

DOI: 10.51981/2588-0039.2024.47.008

СОБЫТИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО РОСТА ГЕОМАГНИТНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ НА КОЛЬСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ ЗА 11 ЛЕТ НАБЛЮДЕНИЙ

В.Б. Белаховский¹, В.А. Пилипенко², В.Н. Селиванов³, Я.А. Сахаров¹

¹Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия

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

³Центр физико-технических проблем энергетики Севера, филиал ФИЦ “Кольский научный центр РАН”, Апатиты, Россия

Абстракт. Проанализированы случаи с экстремальными значениями геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ) в линиях электропередач (ЛЭП) на Кольском полуострове за квазисолнечный цикл 2012-2022 года. Использованы данные подстанции Выходной (VKH). Из 93 экстремальных событий на станции VKH с ГИТ > 20 А 46 (49.5%) были вызваны СМЕ магнитными бурями, 41 (44.1%) происходило во время CIR магнитных бурь и 6 (6.4%) происходило без магнитных бурь. Экстремальные всплески ГИТ наблюдались как в предполуночном, так и послеполуночном секторах MLT. Не наблюдается строгой связи между величиной ГИТ и скоростью солнечного ветра, параметром $V \cdot B_s$, параметром Акасофу ϵ . Также не наблюдается строгой зависимости между величиной ГИТ и индексами геомагнитной активности IE, AE, величиной ГИТ и dB/dt .

Введение

Геомагнитно-индуцированные токи (ГИТ) представляют собой токи, текущие в поверхностных слоях Земли, они вызваны теллурическими электрическими полями, индуцированными изменениями магнитного поля Земли. Наиболее интенсивные токи (до сотен ампер) и электрические поля (> 10 В/м) возбуждаются в высоких широтах в период геомагнитных возмущений, но период сильных магнитных бурь значительные ГИТ могут регистрироваться на средних и низких широтах [Пилипенко, 2021]. Наибольших значений скачки ГИТ достигают во время суббурь [Belakhovsky et al., 2019]. Было показано, что во время более слабых CIR (Corotating Interaction Regions) магнитных бурь могут происходить более высокие скачки ГИТ, чем во время более сильных СМЕ (Coronal Mass Ejection) магнитных бурь [Белаховский и др., 2022].

В данной работе проведен статистический анализ экстремальных значений ГИТ за 11 лет (2012-2022). Рассмотрены следующие вопросы. Во время каких типов магнитных бурь чаще наблюдаются экстремальные значения ГИТ? Как связаны экстремальные величины ГИТ с параметрами солнечного ветра, индексами геомагнитной активности, локальными вариациями магнитного поля.

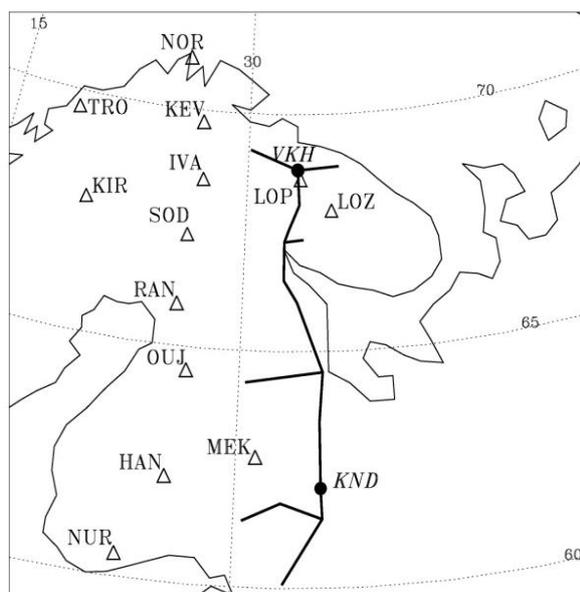


Рисунок 1. Карта расположения станций ГИТ (VKH, KND) на Кольском п-ове и в Карелии, магнитометров на Кольском п-ове и в Скандинавии.

