

# ОЦЕНКА ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МАГНИТНОЙ СТАНЦИИ «БАЙГАЗАН»

А. Ю. Гвоздарев<sup>\*,1</sup>  и Е. О. Учайкин<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, с. Паратунка, Камчатский край, Россия

<sup>2</sup>Горно-Алтайский государственный университет, Горно-Алтайск, Россия

\* **Контакт:** Алексей Юрьевич Гвоздарев, gvozdarev@ikir.ru

На основе данных магнитной станции «Байгазан» произведено моделирование геоиндуцированных токов (ГИТ) в линии электропередачи (ЛЭП) 500 кВ «Саяно-Шушенская ГЭС (СШ ГЭС) – подстанция (ПС) «Новокузнецкая» (и прилегающих к ней линиях) во время очень сильных и экстремальных магнитных бурь (планетарный индекс геомагнитной активности  $K_p \geq 8$ ) за период 2012–2024 г. в приближении одномерной модели распределения проводимости земной коры. Показано, что, для СШ ГЭС ток в нейтрали трансформаторных групп может достигать 17 А, для ПС «Новокузнецкая» – 8 А. Основными источниками ГИТ являются быстрые высокоамплитудные бухтообразные возмущения (до 17 А) и внезапные начала магнитных бурь (до 5 А). Отмечен заметный вклад геомагнитных пульсаций различных классов в формирование ГИТ (до 5 А).

**Ключевые слова:** геоиндуцированные токи, Южная Сибирь, моделирование, бухтообразные возмущения, пульсации геомагнитного поля, внезапные начала магнитных бурь.

**Цитирование:** Гвоздарев А. Ю., Учайкин Е. О. Оценка экстремальных значений геоиндуцированных токов на основе данных магнитной станции «Байгазан» // Russian Journal of Earth Sciences. — 2025. — Т. 25. — ES6023. — DOI: 10.2205/2025es000985 — EDN: XCYWMW

## Введение

Геоиндуцированные токи (ГИТ) – это потенциально опасное явление космической погоды, способное оказывать негативное воздействие на электрические сети во время интенсивных геомагнитных возмущений [Пилипенко, 2021]. При вариациях геомагнитного поля (ГМП) в коре и мантии Земли генерируется геоэлектрическое поле, величина которого зависит от скорости изменения горизонтально направленной компоненты геомагнитного поля  $dB/dt$  и удельного электрического сопротивления (УЭС) слагающих земную кору пород. В результате возникает разность потенциалов между разнесёнными в пространстве заземлёнными нейтралями силовых трансформаторов на концах высоковольтных линий электропередачи (ЛЭП), которая приводит к протеканию ГИТ через первичные обмотки трансформаторов и провода ЛЭП. Сильные ГИТ, протекая по первичным обмоткам, создают постоянные магнитные поля, приводящие к насыщению сердечников трансформаторов. В результате растёт ток холостого хода трансформатора, увеличивается реактивная мощность в линии, происходит нагрев трансформаторов, наблюдается генерация чётных гармоник, возможно ложное срабатывание автоматики. При воздействии ГИТ на блочный трансформатор электростанции, работающий в паре с синхронным генератором, возможно существенное нелинейное искажение тока статора вследствие обратной трансформации гармоник тока намагничивания в цепи статорных обмоток [Вахнина и др., 2024]. Эти явления приводят к снижению пропускной способности ЛЭП, понижению качества электроэнергии, в ряде случаев отмечались выходы силовых трансформаторов из строя и энергетические аварии в результате действия ГИТ [Bolduc, 2002; Wik *et al.*, 2008], в том числе в средних и низких широтах [Gaunt and Coetze, 2007; Marshall *et al.*, 2012].

<https://elibrary.ru/XCYWMW>

Получено: 22 ноября 2024 г.

Принято: 11 сентября 2025 г.

Опубликовано: 30 декабря 2025 г.



© 2025. Коллектив авторов.

В последнее время увеличилось количество исследовательских работ, посвящённых изучению ГИТ в средних и низких широтах [Gil *et al.*, 2023]. Системы регистрации ГИТ созданы во многих странах [Albert *et al.*, 2022; Caraballo *et al.*, 2023; Hübert *et al.*, 2024; Mac Manus *et al.*, 2017; Marshall *et al.*, 2013; Trivedi *et al.*, 2007; Watari *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2015]. Большие усилия приложены к разработке моделей ГИТ в электрических сетях высокого напряжения [Caraballo *et al.*, 2023; Cordell *et al.*, 2024; Espinosa *et al.*, 2023; Hübert *et al.*, 2024; Matandirotya *et al.*, 2015; Švanda *et al.*, 2021]. В США, Канаде (<https://www.swpc.noaa.gov/products/geoelectric-field-models-1-minute>) и Великобритании ([https://geomag.bgs.ac.uk/data\\_service/space\\_weather/gic\\_services.html](https://geomag.bgs.ac.uk/data_service/space_weather/gic_services.html)) наложен оперативный расчёт распределения геоэлектрических полей по территории этих стран по данным магнитных обсерваторий. Так как распределение кажущегося сопротивления земной коры и мантии играет важную роль в генерации ГИТ, для обеспечения этой задачи на всей территории США сделано магнитотеллурическое зондирование.

На территории России мониторинг ГИТ производится только на Кольском полуострове [Селиванов и др., 2023]. Единственная система измерения ГИТ в России принадлежит Полярному геофизическому институту и Центру энергетики Севера, которые с 2010 г. осуществляют мониторинг ГИТ в сетях «Коллэнерго» в условиях высоких геомагнитных широт. За это время накоплен значительный материал, описаны статистические свойства распределений ГИТ, построены регрессионные модели связи ГИТ с AE-индексом и скоростью изменения магнитной индукции, оценены экстремальные значения ГИТ и описаны условия их формирования. Согласно результатам этих работ, кроме высоких значений тока аврорального электророджета, важное значение для генерации ГИТ играют также пульсации классов Pc5/Pi3 [Белаховский и др., 2018; Воробьев и др., 2019; Belakhovskiy *et al.*, 2019a].

В средних широтах России подобные исследования находятся на начальном этапе, например, признаки наличия ГИТ в электрических сетях высокого напряжения на средних широтах косвенными методами обнаружены на Камчатке [Sivokon, 2021] и на Алтае [Uchaikin and Gvozdarev, 2023]. Между тем, существуют предварительные оценки, что энергосистема Сибири может быть подвержена влиянию ГИТ [Соколова и др., 2019]. Однако работы по моделированию ГИТ на основе результатов измерений магнитных вариаций проводились только в Республике Алтай [Gvozdarev *et al.*, 2023], электрические сети 110 кВ которой в целом довольно устойчивы к данному фактору. Целью данной работы является моделирование ГИТ в части энергосистемы Сибири, находящейся рядом с Республикой Алтай (в частности, в ЛЭП 500 кВ от Саяно-Шушенской ГЭС до подстанции «Новокузнецкая»), по данным магнитной станции Горно-Алтайского университета «Байгазан», находящейся на территории Алтайского заповедника [Бакиев и др., 2011] (51,76° с. ш., 87,43° в. д.).

На станции с 2009 г. организован мониторинг геомагнитных вариаций при помощи кварцевого вариометра с частотой регистрации 5 Гц (с 2014 г. – 20 Гц). В качестве дублирующего прибора для регистрации вариаций используется индукционный магнитометр на базе датчика ИНТ-1 [Учайкин и др., 2015]. Удалённость станции от источников техногенных помех обеспечивает относительно низкий уровень шумов на станции (среднеквадратичное отклонение в секундной выборке для кварцевого вариометра не более 0,03 нТл).

### Методика расчётов ГИТ

В [Gvozdarev *et al.*, 2023] описана модель для расчёта геоэлектрического поля в приближении однородной проводимости земной коры  $\sigma$ , развитая на основе [Boteler and Pirjola, 2019]. Входными данными для модели являются результаты измерений составляющих геомагнитного поля: горизонтальной  $B_H(t)$  и склонения  $B_D(t)$ . Из рядов этих данных убирается среднее значение и линейный тренд, на краях применяется окно Ханнинга шириной около 10% от общей длины серии (для минимизации явления Гиббса). По подготовленным таким образом данным через фурье-преобразование определяются

спектры компонент геомагнитных вариаций  $B_H(f), B_D(f)$  и рассчитываются спектры компонент геоэлектрического поля  $E_D(f), E_H(f)$  по формулам

$$\begin{aligned} E_D(f) &= K(f)B_H(f), \\ E_H(f) &= -K(f)B_D(f), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $K(f)$  – передаточная функция. В приближении однородной проводимости она определяется формулой

$$K(f) = \sqrt{\frac{i2\pi f}{\mu_0\sigma}}, \quad (2)$$

где  $f$  – частота,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная. Далее при помощи обратного преобразования Фурье рассчитываются ряды значений компонент геоэлектрического поля для каждого момента времени  $E_D(t), E_H(t)$  и они пересчитываются из геомагнитной системы координат в географическую,

$$\begin{aligned} E_x(t) &= E_D(t)\cos D_0 + E_H(t)\sin D_0, \\ E_y(t) &= -E_D(t)\sin D_0 + E_H(t)\cos D_0, \end{aligned}$$

где  $E_x(t)$  – восточная компонента,  $E_y(t)$  – северная, а  $D_0$  – магнитное склонение. Разность потенциалов между точками заземления ЛЭП с координатами  $(x_i, y_i)$ ,  $(x_j, y_j)$  рассчитывается по формуле

$$U_{ij}(t) = E_x(t)(x_j - x_i) + E_y(t)(y_j - y_i),$$

а ГИТ в ЛЭП между ними  $I_{ij}$  определяется по закону Ома  $I_{ij} = U_{ij}/R_{ij}$ , причём сопротивление между точками заземления  $R_{ij}$  зависит от длины ЛЭП  $L_{ij}$ , сопротивлений первичных обмоток концевых трансформаторов  $R_i, R_j$  и сопротивлений заземления  $R_{Gi}, R_{Gj}$ :

$$R_{ij} = \rho_L L_{ij} + R_i + R_j + R_{Gi} + R_{Gj}.$$

Здесь  $\rho_L$  – погонное сопротивление ЛЭП. Ток в отдельном узле рассчитывается как сумма токов в прилегающих к нему ветвях.

### ЛЭП 500 кВ в соседствующих с Республикой Алтай регионах

Схема ЛЭП 500 кВ в соседствующих с Республикой Алтай регионах показана на [рис. 1](#). Географические и исправленные геомагнитные координаты подстанций и пунктов наблюдений приведены в [табл. 1](#).

