

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.53-56

## ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ ГЕОИНДУКТИРОВАННЫХ ТОКОВ В РЕГИОНАЛЬНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

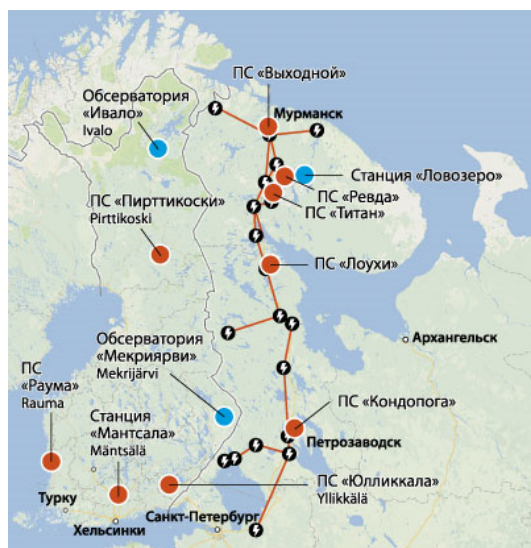
Я.А. Сахаров<sup>1</sup>, В.Н. Селиванов<sup>2</sup>, В.А. Билин<sup>1</sup>, В.Г. Николаев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ФГБНУ “Полярный геофизический институт”, г. Апатиты; e-mail: sakharov@pgia.ru

<sup>2</sup>Кольский научный центр РАН, Россия

<sup>3</sup>Филиал МАГУ, г. Апатиты, Россия

**Аннотация.** Более десяти лет ведется непрерывная регистрация геоиндуктированных токов (ГИТ) на подстанциях магистральных электрических сетей на Северо-Западе России. Анализ амплитудных значений ГИТ в узлах энергосистемы позволяет на фоне относительно гладких закономерностей выделить случаи с максимальными амплитудами токов, экстремальные события. С точки зрения обеспечения стабильной работы электрической сети именно эти, экстремальные события, могут оказаться наиболее опасными. В работе рассмотрены случаи развития геоиндуктированных токов максимальных амплитуд в узлах магистральной линии электропередачи «Северный транзит» при различных геомагнитных возмущениях. Обсуждается связь событий ГИТ с условиями, влияющими на генерацию токов в энергосистеме, а именно величиной геомагнитного возмущения, скоростью изменения горизонтальной компоненты геомагнитного поля, параметрами и расположением линий электропередачи.



**Рисунок 1.** Схема расположения измерительных устройств в проекте EURISGIC.

**Введение.** Окончательным шагом в развитии магнитосферных возмущений может считаться возбуждение электрических полей на поверхности Земли, вызываемое изменениями токов на границе и внутри магнитосферы. Если в зоне, где возникают геоэлектрические поля, присутствуют токопроводящие технологические системы, в них развиваются т.н. геоиндуктированные токи (ГИТ), которые являются, по сути, одним из видов теллурических токов. Во время сильных и очень сильных магнитных бурь ГИТ могут достигать весьма значительных величин, что приводит к нарушениям в штатной работе технологических систем, вплоть до разрушения последних. Достаточно подробно рассмотрены случаи сбоев систем сигнализации [Eroshenko et al., 2010], устройств катодной защиты трубопроводов [Pulkkinen et al., 2001; Ивонин, 2015], повреждений высоковольтных трансформаторов [Gaunt and Coetzee, 2007], срабатывания систем релейной защиты и наступления блэкаутов в линиях электропередач [Boteler, 2001; Pulkkinen et al., 2005]. Для предотвращения серьезных экономических последствий, принимая во внимание серьезную зависимость современного индустриального общества от стабильного

энергоснабжения, особое внимание уделяется прогнозу возможных событий генерации экстремальных величин ГИТ в различных областях, подверженных воздействию электромагнитных возмущений в периоды магнитосферных возмущений [Viljanen et al., 2012]. По мнению авторов [Pulkkinen et al., 2017] одной из наиболее актуальных научных проблем является понимание основных принципов, ответственных за инициирование и развитие динамических токов в магнитосферо-ионосферной системе и генерация интенсивных ГИТ в месте расположения технологической системы. В этой проблеме важны два аспекта: (1) какие межпланетные структуры в солнечном ветре связаны с экстремальными ГИТ на земле, и (2) какова реакция процессов в магнитосферо-ионосферной системе при развитии экстремальных событий.

