

ОПЫТ МОНИТОРИНГА ГЕОМАГНИТНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ В ЭНЕРГОСЕТИ РЕСПУБЛИКИ АЛТАЙ

EXPERIENCE IN MONITORING GEOMAGNETICALLY INDUCED CURRENTS IN THE ALTAI REPUBLIC POWER GRID

А.Ю. Гвоздарев 

Институт космомагнитических исследований
и распространения радиоволн ДВО РАН,
Паратунка, Россия, gvozdarev@ikir.ru

Е.О. Учайкин 

Горно-Алтайский государственный университет,
Горно-Алтайск, Россия, evgeniy_uch@mail.ru

А.Ю. Gvozdarev

*Institute of Cosmophysical Research
and Radio Wave Propagation FEB RAS,
Paratunka, Russia, gvozdarev@ikir.ru*

Е.О. Uchaikin

*Gorno-Altaisk State University,
Gorno-Altaisk, Russia, evgeniy_uch@mail.ru*

Аннотация. Создана установка для измерения геомагнитно-индукционных токов (ГИТ), которая установлена на подстанции «Ининская» в Республике Алтай. С апреля 2024 г. проводился периодический мониторинг ГИТ в заземлении нейтрали силового трансформатора с напряжением 110 кВ. Зарегистрированы ГИТ, амплитуда которых достигала 138 мА во время геомагнитных возмущений, что, с учетом параллельного характера заземления подстанции «Ининская» и Ининской солнечной электростанции, означает наличие суммарного ГИТ 1.3 А в заземлении обоих объектов. Показано наличие ГИТ во время наблюдений геомагнитных пульсаций классов Pc3 и Pc5. Обнаружено качественное согласие результатов измерений ГИТ с модельными значениями, рассчитанными на основе измерений на магнитной станции «Байгазан» в приближении однородной проводимости земной коры. Показано влияние сопротивления заземления на регистрируемые ГИТ.

Ключевые слова: геомагнитно-индукционные токи, мониторинг, моделирование, геомагнитные бури, геомагнитные пульсации, Горный Алтай.

Abstract. A device for measuring geomagnetically induced currents (GICs) has been created which is installed at the Ininskaya power substation in the Altai Republic. Since April 2024, periodic monitoring of GIC in the 110 kV power transformer grounding neutral has been carried out. GICs were registered during geomagnetic disturbances up to 138 mA, which, taking into account the parallel grounding of the Ininskaya substation and the Ininskaya solar power plant, means the presence of 1.3 A total GIC in the grounding of both objects. GICs are shown to occur during Pc3 and Pc5 geomagnetic pulsation observations. The qualitative agreement has been found between the GIC measurement results and the model values calculated from Baigazan magnetic station data in the approximation of the homogeneous Earth's crust conductivity. The grounding resistance is shown to exert an effect on recorded GICs.

Keywords: geomagnetically induced currents, monitoring, simulation, geomagnetic storms, geomagnetic pulsation, Russian Altai.

ВВЕДЕНИЕ

Геомагнитно-индукционные токи (ГИТ) — потенциально опасное явление космической погоды. Во время сильных вариаций геомагнитного поля (ГМП) вследствие электромагнитной индукции в проводящей земной коре возникает геоэлектрическое поле. Это поле (и связанная с ним электродвижущая сила) создает ГИТ, протекающие в высоковольтных линиях электропередач (ЛЭП) между точками заземления силовых трансформаторов. Проходя через первичные обмотки трансформаторов, ГИТ создают в их сердечниках квазистационарное магнитное поле, что приводит к снижению эффективности работы трансформаторов, генерации четных гармоник, увеличению реактивной мощности, асимметрии фаз и ложному срабатыванию автоматики [Пилипенко, 2021]. Величина ГИТ зависит от геомагнитной широты (в авроральной зоне они интенсивнее и могут достигать 300 А), удельного электрического сопротивления

(УЭС) подстилающих пород (над высокоомным фундаментом из кристаллических пород ГИТ выше), длины, топологии и ориентации ЛЭП, а также от сопротивления ЛЭП, обмоток высокого напряжения трансформаторов и их заземлений. Влияние ГИТ на трансформаторы зависит от конструкции их магнитопроводов и величины тока холостого хода. Для высоковольтных трансформаторов (500 кВ) неверная работа автоматики вследствие насыщения магнитопровода возможна уже при ГИТ около 4 А [Гусев и др., 2020]. Широко известны энергетические аварии, вызванные ГИТ 13–14 марта 1989 г. в Квебеке (Канада) [Bolduc, 2002] и в ноябре 2003 г. в Южной Швеции [Pulkkinen et al., 2005].

В последние годы появилось значительное количество работ, посвященных исследованию ГИТ в энергосетях на средних и низких широтах [Пилипенко, 2021; Gil et al., 2023]. Сообщается о выходе из строя блочных трансформаторов на ряде крупных электро-

станций в Южной Африке в результате серии магнитных бурь в 2003 г. [Gaunt, Coetzee, 2007] и энергетических авариях в Новой Зеландии [Marshall et al., 2013]. Наблюдались резкие вариации реактивной мощности на ЛЭП с напряжением 400 кВ во время магнитных бурь в таких южных странах, как Зимбабве [Muchini et al., 2024] и Иран [Taran et al., 2023]. Моделирование показало возможность возникновения энергетической аварии в Европейской части России во время экстремальной бури [Тренькин и др., 2023]. О возможной неустойчивости к ГИТ энергосистемы Сибири сообщается в работе [Соколова и др., 2019]. Все это показывает актуальность работ по регистрации ГИТ в средних широтах, и в частности, в Сибири.

На средних и низких широтах системы мониторинга ГИТ созданы в Новой Зеландии [Mac Manus et al., 2017], Бразилии [Trivedi et al., 2007], Австрии [Albert et al., 2021], Китае [Zhang et al., 2015], Японии [Watari et al., 2021], Великобритании [Hübert et al., 2024], Испании [Marsal et al., 2021], Мексике [Caraballo et al., 2023], при этом сообщается о регистрации ГИТ до 113 А в Новой Зеландии [Mac Manus et al., 2025], до 30 А в Великобритании [Hübert et al., 2024], до 14 А в Австрии [Bailey et al., 2022], до 15 А в Бразилии [Trivedi et al., 2007]. Предприняты значительные усилия по моделированию ГИТ в средних и низких широтах [Švanda et al., 2021; Barbosa et al., 2015; Espinosa et al., 2023; Hübert et al., 2024; Matandirotya et al., 2015; Caraballo et al., 2023] и по предсказанию их значений [Bailey et al., 2022].

В России регистрация ГИТ осуществляется только на подстанциях магистральной электрической сети с напряжением 330 кВ «Северный транзит» на Кольском полуострове и в Карелии, т. е. в полярных и приполярных широтах [Селиванов и др., 2023]. За период регистрации с 2011 г. накоплен значительный материал, причем на подстанции «Выходной» фиксировались ГИТ до 94 А на трансформатор (до 125 А при изменении конфигурации сети).

В средних широтах России прямых измерений ГИТ не проводилось, однако косвенными средствами (по наличию в сети четных гармоник) было обнаружено влияние ГИТ на энергосистемы Камчатки [Сивоконь, 2021] и Алтая [Uchaikin, Gvozdarev, 2023]. Нами была предпринята попытка организации мониторинга ГИТ в сети электроснабжения с напряжением 110 кВ Республики Алтай. Описанию этих работ и их первых результатов посвящена настоящая статья.

Для дальнейшего анализа полезно сделать общие оценки величины ГИТ в средних широтах. ГИТ являются проявлением скин-эффекта [Паркинсон, 1986]. При вариациях геомагнитного поля \mathbf{B} в земной коре генерируется геоэлектрическое поле \mathbf{E} , которое зависит от скорости изменения геомагнитного поля. В приближении малости токов смещения уравнения Максвелла для проводящей среды с удельной проводимостью σ можно записать в виде

$$\text{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (1.1)$$

$$\text{rot} \mathbf{B} = \mu_0 \sigma \mathbf{E}, \quad (1.2)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная. В случае однородной проводимости для меняющегося по гармоническому закону магнитного поля (на поверхности Земли) $\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 e^{i\omega t}$ решением этих уравнений является экспоненциально убывающая с глубиной волна $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{-z/h} e^{i(\omega t - z/h)}$ [Паркинсон, 1986], при этом векторы электрического и магнитного полей взаимно ортогональны и горизонтально ориентированы. Глубина проникновения вихревого геоэлектрического и переменного магнитного полей (толщина скин-слоя)

$$h = \sqrt{2\rho / (\omega \mu_0)} \quad (2)$$

зависит от удельного электрического сопротивления (УЭС) подстилающих пород $\rho = 1/\sigma$ и циклической частоты колебаний поля ω . Например, $h = 113$ км при $\rho = 500$ Ом·м и периоде магнитных вариаций 100 с. Как видно из формулы (2), при повышении УЭС и периода колебаний глубина проникновения электромагнитного поля растет, поэтому в горных районах ГИТ генерируется более эффективно. Различие между средним УЭС верхних 10 км геоэлектрического разреза на территории России составляет несколько порядков: от около 1 Ом·м в Прикаспийской низменности до сотен кОм·м в Карелии и на Кольском полуострове. Для горных систем Южной Сибири характерны УЭС порядка 1–10 кОм·м [Козырева и др., 2022, Alekseev et al., 2015]. В реальности ситуация осложняется неоднородностью геоэлектрического разреза, поэтому представленные выше формулы можно рассматривать лишь как упрощенные оценки.