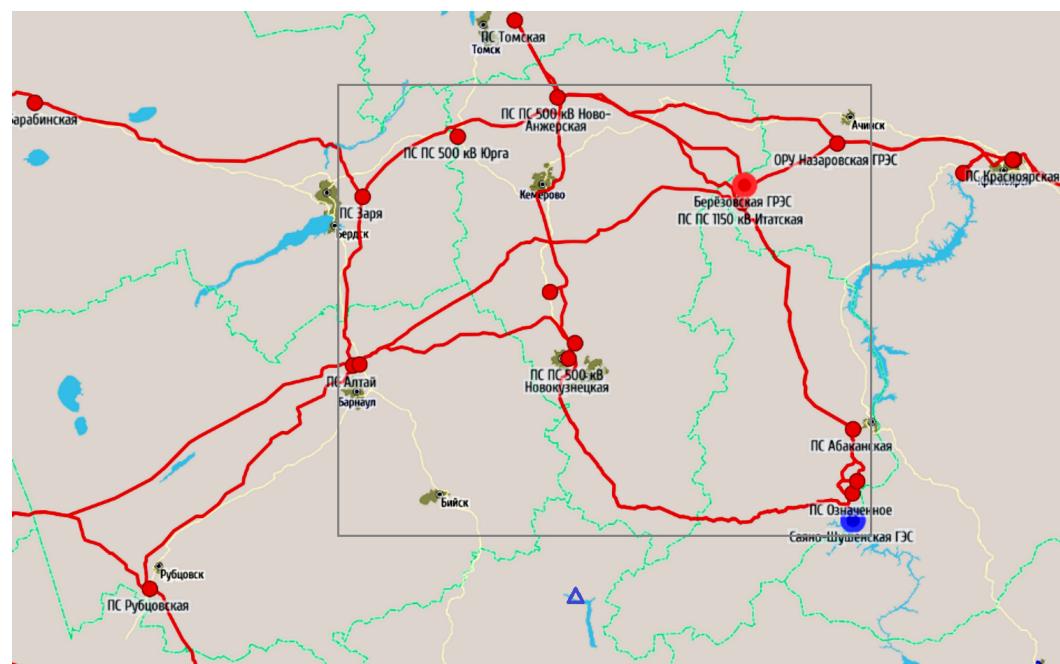
**Таблица 1.** Географические и исправленные геомагнитные координаты пунктов наблюдения и подстанций

Наименование	Географические координаты		Исправленные геомагнитные координаты	
	с. ш., °	в. д., °	широта, °	долгота, °
Магнитная станция «Байгазан»	51,76	87,43	48,35	161,17
Магнитная обсерватория «Ключи»	54,85	83,23	51,59	156,90
Саяно-Шушенская ГЭС	52,84	91,38	49,37	165,33
ПС Новокузнецкая	53,90	86,83	50,56	160,62
ПС Барнаульская	53,59	83,76	50,29	157,41
ПС Итатская	55,44	89,08	52,09	163,02
ПС Ново-Анжерская	56,09	86,13	52,81	159,97

Расстояние от магнитной станции «Байгазан» до Саяно-Шушенской ГЭС (СШ ГЭС) составляет 294 км, до ПС «Барнаульская» – 321 км (до магнитной обсерватории «Ключи» в Новосибирске – 580 и 140 км соответственно), поэтому по данным

станции можно относительно точно оценить ГИТ в проходящих рядом с Республикой Алтай ЛЭП 500 кВ. Для того, чтобы рассчитать токи в заземлённых нейтралях трансформаторов на СШ ГЭС и ПС «Новокузнецкая» достаточно рассмотреть ЛЭП, подходящие к ним. Характеристики этих ЛЭП приведены в [табл. 2](#). Также там описаны ЛЭП 1150 кВ ПС «Итатская» – ПС «Алтай» и ЛЭП 500 кВ ПС «Ново-Анжерская» – ПС «Итатская» (с целью замыкания контуров напряжения). Расчёты для них имеют лишь вспомогательное значение и менее точны из-за заметной удалённости от магнитной станции.

Из схемы также видно, что близко расположенные подстанции 500 кВ на этих линиях можно объединить в отдельные узлы, рассматриваемые как единый источник/сток ГИТ. При этом первичные обмотки силовых трансформаторов на соседних подстанциях одного узла считаются соединёнными параллельно, что снижает сопротивление узла в целом. Характеристики выделенных узлов приведены в [табл. 3](#). Ток через отдельную нейтраль в узле рассчитывается по формуле  $I_n = I_y R_y / R_n$ , где  $R_y, R_n$  – сопротивления узла и трансформаторной группы с заземлением нейтрали соответственно,  $I_y$  – ток узла.



**Рис. 1.** Схема ЛЭП 500 кВ в соседствующих с Республикой Алтай регионах по данным <https://frexosm.ru/power/>. Треугольником показано расположение магнитной станции «Байгазан», прямоугольником очерчена область расчёта средних УЭС.

При расчёте сопротивлений в [табл. 2](#) и [3](#) использовались данные о трансформаторах на подстанциях 500 кВ и соединяющих их ЛЭП из схем и программ развития энергетических систем Хакасии [*Об утверждении схемы...*, 2022], Кемеровской области [*Схема...*, 2020], Алтайского края [*Схема...*, 2021], Красноярского края [*Схема...*, 2022]. Сопротивление заземления для нейтралей групп силовых трансформаторов 500 кВ принималось за 0,5 Ом, сопротивления трансформаторных групп из трансформаторов АОДЦТН 167000 500/220/10,5 – 0,58 Ом (на три фазы), АОДЦТН 267000 500/220/10,5 – 0,28 Ом, ОРЦ-533000/500 – 0,15 Ом (<https://powersystem.info>). Данные о погонном сопротивлении ЛЭП брались на том же сайте. К сожалению, в программах развития не было информации о трансформаторах на ГРЭС, поэтому их трансформаторный парк определялся примерно, по мощности ГРЭС. При расчёте узла Саяно-Шушенской ГЭС считалось, что из 5 трансформаторных групп, имеющихся на ГЭС, в работе находятся 4.

**Таблица 2.** Характеристика ЛЭП 500 кВ между узлами заземления

ЛЭП	Длина, км	Провод	Сопротивление, Ом
Саяно-Шушенская ГЭС – ПС Новокузнецкая (2 ЛЭП)	448,83; 448,05	9×AC-330/43	2,168
ПС Новокузнецкая – ПС Алтай	264,10	9×AC-330/43	2,526
ПС Ново-Анжерская – ПС Новокузнецкая	317,80	9×ACO-400, 9×AC-400/51	2,648
ПС Ново-Анжерская – ПС Итатская	221,46	9×AC-400/51, 9×ACO-500, 9×ACO-400, 9×AC-300/39	1,950
ПС Алтай – ПС Итатская	447,88	24×AC-400/51	1,400
ПС Итатская – Саяно-Шушенская ГЭС (2 ЛЭП)	414,80; 403,94	9×AC-330/43, 9×AC-400/51, 9×AC-500/64	1,857

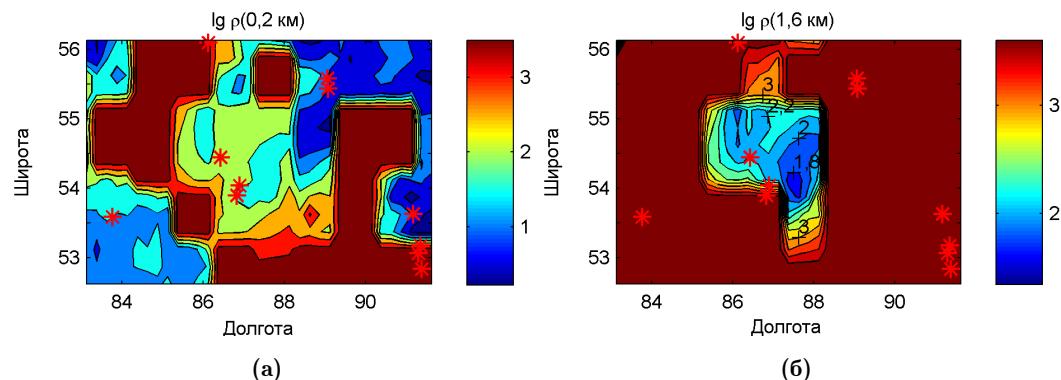
**Таблица 3.** Характеристика узлов заземления ЛЭП

Узел заземления	Подстанции	Трансформаторы 500 кВ	Сопротивление узла, Ом	$R_y/R_h$
Саяно- Шушенская ГЭС	СШ ГЭС Означенное Алюминиевая Абаканская	12×ОРЦ-533000 6×АОДЦТН 267000 6×АОДЦТН 167000 6×АОДЦТН 267000	0,096	0,147
Новокузнецкая	Новокузнецкая Кузбасская Беловская ГРЭС 1260 МВт	6×АОДЦТН 267000 3×АОДЦТН 267000 6×АОДЦТН 167000	0,228	0,293
Алтай	Барнаульская Алтай	6×АОДЦТН 167000 6×АОДЦТН 167000	0,279	0,258
Итатская	Итатская Березовская ГРЭС 2600 МВт	6×АОДЦТН 167000 9×АОДЦТН 267000	0,197	0,182
Ново- Анжерская	Ново- Анжерская	6×АОДЦТН 167000	0,54	0,5

### О выборе передаточной функции

В данной работе мы перешли от приближения однородной проводимости, используемого для расчёта ГИТ в системе высоковольтного электроснабжения Горного Алтая [Gvozdarev *et al.*, 2023] к одномерной модели распределения удельного электрического сопротивления (УЭС), как более точной. Для расчёта передаточной функции использовалась информация о УЭС подстилающих пород из атласа, описанного в [Alekseev *et al.*, 2015]. Шаг сетки в данном атласе составляет  $0,25^\circ$  по широте и долготе, 100 м по глубине. Распределение УЭС для двух глубин (0,1–0,2 и 0,8–1,6 км) в прямоугольнике, охватывающем основную ЛЭП и вспомогательный контур (показан на рис. 1) показаны на рис. 2.

На рис. 2а по высокому УЭС, характерному для кристаллических пород, довольно хорошо видны основные горные хребты, находящиеся в исследуемом районе: Западный Саян и Абаканский хребет в южной части рисунка и примыкающие к ним Кузнецкий Алатау и Салаирский кряж. Низкие УЭС связаны с осадочными породами Минусинской котловины, Кузнецкого бассейна и степного Алтая. Однако мощность этих осадочных пород обычно не превышает 300 м и на глубинах более километра мы видим относительно низкие УЭС только в Кузнецком бассейне и на западных отрогах Кузнецкого Алатау (рис. 2б).