Используемые данные

В работе были использованы данные по регистрации ГИТ в линиях электропередач Кольского полуострова и Карелии (Рис. 1.). Система регистрации создана Центром физико-технических проблем энергетики Севера ФИЦ КНЦ РАН и Полярным геофизическим институтом (ПГИ) и является единственной в России. Система включает себя 4 станции (Выходной – VKH, Титан – TTN, Лоухи – LKH, Кондопога – KND) на линии 330 кВ и одну станцию на линии 220 кВ (Ревда – RVD).

Регистрация ГИТ ведется непрерывно с конца 2011 года, и к 2022 году сформировался “квазисолнечный

цикл” регистрации ГИТ, включающий в себя 24-25 циклы солнечной активности [Селиванов и др., 2022]. Данный цикл измерений являются уникальными для мировой науки, поскольку не так много мест в мире, где проводятся подобные измерения в ЛЭП на протяжении длительного временного интервала (11 лет).

Использованы данные магнитометров ПГИ в обсерваториях "Ловозеро", "Лопарская", а также данные магнитометров сети IMAGE (Рис. 1.). Для характеристики параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля использованы данные базы OMNI.

Методика

В качестве экстремальных событий отбирались случаи, когда величина ГИТ на станции VKH превышала 20 Ампер. Порог экстремального значения выбирался исключительно с точки зрения статистики, а не с точки зрения отклика энергосистемы. На вопрос порогового значения ГИТ для энергосистемы, выше которого могут наблюдаться негативные эффекты и катастрофические последствия, нет однозначного ответа. При этом нужно отметить, что продолжительность экстремальных скачков ГИТ для разных событий была различной: в каких-то случаях она составляла несколько минут, в каких-то – порядка часа. Продолжительность воздействия также может играть важную роль с точки зрения воздействия на энергосистемы, хотя этот вопрос пока не имеет однозначного ответа.

За 11 лет наблюдений (2012-2022 г.г.) было отобрано 93 экстремальных событий для станции VKH (не показано). Наблюдается связь появления экстремальных событий ГИТ с циклом солнечной активности. Так в 2019, 2020 годах, в годы минимума солнечной активности, экстремальных случаев не было зафиксировано. Далее для данных событий рассматривались параметры солнечного ветра и ММП, индексы геомагнитной активности (SYM-H, AE, IE), вариабельность геомагнитного поля по данным станций LOP и LOZ. Из данных базы OMNI отбирались параметры межпланетной среды, регистрируемые примерно в одно время со скачком ГИТ.

Классификация магнитных бурь

Для характеристики типа солнечного ветра и соответственно типа магнитной бури использовалась также база данных Института космических исследований, составленная группой Ермолаева [www.iki.rssi.ru/pub/omni/catalog], [Ермолаев и др., 2023]. Магнитные бури разделялись на два типа: CME и CIR. CME бури также разделялись на бури, вызванные магнитным облаком (MC – magnetic cloud) и бури, вызванные областью EJECTA. Случаи без магнитных бурь обозначались как “No”. В качестве порога для идентификации магнитной бури выбиралась величина SYM-H индекса в -40 нТл. Рассматривались значения SYM-H индекса не только в момент скачка ГИТ, но и наименьшие значения SYM-H в период всей магнитной бури (магнитного возмущения). Нужно отметить, что порой наблюдается достаточно небольшая разница в вариациях SYM-H индекса для CIR магнитных бурь и интервалов без бурь.

Зависимость от местного магнитного времени (MLT)

Распределение величины ГИТ в зависимости от MLT (Рис. 2) для станций VKH показывает, что экстремальные значения ГИТ могут наблюдаться как в предполуночном, так и в послеполуночном секторах с примерно одинаковой вероятностью. Ранее было показано, что основным источником ГИТ являются суббури [Belakhovky et al., 2019]. В дневном секторе (12-16 MLT) не наблюдается экстремальных значений ГИТ. Исключению составляют события, вызванные скачком плотности солнечного ветра.