Возникающее вследствие электромагнитной индукции при вариациях геомагнитного поля вихревое геоэлектрическое поле создает электродвижущую силу, прикладываемую к точкам заземления сети электроснабжения, которая генерирует в них квазистационарный ГИТ с частотами от долей миллигерца до 1 Гц (рис. 1). Например, при скорости изменения магнитного поля $dB/dt = 0.5$ нТл/с (эта величина считалась пороговой для воздействия ГИТ на энергосистему Сибири в работе [Водяников и др., 2006]), расстоянии между точками заземления $L = 100$ км и глубине проникновения поля $h = 100$ км согласно закону электромагнитной индукции электродвижущую силу можно оценить как

$$\varepsilon = \left| \frac{dB}{dt} \right| h L = 0.5 \cdot 10^{-9} \frac{\text{Тл}}{\text{с}} \cdot 10^5 \text{ м} \cdot 10^5 \text{ м} = 5 \text{ В.}$$

Отсюда видно, что существенную роль в величине ГИТ играет толщина скин-слоя h : она, наряду с расстоянием между точками заземления L , определяет площадь сечения, через которое проходит переменный магнитный поток (показано прямоугольником на рис. 1). Возникающее в результате напряжение между точками заземления вызывает ток через ЛЭП, величина которого зависит от сопротивления цепи, включающей ЛЭП, обмотки высокого напряжения силовых трансформаторов и заземления нейтралей трансформаторов. При сопротивлениях порядка 10 Ом в ЛЭП с напряжением 110 кВ можно ожидать появления ГИТ около 0.5 А.

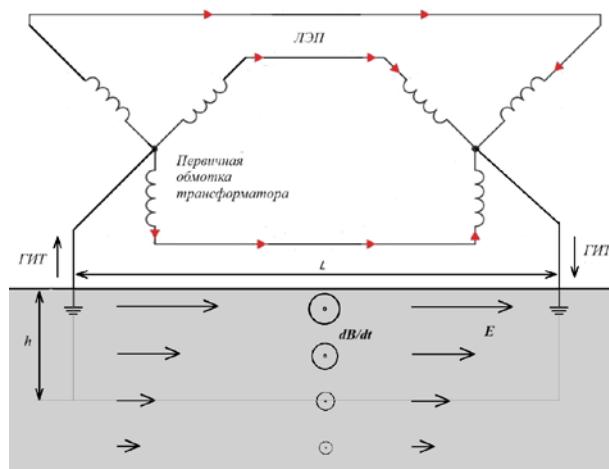


Рис. 1. Схема генерации ГИТ

1. ОСОБЕННОСТИ СЕТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ 110 кВ РЕСПУБЛИКИ АЛТАЙ

Выбор региона для исследований был обусловлен наличием на территории Алтайского заповедника магнитной станции Горно-Алтайского государственного университета «Байгазан», осуществляющей мониторинг геомагнитных вариаций с 2009 г. [Бакиянов и др., 2011]. На станции работает кварцевый вариометр с частотой регистрации 20 Гц и амплитудой шума (среднеквадратичное отклонение секундных средних) 0.01–0.03 нТл. Расстояние от станции до силовых подстанций сети электроснабжения с напряжением 110 кВ Республики Алтай не превышает 200 км, что позволяет относительно точно оценивать ГИТ в ней при помощи моделирования [Gvozdarev et al., 2023; Uchaikin et al., 2024].

Важную роль играл также личный фактор — один из авторов статьи имеет навыки как разработчика геофизической аппаратуры, так и специалиста по энергетике. Чтобы просто зайти на территорию высоковольтной подстанции, необходимо иметь допуск по электробезопасности на напряжение 1000 и более вольт, и, как правило, геофизики его не имеют. Эту трудность обходят по-разному, например, путем измерений ГИТ вне подстанций методами дифференциальной магнитометрии, как поступили исследователи в Намибии [Matandirotya et al., 2016], Великобритании [Hübert et al., 2024] и Испании [Marsal et al., 2021], или путем измерений ОНЧ-излучения ЛЭП, как это было сделано на Камчатке [Сивоконь, 2021].

В Республике Алтай, как в целом ряде малонаселенных регионов, для электроснабжения применяется сеть с напряжением 110 кВ с протяженностью линий более 500 км. Такое напряжение, обычно используемое в промышленно развитых регионах для районной сети, было выбрано, поскольку нагрузка сел небольшая (до 40 МВт). Для безопасной работы применяется схема заземлений нейтралей силовых трансформаторов с напряжением 110 кВ с помощью специальных выключателей заземляющего устройства, поэтому линия заземлена на концах и на некоторых промежуточных подстанциях. Большая про-

тяжленность системы электроснабжения Республики Алтай делает ее относительно восприимчивой к магнитным бурям.

Схема центральной и южной части сети электроснабжения с напряжением 110 кВ Республики Алтай показана на рис. 2. Звездочками показаны пункты регистрации геомагнитных вариаций на ст. «Байгазан» [Бакиянов и др., 2011] на Телецком озере и геомагнитно-индукционных токов и амплитуды четных гармоник [Uchaikin, Gvozdarev, 2023] на подстанции «Ининская». На схеме показаны также солнечные электростанции (СЭС) районного значения. Основная передача электроэнергии осуществляется по ЛЭП с напряжением 110 кВ с Бийской ТЭЦ, находящейся за пределами схемы более чем в 70 км к северу. Нейтрали силовых трансформаторов заземлены на подстанциях в Кош-Агаче, Улагане, Ине, Черге, Усть-Коксе, а также на Ининской СЭС.

Было показано [Uchaikin, Gvozdarev, 2023], что во время геомагнитных возмущений амплитуды 4-й и 6-й гармоники магнитного поля трансформатора на подстанции «Ининская» пропорциональны квадрату скорости изменения горизонтально-ориентированной компоненты магнитного поля dB/dt , что указывает на его восприимчивость к ГИТ [Uchaikin et al., 2025]. В связи с этим установку для измерения ГИТ было решено ставить на подстанции «Ининская». Как следует из рис. 2, ГИТ в Ине фактически является суммой трех токов, создаваемых в линиях электропередачи Иня—Кош-Агач, Иня—Улаган и Иня—Черга. Первые две ЛЭП имеют преимущественно широтное направление. Как показало моделирование [Gvozdarev et al., 2023; Uchaikin et al., 2024], обычно генерация ГИТ происходит в них при быстром изменении северной компоненты ГМП, типичном, например, для внезапных начал магнитных бурь (Storm Sudden Commencement, SSC). ЛЭП Черга—Иня имеет значительный участок, направленный преимущественно вдоль меридиана, поэтому ГИТ в ней возникает и при изменении восточной компоненты ГМП. Поскольку все эти ГИТ не скомпенсированы, при любых изменениях геомагнитного поля на подстанции «Ининская» будет регистрироваться ГИТ. Предварительные оценки при помощи моделирования показали, что в высоковольтной сети электроснабжения Республики Алтай возможны ГИТ до 0.4 А [Uchaikin et al., 2024]. Таким образом, измерительный комплекс должен иметь разрешающую способность десятки, а лучше единицы миллиампер.

2. РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Для обеспечения мониторинга непрерывных измерений тока нейтрали был разработан измерительный комплекс на базе модифицированных стандартных токовых клещей с датчиком Холла для измерения постоянного тока. Дополнительно был установлен температурный датчик для последующей температурной коррекции. Выходное напряжение измеряется разработанным регистратором напряжения на основе прецизионного 24-битного 2-канального АЦП AD7732 с фиксацией времени измерений (UTC) с по-



Рис. 2. Схема сети электроснабжения с напряжением 110 кВ центральной и южной частей Республики Алтай. Звездами показано расположение точек мониторинга геомагнитных вариаций (BGZ) и амплитуды четных гармоник переменного тока и ГИТ в сети электроснабжения Республики Алтай (Иня)

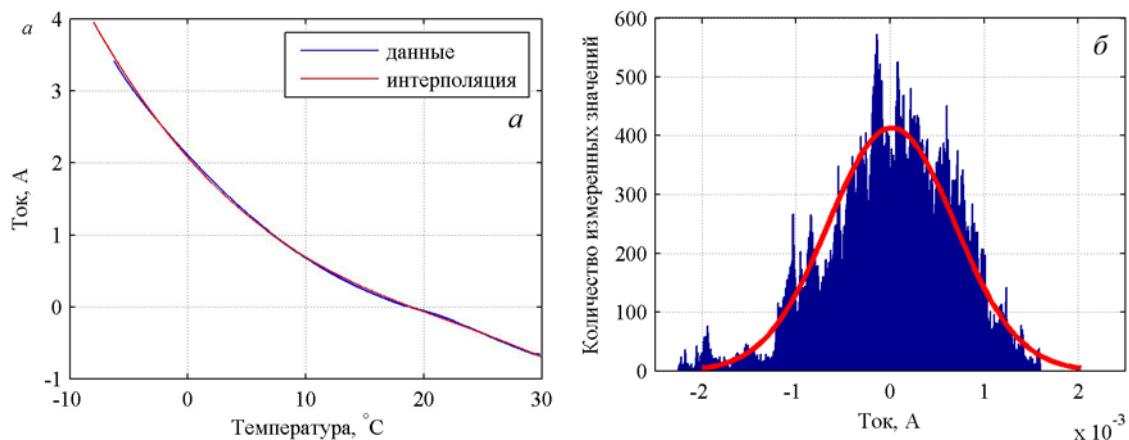


Рис. 3. Результаты исследований температурной зависимости показаний модифицированных токовых клещей и оценки их шума: зависимость измеренных значений при нулевом токе через клещи при изменении температуры (а); распределение ошибки измерений при нулевом токе за 15 мин при постоянной температуре (б)

мощью GPS-модуля и записью измеренных данных на SD-карту. Измерение выполняется по двум каналам с частотой 100 Гц. Собственный шум АЦП не превышает 20 мкВ при диапазоне ± 10 В. Чувствительность токовых клещей была увеличена с 10 до 22 мВ/А. Определение чувствительности проводилось с помощью лабораторного источника тока АКИП-1102 в диапазоне ± 3 А. Основой для регистрирующей части комплекса послужили разработки индукционного магнитометра, установленного на магнитной станции «Байгазан» [Учайкин и др., 2015].