Наряду с построением моделей развития ГИТ в существующих сетях, вероятностными оценками интенсивности геомагнитных бурь при различных условиях в солнечном ветре, важной частью задачи защиты от негативных воздействий космической погоды является мониторинг возмущений геомагнитного поля и регистрация развития ГИТ в реальных энергосистемах. Именно поэтому нами была создана система

непрерывной регистрации ГИТ на ряде трансформаторных подстанций линии электропередач «Северный транзит». В работе представлены события, в которых наблюдались максимальные значения ГИТ за период 2003 – 2018гг.

**Таблица 1.** Координаты измерительных устройств в проекте EURISGIC.

| Станция   | Географические координаты |              | Тип измерений |
|-----------|---------------------------|--------------|---------------|
|           | широта, °N                | долгота, ° E |               |
| Выходной  | 68,83                     | 33,08        | ГИТ           |
| Лопарская | 68,63                     | 33,25        | МВС           |
| Ревда     | 67,89                     | 34,16        | ГИТ           |
| Ловозеро  | 67,97                     | 35,02        | МВС           |
| Титан     | 67,53                     | 33,44        | ГИТ           |
| Лоухи     | 66,08                     | 33,12        | ГИТ           |
| Кондопога | 62,22                     | 34,36        | ГИТ           |

**Используемые данные.** Для проведения измерений ГИТ в энергосистеме нами был выбран метод регистрации тока в нейтрали силового трансформатора [Сахаров и др., 2007; 2016], для чего был разработан специальный датчик ГИТ [Баранник и др., 2012], включенный в распределенную систему регистрации [Баранник и др., 2011], позволяющую проводить измерения и публиковать обзорные результаты в режиме почти реального времени. Организовать систему непрерывных наблюдений в 3 – 5 узлах действующей линии электропередач удалось при финансовой поддержке ЕС в рамках научной программы EURISGIC, FP7/2007–2013, грант n260330 [Viljanen et al., 2012].

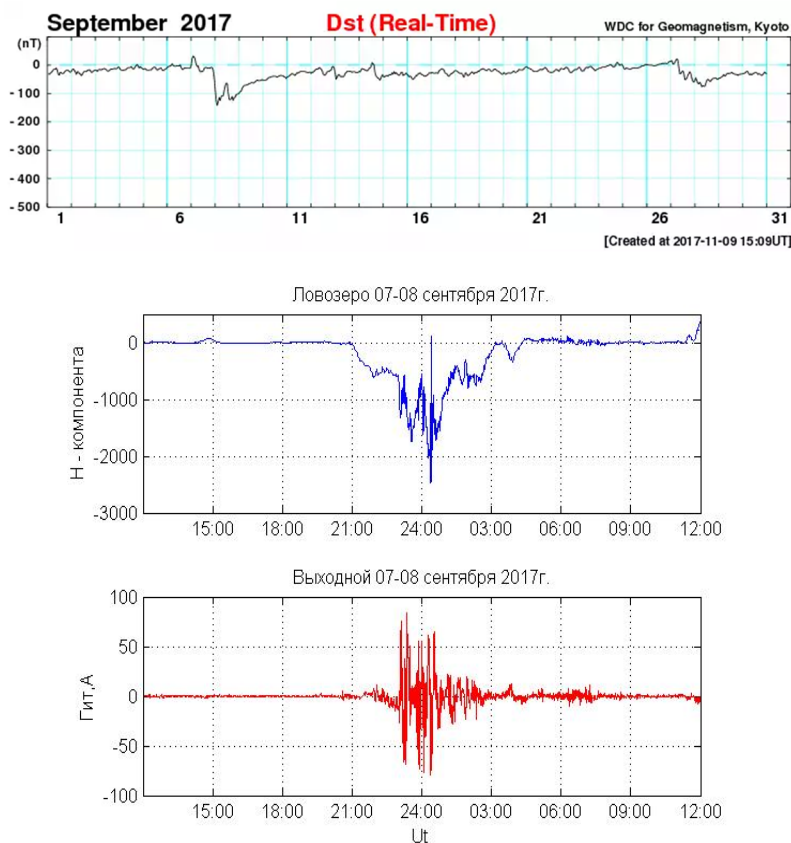
Нами также использованы данные магнитных наблюдений на геофизических обсерваториях ПГИ Ловозеро и Лопарская, и данные международной сети IMAGE. На Рис. 1 представлена схема размещения точек регистрации ГИТ и пунктов измерения геомагнитных вариаций в проекте EURISGIC, географические координаты приведены в Табл. 1. Текущие результаты регистрации ГИТ представлены на сайте *eurisgic.org*.