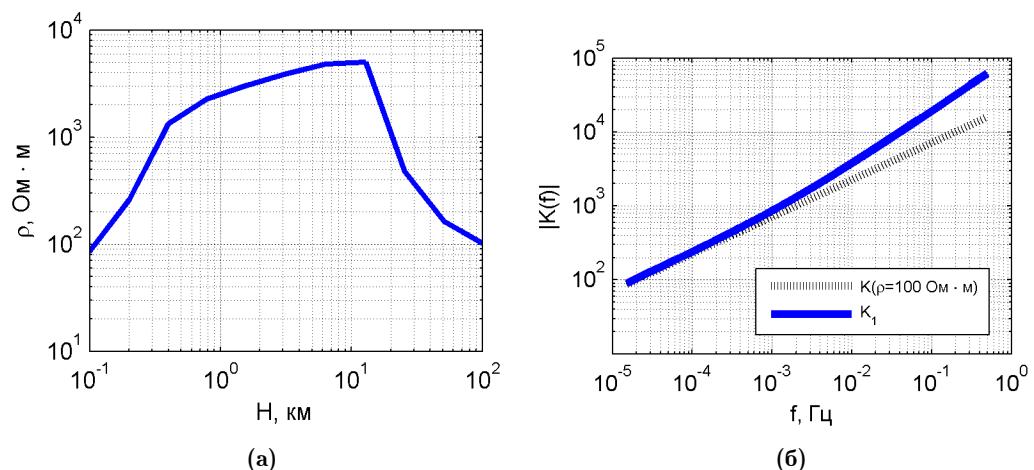
**Рис. 2.** Распределение логарифма удельного электрического сопротивления на исследуемой территории согласно атласу [Alekseev et al., 2015] на глубинах 0,2 км (а) и 0,8–1,6 км (б). Маркерами показаны подстанции 500 кВ.

На основе данных атласа рассчитывались средние по площади УЭС на исследуемой территории на глубинах 0–0,1; 0,1–0,2; 0,2–0,4; 0,4–0,8; 0,8–1,6; 1,6–3,2; 3,2–6,4; 6,4–12,8; 12,8–25,6; 25,6–51,2; 51,2–100 км. Полученный профиль УЭС показан на [рис. 3а](#). Относительно низкие УЭС до 0,3 км отражают наличие чехла осадочных пород (который выклинивается в горной местности), а понижение УЭС глубже 12 км вызвано снижением сопротивления кристаллических пород при повышении температуры с глубиной.

Согласно [Boteler and Pirjola, 2019] расчёт передаточной функции при одномерной модели распределения УЭС производится на основе рекуррентного соотношения, связывающего передаточную функцию  $n$ -го слоя  $K_n$  толщиной  $l_n$  и УЭС  $\rho_n$  с передаточной функцией более глубоко расположенного слоя  $K_{n+1}$

$$K_n = \eta_n \frac{K_{n+1}(1 + \exp(-2k_n l_n)) + \eta_n(1 - \exp(-2k_n l_n))}{K_{n+1}(1 - \exp(-2k_n l_n)) + \eta_n(1 + \exp(-2k_n l_n))} \quad (3)$$

где  $\eta_n = \sqrt{i2\pi f \rho_n / \mu_0}$ ,  $k_n = \sqrt{i2\pi f \mu_0 / \rho_n}$ . Передаточная функция нижнего слоя, считающегося однородным и полубесконечным, определяется формулой (2). В результате пересчёта, начинаящегося с нижнего слоя, был получен набор передаточных функций для каждого слоя. В дальнейшем для расчётов геоэлектрического поля в формуле (1) использовалась передаточная функция приповерхностного слоя  $K_1$ . Зависимость её модуля от частоты показана на [рис. 3б](#). Также там показана передаточная функция для самого глубокого слоя, среднее УЭС которого равно 100 Ом·м.



**Рис. 3.** Зависимость среднего УЭС от глубины на исследуемом участке (а) и зависимость модуля передаточной функции от частоты (б). Прерывистой линией показана передаточная функция для самого глубокого слоя.

Переход к 3D-модели на основе данных [Alekseev *et al.*, 2015] вряд ли имеет смысл, т. к. кристаллические породы описываются в данном атласе очень обобщённо (в частности, на глубине 12 км УЭС одинаково для всей исследуемой территории). Между тем, согласно работам [Беляевский и Гайдина, 2012; Беляевский и Лозовский, 2022], основанных на анализе результатов магнитотеллурического зондирования, УЭС кристаллических пород в Алтае-Саянском регионе меняется весьма значительно. Эти различия, в том числе, связаны с особенностями тектонического процесса, формирующего в регионе флюидонасыщенные зоны с низким УЭС. К сожалению, геолого-геофизическая изученность региона пока не полна, – как видно из [Беляевский и Гайдина, 2012; Беляевский и Лозовский, 2022], магнитотеллурическое зондирование выполнено вдоль нескольких профилей и не охватывает весь регион. Описанные в цитируемых работах 3D модели распределения УЭС также охватывают лишь некоторые части исследуемой территории.

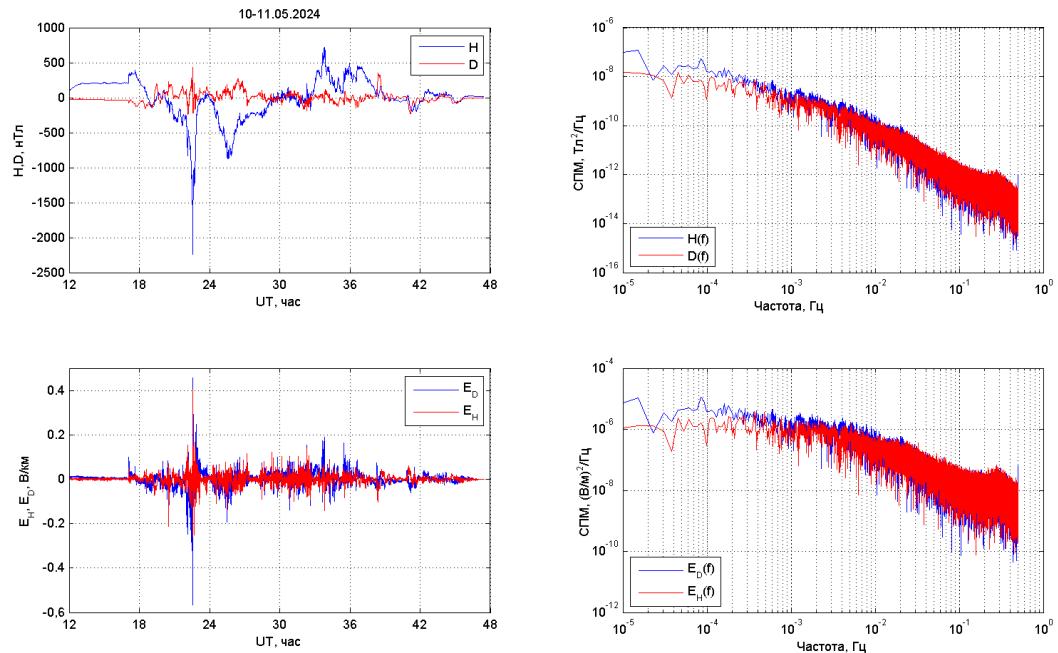
### Результаты расчёта ГИТ и их обсуждение

Был произведён расчёт геоэлектрических полей, напряжений между узлами заземления и ГИТ в ЛЭП и заземлённых нейтралях трансформаторов для очень сильных и экстремальных бурь (планетарный индекс геомагнитной возмущённости согласно данным <https://kp.gfz-potsdam.de/en/> принимал значения  $Kp \geq 8$ ) за период работы магнитной станции «Байгазан» (2010–2024 гг.) – всего 9 событий. Исходными данными для расчётов были секундные средние результатов измерений кварцевого вариометра. Данные за 23.03.2023 и 10.05.2024 были утеряны, поэтому расчёт для этих дат вёлся на основе секундных данных обсерватории «Ключи» в Новосибирске. Также их пришлось использовать для бури 08.09.2017 г., т. к. один из каналов кварцевого вариометра находился в это время в состоянии «ложного равновесия» с низкой чувствительностью и повышенным шумом [Нечаев, 2006].

Для расчёта спектра использовались данные за двое суток, содержащих бурю, из них выбирался ряд длиной  $2^{17}$  с (36,4089 часа) и по ним считался спектр. Границы ряда подбирались так, чтобы они находились достаточно далеко от начала и конца бури. По спектрам ГМП согласно (1), (3) считалось геоэлектрическое поле (см. рис. 4), а по нему – напряжения между узлами заземления и ГИТ (см. рис. 5–7). На рис. 4 хорошо видно, что наклон спектра геоэлектрического поля существенно меньше, чем геомагнитного, т. к. при умножении спектра ГМП на передаточную функцию (см. (1)), она примерно на два порядка уменьшает разницу в значениях спектральной плотности мощности (СПМ) короткопериодных и долгопериодных вариаций. Также заметно, что более сильная реакция  $H$ -компоненты ГМП на данную магнитную бурю приводит к несколько большей СПМ для длиннопериодных вариаций этой компоненты и более высоким значениям СПМ квазивосточной компоненты геоэлектрического поля  $E_D$  на низких частотах.

Экстремальные значения ГИТ в заземлённых нейтралях трансформаторных групп на СШ ГЭС  $I_1$ , и ПС «Новокузнецкая»  $I_2$ , составляющие геоэлектрического поля (восточная  $E_x$  и северная  $E_y$ ) и скорость изменения компонент геомагнитного поля ( $dH/dt$ ,  $dD/dt$ ) в момент их достижения, полученные в результате расчётов, приведены в табл. 4. В последней колонке указан тип возмущений, генерирующих ГИТ (SSC – внезапное начало магнитной бури,  $B$  – бухтообразное возмущение, Рс4, Рс5, Ри2 – пульсации геомагнитного поля). Также в таблице приведено магнитное локальное время (MLT), соответствующее времени экстремума ГИТ, согласно [https://sdnet.thayer.dartmouth.edu/aacgm/aacgm\\_calc.php#AACGM](https://sdnet.thayer.dartmouth.edu/aacgm/aacgm_calc.php#AACGM).

Как видно из табл. 4, максимальное значение ГИТ в нейтрали трансформаторов на СШ ГЭС (16,8 А) и на ПС «Новокузнецкая» (7,9 А) наблюдалось во время экстремальной бури 10–11 мая 2024 г. Более высокие значения ГИТ на СШ ГЭС связаны с её «угловым» расположением: ЛЭП подходят к ней и с запада и с севера. Согласно (1) в широтно-ориентированных линиях ГИТ возникает при вариации  $H$ -компоненты, а в линиях, направленных вдоль меридиана – при вариации  $D$ -составляющей ГМП. Поэтому при любых вариациях поля в линиях, подходящих к СШ ГЭС, возникают



**Рис. 4.** Пример расчёта геоэлектрических полей 10–11 мая 2024 г. Вверху слева – вариации компонент геомагнитного поля, вверху справа – их спектры, внизу слева – вариации компонент расчётного геоэлектрического поля, внизу справа – их спектры.

ГИТ, которые складываются в узле СШ ГЭС. К узлу ПС «Новокузнецкая» подходят три ЛЭП, две из которых имеют преимущественно широтное направление и их токи частично компенсируют друг друга. Нескомпенсированным остаётся ток меридионально ориентированной ЛЭП на Ново-Анжерскую ПС, который возникает преимущественно при изменениях  $D$ -составляющей ГМП.

