛЭП и связанные с ними сбои в работе электрооборудования
- ГИТ возбуждаются в любых протяженных проводниках, в том числе в рельсах
- Работ по влиянию геомагнитных возмущений на объекты ж/д инфраструктуры мало, хотя первые описания были сделаны около 100 лет назад
- Во время сильных бурь рост числа сбоев наблюдается даже на средних широтах

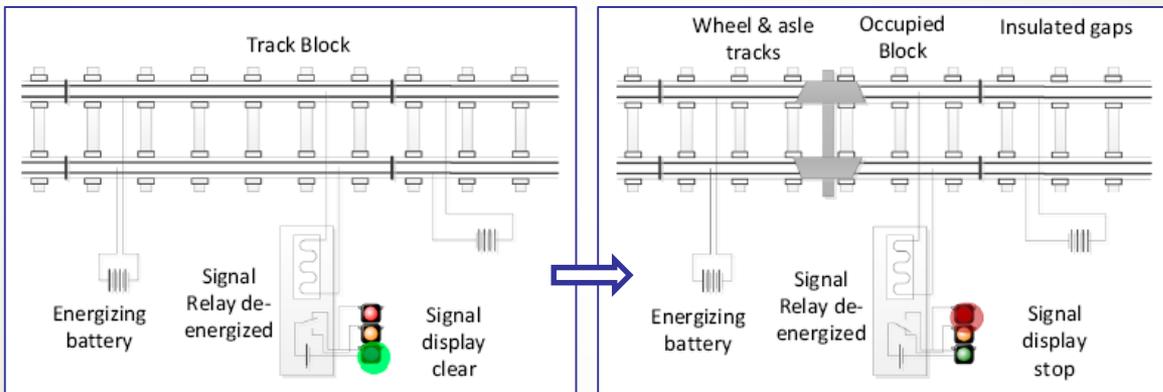


Скользящие средние за 5 суток продолжительности отказов (круги) и индексы локальной геомагнитной активности на Вост.-Сиб. ж/д во время геомагнитных бурь

Касинский и др., Геомаг. и аэрон. 2007



Сбои в работе железнодорожной автоматики и геомагнитная активность (2)



Старая схема: рельсовый стык содержит диэлектрик, колесо замыкает цепь и подает сигнал на светофор

Thaduri et al., Int J Syst Assur Eng Manag 2020

- Во время бури 1982 г. в Швеции ж/д светофор переключался с красного на зеленый свет и обратно без видимых причин. Наиболее опасным является ложный зеленый
- Изменения технической базы приводят к пропаданию одних эффектов и возникновению новых, но общая физическая причина (возбуждение ГИТ в протяженном проводнике) устранена быть не может



В зависимости от направления ГИТ в рельсах, может быть как ложный красный при свободном пути (любое направление ГИТ), так и ложный зеленый – при занятом (ГИТ с обратным знаком)

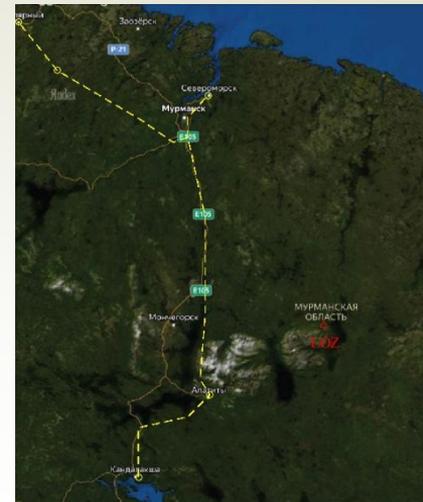
Сбои в работе железнодорожной автоматики и геомагнитная активность (3)

- Архив журнальных записей запротоколированных сбоев в работе ж/д автоматики на участке Октябрьской железной дороги от ст. Кадалакша (67.15° СШ) до ст. Никель-Мурманский (69.4° СШ) за 2001–2006 гг.
- Всего **более 1800 записей** о сбоях за 6 лет

Группы событий:

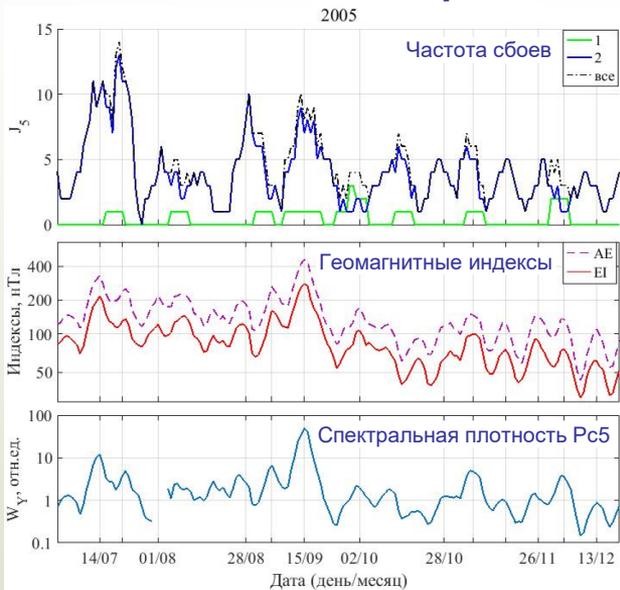
- **(0): период без сбоев** длительностью > 1 суток
- **(1): сбои без явной** механической/метеорологической/... внешней **причины** (априорно эти сбои с большей вероятностью вызваны возмущениями космической погоды)
- **(2): сбои с указанием причины** – чаще всего это механические повреждения, метеорологические причины или вмешательство посторонних лиц

Розенберг и др., Железнодорожный транспорт 2021

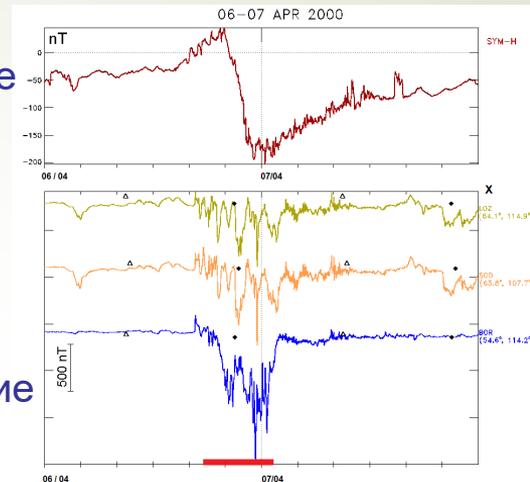


Сбои в работе железнодорожной автоматики и геомагнитная активность (4)

Анализ с помощью 4 статистических тестов на разных принципах показал:



1. Вероятность появления сбоев растет с уровнем геомагнитной активности
2. Значимым оказываются интегральные за 2–4 дня значения индексов (~длительность бури)
3. Группы сбоев (2) не обнаруживают отличий в статистической связи с геомагнитной активностью
4. Возможные причины п. 3 – технические (неточности описания) и физические (косвенное влияние через погоду)



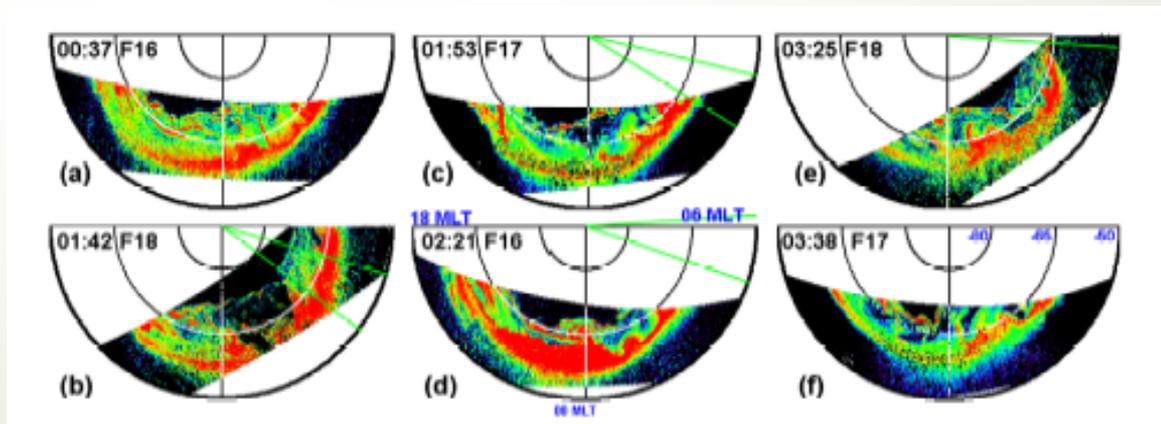
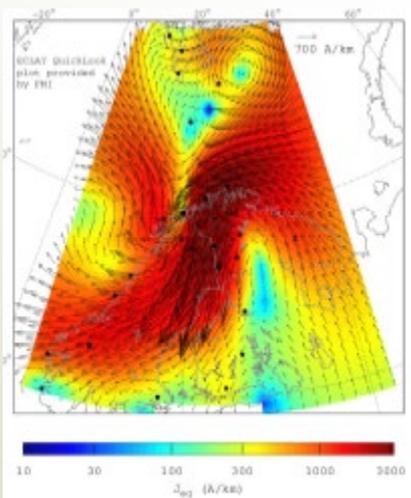
**Ложное срабатывание
сигнализации совпадает с
бурей**