Для компенсации температурной зависимости проведена серия измерений нулевого значения тока при меняющейся температуре в естественных условиях в диапазоне температур от -10 до 30 °С. На рис. 3, а видно, что с увеличением температуры коэффициент наклона уменьшается и температурная зависимость является нелинейной. Температурная зависимость была аппроксимирована полиномом третьей степени:

$$I_{base}(T) = -8.3 \cdot 10^{-5} T^3 + 5.59 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - 0.1855 \cdot T + 2.07,$$

где T — температура.

Распределение количества измерений, осуществленных в течение 15 мин при нулевом токе, показано на рис. 3, б. Как видно из рисунка, распределение является нормальным со среднеквадратичным отклонением (СКО) 0.5 мА. По правилу трех сигм доверительный интервал разработанного измерительного комплекса составляет ± 1.5 мА.

Для минимизации быстрых температурных изменений датчик был помещен в термобокс. Анализ результатов измерений показал, что тепловая инертность термобокса позволила избежать колебаний температуры с периодом меньше 15 мин.

Применение в измерительном комплексе 24-разрядного АЦП позволило получить довольно широкий динамический диапазон измерений: около ± 450 А при шаге дискретизации ~ 0.05 мА и собственном шуме ~ 0.5 мА. Например, в измерительной системе, применяемой на Кольском полуострове, используется 11-разрядный АЦП, при этом предел измерения составляет ± 125 А на подстанции «Выходной» и ± 62.5 А на прочих подстанциях при шаге дискретизации 0.12 и 0.06 А соответственно [Баранник и др., 2012].

Однако одним из ключевых параметров в системах регистрации ГИТ на основе холловских датчиков



Рис. 4. Размещение токового датчика на шине заземления силового трансформатора установленной мощности 2.5 МВА на подстанции «Ининская»

является стабильность температуры. На Кольском полуострове регистрация осуществляется токовыми клещами, находящимися в термостабилизированном боксе (точность поддержания температуры 0.1 °C), что позволяет добиться очень малого (по сравнению с нашими измерениями) дрейфа нуля в течение суток [Баранник и др., 2012].

3. ОРГАНИЗАЦИЯ МОНИТОРИНГА ТОКА В НЕЙТРАЛИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА НА ПОДСТАНЦИИ «ИНИНСКАЯ»

Пятнадцатого апреля 2024 г. измерительный комплекс был установлен на подстанции «Ининская» 110\10 кВ на нейтрали трансформатора T1 2.5 МВА, под которым ранее был установлен регистратор четных гармоник [Uchaikin, Gvozdarev, 2023]. Положение элементов измерительного комплекса иллюстрирует рис. 4, на котором показаны регистратор (Data logger), токовые клещи (current clamps), шина заземления нейтрали (neutral grounding bus). Для получения равномерного распределения температуры и минимизации нагрева токовые клещи были помещены в утепленную коробку (thermo box). На фото виден также сенсор регистратора четных гармоник под силовым трансформатором.

Заметим, что установка токового датчика на других подстанциях сталкивалась со значительными трудностями, поскольку трансформаторы на них обладали большей установленной мощностью и, соответственно, более сложно устроенным заземлением, включающим, как правило, несколько шин. Установка датчика только на одну шину приводит к снижению регистрируемого тока. Из соображений точности было бы желательно устанавливать датчик на шину, непосредственно связывающую заземляющий нож с трансформатором, но такой вариант вызывает возражения у персонала подстанции.

Необходимо учитывать также, что подстанция «Ининская» находится в 4 км от Ининской СЭС,

внешняя обмотка силового трансформатора которой тоже заземлена. Поэтому через заземление подстанции «Ининская» проходит ток $I_{0\text{ПС}}$, составляющий лишь некоторую часть геомагнитно-индукционного тока I_0 . Их отношение определяется соотношением сопротивлений первичных обмоток силовых трансформаторов подстанции и солнечной электростанции и их заземлений:

$$1/\beta = \frac{I_{0\text{ПС}}}{I_0} = \frac{1}{1 + \frac{R_1 + R_{31}}{R_2 + R_{32}}} = \frac{R_2 + R_{32}}{R_1 + R_{31} + R_2 + R_{32}}. \quad (3)$$

Здесь R_1 , R_2 и R_{31} , R_{32} — сопротивления первичных обмоток фаз силовых трансформаторов и заземлений соответственно на подстанции «Ининская» и на Ининской СЭС. При $R_1=7.1$ Ом, $R_2=0.42$ Ом, $R_{31}=R_{32}=2$ Ом получаем $1/\beta_0 = 0.210 = 1/4.77$.

Поскольку потребляемая селом мощность невелика, то для электроснабжения используется только один трансформатор из двух имеющихся на подстанции «Ининская», которые работают попеременно, примерно по месяцу каждый. В результате регистрация ГИТ не являлась непрерывной — во время подключения трансформатора T2 регистрация не велась. Тем не менее за время регистрации наблюдались магнитные бури 16.04, 19.04, 26.04, 10–11.05, 28.06 и 04.08.2024. Для сбора данных Е.О. Учайкин периодически выезжал в Иню и забирал результаты измерений, записанные на флеш-карту.

4. ПРОЦЕДУРА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТЫ РЕГИСТРАЦИИ

Результаты измерений сглаживались по десяти значениям для компенсации гармоники 50 Гц, которая имеет амплитуду около 50 мА, затем очищались от выбросов (при этом удалялись все значения, отстоящие от сглаженной кривой более чем на 10 СКО). Далее по очищенным данным рассчитывались средние значения для каждой секунды и секундные СКО

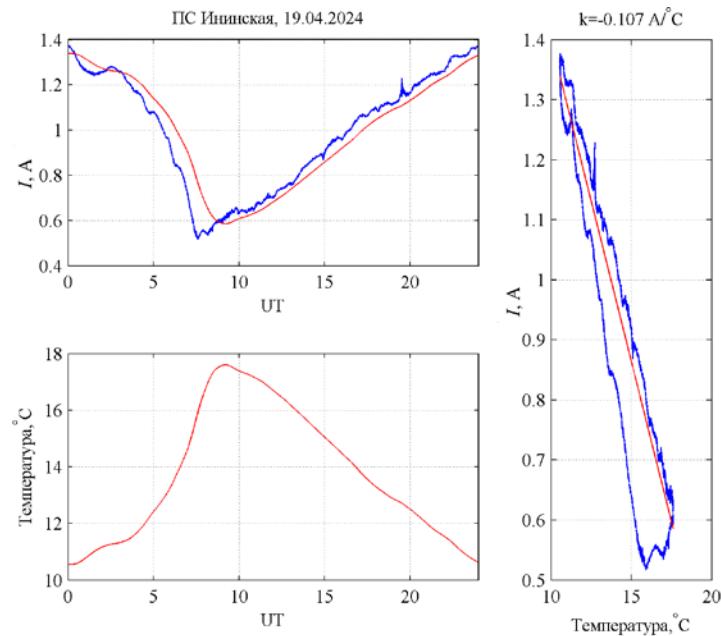


Рис. 5. Результаты регистрации тока (верхняя левая панель) и температуры (нижняя левая панель) 19 апреля 2024 г. На верхней левой панели синим цветом показаны результаты измерений, красным — теоретическая кривая, рассчитанная по температуре. Справа показано соотношение зарегистрированных значений тока и температуры, хорошо заметен гистерезис зависимости тока от температуры, красной прямой показана оценка температурной зависимости тока

(последние — как характеристика амплитуды переменного тока в заземлении). Динамика секундных средних значений тока и температуры за 19 апреля 2024 г. показана на рис. 5. Видно, что в результате сильной зависимости показаний датчика от температуры, которая в данном случае меняется в течение суток на 6° , в показаниях датчика наблюдается суточная волна с амплитудой около 0.8 А. При этом, как следует из диаграммы на правой панели, в зависимости показаний датчика тока от температуры присутствует гистерезис: волна показаний датчика тока несколько обгоняет по фазе суточную волну показаний датчика температуры. Это явление, вероятно, вызвано различием температур в местах установки датчиков температуры и датчика Холла соответственно.

На кривой тока видны также небольшие возмущения с амплитудой до 100 мА, которые, собственно, и являются ГИТ (в этот день наблюдалась магнитная буря с $K_p=7$). Чтобы выделить их на фоне температурной волны, необходимо компенсировать температурную зависимость. Поскольку наличие гистерезиса сильно осложняет такую компенсацию, для выделения ГИТ обычно брался малый интервал времени (15 мин) и из ряда значений тока вычитался полином второго порядка для компенсации тренда. Оценки показали, что суточная волна температуры после такой компенсации дает поправки порядка 1 мА. Заметим, что при обработке данных системы регистрации ГИТ Центра проблем энергетики Севера КНЦ РАН и Полярного геофизического института компенсация тренда производилась на суточном интервале, поскольку дрейф нуля был относительно небольшим благодаря активной термокомпенсации установки [Баранник и др., 2012]. В наших измерениях компенсация тренда на длительных интервалах времени (до 8 ч) была возможна только в ночное

время, когда колебания температуры были невелики и относительно регулярны. В этом случае для расчета тренда проводилась аппроксимация ряда измерений кубическими сглаживающими сплайнами с помощью оператора MATLAB csaps при значении сглаживающего параметра $p=0.01$.