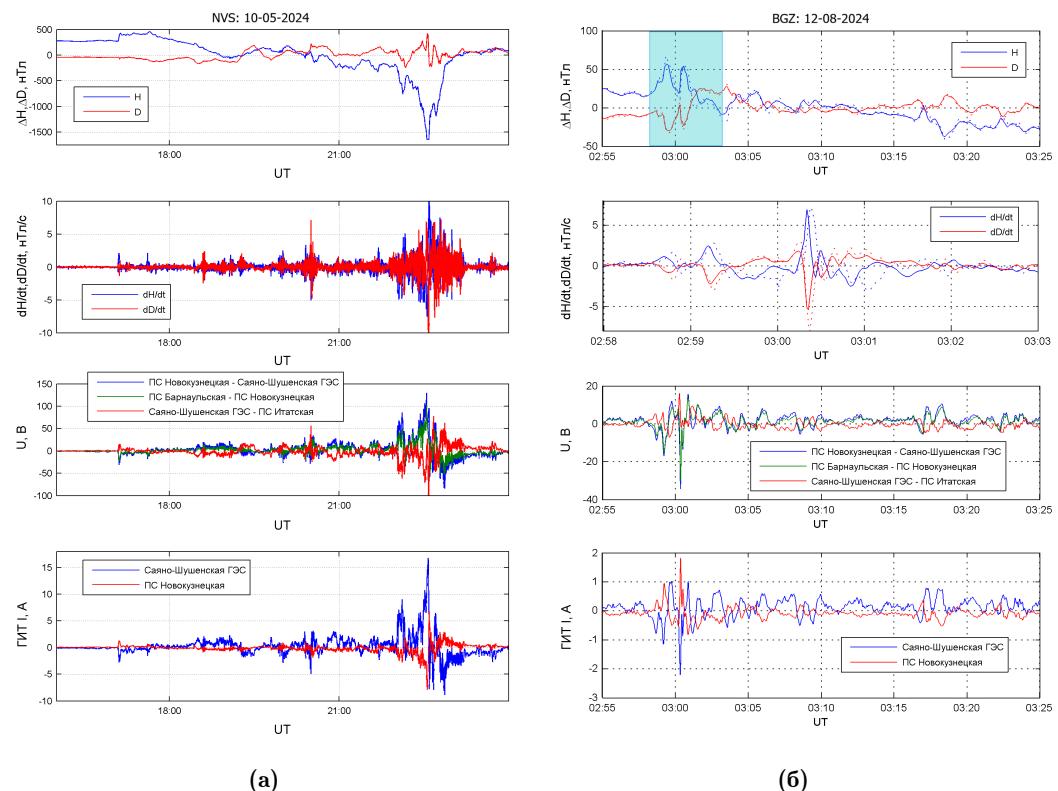
**Таблица 4.** Результаты расчётов ГИТ для очень сильных и экстремальных бурь за 2012–2024 гг.

№	Дата	UT max	MLT max	$dH/dt$ , нТл/с	$dD/dt$ , нТл/с	$E_x$ , мВ/км	$E_y$ , мВ/км	$I_1$ , А	$I_2$ , А	Примечание
1	08.03.2012	11:03:51	16:48	2,83	0,22	92,25	2,24	-2,64	1,14	SSC
2	22.06.2015	18:33:54	00:35	1,75	-0,07	104,9	-10,17	-3,33	1,25	SSC
3	08.09.2017	14:17:56	19:43	0,11	3,41	50,26	-77,91	-3,50	0,33	B, Pi2
		14:16:40	19:42	3,32	-3,64	105,67	50,73	-1,77	1,49	B, Pi2
4	23.03.2023	18:38:20	00:11	0,42	0,09	24,30	-8,39	-0,92	0,27	B, Pi2
		21:17:08	02:51	0,49	-0,02	22,26	19,03	-0,16	0,34	B, Pi2
5	24.04.2023	03:53:28	09:49	-4,93	-0,21	-164,17	3,49	4,89	-2,00	?
		14:37:21	20:14	1,66	1,36	97,75	-33,47	-3,73	1,08	SSC
6	24.03.2024	14:37:11	20:14	2,53	0,49	108,01	-4,66	-3,28	1,31	
7	10.05.2024	22:34:29	04:28	0,03	-9,41	-379,48	218,68	16,79	-3,86	B, Pc4, Pc5
		22:33:31	04:27	-7,14	5,28	-581,17	-207,59	11,58	-7,91	
8	12.08.2024	08:45:29	14:32	-3,73	-2,22	-97,74	37,28	3,83	-1,06	B, Pi2
		03:00:21	08:50	6,47	-5,22	130,41	59,96	-2,25	1,82	Pi2
9	10.10.2024	15:15:58	21:22	3,63	1,10	162,52	-27,87	-5,48	1,89	SSC
		15:15:56	21:22	3,92	0,92	161,80	-18,15	-5,20	1,92	

Величины экстремальных ГИТ на СШ ГЭС, приведённых в [табл. 4](#), близки к диапазону квазистоянных токов (4–10 А), которые с наибольшей вероятностью вызывают ложное срабатывание автоматики у трансформатора близкой к установленным на ГЭС мощности (ТЦ-630000/500) согласно результатам моделирования в [Гусев и др., [2020](#)],

поэтому устойчивость данного узла к ГИТ (да и всей энергосистемы Сибири) требует дополнительного исследования.

На [рис. 5а](#) показан пример расчёта ГИТ для бури 10.05.2024 г. Как видно из графиков, максимальный ток наблюдался во время очень сильного отрицательного бухтообразного возмущения в  $H$ -компоненте (его амплитуда превысила 1500 нТл, что свидетельствует о плотности тока в ионосфере над Южной Сибирью порядка 1 кА/км), согласно данным мирового центра данных в Киото ([https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/ae\\_provisional/202405/index.html](https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/ae_provisional/202405/index.html)),  $AE$ -индекс в интервале от 22:00 до 23:00 UT достигал значения 2023 нТл. При этом, как мы видим из [табл. 4](#), скорость изменения горизонтально-ориентированной компоненты поля достигла 9 нТл/с, а расчётоное геоэлектрическое поле – 617 мВ/км. Значение скорости изменения поля согласуется с распределением  $dB/dt$ , построенным по данным INTERMAGNET для бури 10–12.05.2024 [*De Michelis and Consolini, 2025*]. Заметим, что, согласно этому распределению, на фазе роста индекса  $SYM-H$  большие значения  $dB/dt$  на геомагнитной широте станции наблюдались в секторе от 06 до 12 MLT, – таким образом, потенциально на данной широте могли наблюдаться более высокие значения ГИТ. Заметим, что в Новой Зеландии на подстанции Halfway Bush (Dunedin,  $-52,9^\circ$  геомагнитной широты) во время этой бури было зарегистрировано значение ГИТ 113 А [*Mac Manus et al., 2025*].



**Рис. 5.** Примеры реакции ГИТ на авроральную активность: а) реакция ГИТ на интенсивное бухтообразное возмущение 10.05.2024; б) экстремальное значение ГИТ на подстанции «Новокузнецкая» в результате отклика на пульсации Pi2 12.08.2024. На каждом графике на верхней панели показана динамика компонент геомагнитного поля, ниже – скорости изменения компонент геомагнитного поля, на третьей сверху – расчётных значений разности потенциалов между подстанциями 500 кВ, на нижней – расчётные ГИТ на СШ ГЭС и ПС «Новокузнецкая». На верхних двух панелях на б) пунктиром показаны кривые, полученные в обсерватории «Ключи» в Новосибирске. Цветным прямоугольником показан интервал времени, для которого отображена скорость изменения компонент поля в увеличенном масштабе.

На фоне этого возмущения развивались интенсивные пульсации, которые тоже нашли своё отражение в динамике ГИТ: примерно в течение часа с 22 до 23 UT

наблюдались Pc4 с периодом 110 и 55 с (9 и 18 мГц) амплитудой до 30 нТл и Pc5 с периодом около 300 с и амплитудой до 100 нТл. Как видно из [рис. 7б](#), амплитуда переменного тока, создаваемого ими (он имеет тот же период), могла достигать единиц ампер.

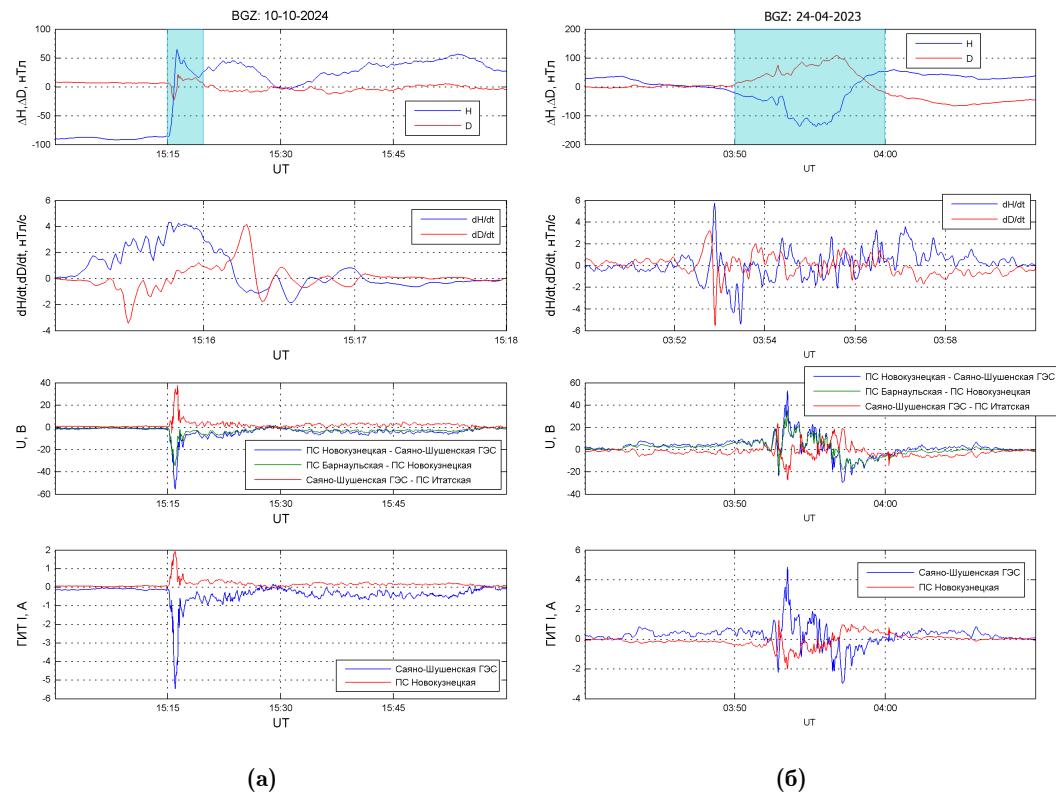
Как видно из [табл. 4](#), бухтообразные возмущения были причиной экстремальных значений ГИТ примерно в половине рассматриваемых событий на СШ ГЭС. Видимо, это связано с тем, что при очень сильных и экстремальных бурях зона полярных сияний смещается к средним широтам, поэтому авроральная активность играет значительную роль в генерации ГИТ. Например, во время бури 10–11 мая 2024 г. даже в такой южной стране, как Мексика, полярные сияния наблюдались по всей её территории, а ГИТ на подстанции Laguna Verde достигал 40 А [*Gonzalez-Esparza et al., 2024*].