Совпадение максимумов авроральной активности / локальной возмущенности и частоты сбоев

Ягова и др., Арктика: экология и экономика 2023

Краткосрочный прогноз авроральных высыпаний (1)

Анализ амплитуды ГИТ и сбоев на ж/д показывает, что источником самых сильных возмущений является авроральный овал (область дискретных высыпаний) → **необходимость прогноза**

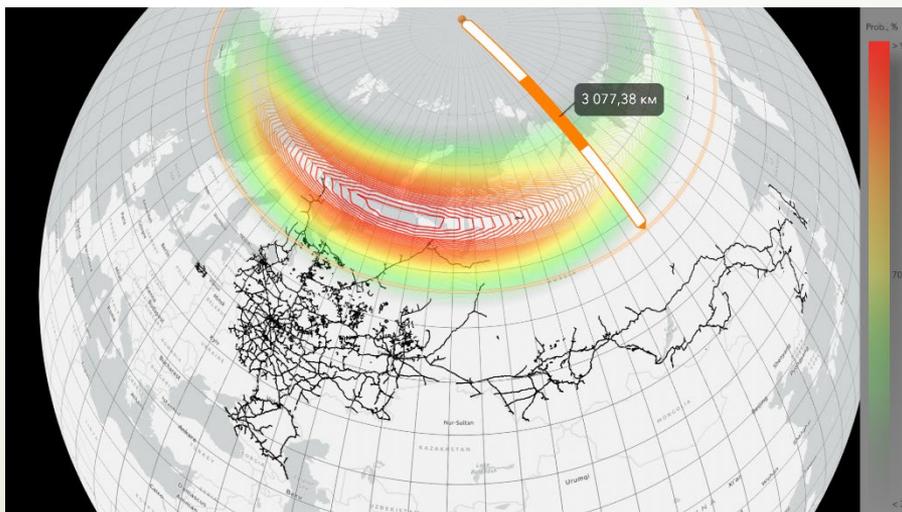


Интенсивность ГИТ и области дискретных высыпаний (красный цвет) класса OMEGA bands

Apatenkov et al., *Geophys. Res. Lett.* 2020

Краткосрочный прогноз авроральных высыпаний (2)

Разработан онлайн-сервис краткосрочного (с горизонтом 30–70 мин) прогноза интенсивности и пространственного распределения полярных сияний. Входными параметрами являются данные в реальном времени с межпланетных спутников. Доля подтвержденного прогноза сияний составляет более 86 %.



Моделирование положения аврорального овала <http://aurora-forecast.ru>

Воробьев и др., Солнечно-земная физика 2022

Выводы

- По статистике более слабые (и частые) геомагнитные события создают бóльшие ГИТ
- Чем длиннее ЛЭП, тем сильнее наведенные токи, что важно иметь ввиду при строительстве – например, дробить на сегменты (опыт скандинавских стран)
- ГИТ необходимо включать в нормативы при развитии электросетей и ж/д (сейчас отсутствует)
- Перспективно развитие наблюдательной сети для оценки и прогноза ГИТ в ЛЭП на базе автономных градиентных магнитометрических установок
- Геомагнитная активность на высоких широтах – значимая причина, контролирующая появление сбоев в работе ж/д автоматики
- Источники ГИТ тяготеют к экваториальной границе аврорального овала
- Прогноз интенсивности и положения высыпаний важен, поскольку чем сильнее возмущение, тем на более низкие широты опускается овал