**Таблица 2.** События, в которых отмечены максимальные значения ГИТ на подстанции Выходной.

|   | Дата     | Время, UT | ГИТmax, А | dB/dt, нТ/мин | Кр | Dst, нТ | Источник |
|---|----------|-----------|-----------|---------------|----|---------|----------|
| 1 | 07092017 | 23.30     | 85        | 1000          | 8  | -142    | СМЕ      |
| 2 | 02092016 | 01.08     | 80        | 495           | 6  | -60     | ?        |
| 3 | 17032013 | 23.15     | 70        | 250           | 7  | -131    | СМЕ      |
| 4 | 27032013 | 17.45     | 73        | 450           | 8  | -120    | CIR      |
| 5 | 29062013 | 02.10     | 140       | 810           | 6  | -100    | СМЕ      |
| 6 | 17032015 | 23.15     | 60        | 220           | 7  | -220    | СМЕ      |
| 7 | 08092015 | 01.35     | 48        | 625           | 6  | -60     | CIR      |
| 8 | 01062013 | 03.50     | 40        | 475           | 7  | -110    | СМЕ      |

**Результаты и обсуждение.** Анализ данных регистрации ГИТ за период 2003-2018гг показал, что в каждом случае магнитосферных возмущений максимальное значение ГИТ отмечалось на подстанции Выходной, наиболее северной в нашей энергосистеме. Этот факт связан, вероятно, с тем, что вся линия электропередач расположена на границе авроральной и субавроральной зон, и её северное звено наиболее часто попадает в область интенсивного развития авроральных джетов. Поэтому для дальнейшего анализа остановимся на данных ГИТ, полученных на подстанции Выходной. Результаты представлены в Табл. 2, содержащей ранжированный список событий, в которых наблюдались максимальные значения ГИТ.

В столбцах таблицы указаны дата события, мировое время рассматриваемого всплеска ГИТ, амплитуда всплеска, скорость изменения горизонтальной компоненты геомагнитного поля на ближайшей обсерватории, значение индекса Кр в рассматриваемый интервал времени и минимального значения индекса Dst в рассматриваемом событии. В левом столбце указан качественный характер возмущения в солнечном ветре для данного события. Следует отметить, что регистрация ГИТ на подстанции проводится в нейтрали одного из двух трансформаторов, поэтому полный ток в узле сети будет в два раза больше. Этот эффект проявился в событии 29 июня 2013г., когда второй трансформатор был полностью отключен от сети на высокой стороне. Именно поэтому сильный всплеск ГИТ проявился как «суперсильный», так как был зарегистрирован полный ток в узле [Сахаров и др., 2016].



**Рисунок 2.** Экстремально сильный ГИТ в бурю 07-12.09.2017 г. *Вверху* – график Dst за сентябрь 2017 г.; *в середине* – вариация H-компоненты магнитного поля на obs. Ловозеро 07-08.09.2017; *внизу* – график ГИТ на подстанции Выходной.

В природе встречаются также локализованные по месту и достаточно короткие во времени всплески геоэлектрического поля и, соответственно, ГИТ, не совпадающие с активной фазой суббури, см. [Ngwira *et al.*, 2015], либо суперсуббури, по терминологии [Дэспирак и др., 2019]. Подобный случай представлен на Рис. 3, когда необычно сильный всплеск ГИТ (80А) на ст. Выходной развился 02 сентября 2016 г. в 01.08 UT и был связан, вероятно, с локальной интенсификацией аврорального возмущения, проявившегося в 01.11-01.12 UT на камере всего неба в obs. Кируна, Швеция. В таких событиях в генерации геоэлектрического поля основную роль может играть локальный продольный ток и связанные с ним ионосферные токи Холла.

**Выводы.** Результаты выполненного нами анализа измерений позволяют заключить, что для транзитной высоковольтной ЛЭП, расположенной на Северо-Западе России, всплески ГИТ экстремальной величины развиваются, как правило, в периоды сильных магнитных бурь, вызванных корональными выбросами (СМЕ), и совпадают по времени со всплесками геоэлектрического поля.

Встречаются всплески ГИТ большой амплитуды, не связанные с магнитными бурями и обусловленные, вероятно, локальными интенсификациями авроральных структур.

Величина тока ГИТ, протекающего в нейтрали конкретного трансформатора, помимо внешнего воздействия (величины геоэлектрического поля в локальной области) зависит от схемы включения силового оборудования на подстанции.