Естественно, при влиянии авроральной активности на ГИТ заметную роль играет такой фактор, как местное магнитное время (MLT). Например, во время бури 07–08 сентября 2017 г. максимальные значения ГИТ на Кольском полуострове наблюдались в период от 0 до 04 UT 08.09.2017 (85 А на ПС «Выходной» и около 20 А на ПС «Кондопога») [*Belakhovsky et al., 2019b*]. Расчётные значения ГИТ на СШ ГЭС в это время хоть и были повышенными, но максимума (2 А) они достигли во время второй активизации геомагнитной активности данной бури около 16 UT, когда Сибирь вошла в вечерне-ночной сектор (около 22 MLT). Во время первой активизации Сибирь находилась уже в утреннем секторе, и геомагнитная активность там была не столь сильной. Кольский полуостров, напротив, во время первой активизации находился в ночном секторе, а во время второй – в вечернем, где геомагнитная активность проявлялась слабее.

Как известно, авроральная активность сопровождается сильными пульсациями. Высокоамплитудные вариации ГМП приводят к быстрым изменениям поля, что даёт некоторый вклад в ГИТ. Интересно, что на подстанции «Новокузнецкая» даже отмечен случай, когда экстремальное значение расчётного ГИТ (1,8 А) наблюдалось во время интенсивных цугов пульсаций Pi2 амплитудой до 20 нТл (скорость изменения поля до 8 нТл/с) около 03:00 12.08.2024 – он показан на [рис. 5б](#). На кривых вариаций и их производных пунктиром показаны результаты измерений на магнитной обсерватории «Ключи» в Новосибирске. Видно, что описанные возмущения наблюдались в это время и там, но с несколько большей амплитудой и периодом. При этом бухтообразные возмущения в этот день дали меньший эффект в ГИТ на ПС «Новокузнецкая», хотя с одним из них связан максимум ГИТ на Саяно-Шушенской ГЭС в 08:45 (во время этого события ГИТ на ПС «Новокузнецкая» не превышал 1,4 А). Заметим, что вариации ГИТ сходной амплитуды в результате действия Pi2-пульсаций были отмечены на станции Paradise (47,4° геомагнитной широты) в юго-восточной части США во время бури 23.06.2015 [*Heyns et al., 2021*].

Вторым механизмом генерации экстремальных ГИТ в средних широтах является реакция магнитосферы на резкие изменения параметров солнечного ветра, в частности, внезапное начало бури (SSC). О роли SSC в генерации ГИТ в низких широтах указывалось в работах [*Zhang et al., 2015*], [*Caraballo et al., 2023*]. При SSC обычно наблюдается резкий скачок *H*-компоненты ГМП (со скоростями изменения  $dH/dt$  до 4 нТл/с в исследованных нами случаях), который приводит к генерации восточной составляющей геоэлектрического поля (90–160 мВ/км в [табл. 4](#)). В результате возникает ГИТ в широтно-ориентированных ЛЭП (см., например, SSC 08.03.2012, 22.06.2015) – в рассматриваемом случае это ЛЭП «ПС Новокузнецкая – СШ ГЭС». Если при SSC возбуждается волновая активность, то возникают вариации в обеих горизонтально ориентированных составляющих ГМП и наблюдается ГИТ в меридионально-ориентированных ЛЭП. Примеры подобных явлений наблюдались во время SSC 24.03.2024 г. и 10.10.2024 г. – поэтому мы видим относительно высокие величины  $dD/dt$  во время этих событий. На [рис. 6а](#) показан пример генерации ГИТ около 5 А во время SSC амплитудой около 150 нТл 10.10.2024 г. На ПС «Новокузнецкая» ГИТ во время SSC в среднем в 2,7 раза ниже (и имеет другую полярность), т. к. напряжения на двух широтно-ориентированных

ЛЭП, примыкающих к ней (они показаны зелёной и синей кривой на третьей панели [рис. 6а](#)), частично компенсируют друг друга.



**Рис. 6.** Реакция ГИТ на внезапное начало магнитной бури (SSC) 10.10.2024 (а) и на скачок плотности солнечного ветра во время магнитной бури 24.04.2024 (б). Структура графиков как на [рис. 5](#).

Ещё одним примером ударного воздействия солнечного ветра на магнитосферу является событие 24.04.2023 г., которое выделяется среди всех остальных необычной формой вариаций поля. Оно представляет собой отрицательное бухтообразное возмущение амплитудой более 100 нТл и длительностью всего около 2 минут (см. [рис. 6б](#), верхняя панель). График скорости изменения поля показывает, что прохождение этого возмущения вызвало интенсивные пульсации ГМП с периодом около 7 с. Как видно из [рис. 6б](#) (нижняя панель), максимум ГИТ наблюдался на переднем фронте этой бухты, а затем источником ГИТ были пульсации ГМП. Согласно [Despirak *et al.*, 2024], в это время наблюдалось сходное возмущение в обсерваториях Урала, Сибири, в северной Карелии. Одновременно наблюдались экстремальные значения ГИТ на подстанциях «Коленерго» «Кондопога» (15 А) и «Выходной» (45 А) и интенсивные пульсации на сети магнитометров IMAGE в Финляндии. Сообщается, что это событие вызвано резким усилением плотности плазмы солнечного ветра и скачком межпланетного магнитного поля на фоне интенсивной магнитной бури. Предполагается, что это возмущение было вызвано прохождением корональной петли на фоне магнитного облака, причём это первое наблюдение геоэффективности корональной петли.

По поводу этого же события 24.04.2023 г. в [Liu *et al.*, 2024] сообщается о краткосрочном увеличении плотности солнечного ветра на порядок (в течение 10–20 минут), которое, согласно спутниковым измерениям, вызвало смещение головной ударной волны магнитосферы на 6 радиусов Земли, а магнитопаузы – на 1,3 – 2 радиуса Земли. В результате отклика на это смещение интенсивные ГИТ наблюдались синхронно в 03:53 – 03:55 UT в Новой Зеландии (16 А), США (58 А), Канаде (64 А) и Финляндии (35 А).

В последнее время усилился интерес к генерации ГИТ в результате действия пульсаций, в том числе в средних широтах. Основными источниками для генерации ГИТ считаются пульсации классов Pc5/Pi3. Например, во время экстремальной бури 29–31 октября 2003 г. (Halloween storm) были отмечены вариации ГИТ в результате действия пульсаций класса Pc5 в США [Kappertman, 2005], Южной Африке [Heyns *et al.*, 2021] и на нефтепроводах в Чехии [Hejda and Bochníček, 2005]. Как известно, в это время наблюдался один из самых интенсивных эпизодов генерации глобальных Pc5 пульсаций, их амплитуда в средних широтах достигала 150 нТл, а общая длительность события составила 42 часа [Потапов и др., 2008].

В [Heyns *et al.*, 2021] также рассмотрен эпизод генерации ГИТ в результате действия пульсаций Ps6 во время бури 23.06.2015 г. в среднеширотных электрических сетях на юго-востоке США (станция Paradise). Так как размах вариаций ГИТ составлял от 14 до 28 А в течение двух часов при максимальном значении ГИТ во время SSC, равном 16,46 А, авторы сделали вывод о сравнимом (и даже большем) эффекте воздействия пульсаций на электрическую сеть по сравнению с SSC. Этот же тип пульсаций на фоне суббури связывают с экстремальными значениями  $dB/dt$  в авроральной зоне [Apatenkov *et al.*, 2004]. Хотя источник пульсаций Ps6 является авроральным и связан с омега-структурой полярного сияния, авторы указывают на возможность их распространения в средние широты за счёт повышенной проводимости летней ионосферы [Heyns *et al.*, 2021].

Авторы [Heyns *et al.*, 2021] отмечают интересные особенности в зависимости от типа пульсаций. Так, для гигантских Pc5-пульсаций характерно более сильное проявление в северной компоненте ГМП, поэтому они оказывают большее воздействие на широтно-ориентированные ЛЭП. Ps6 возмущения имеют большую амплитуду в восточной составляющей, поэтому сильнее воздействуют на элементы сети, ориентированные вдоль меридиана.

Однако в работе [Hartinger *et al.*, 2023] на примере экстремальной бури 29–31 октября 2003 г. указывается на заметную роль пульсаций с периодами менее 120 с для широт ниже 60° (их вклад в общую амплитуду ГИТ составлял около 50%). При этом авторы указывают, что вклад короткопериодных колебаний ГМП в ГИТ может быть недооценён, т. к. во многих случаях и данные станций регистрации ГИТ и данные магнитных обсерваторий имеют временное разрешение 1 минута. Поэтому приобрели актуальность работы по изучению пульсаций Pc3–4, развитых в средних широтах. Например, в [Ягова и др., 2024] на основе анализа данных регистрации ГИТ с временным разрешением 10 с в 2017 г. на подстанции «Выходной» на Кольском полуострове отмечено повышение эффективности возбуждения ГИТ пульсациями с увеличением их частоты в диапазоне от 2 до 20 мГц, в частности, для пульсаций Pc4.

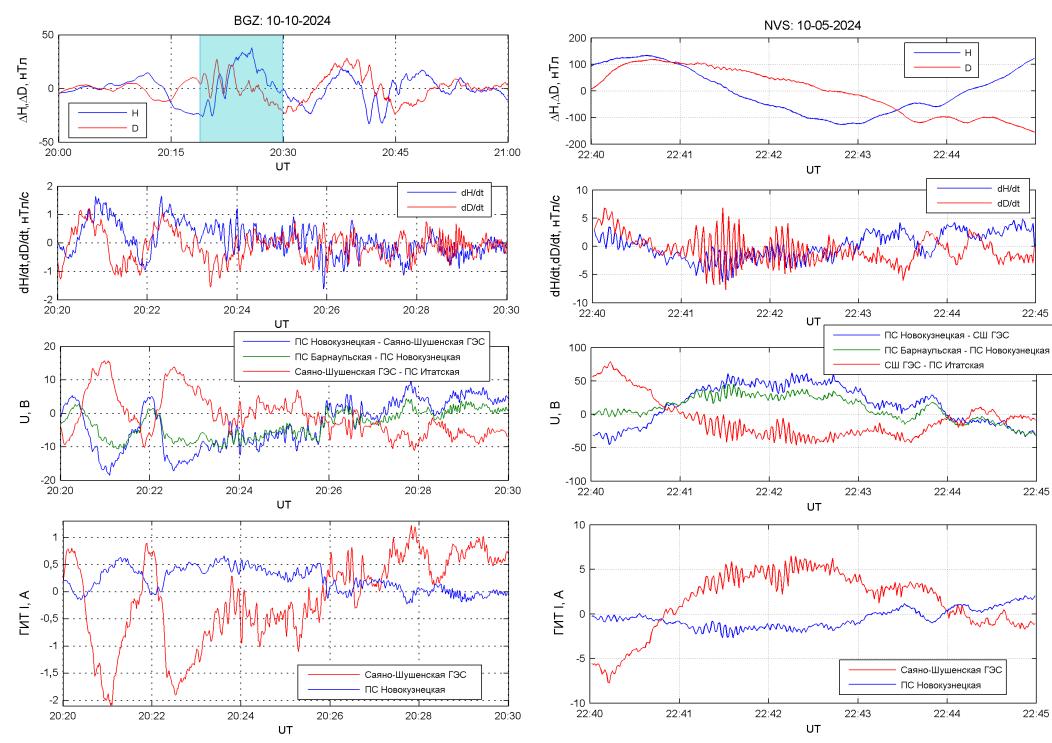
На рис. 7 в качестве иллюстрации возможной заметной роли пульсаций для энергосистемы Сибири представлены два примера, когда амплитуда расчётных ГИТ, создаваемых пульсациями разного типа, была довольно велика. Как видно из рис. 7а, описывающим ГИТ во время очень сильной магнитной бури 10.10.2024 ( $K_p = 8+$  для интервала 18:00–21:00 UT), скорость изменения поля для пульсаций с периодом 110 с достигает 1,5 нТл/с, а размах колебаний ГИТ с таким периодом может достигать 3 А. Также на графике наблюдаются колебания ГИТ с периодом от 10 до 6 с, вызванные пульсациями Pi1 (колебания убывающего периода) с амплитудой до 1 нТл, их размах в данном случае достигал 1 А.