Результаты обработки на 15-минутных интервалах показаны на рис. 6. На рис. 6, а представлена реакция ГИТ на внезапное начало магнитной бури 04.08.2024 в 22.20 (согласно <https://obsebre.es/en/variations/rapid>), на рис. 6, б — на интенсивное бухтообразное возмущение во время той же бури (на Алтае в это время наблюдалось полярное сияние). На этих рисунках (а также на рис. 6, в, г) на верхней панели показаны вариации горизонтальной компоненты H и склонения D геомагнитного поля на магнитной станции «Байгазан», на средней — рассчитанные по ним скорости изменения компонент dH/dt и dD/dt , на нижней — результаты измерения ГИТ на подстанции «Ининская». Из графиков следует, что суббурия характеризовалась скоростью изменения поля до 2–3 нТ/с.

Как говорилось ранее, наблюдаемые значения ГИТ надо увеличивать примерно на порядок: на рис. 6, а максимальный ток составляет 0.11 А, а рис. 6, б — 0.37 А. Это примерно соответствует расчетным оценкам, приведенным в работе [Uchaikin et al., 2024].

На рис. 6, в и г показана реакция ГИТ на геомагнитные пульсации классов Pc3 и Pc5 соответственно. На нижней панели рис. 6, в явно прослеживается цуг колебаний тока, вызванных пульсациями геомагнитного поля с периодом около 30 с и амплитудой до 1 нТл.

Очевидна сильная связь между ГИТ в нейтрали трансформатора и геомагнитными пульсациями. Заметим, что геомагнитное поле в это время было слабо возмущенным: $K_p=2+$. Таким образом, слабые

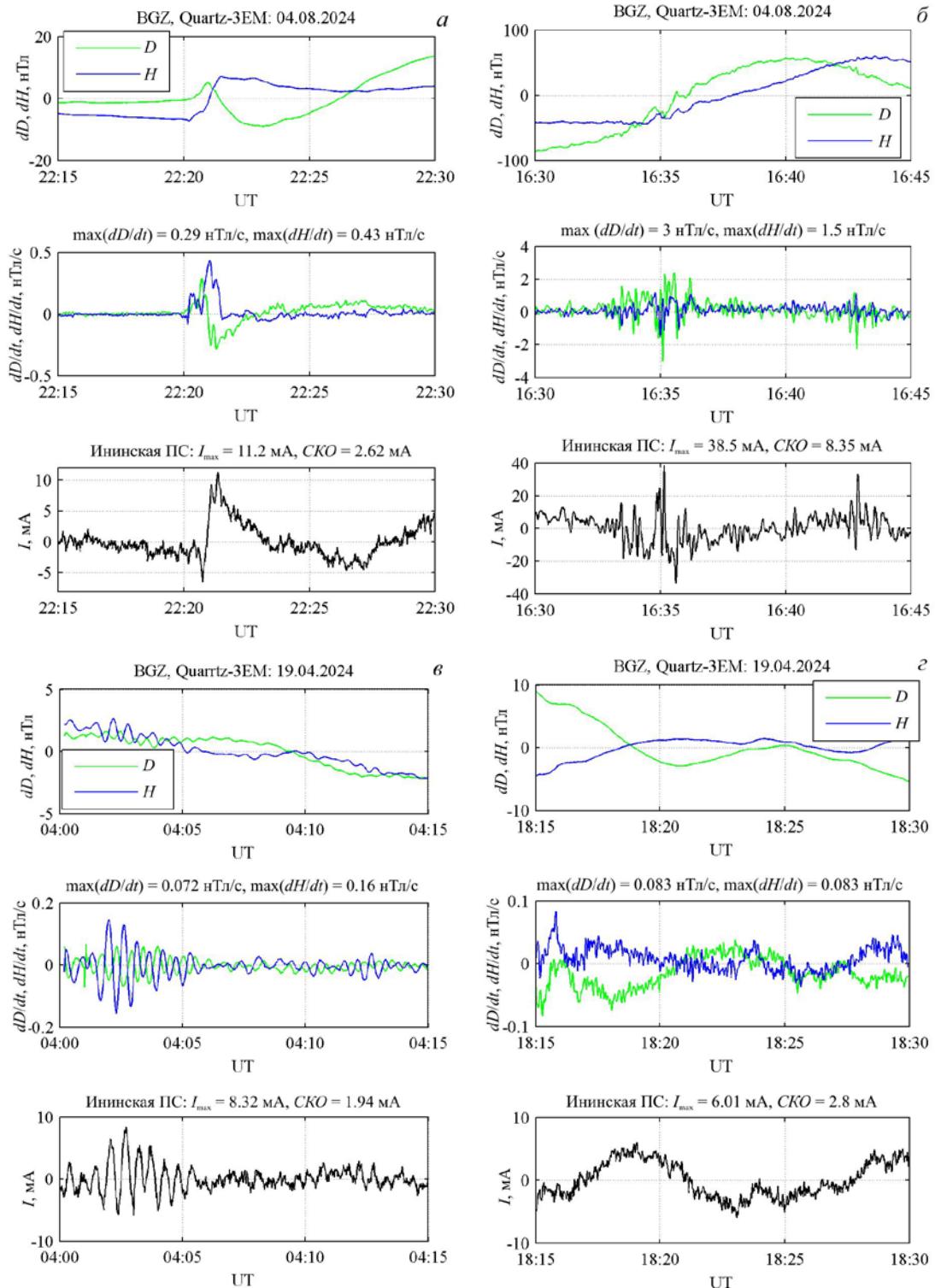


Рис. 6. Записи ГИТ на подстанции «Ининская» во время внезапного начала магнитной бури (а) и интенсивного бухтообразного возмущения (б), а также во время наблюдения микропульсаций ГМП классов Pc3 (в) и Pc5 (г): верхние панели — результаты регистрации вариаций геомагнитного поля на магнитной станции «Байгазан», средние панели — скорость изменения компонент поля, рассчитанная по результатам регистрации геомагнитных вариаций; нижние панели — ГИТ, зарегистрированные на подстанции «Ининская»

ГИТ вызываются даже пульсациями ГМП, которые наблюдаются каждый день, однако такие токи не оказывают заметного воздействия на сеть электроснабжения. Как видно по значениям, приведенным над панелями, СКО ГИТ во время пульсаций в 3–4 раза ниже, чем при суббури. Учитывая, что амплитуда четных гармоник (которую можно рассматривать как показа-

тель воздействия на сеть электроснабжения) в Ине пропорциональна квадрату скорости изменения поля [Uchaikin, Gvozdarev, 2023], можно считать, что эффект от пульсаций меньше на 10–15 дБ.

Естественно, эти оценки носят предварительный характер, поскольку влияние геомагнитных пульсаций на электрические сети пока слабо изучено. Системы

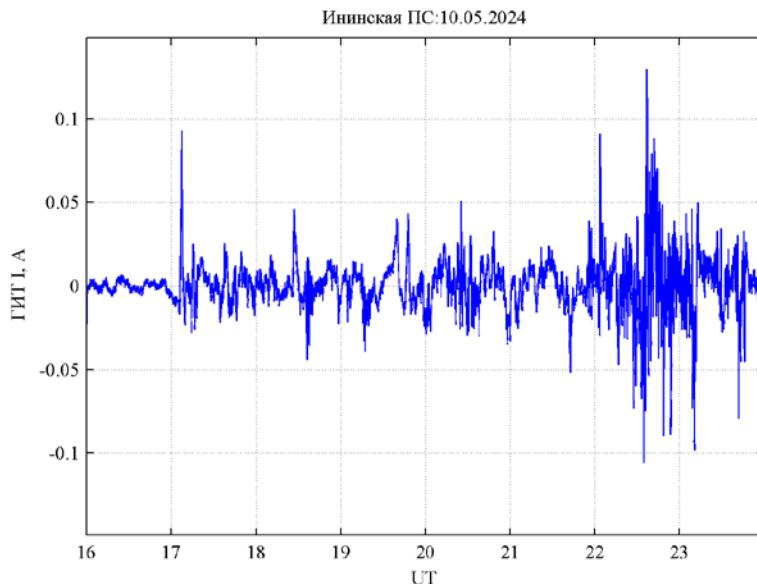


Рис. 7. Результаты регистрации ГИТ на подстанции «Ининская» во время магнитной бури 10 мая 2024 г.

Таблица 1

Максимальные измеренные ГИТ I и СКО измеренного ГИТ в заземляющей шине подстанции «Ининская» во время магнитных бурь, а также расчетные суммарные значения ГИТ (βI) для подстанции «Ининская» и Ининской СЭС

Дата	UT	Максимальный ток, мА		СКО тока, мА		K_p
		I	βI	std(I)	std(βI)	
16.04.2024	15–18	37.2	177	3.13	14.9	5–
	18–21	13.7	65	2.88	13.7	5+
	21–24	11.0	52	2.39	11.4	5
19.04.2024	12–15	16.8	80	2.22	10.6	5
	15–18	11.2	53	1.94	9.3	6–
	18–21	43.9	209	3.87	18.5	7
26.04.2024	12–15	13.4	128	3.40	32.4	4
10.05.2024	15–18	92.5	882	8.15	77.8	8–
	18–21	54.3	518	14.47	138.0	9–
	21–24	137.9	1316	23.51	224.3	9–
11.05.2024	00–03	нет данных				9
	03–06	65.2	622	14.30	136.4	8+
	06–09	133.4	1273	25.13	239.7	8+
	09–12	99.8	952	18.39	175.4	9
	12–15	38.7	369	9.17	87.5	9–
28.06.2024	09–12	32.7	312	5.44	51.9	6
	12–15	15.4	147	2.13	20.3	8–
	15–18	19.4	185	2.22	21.2	6–
	18–21	9.4	90	1.37	13.1	5+
04.08.2024	12–15	29.8	284	2.40	22.9	7–
	15–18	43.4	414	2.86	27.3	7

регистрации ГИТ обычно имеют временное разрешение 1 мин, поэтому их данные могут быть использованы лишь для изучения проявлений в ГИТ геомагнитных пульсаций классов Pc5/Pi3 [Yagova et al., 2021]. При шаге между измерениями 10 с возникает возможность изучения влияния на ГИТ Pc4/Pi2-пульсаций [Ягова и др., 2024].