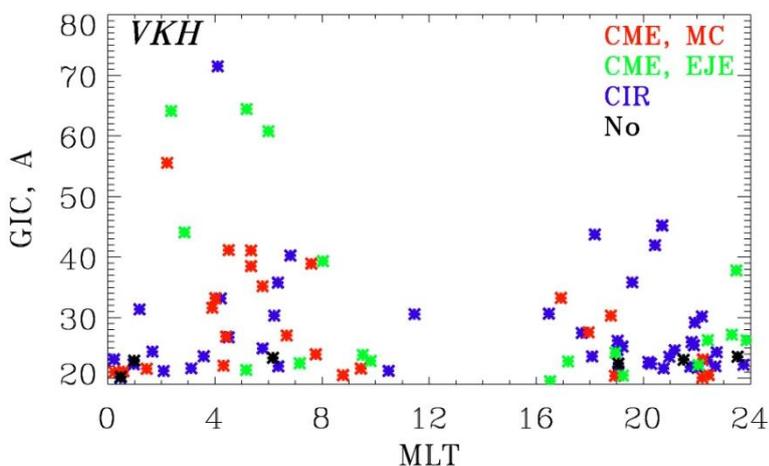


Рисунок 2. Зависимость величины ГИТ от местного магнитного времени (MLT) для экстремальных событий ГИТ на станции VKH. Красным цветом обозначены события ГИТ, вызванные CME (магнитные облака); зеленым цветом обозначены события ГИТ, вызванные CME (область Ejecta); синим цветом обозначены события ГИТ, вызванные CIR; черным цветом обозначены события, произошедшие в отсутствие магнитной бури.

Связь с индексами геомагнитной активности

Большинство экстремальных событий происходило во время магнитных бурь (Рис. 3, верхние панели). Несколько событий происходило при положительном значении SYM-H индекса. По всей видимости, это события, вызванные скачком плотности солнечного ветра. Не наблюдается строгой зависимости величины ГИТ как от АЕ-индекса, так и от локального IЕ индекса (Рис. 3). Это говорит о сложности однозначного прогноза ГИТ на основе прогностических значений АЕ, IЕ индексов.

Анализ показывает, что для станции VКН 46 экстремальных скачков ГИТ (~49.5%) были вызваны СМЕ магнитными бурями, из них 25 событий было вызвано воздействием магнитного облака на магнитосферу и 21 событие было вызвано областью EJЕСТА. 41 экстремальное событие (~44.1%) происходило во время CIR магнитных бурь и 6 событий (~6.4%) происходило без магнитных бурь – Рис. 2.