Во время экстремальной бури 10 мая 2024 г. (самая сильная за последние 20 лет) обсерваторией в Новосибирске с 22:40 до 23:15 были зафиксированы интенсивные пульсации с периодом около 3,5 с (класс Pc1) амплитудой до 4 нТл. На рис. 4 хорошо виден спектральный максимум на частоте 0,3 Гц, который им соответствует, – как в спектре магнитных вариаций, так и в спектре геоэлектрического поля. На рис. 6б показана реакция ГИТ на них – как видно из него, скорость изменения поля для этих пульсаций в пике превышала 5 нТл/с, а размах колебаний расчётного тока на СШ ГЭС с таким периодом составил около 2 А. Заметим, что для Pc1 указанное значение

амплитуды является экстремальным, обычно она на порядок-два ниже [Гульельми и Троицкая, 1973].

Также на графике видна часть колебания с размахом 10 А, вызванного пульсацией класса типа Pc5 с периодом около 300 с, которые начались около 22 UT и длились в течение часа. Заметим, что вариации ГИТ сходной амплитуды (около 5 А) наблюдались в результате действия глобальных Pc5 пульсаций во время экстремальной бури 29–31 октября 2003 г. в Южной Африке (Grassridge,  $-42,3^{\circ}$  геомагнитной широты) [Heyns *et al.*, 2021].

Как видно из этих примеров, пульсации всех частотных диапазонов потенциально могут создавать заметные ГИТ во время очень сильных и экстремальных магнитных бурь в исследуемом регионе. И если наблюдения ГИТ для Pc5, Pi3, Pc4 пульсаций уже проводились, то вариации ГИТ в частотном диапазоне Pc1 и Pi1 пульсаций требуют пояснений.



**Рис. 7.** Примеры реакции ГИТ на пульсации Pc4 (период около 110 с) и Pi1 (период 5–10 с) 10.10.2024 (а) и Pc5 (период 310 с) и Pc1 (период 4 с) 10.05.2024. На каждом графике на верхней панели показана динамика компонент геомагнитного поля, ниже – скорости изменения компонент геомагнитного поля, на третьей сверху – расчётных значений разности потенциалов между подстанциями 500 кВ, на нижней – ГИТ на СШ ГЭС и ПС «Новокузнецкая». Цветным прямоугольником на верхней панели показан диапазон времени, для которого на нижних панелях показаны графики в увеличенном временном масштабе.

Для дальнейшего анализа полезно оценить ЭДС, создаваемую переменным магнитным потоком пульсации в ЛЭП длиной  $L = 400$  км, ориентированной поперек горизонтальной составляющей магнитного потока. Согласно закону электромагнитной индукции, создаваемая ею ЭДС может быть оценена по формуле

$$\varepsilon = \frac{dB}{dt} hL,$$

где  $h$  – толщина скин-слоя для переменного магнитного поля,  $\frac{dB}{dt}$  – скорость его изменения. Глубина проникновения переменного магнитного потока в литосферу (толщина скин-слоя) в приближении однородной проводимости определяется формулой

$$h = \sqrt{\rho/(\pi\mu_0 f)}, \quad (4)$$

но в одномерной модели с точностью до множителя может быть оценена как отношение передаточной функции к циклической частоте  $\sqrt{2|K(f)|/\omega}$ . Эти значения для разных типов пульсаций для исследуемого региона приведены в [табл. 5](#). Как видно из неё, с увеличением периода пульсаций толщина скин-слоя растёт. Однако по мере проникновения вглубь литосферы переменный магнитный поток взаимодействует со всё более проводящими породами, в результате разница в эффективной толщине скин-слоя для разных типов пульсаций несколько сглажена за счёт низкого сопротивления нижней коры и верхней мантии и не превышает одного порядка (в случае использования формулы (4) она бы превышала порядок величины). Отметим, что наличие низкоомного корового слоя в регионе связывают с его сейсмичностью.

**Таблица 5.** Оценки ГИТ, вызванных пульсациями

Класс	Период, с	Амплитуда, нТл	Скорость изменения поля $dB/dt$ , нТл/с	Толщина скин-слоя $\sqrt{2 K(f) /\omega}$ , км	ЭДС при длине ЛЭП 400 км, В	Амплитуда переменного ГИТ, А
Pc1	0,2–5	0,01–1	2,4	29	28	1,7
Pc3	10–45	0,4–10	2,3	58	53	3,1
Pc5	150–600	1–150	2,5	133	134	8,0

Также в [табл. 5](#) приведены оценки скорости изменения магнитного поля  $(dB/dt)_{\max} = 2\pi A/T$ , где  $A$  – максимальное значение из приведённых в таблице амплитуд, а  $T$  – средний период пульсаций согласно [Бенъкова и Шевнин, 1984; Потапов и др., 2008]. Видно, что несмотря на различие в амплитудах в два порядка, максимальная скорость изменения поля для разных пульсаций во время экстремальных бурь практически одинакова. В результате, оценки ЭДС, создаваемых Pc5 и Pc1 в регионе, отличаются менее чем на порядок, их различие определяется, в основном, разницей в толщине скин-слоя. Легко видеть, что при сопротивлении цепи около 2 Ом, эти ЭДС могут создавать переменные токи с амплитудами от 2 А (Pc1/Pi1) до 8 А (Pc5/Pi3) на трансформаторную группу (с учётом коэффициента  $R_y/R_n$  из [табл. 3](#)). В наших примерах наблюдались сравнимые амплитуды переменных компонент ГИТ.

Отметим, что в спектре геоэлектрического поля во время экстремальной магнитной бури 10–11 мая 2024 г. на [рис. 4](#) разница СПМ между короткопериодными и длиннопериодными колебаниями поля составляет меньше двух порядков – то есть разница в амплитудах создаваемых ими ЭДС также не превышает одного порядка, как в наших оценках.

Интересно, что ещё авторы известной монографии о пульсациях [Гульельми и Троицкая, 1973] писали, что установка для регистрации теллурических токов является наиболее простым и чувствительным (доли пТл) устройством для регистрации пульсаций ГМП. Видимо, в некотором смысле, это замечание можно отнести и к ГИТ, если увеличить временное разрешение их регистрации по сравнению с 1 минутным, принятым в энергетике.

Тем не менее, приведённые нами примеры надо рассматривать как единичные случаи, которые не претендуют на общность выводов, и описывают лишь несколько конкретных ситуаций на территории Южной Сибири и относиться к ним необходимо с осторожностью. Неясно, является ли близость значений ГИТ для разных типов пульсаций следствием конкретного строения геоэлектрического разреза на изучаемой территории или особенностями соотношения максимальных амплитуд различных

пульсаций во время экстремальных бурь. Ответ на эти вопросы требует отдельного исследования, выходящего далеко за рамки представленной работы.

Кроме того, при оценке воздействия пульсаций на ЛЭП необходимо учитывать их пространственную когерентность, которая неодинакова у разных их типов [Yagova *et al.*, 2021]. Мы в своих расчётах для простоты предполагали колебания поля во всех точках исследуемой территории синфазными. Кроме того, для колебаний с частотами порядка герца может стать заметна реактивная составляющая сопротивления ЛЭП, которой мы пренебрегли для упрощения расчётов. Помимо пространственной когерентности пульсаций важную роль во время экстремальных бурь может играть и конфигурация ионосферных токовых систем [Белаховский *и др.*, 2023].

### Заключение

На основе данных магнитной станции «Байгазан» и магнитной обсерватории «Ключи» (Новосибирск) произведено моделирование ГИТ в линии электропередачи 500 кВ «Саяно-Шушенская ГЭС – подстанция «Новокузнецкая» (и прилегающих к ней линиях) во время очень сильных и экстремальных магнитных бурь (индекс геомагнитной активности  $K_p \geq 8$ ) за период 2012–2024 г. в приближении одномерной модели распределения проводимости земной коры согласно данным атласа [Alekseev *et al.*, 2015]. Показано, что, для Саяно-Шушенской ГЭС ток в нейтрали трансформаторной группы может достигать 17 А, а для ПС «Новокузнецкая» – 8 А. Обнаружена специфика в реакции узлов заземления ЛЭП на вариации ГМП: на СШ ГЭС ГИТ возникают при любых возмущениях, а ПС «Новокузнецкая» более чувствительна к быстрым изменениям восточной компоненты ГМП. Внезапные начала бурь вызывают ГИТ в обоих энергетических центрах (до 5 А в СШ ГЭС, до 1,9 А в ПС «Новокузнецкая»). Отмечен заметный вклад пульсаций различных классов в формирование переменной составляющей ГИТ (до 5 А).

Необходимо дополнительное исследование устойчивости данных энергетических объектов к ГИТ, т. к. расчётные значения ГИТ находятся в диапазоне токов, с наибольшей вероятностью вызывающих ложное срабатывание автоматики у трансформаторов 500 кВ по мощности близких к установленным на СШ ГЭС [Гусев *и др.*, 2020].