Всплески ГИТ, зафиксированные за время проведения наблюдений на магистрали «Северный транзит», не привели к нарушениям в работе высоковольтного распределительного оборудования, однако уровень гармоник промышленной частоты, отмеченный в ряде возмущений [Селиванов и др., 2017], не исключает полностью такую возможность.

Мы полагаем, что продолжение непрерывных наблюдений за развитием ГИТ в узловых точках высоковольтной ЛЭП даст новый материал для оценки устойчивости линии к магнитосферным возмущениям и поможет решению задачи прогноза и защиты технологических систем от воздействий космической погоды.

За рассматриваемый интервал времени сильные всплески ГИТ наблюдались, как правило, во время развития сильных бурь или суббурь, связанных с корональными инжекциями массы (СМЕ) либо с границами магнитных облаков в солнечном ветре (МС), всего 5 событий из 8, в двух событиях были определены явления SIR, связанные с корональными дырами на солнечном диске. Примером события, вызванного СМЕ, может служить сложная буря 07-10.09.2017 г. Максимальный ГИТ на подстанции Выходной был отмечен 07 сентября в 23.30 UT, во время достаточно сильной суббури на фазе роста магнитной бури, см. рис. 2. Реально в событии развились около 8 интенсивных всплесков ГИТ примерно одной магнитуды. Все всплески сопровождались усилениями производной  $dV/dt$  горизонтальной компоненты геомагнитного поля, что свидетельствует об индукционном характере возбуждаемого электрического поля, что вполне согласуется с общепринятой точкой зрения [Oliveira and Ngwira, 2017].

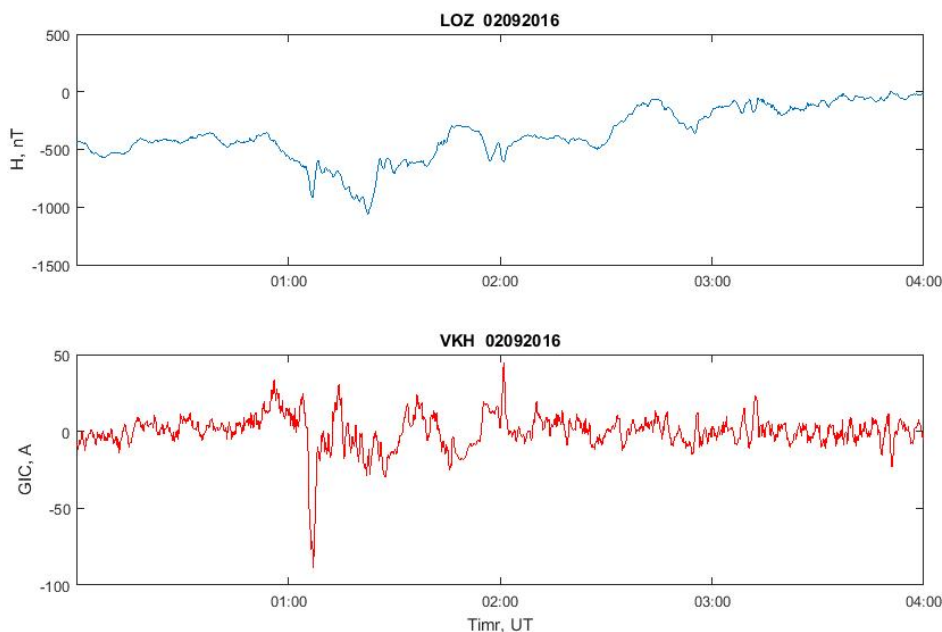


Рисунок 3. Необычно сильный всплеск ГИТ в событии 02.09.2016.