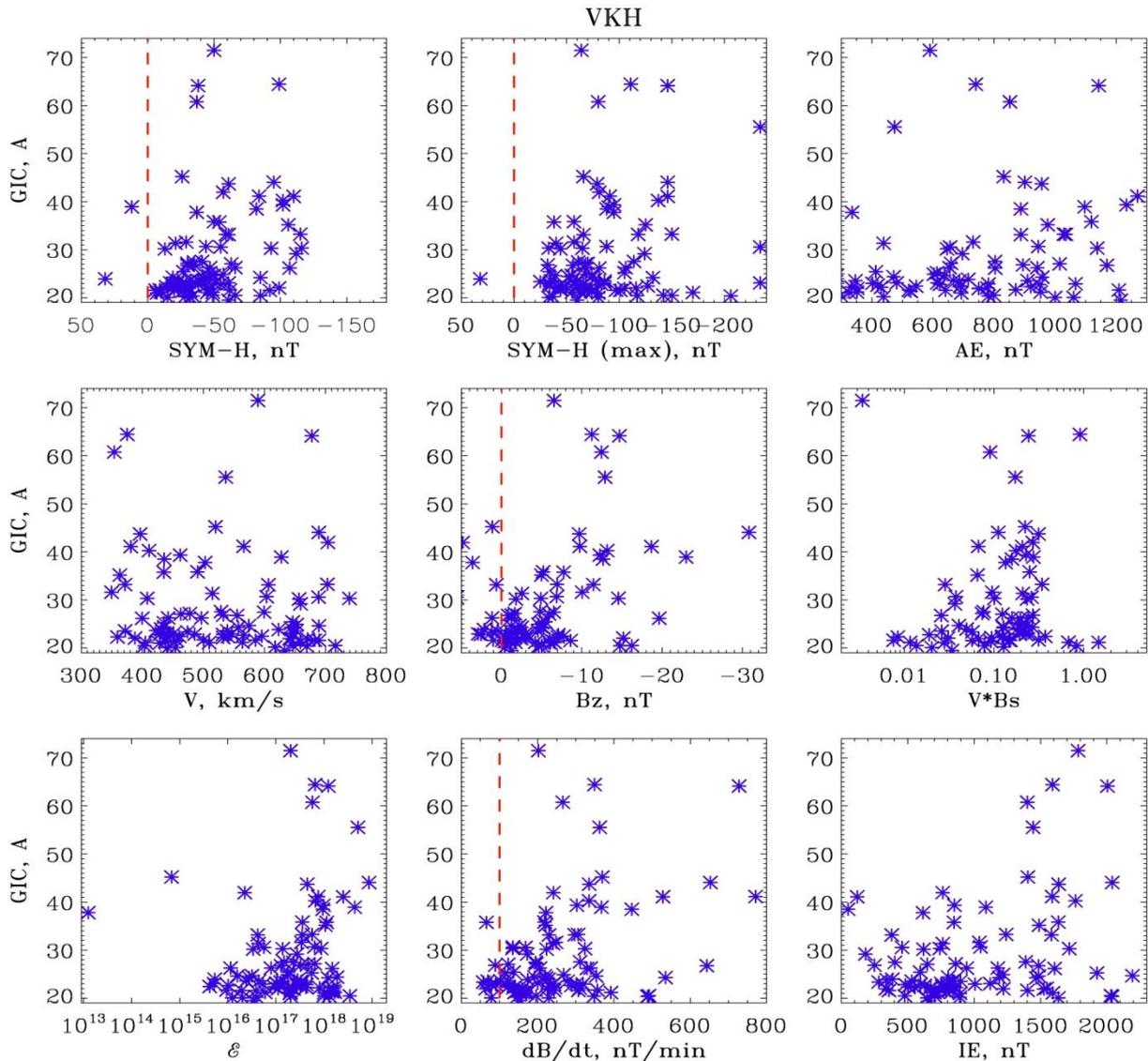


Рисунок 3. Зависимость величины ГИТ на станции VКН в период экстремальных событий: от SYM-H индекса, максимального SYM-H индекса в период бури; АЕ-индекса; скорости солнечного ветра V, Bz-компоненты ММП, параметра V*Bs, параметра Акасофу (ϵ), варибельности магнитного поля dB/dt, IЕ-индекса.

Связь с параметрами солнечного ветра и ММП

Рассмотрены наиболее важные характеристики межпланетной среды, влияющие на динамику магнитосферы: скорость солнечного ветра, Bz-компонента ММП, проводился расчет энергетической характеристики магнитосферы – V*Bs, где Bs – южная компонента ММП. Также рассчитывалась зависимость экстремальных значений ГИТ от параметра Акасофу (ϵ):

$$\varepsilon = 10^7 \cdot V \cdot B^2 \cdot l_0^2 \cdot \sin^4\left(\frac{\theta}{2}\right), \quad (1)$$

где $B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$, V – скорость солнечного ветра, $l_0 = 7 \cdot R_e$, $R_e = 6400$ км – радиус Земли,

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{B_y}{B_z}\right), \text{ если } B_z > 0; \theta = 180 - \tan^{-1}\left(\frac{B_y}{B_z}\right), \text{ если } B_z < 0,$$

Практически все экстремальные события ГИТ происходят при отрицательной B_z -компоненте ММП, исключение составляют события, вызванные ростом плотности солнечного ветра. Анализ показывает, что не наблюдается строгой связи между величиной ГИТ и скоростью солнечного ветра, а также ГИТ и характеристикой $V \cdot B_s$ (Рис. 3), параметром ε . То есть одному и тому же значению ГИТ могут соответствовать разные значения V , $V \cdot B_s$, ε . Это говорит о сложности прогноза величины ГИТ в ЛЭП на только основе данных о параметрах солнечного ветра.