**Благодарности.** Работа выполнена за счёт средств гранта РНФ № 23-27-10055 и Министерства науки и образования Республики Алтай. Авторы признательны В. А. Пилипенко, В. Б. Белаховскому, Д. В. Кудину за обсуждение материалов работы и критические замечания, позволившие значительно её улучшить. Мы благодарим младшего научного сотрудника обсерватории «Ключи» А. А. Ковалева и зав. обсерваторией А. Ю. Белинскую за предоставленные секундные данные обсерватории. Мы благодарны научному сотруднику Алтайского заповедника М. Б. Сахневич и сменившему её инспектору И. Н. Светлояру, обеспечивавшим мониторинг геомагнитных вариаций на кордоне Байгазан и дирекции Алтайского заповедника, много лет поддерживающей магнитные измерения в заповеднике. Авторы выражают свою признательность двум анонимным рецензентам, замечания которых позволили существенно улучшить статью.

### Список литературы

- Бакиев А. И., Бетев А. А., Гвоздарев А. Ю. и др. Новая магнитная станция - Байгазан (Горный Алтай, Телецкое озеро) // Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей. – Екатеринбург : УрО РАН, 2011. – С. 29–32. – EDN: [TYTQPL](#).
- Белаховский В. Б., Пилипенко В. А., Сахаров Я. А. и др. Характеристики вариабельности геомагнитного поля для изучения воздействия магнитных бурь и суббурь на электроэнергетические системы // Физика Земли. – 2018. – № 1. – С. 56–68. – <https://doi.org/10.7868/s0002333718010052>.
- Белаховский В. Б., Пилипенко В. А., Сахаров Я. А. и др. 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. – <https://doi.org/10.31857/s0367676522700478>.

- Беляевский В. В. и Гойдина А. Г. Трехмерная геоэлектрическая модель металлогенических зон Кузнецко-Алатауской складчатой области // Физика Земли. — 2012. — № 11/12. — С. 97–117. — EDN: [PFEYCT](#).
- Беляевский В. В. и Лозовский И. Н. Оценка флюидонасыщенности литосферы Алтае-Саянской складчатой области по данным магнитотеллурических зондирований // Геология и геофизика. — 2022. — Т. 63, № 1. — С. 102–116. — <https://doi.org/10.15372/GiG2020182>.
- Бенькова Н. П. и Шевнин А. Д. Геомагнитные поля и их вариации // Электромагнитные поля в биосфере. Т. 1. — М. : Наука, 1984. — С. 40–53.
- Вахнина В. В., Кувшинов А. А., Черненко А. Н. и др. Эмиссия гармоник тока намагничивания блочного трансформатора в цепи статорных обмоток синхронного генератора при геомагнитных возмущениях // Вопросы электротехнологии. — 2024. — № 1. — С. 77–86. — EDN: [NREKNB](#).
- Воробьев А. В., Пилипенко В. А., Сахаров Я. А. и др. Статистические взаимосвязи вариаций геомагнитного поля, аурорального электроджета и геоиндуцированных токов // Солнечно-земная физика. — 2019. — Т. 5, № 1. — С. 48–58. — <https://doi.org/10.12737/szf-51201905>.
- Гульельми А. В. и Троицкая В. А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. — М. : Наука, 1973.
- Гусев Ю. П., Лхамдондог А. Д., Монаков Ю. В. и др. Влияние знакопостоянного тока на баланс потокосцеплений первичных и вторичных обмоток силового трансформатора // Релейная защита и автоматизация. — 2020. — № 2. — С. 20–25. — EDN: [CWOZQJ](#).
- Нечаев С. А. Руководство для стационарных геомагнитных наблюдений. — Иркутск : Изд-во Ин-та географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2006. — EDN: [QKGDNL](#).
- Об утверждении схемы и программы перспективного развития электроэнергетики Республики Хакасия на 2023–2027 годы. — Постановление Правительства Республики Хакасия от 27.04.22 №31-ПП, 2022.
- Пилипенко В. А. Воздействие космической погоды на наземные технологические системы // Солнечно-земная физика. — 2021. — Т. 7, № 3. — С. 72–110. — <https://doi.org/10.12737/szf-73202106>.
- Потапов А. С., Цэгмэд Б. и Поляшкина Т. Н. Вклад глобальных колебаний Рс5 в магнитную возмущенность во время геомагнитных бурь // Солнечно-земная физика. — 2008. — Т. 125, № 12–1. — С. 142–147. — EDN: [KKODTX](#).
- Селиванов В. Н., Аксенович Т. В., Билин В. А. и др. База данных геоиндуцированных токов в магистральной электрической сети «Северный транзит» // Солнечно-земная физика. — 2023. — Т. 9, № 3. — С. 100–110. — <https://doi.org/10.12737/szf-93202311>.
- Соколова О. Н., Сахаров Я. А., Грицутенко С. С. и др. Алгоритм анализа устойчивости энергосистем к геомагнитным бурям // Известия Российской академии наук. Энергетика. — 2019. — № 5. — С. 33–52. — <https://doi.org/10.1134/s0002331019050145>.
- Схема и программа «Развитие электроэнергетики Алтайского края 2022–2026 годы». — Указ Губернатора Алтайского края от 26 апреля 2021 года №64, 2021.
- Схема и программа перспективного развития электроэнергетики Кемеровской области - Кузбасса на 2021–2025 годы. — Утверждена распоряжением Губернатора Кемеровской области - Кузбасса от 30.04.2020 №58-р, 2020.
- Схема и программа перспективного развития электроэнергетики Красноярского края на период 2023–2027 годов. — Приложение к распоряжению Губернатора Красноярского края от 29.04.2022 №246-р, 2022.
- Учайкин Е. О., Кудин Д. В. и Гвоздарев А. Ю. Разработка индукционного магнитометра на основе датчика ИНТ-1 и результаты мониторинга на магнитной станции Байгазан // Взаимодействие полей и излучения с веществом. — Иркутск : ИСЗФ СО РАН, 2015. — С. 267–268. — EDN: [TUAHEN](#).
- Ягова Н. В., Сахаров Я. А., Пилипенко В. А. и др. Длиннопериодные геомагнитные пульсации как элемент воздействия космической погоды на технологические системы // Солнечно-земная физика. — 2024. — Т. 10, № 3. — С. 146–156. — <https://doi.org/10.12737/szf-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, no. 1. — e2021SW002912. — <https://doi.org/10.1029/2021sw002912>.
- Alekseev D., Kuvshinov A. and Palshin N. Compilation of 3D global conductivity model of the Earth for space weather applications // Earth, Planets and Space. — 2015. — Vol. 67, no. 1. — <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0272-5>.
- Apatenkov S. V., Sergeev V. A., Pirjola R., et al. Evaluation of the geometry of ionospheric current systems related to rapid geomagnetic variations // Annales Geophysicae. — 2004. — Vol. 22, no. 1. — P. 63–72. — <https://doi.org/10.5194/angeo-22-63-2004>.
- Belakhovsky V., Pilipenko V., Engebretson M., et al. Impulsive disturbances of the geomagnetic field as a cause of induced currents of electric power lines // Journal of Space Weather and Space Climate. — 2019a. — Vol. 9. — A18. — <https://doi.org/10.1051/swsc/2019015>.

- Belakhovsky V. B., Pilipenko V. A., Sakharov Ya. A., et al. Substorm influence on GIC registered in electric power lines: the magnetic storm of 7-8 September 2017 // Physics of Auroral Phenomena. — 2019b. — Vol. 42, no. 1. — P. 5–12. — <https://doi.org/10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.9-12>.
- Bolduc L. G. GIC observations and studies in the Hydro-Québec power system // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2002. — Vol. 64, no. 16. — P. 1793–1802. — [https://doi.org/10.1016/s1364-6826\(02\)00128-1](https://doi.org/10.1016/s1364-6826(02)00128-1).
- Boteler D. H. and Pirjola R. J. Numerical Calculation of Geoelectric Fields That Affect Critical Infrastructure // International Journal of Geosciences. — 2019. — Vol. 10. — P. 930–949. — <https://doi.org/10.4236/ijg.2019.1010053>.
- Caraballo R., González-Esparza J. A., Pacheco C. R., et al. Improved Model for GIC Calculation in the Mexican Power Grid // Space Weather. — 2023. — Vol. 21, no. 10. — <https://doi.org/10.1029/2022sw003202>.
- Cordell D., Mann I. R., Parry H., et al. Modeling Geomagnetically Induced Currents in the Alberta Power Network: Comparison and Validation Using Hall Probe Measurements During a Magnetic Storm // Space Weather. — 2024. — Vol. 22, no. 4. — e2023SW003813. — <https://doi.org/10.1029/2023sw003813>.
- De Michelis P. and Consolini G. Unveiling the Gannon Storm: How Ground-Based Magnetometers Mapped Its Global Impact // Space Weather. — 2025. — Vol. 23, no. 6. — e2025SW004350. — <https://doi.org/10.1029/2025sw004350>.
- Despirak I., Setsko P., Lubchich A., et al. Geomagnetically induced currents (GICs) during strong geomagnetic activity (storms, substorms, and magnetic pulsations) on 23–24 April 2023 // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2024. — Vol. 261. — P. 106293. — <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2024.106293>.
- 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, no. 4. — e2022SW003166. — <https://doi.org/10.1029/2022SW003166>.
- Gaunt C. T. and Coetzee G. Transformer failures in regions incorrectly considered to have low GIC-risk // 2007 IEEE Lausanne Power Tech. — Lausanne, Switzerland : IEEE, 2007. — P. 807–812. — <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, no. 21. — P. 7406. — <https://doi.org/10.3390/en16217406>.
- Gonzalez-Esparza J. A., Sanchez-Garcia E., Sergeeva M., et al. The Mother's Day Geomagnetic Storm on 10 May 2024: Aurora Observations and Low Latitude Space Weather Effects in Mexico // Space Weather. — 2024. — Vol. 22, no. 11. — e2024SW004111. — <https://doi.org/10.1029/2024sw004111>.
- Gvozdarev A. Yu., Kazantzeva O. V., Uchaikin E. O., et al. Estimation of geomagnetically induced currents in the Altai Republic power system according to the Baygazan magnetic station data // Vestnik KRAUNC. Fiziko-Matematicheskie Nauki. — 2023. — Vol. 45, no. 4. — P. 190–200. — <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2023-45-4-190-200>.
- Hartinger M. D., Shi X., Rodger C. J., et al. Determining ULF Wave Contributions to Geomagnetically Induced Currents: The Important Role of Sampling Rate // Space Weather. — 2023. — Vol. 21, no. 5. — E2022SW003340. — <https://doi.org/10.1029/2022sw003340>.
- Hejda P. and Bochníček J. Geomagnetically induced pipe-to-soil voltages in the Czech oil pipelines during October–November 2003 // Annales Geophysicae. — 2005. — Vol. 23, no. 9. — P. 3089–3093. — <https://doi.org/10.5194/angeo-23-3089-2005>.
- Heyns M. J., Lotz S. I. and Gaunt C. T. Geomagnetic Pulsations Driving Geomagnetically Induced Currents // Space Weather. — 2021. — Vol. 19, no. 2. — e2020SW002557. — <https://doi.org/10.1029/2020sw002557>.
- 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, no. 2. — e2023SW003769. — <https://doi.org/10.1029/2023sw003769>.
- Kappenman J. G. An overview of the impulsive geomagnetic field disturbances and power grid impacts associated with the violent Sun-Earth connection events of 29–31 October 2003 and a comparative evaluation with other contemporary storms // Space Weather. — 2005. — Vol. 3, no. 8. — S08C01. — <https://doi.org/10.1029/2004sw000128>.
- Liu T. Z., Shi X., Hartinger M. D., et al. Global Observations of Geomagnetically Induced Currents Caused by an Extremely Intense Density Pulse During a Coronal Mass Ejection // Space Weather. — 2024. — Vol. 22, no. 10. — e2024SW003993. — <https://doi.org/10.1029/2024sw003993>.
- 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, no. 8. — P. 1020–1038. — <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, no. 6. — e2025SW004388. — <https://doi.org/10.1029/2025sw004388>.