**Благодарности.** Работа выполнена при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект р-а № 17-48-510199.

## Литература

- Баранник М.Б., А. Вильянен, А.Н. Данилин, Ю.В. Катькалов, В.В. Колобов, П.И. Прокопчук, Я.А. Сахаров, В.Н. Селиванов, Разработка системы измерения геоиндуцированных токов на Северо-Западе России для проекта EURISGIC // Труды КНЦ РАН. Энергетика. Выпуск 3. – Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2011. С.120 – 125.
- Баранник М.Б., А.Н. Данилин, Ю.В. Катькалов, Б.Б. Колобов, Я.А. Сахаров, В.Н. Селиванов, Система регистрации геоиндуцированных токов в нейтралах силовых автотрансформаторов // ПТЭ, 2012. №1. С.118-123.
- Дэспирак И.В., А.А. Любич, Н.Г. Клейменова. Суперсуббури и условия в солнечном ветре // Геомагнетизм и аэронавигация, 2019. том 59. № 2. С. 183–190.
- Ивонин А.А., Влияние геомагнитного поля Земли на защиту от коррозии МГ ООО «ГАЗПРОМ ТРАНСГАЗ УХТА» // Коррозия «Территории «НЕФТЕГАЗ», 2015. №1. С. 88 – 89.
- Селиванов В.Н., М.Б. Баранник, В.А. Билин, Б.В. Ефимов, В.В. Колобов, Я.А. Сахаров, Исследование гармонического состава тока в нейтрале трансформатора в периоды геомагнитных возмущений // Труды Кольского научного центра РАН. 2017. № 1-14 (8). С. 43-52.
- Сахаров Я.А., А.Н. Данилин, Р.М. Остафийчук, Регистрация ГИЦ в энергосистемах Кольского полуострова // Труды 7-го Междунар. симп. по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии, г. Санкт-Петербург, 26–29 июня 2007 г. СПб., 2007. С. 291–293. IEEE Cat.N. 07EX1804C; ISBN: 1–4244–1270–6
- Сахаров Я.А., Ю.В. Катькалов, В.Н. Селиванов, А. Вильянен, Регистрация геоиндуцированных токов в региональной энергосистеме // Сб. Практические аспекты гелиогеофизики, Материалы специальной секции «Практические аспекты науки космической погоды» 11-й ежегодной конференции «Физика плазмы в солнечной системе», 17 февраля 2016 г., Москва, ИКИ, 2016. С. 134-145.
- Boteler D.H., Space weather effects on power systems // In: Song, D., Singer, H.J., Siscoe, G.L. (Eds.), Space Weather. 2001. AGU Geophysical Monograph 125, pp. 347–352.
- Eroshenko E.A., A. V. Belov, D. Boteler, S.P. Gaidash, S.L. Lobkov, R. Pirjola, L. Trichtchenko, Effects of strong geomagnetic storms on Northern railways in Russia // Adv. Space Res. 2010. 46, pp. 1102–1110. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.05.017>.
- Gaunt C.T., G. Coetzee, Transformer failure in regions incorrectly considered to have low GIC-risks // In: IEEE Power Tech., 2007. Conference Paper 445, Lausanne, July, pp. 807–812.
- Ngwira C.M., A. Pulkkinen, E. Bernabeu, J. Eichner, A. Viljanen, G. Crowley, Characteristics of extreme geoelectric fields and their possible causes: localized peak enhancements // Geophys. Res. Lett. 2015. 42. <https://doi.org/10.1002/2015GL065061>.
- Oliveira D.M., C.M. Ngwira, Geomagnetically Induced Currents: Principles // Braz J. Phys. 2017. 47. pp. 552–560. DOI 10.1007/s13538-017-0523-y
- Pulkkinen A., A. Viljanen, K. Pajunpaa, R. Pirjola, Recordings and occurrence of geomagnetically induced currents in the Finnish natural gas pipeline network // J. Appl. Geophys. 2001. 48. pp. 219–231.
- Pulkkinen A., S. Lindahl, A. Viljanen, R. Pirjola, Geomagnetic storm of 29–31 October: geomagnetically induced currents and their relation to problems in the Swedish high-voltage power transmission system // Space Weather 2005. 3. S08C03. <https://doi.org/10.1029/2004SW000123>.
- Pulkkinen A., E. Bernabeu, A. Thomson, A. Viljanen, R. Pirjola, D. Boteler, J. Eichner, P.J. Cilliers, D. Welling, N.P. Savani, R.S. Weigel, J.J. Love, C. Balch, C.M. Ngwira, G. Crowley, A. Schultz, R. Kataoka, B. Anderson, D. Fugate, J.J. Simpson, M. MacAlester, Geomagnetically induced currents: science, engineering and applications readiness // Space Weather. 2017. <https://doi.org/10.1002/2017SW001501>.
- Viljanen A., R. Pirjola, I. Honkonen, A. Thomson, E. Clarke, M. Wik, P. Wintoft, V. Wertzergom, E. Pracsner, Ya. Sakharov, Yu. Katkalov, A. Pulkkinen, EURISGIC: European Risk from Geomagnetically Induced Currents // In: Let's Embrace Space, 2012. Vol. II, European Commission, pp. 482-485. ISBN 978-92-79-22207-8. doi:10.2769/31208.