Интересно отметить, что при меньшей скорости изменения поля dB/dt у пульсаций Pc5 (см. рис. 6, ε) их амплитуда сравнима с амплитудой пульсаций Pc3 (см. рис. 6, ε). Это вызвано большей глубиной про-

никновения переменного магнитного потока, созданного длиннопериодными Pc5-пульсациями в литосферу Земли. Динамика ГИТ в заземляющей шине подстанции «Ининская» во время начала экстремальной бури 10–11 мая 2024 г. показана на рис. 7. Поскольку измерения 10 мая проводились ночью, удаление тренда удалось провести в 8-часовом окне. Как видно на рисунке, ГИТ во время этой бури (которая была самой сильной за последние 20 лет) достигал 0.138 А. С учетом разделения ГИТ между заземлениями подстанции «Ининская» и Ининской

СЭС, суммарный ГИТ в обеих заземляющих шинах мог достигать 1.3 А, при этом большая его часть проходила через заземление Игинской СЭС (которая в ночное время работает на холостом ходу). Кроме этого максимум ГИТ в 22:36 UT, вызванного интенсивной суббурей, хорошо заметен всплеск ГИТ амплитудой 92 мА в 17:07 UT, вызванный внезапным началом бури.

В табл. 1 показаны результаты обработки данных, полученных во время магнитных бурь, — максимальные измеренные ГИТ и среднеквадратичные отклонения измеренного ГИТ за трехчасовой интервал времени. В таблице приведены также оценки максимального значения и СКО суммарного ГИТ, проходящего через заземления Игинской подстанции и Игинской СЭС. В последнем столбце показан планетарный индекс геомагнитной возмущенности K_p , взятый с сайта Германского научного центра наук о Земле [<https://kp.gfz-potsdam.de/en/>].

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИТ В ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ СЕТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ АЛТАЙ

В статье [Gvozdarev et al., 2023] описана модель для расчета ГИТ в высоковольтной сети электроснабжения Республики Алтай, развитая на основе работы [Boteler, Pirjola, 2019]. Исходными данными модели являются данные о геомагнитных вариациях на магнитной станции «Байгазан» с дискретностью 1 с. От рядов этих данных рассчитываются спектры горизонтально ориентированных компонент геомагнитного поля: северной $B_y(f)$ и восточной $B_x(f)$, после домножения на передаточную функцию $K(f)$ из них получаются спектры горизонтально ориентированных компонент геоэлектрического поля: восточной E_x и северной E_y (для упрощения работы с географическими координатами подстанций в данном случае используется географическая, а не геофизическая система обозначений координат):

$$E_x(f) = K(f)B_y(f), \quad (4.1)$$

$$E_y(f) = -K(f)B_x(f). \quad (4.2)$$

Передаточная функция связана с частотой f и ка-
жуемся удельным электрическим сопротивлением ρ формулой

$$K(f) = \sqrt{\frac{i2\pi f \rho}{\mu_0}}, \quad (5)$$

где μ_0 — магнитная постоянная.

После обратного преобразования Фурье спектра геоэлектрического поля $E_x(f)$, $E_y(f)$ получаем ряды значений этих компонент $E_x(t)$, $E_y(t)$ в разные моменты времени t . По этим значениям рассчитываются напряжения между точками заземления ЛЭП 110 кВ:

$$U_{0j}(t) = E_x(t)(x_j - x_0) + E_y(t)(y_j - y_0), \quad (6)$$

где x_j , y_j — координаты подстанций.

В модели [Gvozdarev et al., 2023] не были учтены сопротивления первичных обмоток трансформаторов

и их заземлений, а также сдвоенный характер заземления ЛЭП 110 кВ в Ине и двухцепное исполнение некоторых ЛЭП. Для магнитных бурь с марта по август 2024 г. были проведены расчеты ГИТ с учетом этих факторов. Эквивалентная электрическая схема высоковольтной сети электроснабжения показана на рис. 8. Электрическая сеть Республики Алтай с напряжением 110 кВ выполнена проводом АС 120/19 с погонным сопротивлением 0.249 Ом/км и АЖ-120/19 с погонным сопротивлением 0.283 Ом/км. ЛЭП от Ини на Кош-Агач и Улаган выполнены в двухцепном исполнении, остальные — в одноцепном. Информация о длине ЛЭП, используемых марках провода и установленных на подстанциях трансформаторах бралась из [Схема и..., 2021] (см. табл. 3.3, 3.4 в данном источнике), а электрические параметры трансформаторов и ЛЭП — на сайте [<https://powersystem.info>]. Сопротивление участков цепи с учетом сопротивлений трансформаторов приведено в табл. 2. При расчете сопротивление заземления задавалось равным 2 Ом (для Кош-Агача 4 Ом из-за присутствия вечной мерзлоты). В Кош-Агаче и Улагане считалось, что заземлены и подсоединенны к ЛЭП 110 кВ оба трансформатора. В Черге один трансформатор обслуживает ЛЭП на Усть-Коксу, а второй — ЛЭП на Кош-Агач. Они гальванически связаны на уровне контура заземления, но при расчетах их взаимное влияние не учитывалось. На подстанции «Игинская» к ЛЭП присоединен только один трансформатор.

Реактивное сопротивление провода АС 120/19 составляет 0.427 Ом/км на частоте 50 Гц, для ГИТ эта величина будет на 3–4 порядка меньше, в результате на 100 км линии мы получим сопротивление около 0.05 Ом на фазу и им можно пренебречь.

Считалось, токи от трех линий электропередачи суммируются в Ине (см. рис. 8):

$$I_0 = I_{12} + I_3 = I_1 + I_2 + I_3, \quad (7)$$

где I_0 — ток через Игинский узел заземления; I_1 , I_2 , I_3 — токи через узлы заземления в Кош-Агаче, Улагане и Черге соответственно; I_{12} — ток через ЛЭП Ини—Акташ.

Учитывалось, что в Ине заземлен не только силовой трансформатор 2.5 МВА на подстанции «Игинская», но и трансформатор 40 МВА на Игинской СЭС (сопротивление Игинского узла заземления $R_0 = 1.91$ Ом):

$$I_0 = I_{0\text{ПС}} + I_{0\text{СЭС}}. \quad (8)$$

Токи в ветвях эквивалентной схемы рассчитываются по правилам Кирхгофа, представленным в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} R_0 & R_1 & R_{12} & 0 & 0 \\ R_0 & 0 & R_{12} & R_2 & 0 \\ R_0 & 0 & 0 & R_3 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_{12} \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{01} \\ U_{02} \\ U_{03} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Здесь R_0 , R_1 , R_{12} , R_2 , R_3 — сопротивления участков цепи (приведены в табл. 1); I_0 , I_1 , I_{12} , I_2 , I_3 — токи в них; U_{01} , U_{02} , U_{03} — напряжения между Иней и Кош-Агачем, Улаганом и Чергой соответственно.

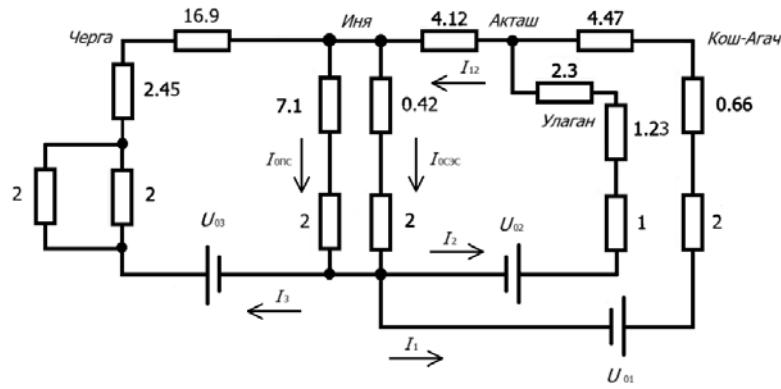


Рис. 8. Эквивалентная схема высоковольтной сети электроснабжения южной и центральной частей Республики Алтай для расчета ГИТ

Таблица 2

Параметры участков цепи

№	Участок	Количество цепей в ЛЭП	Длина, км	Сопротивление, Ом		
				ЛЭП	трансформаторов и заземления	суммарное
1	Иня—Акташ R_{12}	2	87.28	4.12		4.12
2	Акташ—Кош-Агач R_1	2	94.72	4.47	2.66	7.13
3	Акташ—Улаган R_2	2	55.36	2.30	2.23	4.52
4	Ининская—Чергинская R_3	1	204.11	16.94	3.45	20.39