Связь с локальными вариациями dB/dt

Производная вариаций магнитного поля по времени рассчитывалась по формуле:

$$dB/dt = (B_{i+1} - B_{i-1}) / 2\Delta t, \quad (2)$$

где i – номер значения, t – время. При этом рассматривались только горизонтальные компоненты магнитного поля X , Y :

$$dB/dt = \sqrt{(dX/dt)^2 + (dY/dt)^2}. \quad (3)$$

Выбирались значения dB/dt именно в момент экстремальных значений ГИТ. Большинство экстремальных событий происходят при $dB/dt > 100$ нТл/мин. Но отдельные случаи бывают и при $dB/dt < 100$ нТл/мин (Рис. 3.). Анализ показывает, что нет однозначной зависимости между величинами ГИТ и величинами dB/dt . Данные наблюдения также говорят о сложности прогноза ГИТ на основании прогноза величин dB/dt . Дело в том, что на величину ГИТ влияет целый ряд факторов. Помимо вариабельности магнитного поля dB/dt , это наличие мелкомасштабных токовых структур в ионосфере [Belakhovsky *et al.*, 2019], проводимость земной коры, конфигурация технологических линий, режим работы технологических систем.

Выводы

Проанализированы экстремальные значения геомагнитно-индуцированных токов ($I > 20$ А) за 11 лет наблюдений (2012-2022 года) в линии электропередач на севере России (Кольский полуостров). По данным станции VKN из 93 экстремальных событий 46 случаев (49.5%) были вызваны СМЕ магнитными бурями, 41 случай (44.1%) происходил во время CIR магнитных бурь и 6 (6.4%) происходило без магнитных бурь. Анализ показывает, что не наблюдается строгой связи между величиной ГИТ и скоростью солнечного ветра, а также ГИТ и энергетическими характеристиками магнитосферы $V \cdot B_s$, параметров Акасофу ε . Также не наблюдается строгой зависимости между величиной ГИТ и индексами геомагнитной активности (IE , AE), величиной ГИТ и dB/dt .

Литература

- Belakhovsky V., Pilipenko V., Engebretson M., Sakharov Ya., Selivanov V. Impulsive disturbances of the geomagnetic field as a cause of induced currents of electric power lines // *J. of Space Weather and Space Climate*, 2019, 9, A18, doi:10.1051/swsc/2019015.
- Белаховский В.Б., Пилипенко В.А., Сахаров Я.А., Селиванов В.Н. Рост геомагнитно-индуцированных токов во время геомагнитных бурь, вызванных корональным выбросом массы и высокоскоростным потоком солнечного ветра, в 2021 году // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*, 2023, Т. 87, № 2, С. 271-277.
- Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г., Хохлачев А.А., Ермолаев М.Ю. и др. Параметры солнечного ветра на фазе роста 25-го солнечного цикла: сходства и различия с 23-м и 24-м солнечными циклами // *Солнечно-земная физика*, 2023, Т. 9, № 4, С. 63–70.
- Пилипенко В.А. Воздействие космической погоды на наземные технологические системы // *Солнечно-земная физика*, 2021, Т. 7, № 3. С. 72–110.
- Селиванов В.Н., Билин В.А., Колобов В.В., Сахаров Я.А. Геоиндуктированные токи в магистральной электрической сети "Северный транзит". РИД. Номер свидетельства: RU 2022623220.