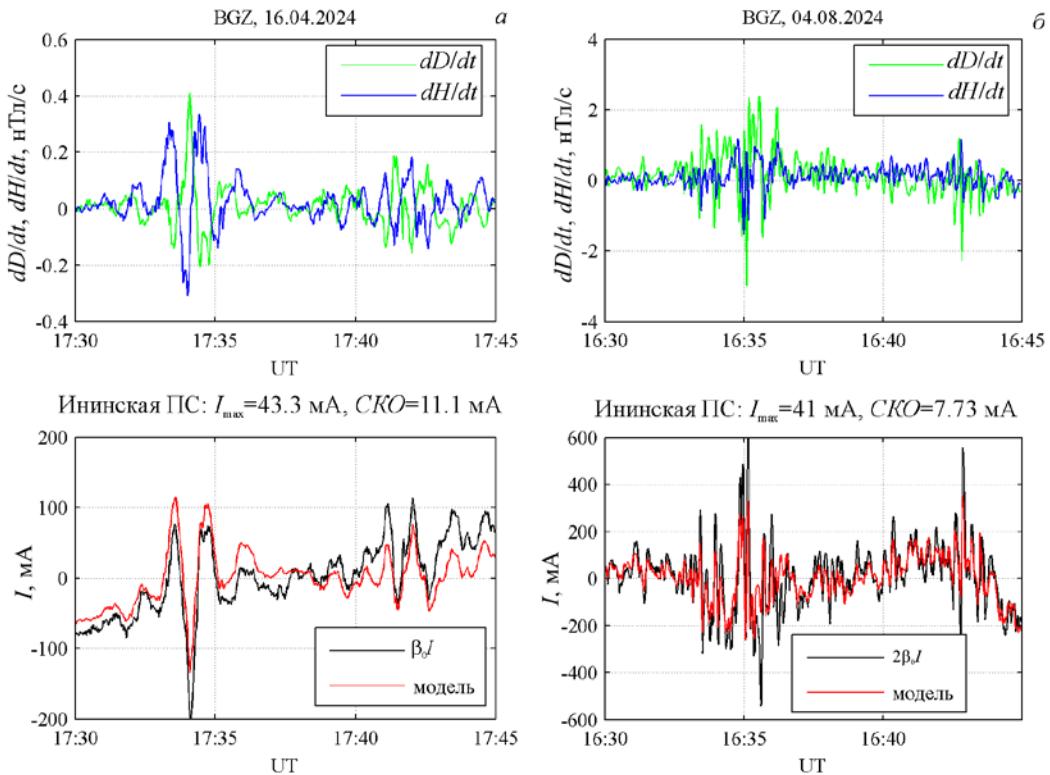


Рис. 9. Сравнение измеренных на подстанции «Ининская» ГИТ с результатами расчетов по модели 16.04.2024 (а) и 04.08.2024 (б): верхняя панель — динамика скорости изменения компонент геомагнитного поля на магнитной станции «Байгазан», нижняя панель — расчетные и измеренные значения ГИТ. В апреле используется коэффициент пересчета β_0 , в августе — $2\beta_0$

Для каждого момента времени решалось матричное уравнение при помощи MATLAB.

Результаты сопоставления расчетов с измерениями на подстанции «Ининская» представлены на рис. 9. Видно, что наблюдается качественное согласие между

расчетом и измерениями. Различия между моделью и измерениями могут быть вызваны несовпадением реальной передаточной функции, в которой кажущееся сопротивление зависит от частоты [Поспехова и др., 2014], с модельной.

Таблица 3

Оценки согласно модели максимальных значений ГИТ в энергосети Республики Алтай во время магнитных бурь 2024 г. (в скобках приведены экспериментальные значения ГИТ)

Дата	Время максимума тока, UT	Геоэлектрическое поле, мВ/км	dB/dt , нТл/мин	ГИТ, мА			
				Иня	Черга	Кош-Агач	Улаган
03.03.2024	19:34:48	42.8	44.4	400	147	350	197
23.03.2024	14:10:53	23.4	12.6	214	113	236	91
24.03.2024	14:37:13	162.0	144.9	1528	711	1551	688
25.03.2024	04:00:48	89.9	125.1	858	1	302	556
16.04.2024	20:15:01	19.0	4.8	171(177)	19	33	119
19.04.2024	14:55:05	25.1	11.6	248(162)	27	125	150
	19:30:41	51.1	40.2	236(371)	262	291	265
26.04.2024	19:52:23	15.7	5.2	145(104)	11	35	99
02.05.2024	14:09:23	28.7	13.9	237	165	318	84
10.05.2024	22:36:43			(1316)			
11.05.2024	08:20:10			(1273)			
13.05.2024	10:00:56	40.8	38.0	377	192	406	163
16.05.2024	07:59:03	45.5	27.7	434	190	424	201
17.05.2024	13:29:55	23.8	11.2	198	84	187	95
07.06.2024	14:54:31	45.3	22.6	437	181	411	206
28.06.2024	11:22:40	72.0	36.8	665(312)	338	716	287
26.07.2024	03:58:15	48.7	44.9	485	75	278	282
30.07.2024	05:10:44	37.7	62.6	354	167	363	158
01.08.2024	04:37:21	37.5	31.8	322	62	25	235
04.08.2024	16:42:52	61.6	130.1	587(486)	259	576	270
11.08.2024	09:59:32	51.8	36.8	466	114	367	213
12.08.2024	08:46:19	120.0	126.0	1163	463	1069	557
17.08.2024	17:28:10	79.7	35.7	771	312	715	367
27.08.2024	08:44:01	28.0	12.4	278	84	217	145
12.09.2024	09:01:26	66.4	72.7	654	224	549	329
13.09.2024	15:16:09	18.4	18.5	180	13	82	111
17.09.2024	01:08:53	27.3	28.0	274	63	186	150
07.10.2024	20:54:31	49.1	33.9	482	41	228	295
08.10.2024	02:16:46	24.4	18.3	243	37	138	142
10.10.2024	15:15:58	245.9	227.7	2214	1232	2535	911
11.10.2024	09:24:04	72.3	39.3	692	576	253	446
09.11.2024	13:00:14	32.1	40.6	309	128	291	146
10.11.2024	19:06:18	22.7	7.1	197	35	20	143

В работе [Gvozdarev et al., 2023] для кажущегося удельного электрического сопротивления было выбрано значение $\rho=500$ Ом·м, которое является промежуточным между значением этого параметра для горных котловин, заполненных четвертичными осадками, и их горным обрамлением на Юго-Восточном Алтае [Поспехова и др., 2014]. В модели принято приближение однородной проводимости земной коры на Алтае как наиболее простое. В реальности отмечается как латеральное различие удельного сопротивления между межгорными котловинами и их горным обрамлением, осложненное наличием хорошо проводящих разломных зон (до 2 Ом·м), так и понижение сопротивления с глубиной (на Алтае присутствует низкоомный коровой слой). Показано, что кажущееся сопротивление падает на порядок при уменьшении частоты с 1 Гц до 0.01 Гц [Поспехова и др., 2014]. Кроме того, свой вклад может вносить вечная мерзлота, мощность которой достигает 50 м в высокогорном Кош-Агачском районе.

Необходимо отметить, что согласие результатов измерений с моделью существенно зависит от времени года, предположительно, из-за изменения сопротивления заземления. В апреле наилучшее согласие между

расчетами и измерениями наблюдается при коэффициенте пересчета тока β_0 (см. рис. 9, а), а в летнее время лучшее согласие наблюдается при коэффициенте пересчета около $2\beta_0$ (рис. 9, б). Этот эффект проявлялся также в том, что при близких скоростях изменения поля 4 августа и 19 апреля при наблюдении пульсаций типа Рс3 амплитуда ГИТ в апреле (см. рис. 6, в) больше примерно в два раза.

Заземление на Игинской СЭС для более мощного трансформатора сделано более качественно, и, видимо, в летнее время, когда оттаивает грунт, сопротивление заземления на Игинской СЭС существенно ниже, в результате через Игинскую подстанцию идет меньшая доля ГИТ. Заметим, что глубина промерзания грунта в Ине оценивается от 2 до 3 м, а создание эффективного заземления в песчано-галечных отложениях Катуни, на которых стоит подстанция, представляет серьезную проблему

В табл. 3 представлены результаты оценок по модели максимальных ГИТ во время магнитных бурь 2024 г. в Ине, Черге и Кош-Агаче. В таблице приведены также расчетные значения скорости изменения горизонтальной составляющей геомагнитного поля dB/dt и геоэлектрического поля в моменты макси-

мумов расчетных ГИТ в Ине (для 19 апреля приведены также результаты расчетов для момента, когда достиг максимума измеренный ГИТ). В скобках приведены значения ГИТ, полученные из измерений на Игинской подстанции, при этом для бурь 16 и 19 апреля использовался коэффициент пересчета β_0 , а для остальных — $2\beta_0$. Такие же значения использовались для расчетов параметров ГИТ в табл. 1.

Как видно из табл. 3, расчетный ГИТ в Ине превышал 1 А во время магнитных бурь 24 марта, 10–11 мая, 12 августа и 2 А (в Кош-Агаче — 2.5 А) во время бури 10 октября.

Сравнение результатов моделирования и измерений показывает, что они довольно близки для апельских бурь (16, 19 и 26 апреля). Однако в некоторых случаях (28.06.2024) модельные максимальные значения выше результатов измерений. Одной из причин может быть занижение ГИТ за счет вычитания тренда в тех случаях, когда магнитные вариации имеют характерное время больше 15 мин, например, во время бухтообразных возмущений.

Второй возможной причиной несовпадения модели и измерений может быть уже упоминавшаяся частотная зависимость кажущегося сопротивления. В работе [Caraballo et al., 2023] отмечалось, что модель однородной проводимости дает заниженные значения ГИТ во время быстрых процессов по сравнению со слоистой моделью проводимости и реальными измерениями. Это объяснялось большей ролью верхней части геоэлектрического разреза в формировании отклика на быстрые процессы. В нашем случае есть тенденция к обратному — во время внезапного начала бури 28.06.2024 и быстрого бухтообразного возмущения 04.08.2024 модель дает завышенное значение ГИТ. Возможно, это связано с меньшим, чем в модели, удельным сопротивлением четвертичных осадочных пород, заполняющих межгорные котловины и долины рек, вдоль которых обычно прокладывают ЛЭП, которые и определяют электрические свойства верхней части геоэлектрического разреза. Согласно [Новиков, Поспехова, 2017], для осадочных пород Курайской и Чуйской котловин удельное сопротивление составляет от 10 до 300 Ом·м, что существенно ниже 500 Ом·м, заложенных в модель.

Наконец, при латеральной неоднородности проводимости возможно влияние вариаций обеих горизонтально ориентированных компонент геомагнитного поля на ГИТ независимо от ориентации ЛЭП [Bedrosian, Love, 2015].

Тем не менее результаты расчета по модели могут использоваться для предварительной оценки интенсивности ГИТ в регионе во время геомагнитных возмущений. По мере накопления измерений она будет уточняться. В целом полученные значения ГИТ ниже, чем максимальные расчетные токи для изолированной энергосистемы 115 кВ Baja California Sur в Мексике, для которой они оценивались величиной 2 А при возмущении уровня G2 [Caraballo et al., 2023]. Видимо, это связано с большим погонным сопротивлением 110 кВ ЛЭП в России (0.249 Ом/км в России против 0.061 Ом/км для 115 кВ ЛЭП в Мексике) — таким образом, наши 110 кВ сети должны быть более устойчивыми к ГИТ.

Полученные результаты в дальнейшем могут быть использованы для расчетов ГИТ в близко расположенных сибирских ЛЭП 500 кВ. В частности, ЛЭП от Саяно-Шушенской ГЭС до подстанции «Новокузнецкая» проходит от магнитной станции «Байгазан» на расстояниях, не превышающих 300 км, что позволяет относительно точно моделировать динамику ГИТ в ней.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На подстанции «Игинская» на Алтае установлена система регистрации геомагнитно-индукционных токов в заземляющей шине силового трансформатора ТМН-2500/110 Т1. Холловский датчик тока в токовых клещах имеет чувствительность около 20 мА/В и погрешность около 0.5 мА. Регистрация осуществляется при помощи 24-битного АЦП 100 раз в секунду. Результаты записываются на SD-карту.

Измерения тока имеют существенный температурный тренд, вызванный суточными колебаниями температуры (до 25° за сутки в летнее время). Для выделения ГИТ данные делятся на 15-минутные интервалы, на каждом из них проводится удаление тренда в виде полинома 2-го порядка.

Проведены измерения ГИТ во время магнитных бурь 16.04.2024, 19.04.2024, 26.04.2024, 10–11.05.2024, 28.06.2024, 04.08.2024 г. Бури 10–11.05.2024 была самой сильной за последние 20 лет, измеренные значения ГИТ достигали 138 мА. Необходимо учитывать, что ГИТ в Ине делятся на две неравные части, поскольку трансформаторы заземлены не только на Игинской подстанции, но и на Игинской солнечной электростанции. Расчетный суммарный ГИТ в Ине достигал 1.3 А. Показано наличие ГИТ во время наблюдения геомагнитных пульсаций классов Рс3 и Рс5.

Результаты измерений ГИТ сопоставлялись с модельными расчетами в приближении однородной проводимости земной коры на основе данных магнитной станции «Байгазан» на Алтае. Обнаружено качественное согласие модели с расчетами. Для улучшения согласия необходимо, с одной стороны, учесть в модели детали геоэлектрического разреза Алтая, с другой — снизить температурную чувствительность токовых датчиков.

Проведены расчеты ГИТ во время магнитных бурь 2024 г. по модели однородной проводимости. Расчетный ГИТ в Ине превышал 1 А во время бурь 24 марта, 10–11 мая, 12 августа, а во время бури 10 октября превысил 2 А.

Обнаружена зависимость интенсивности ГИТ на подстанции «Игинская» от сезона, предположительно вызванная перераспределением ГИТ между подстанцией «Игинская» и Игинской СЭС вследствие изменения сопротивлений заземления на них при оттаивании грунта.

Авторы выражают признательность электромонтерам по обслуживанию подстанции «Игинская» Волоскову Г.П. и Сойтошеву А.М. за поддержку мониторинга ГИТ на подстанции и главному инженеру ПО «Горно-Алтайские электрические сети» филиала ПАО «Россети Сибирь» — «Алтайэнерго» Филатову А.В. за помощь в организации мониторинга ГИТ в энер-

госетях Республики Алтай. Мы благодарны инспектору Алтайского заповедника И.Н. Светлояру, обеспечивавшему мониторинг геомагнитных вариаций на кордоне «Байгазан», и дирекции Алтайского заповедника, много лет поддерживающей магнитные измерения в заповеднике. Авторы благодарят рецензентов, замечания которых позволили существенно улучшить статью.

Работа проведена за счет средств гранта РНФ 23-27-10055 и Министерства образования и науки Республики Алтай.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бакиев А.И., Бетев А.А., Гвоздарев А.Ю., Учайкин Е.О. Новая магнитная станция — Байгазан (Горный Алтай, Телецкое озеро). *Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей: труды 6-х научных чтений Ю.П. Булашевича*. Екатеринбург: УрО РАН, 2011, с. 29–32.

Баранник М.Б., Данилин А.Н., Катыкалов Ю.В. и др. Система регистрации геондуктированных токов в нейтралях силовых автотрансформаторов. *Приборы и техника эксперимента*. 2012, № 1, с. 118–123.

Водяников В.В., Гордиенко Г.И., Нечаев С.А. и др. Наведенные токи в линиях электропередач по данным геомагнитных вариаций. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2006, т. 46, № 6, с. 853–859.

Гусев Ю.П., Лхамдондог А.Д., Монаков Ю.В., Ягова Н.В. Влияние знакопостоянного тока на баланс потокосцеплений первичных и вторичных обмоток силового трансформатора. *Релейная защита и автоматизация*. 2020, № 2 (39), с. 20–25.

Козырева О.В., Пилиенко В.А., Добровольский М.Н. и др. База данных геомагнитных наблюдений в российской Арктике и ее использование для оценки воздействий космической погоды на технологические системы. *Солнечно-земная физика*. 2022, т. 8, № 1, с. 39–50. DOI: [10.12737/szf-81202205](https://doi.org/10.12737/szf-81202205) / Kozyreva O.V., Pilipenko V.A., Dobrovolsky M.N., Zaitsev A.N., Marshalko E.E. Database of geomagnetic observations in Russian Arctic and its application for estimates of the space weather impact on technological systems. *Sol.-Terr. Phys.* 2022, vol. 8, no. 1, pp. 39–50. DOI: [10.12737/stp-81202205](https://doi.org/10.12737/stp-81202205).

Новиков И.С., Поспесева Е.В. Неотектоника восточной части Горного Алтая по данным магнитотелурического зондирования. *Геология и геофизика*. 2017, т. 58, № 7, с. 959–971. DOI: [10.15372/GiG20170701](https://doi.org/10.15372/GiG20170701).

Паркинсон У. Введение в геомагнетизм: Пер. с англ. М.: Мир, 1986, 528 с.

Пилиенко В.А. Воздействие космической погоды на наземные технологические системы. *Солнечно-земная физика*. 2021, т. 7, № 3, с. 72–110. DOI: [10.12737/szf-73202106](https://doi.org/10.12737/szf-73202106) / Pilipenko V.A. Space weather impact on ground-based technological systems. *Sol.-Terr. Phys.* 2021, vol. 7, no. 3, pp. 68–104. DOI: [10.12737/stp-73202106](https://doi.org/10.12737/stp-73202106).

Поспесева Е.В., Витте Л.В., Потапов В.В., Сахарова М.А. Магнитотелурические исследования в районах новейшей тектоники и сейсмической активности (на примере Горного Алтая). *Геофизика*. 2014, № 4, с. 8–16.

Селиванов В.Н., Аксенович Т.В., Билин В.А. и др. База данных геондуктированных токов в магистральной электрической сети «Северный транзит». *Солнечно-земная физика*. 2023, т. 9, № 3, с. 100–110. DOI [10.12737/szf-93202311](https://doi.org/10.12737/szf-93202311) / Selivanov V.N., Aksenovich T.V., Bilin V.A., Kolobov V.V., Sakharov Ya.A. Database of geomagnetically induced currents in the main transmission line “Northern transit”. *Sol.-Terr. Phys.* 2023, vol. 9, no. 3, pp. 93–101. DOI: [10.12737/stp-93202311](https://doi.org/10.12737/stp-93202311).

Сивоконь В.П. Новый метод обнаружения геомагнитно-индуцированных токов. *Электротехника*. 2021, № 11, с. 53–58.

Соколова О.Н., Сахаров Я.А., Грицутенко С.С., Коровкин Н.В. Алгоритм анализа устойчивости энергосистем к геомагнитным бурям. *Известия РАН. Энергетика*. 2019, № 5, с. 33–52. DOI: [10.1134/S0002331019050145](https://doi.org/10.1134/S0002331019050145).

Схема и программа развития электроэнергетики Республики Алтай на 2022–2026 (утверждена решением главы Республики Алтай 04/29/2021 № 118-и). Горно-Алтайск: Министерство регионального развития Республики Алтай, 2021. URL: <https://docs.cntd.ru/document/574723771> (дата обращения 13 мая 2025 г.)

Тренькин А.А., Воеводин С.В., Коблова О.Н. и др. Моделирование воздействия сильной магнитной бури на Объединенную энергетическую систему Центра России. *Электричество*. 2023, № 2, с. 37–49. DOI: [10.24160/0013-5380-2023-2-37-49](https://doi.org/10.24160/0013-5380-2023-2-37-49).

Учайкин Е.О., Кудин Д.В., Гвоздарев А.Ю. Разработка индукционного магнитометра на основе датчика ИНТ-1 и результаты мониторинга на магнитной станции «Байгазан». *Взаимодействие полей и излучения с веществом: труды Международной Байкальской междисциплинарной научной школы по фундаментальной физике*. Иркутск, 2015, С. 267–268.

Ягова Н.В., Сахаров Я.А., Пилиенко В.А., Селиванов В.Н. Длиннопериодные геомагнитные пульсации как элемент воздействия космической погоды на технологические системы. *Солнечно-земная физика*. 2024, т. 10, № 3, с. 146–156. DOI: [10.12737/szf-103202415](https://doi.org/10.12737/szf-103202415) / Yagova N.V., Sakharov Y.A., Pilipenko V.A., Selivanov V.N. Long-period pulsations as an element of space weather influence on technological systems. *Sol.-Terr. Phys.* 2024, vol. 10, no. 3, pp. 136–146. DOI: [10.12737/stp-103202415](https://doi.org/10.12737/stp-103202415).

Albert D., Schachinger P., Bailey R.L., et al. Analysis of long-term GIC measurements in transformers in Austria. *Space Weather*. 2022, vol. 20, e2021SW002912. DOI: [10.1029/2021SW002912](https://doi.org/10.1029/2021SW002912).

Alekseev D., Palshin N., Kuvshinov A. Compilation of 3D global conductivity model of the Earth for space weather applications. *Earth, Planets and Space*. 2015, vol. 67, no. 1, p. 108. DOI: [10.1186/s40623-015-0272-5](https://doi.org/10.1186/s40623-015-0272-5).

Bailey R.L., Leonhardt R., Möstl C., et al. Forecasting GICs and geoelectric fields from solar wind data using LSTMs: Application in Austria. *Space Weather*. 2022, vol. 20, e2021SW002907. DOI: [10.1029/2021SW002907](https://doi.org/10.1029/2021SW002907).

Barbosa C.S., Hartmann G.A., Pinheiro K.J. Numerical modeling of geomagnetically induced currents in a Brazilian transmission line. *Adv. Space Res.* 2015, vol. 55, iss. 4, pp. 1168–1179. DOI: [10.1016/j.asr.2014.11.008](https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.11.008).

Bedrosian P.A., Love J.J. Mapping geoelectric fields during magnetic storms: Synthetic analysis of empirical United States impedances. *Geophys. Res. Lett.* 2015, vol. 42, pp. 10160–10170. DOI: [10.1002/2015GL066636](https://doi.org/10.1002/2015GL066636).

Bolduc L. GIC observations and studies in the Hydro-Québec power system. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 2002, vol. 64, pp. 1793–1802. DOI: [10.1016/S1364-6826\(02\)00128-1](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00128-1).

Boteler D.H., Pirjola R.J. Numerical calculation of geoelectric fields that affect critical infrastructure. *International J. Geosci.* 2019, vol. 10, pp. 930–949. DOI: [10.4236/ijg.2019.1010053](https://doi.org/10.4236/ijg.2019.1010053).

Caraballo R., González-Esparza J.A., Pacheco C.R., Corona-Romero P. Improved model for GIC calculation in the Mexican power grid. *Space Weather*. 2023, vol. 21, no. 1, e2022SW003202. DOI: [10.1029/2022SW003202R](https://doi.org/10.1029/2022SW003202R).

Espinosa K.V., Padilha A.L., Alves L.R., et al. Estimating geomagnetically induced currents in southern Brazil using 3-D Earth resistivity model. *Space Weather*. 2023, vol. 21, e2022SW003166. DOI: [10.1029/2022SW003166](https://doi.org/10.1029/2022SW003166).

Gaunt C.T., Coetze G. Transformer failures in regions incorrectly considered to have low GIC-risk. *2007 IEEE Lausanne Power Tech. Lausanne, Switzerland*, 2007, pp. 807–812. DOI: [10.1109/PCT.2007.4538419](https://doi.org/10.1109/PCT.2007.4538419).

Gil A., Berendt-Marchel M., Modzelewska R., et al. Review of geomagnetically induced current proxies in mid-latitude European countries. *Energies*. 2023, vol. 16, p. 7406. DOI: [10.3390/en16217406](https://doi.org/10.3390/en16217406).

Gvozdarev A.Yu., Kazantzeva O.V., Uchaikin E.O., Yadagaev E.G. Estimation of geomagnetically induced currents in the Altai republic power system according to the Baygazan magnetic station data. *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2023, vol. 45, no. 4, pp. 190–200. DOI: [10.26117/2079-6641-2023-45-4-190-200](https://doi.org/10.26117/2079-6641-2023-45-4-190-200).

Hübert J., Beggan C. D., Richardson G.S., et al. Validating a UK geomagnetically induced current model using differential magnetometer measurements. *Space Weather*. 2024, vol. 22, e2023SW003769. DOI: [10.1029/2023SW003769](https://doi.org/10.1029/2023SW003769).

Mac Manus D.H., Rodger C.J., Dalzell M., et al. Long-term geomagnetically induced current observations in New Zealand: Earth return corrections and geomagnetic field driver. *Space Weather*. 2017, vol. 15, pp. 1020–1038. DOI: [10.1002/2017SW001635](https://doi.org/10.1002/2017SW001635).

Mac Manus D.H., Rodger C.J., Renton A., et al. Implementing geomagnetically induced currents mitigation during the May 2024 “Gannon” G5 storm: Research informed response by the New Zealand power network. *Space Weather*. 2025, vol. 23, e2025SW004388. DOI: [10.1029/2025SW004388](https://doi.org/10.1029/2025SW004388).

Marsal S., Torta J.M., Curto J.J., et al. Validating GIC modeling in the Spanish power grid by differential magnetometry. *Space Weather*. 2021, vol. 19, iss. 12. DOI: [10.1029/2021SW002905](https://doi.org/10.1029/2021SW002905).

Marshall R.A., Dalzell M., Waters C.L., et al. Geomagnetically induced currents in the New Zealand power network. *Space Weather*. 2013, vol. 10, iss. 8, S08003. DOI: [10.1029/2012SW000806](https://doi.org/10.1029/2012SW000806).

Matandirotya E., Cilliers P.J., Van Zyl R.R. Modeling geomagnetically induced currents in the South African power transmission network using the finite element method. *Space Weather*. 2015, vol. 13, pp. 185–195. DOI: [10.1002/2014SW001135](https://doi.org/10.1002/2014SW001135).

Matandirotya E., Cilliers, P.J., Van Zyl R.R., et al. Differential magnetometer method applied to measurement of geomagnetically induced currents in Southern African power networks. *Space Weather*. 2016, vol. 14, no. 3, pp. 221–232. DOI: [10.1002/2015SW001289](https://doi.org/10.1002/2015SW001289).

Muchini P., Matandirotya E., Mashonjowa E. Analysis of transformer reactive power fluctuations during adverse space weather. *International Journal of Energy and Power Engineering*. 2024, vol. 18, no. 2, pp. 16–21.

Pulkkinen A., Lindahl S., Viljanen A., Pirjola R. Geomagnetic storm of 29–31 October 2003: Geomagnetically induced currents and their relation to problems in the Swedish high-voltage power transmission system. *Space Weather*. 2005, vol. 3, S08C03. DOI: [10.1029/2004SW000123](https://doi.org/10.1029/2004SW000123).

Švanda M., Smičková A., Výbošťková T. Modelling of geomagnetically induced currents in the Czech transmission grid. *Earth Planets and Space*. 2021, vol. 73, no. 1, p. 229. DOI: [10.1186/s40623-021-01555-5](https://doi.org/10.1186/s40623-021-01555-5).

Taran S., Alipour N., Rokni K., et al. Effect of geomagnetic storms on a power network at mid latitudes. *Adv. Space Res.* 2023, vol. 71, iss. 12, pp. 5453–5465. DOI: [10.1016/j.asr.2023.02.027](https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.02.027).

Trivedi N.B., Vitorello I., Kabata W., et al. Geomagnetically induced currents in an electric power transmission system at low latitudes in Brazil: A case study. *Space Weather*. 2007, vol. 5, iss. 4, S04004. DOI: [10.1029/2006SW000282](https://doi.org/10.1029/2006SW000282).

Uchaikin E.O., Gvozdarev A.Y. Organization of monitoring of even harmonics amplitudes in the electricity networks of the Altai Republic as an indicator of space weather. *2023 IEEE XVI International scientific and technical conference “Actual problems of electronic instrument engineering” (APEIE)*. Novosibirsk, 2023, pp. 450–454. DOI: [10.1109/APEIE59731.2023.10347597](https://doi.org/10.1109/APEIE59731.2023.10347597).

Uchaikin E., Gvozdarev A., Kudryavtsev N. Assessment of the geomagnetically induced currents impact on the power transformers cores of the Altai Republic 110 kV power grid. *E3S Web of Conferences*. 2024, vol. 542, p. 02002. DOI: [10.1051/e3sconf/202454202002](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202454202002).

Uchaikin E., Gvozdarev A., Kudryavtsev N., Yadagaev E.G. On the impact of geomagnetically induced currents on the energy system of the Altai Republic and Siberia. *Russian Electrical Engineering*. 2025, vol. 96, no. 6, pp. 477–484. DOI: [10.3103/S1068371225700622](https://doi.org/10.3103/S1068371225700622).

Watari S., Nakamura S., Ebinara Y. Measurement of geomagnetically induced currents (GIC) around Tokyo. *Earth, Planets and Space*. 2021, vol. 73, p. 102. DOI: [10.1186/s40623-021-01422-3](https://doi.org/10.1186/s40623-021-01422-3).

Yagova N.V., Pilipenko V.A., Sakharov Y.A., Selivanov V.N. Spatial scale of geomagnetic Pc5/Pi3 pulsations as a factor of their efficiency in generation of geomagnetically induced currents. *Earth Planets Space*. 2021, pp. 73–88. DOI: [10.1186/s40623-021-01407-2](https://doi.org/10.1186/s40623-021-01407-2).

Zhang J.J., Wang C., Sun T.R., et al. GIC due to storm sudden commencement in low-latitude high-voltage power network in China: Observation and simulation. *Space Weather*. 2015, vol. 13, pp. 643–655. DOI: [10.1002/2015SW001263](https://doi.org/10.1002/2015SW001263).

URL: <https://powersystem.info> (дата обращения 12 мая 2025 г.).

URL: <https://kp.gfz-potsdam.de/en/> (дата обращения 12 мая 2025 г.).

URL: <https://obsebre.es/en/variations/rapid> (дата обращения 12 мая 2025 г.).

Как цитировать эту статью:
Гвоздарев А.Ю., Учайкин Е.О. Опыт мониторинга геомагнитно-индексированных токов в энергосети Республики Алтай. *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, № 4, с. 92–105. DOI: [10.12737/szf-114202509](https://doi.org/10.12737/szf-114202509).