- Marshall R. A., Dalzell M., Waters C. L., et al. Geomagnetically induced currents in the New Zealand power network // *Space Weather*. — 2012. — Vol. 10, no. 8. — S08003. — <https://doi.org/10.1029/2012sw000806>.
- Marshall R. A., Gorniak H., Van Der Walt T., et al. Observations of geomagnetically induced currents in the Australian power network // *Space Weather*. — 2013. — Vol. 11, no. 1. — P. 6–16. — <https://doi.org/10.1029/2012sw000849>.
- Matandirotya E., Cilliers P. J. and 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, no. 3. — P. 185–195. — <https://doi.org/10.1002/2014sw001135>.
- Sivokon V. P. A New Method for Detecting Geomagnetically Induced Currents // *Russian Electrical Engineering*. — 2021. — Vol. 92, no. 11. — P. 685–690. — <https://doi.org/10.3103/s1068371221110146>.
- Švanda M., Smičková A. and Výboštovková T. Modelling of geomagnetically induced currents in the Czech transmission grid // *Earth, Planets and Space*. — 2021. — Vol. 73, no. 1. — P. 229. — <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01555-5>.
- 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, no. 4. — S04004. — <https://doi.org/10.1029/2006sw000282>.
- Uchaikin E. O. and Gvozdarev A. 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 : IEEE, 2023. — P. 450–454. — <https://doi.org/10.1109/apeie59731.2023.10347597>.
- Watari S., Nakamura S. and Ebihara Y. Measurement of geomagnetically induced current (GIC) around Tokyo, Japan // *Earth, Planets and Space*. — 2021. — Vol. 73, no. 1. — P. 102. — <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01422-3>.
- Wik M., Viljanen A., Pirjola R., et al. Calculation of geomagnetically induced currents in the 400 kV power grid in southern Sweden // *Space Weather*. — 2008. — Vol. 6, no. 7. — S07005. — <https://doi.org/10.1029/2007sw000343>.
- Yagova N. V., Pilipenko V. A., Sakharov Ya. A., et al. Spatial scale of geomagnetic Pc5/Pi3 pulsations as a factor of their efficiency in generation of geomagnetically induced currents // *Earth, Planets and Space*. — 2021. — Vol. 73, no. 1. — <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, no. 10. — P. 643–655. — <https://doi.org/10.1002/2015sw001263>.

# THE GEOMAGNETICALLY INDUCED CURRENT EXTREMAL VALUES ESTIMATION BASED ON BAYGAZAN MAGNETICAL STATION DATA

A. Y. Gvozdarev<sup>\*,1</sup>  and E. O. Uchaikin<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, FEB RAS, Paratunka, Kamchatka region, Russia

<sup>2</sup>Gorno-Altaisk State University, Gorno-Altaisk, Russia

**\*\*Correspondence to:** Alexey Gvozdarev, gvozdarev@ikir.ru

Based on the Baygazan magnetic station data, geomagnetically induced currents (GIC) in the 500 kV Sayano-Shushenskaya HPP (SSHPP) – Novokuznetsk substation power line were simulated during very strong and extreme magnetic storms (planetary geomagnetic index activity  $K_p \geq 8$ ) for the period 2012–2024. The 1D Earth's crust conductivity distribution model is used for calculation. It is shown that, the GIC in the transformer neutral can reach 17 A for the SSHPP, and 8 A for the Novokuznetsk substation. The main sources of GIC are rapid high-amplitude bay-like disturbances (up to 17 A) and SSC (up to 5 A). A specificity has been found in the reaction of power line grounding nodes to geomagnetic activity caused by the network topology. A noticeable contribution of various pulsations classes to the GIC generation (up to 5 A) was noted.

Received: November 22, 2024

Accepted: September 11, 2025

Published: December 30, 2025



© 2025. The Authors.

**Citation:** Gvozdarev A. Y., Uchaikin E. O. (2025), The Geomagnetically Induced Current Extremal Values Estimation Based on Baygazan Magnetical Station Data, *Russian Journal of Earth Sciences*, 25, ES6023, <https://doi.org/10.2205/2025ES000985>, EDN: XCYWMW

## References

- Albert D., Schachinger P., Bailey R. L., et al. Analysis of Long-Term GIC Measurements in Transformers in Austria // Space Weather. — 2022. — Vol. 20, no. 1. — e2021SW002912. — <https://doi.org/10.1029/2021sw002912>.
- Alekseev D., Kuvshinov A. and Palshin N. Compilation of 3D global conductivity model of the Earth for space weather applications // Earth, Planets and Space. — 2015. — Vol. 67, no. 1. — <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0272-5>.
- Apatenkov S. V., Sergeev V. A., Pirjola R., et al. Evaluation of the geometry of ionospheric current systems related to rapid geomagnetic variations // Annales Geophysicae. — 2004. — Vol. 22, no. 1. — P. 63–72. — <https://doi.org/10.5194/angeo-22-63-2004>.
- Bakyianov A. I., Betyev A. A., Gvozdarev A. Yu., et al. New Magnetic Station - Baygazan (Gorny Altai, Teletskoye Lake) // Deep Structure, Geodynamics, Thermal Field of the Earth, Interpretation of Geophysical Fields. — Yekaterinburg : UB RAS, 2011. — P. 29–32. — EDN: [TYTQPL](#) ; (in Russian).
- Belakhovsky V., Pilipenko V., Engebretson M., et al. Impulsive disturbances of the geomagnetic field as a cause of induced currents of electric power lines // Journal of Space Weather and Space Climate. — 2019a. — Vol. 9. — A18. — <https://doi.org/10.1051/swsc/2019015>.
- Belakhovsky V. B., Pilipenko V. A., Sakharov Ya. A., et al. Characteristics of the variability of a geomagnetic field for studying the impact of the magnetic storms and substorms on electrical energy systems // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. — 2018. — Vol. 54, no. 1. — P. 52–65. — <https://doi.org/10.1134/s1069351318010032>.
- Belakhovsky V. B., Pilipenko V. A., Sakharov Ya. A., et al. Substorm influence on GIC registered in electric power lines: the magnetic storm of 7-8 September 2017 // Physics of Auroral Phenomena. — 2019b. — Vol. 42, no. 1. — P. 5–12. — <https://doi.org/10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.9-12>.
- Belakhovsky V. B., Pilipenko V. A., Sakharov Ya. A., et al. The Growth of Geomagnetically Induced Currents during CME and CIR Geomagnetic Storms in 2021 // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2023. — Vol. 87, no. 2. — P. 236–242. — <https://doi.org/10.3103/s1062873822700988>.

- Belyavsky V. V. and Goidina A. G. Three-dimensional geoelectrical model of metallogenic zones in the Kuznetsk-Alatau folded area // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. — 2012. — Vol. 48, no. 11/12. — P. 877–897. — <https://doi.org/10.1134/s106935131211002x>.
- Belyavsky V. V. and Lozovsky I. N. Fluid Saturation in the Lithosphere of the Altai-Sayan Folded Region according to Magnetotelluric Data // *Russian Geology and Geophysics*. — 2022. — Vol. 63, no. 1. — P. 85–97. — <https://doi.org/10.2113/rgg20204211>.
- Benkova N. P. and Shevnin A. D. Geomagnetic Fields and Their Variations // *Electromagnetic Fields in the Biosphere*. — Vol. 1. — Moscow : Nauka, 1984. — P. 40–53. — (In Russian).
- Bolduc L. G. GIC observations and studies in the Hydro-Québec power system // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2002. — Vol. 64, no. 16. — P. 1793–1802. — [https://doi.org/10.1016/s1364-6826\(02\)00128-1](https://doi.org/10.1016/s1364-6826(02)00128-1).
- Boteler D. H. and Pirjola R. J. Numerical Calculation of Geoelectric Fields That Affect Critical Infrastructure // *International Journal of Geosciences*. — 2019. — Vol. 10. — P. 930–949. — <https://doi.org/10.4236/ijg.2019.1010053>.
- Caraballo R., González-Esparza J. A., Pacheco C. R., et al. Improved Model for GIC Calculation in the Mexican Power Grid // *Space Weather*. — 2023. — Vol. 21, no. 10. — <https://doi.org/10.1029/2022sw003202>.
- Cordell D., Mann I. R., Parry H., et al. Modeling Geomagnetically Induced Currents in the Alberta Power Network: Comparison and Validation Using Hall Probe Measurements During a Magnetic Storm // *Space Weather*. — 2024. — Vol. 22, no. 4. — e2023SW003813. — <https://doi.org/10.1029/2023sw003813>.
- De Michelis P. and Consolini G. Unveiling the Gannon Storm: How Ground-Based Magnetometers Mapped Its Global Impact // *Space Weather*. — 2025. — Vol. 23, no. 6. — e2025SW004350. — <https://doi.org/10.1029/2025sw004350>.
- Despirak I., Setsko P., Lubchich A., et al. Geomagnetically induced currents (GICs) during strong geomagnetic activity (storms, substorms, and magnetic pulsations) on 23–24 April 2023 // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2024. — Vol. 261. — P. 106293. — <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2024.106293>.
- 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, no. 4. — e2022SW003166. — <https://doi.org/10.1029/2022SW003166>.
- Gaunt C. T. and Coetzee G. Transformer failures in regions incorrectly considered to have low GIC-risk // *2007 IEEE Lausanne Power Tech*. — Lausanne, Switzerland : IEEE, 2007. — P. 807–812. — <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, no. 21. — P. 7406. — <https://doi.org/10.3390/en16217406>.
- Gonzalez-Esparza J. A., Sanchez-Garcia E., Sergeeva M., et al. The Mother's Day Geomagnetic Storm on 10 May 2024: Aurora Observations and Low Latitude Space Weather Effects in Mexico // *Space Weather*. — 2024. — Vol. 22, no. 11. — e2024SW004111. — <https://doi.org/10.1029/2024sw004111>.
- Guglielmi A. V. and Troitskaya V. A. *Geomagnetic Pulsations and Magnetosphere Diagnostics*. — Moscow : Nauka, 1973. — (In Russian).
- Gusev Yu. P., Lkhamdondog A. D., Monakov Yu. V., et al. Sign-constant current influence on flux linkage balance of power transformer's primary and secondary winding // *Relay Protection and Automation*. — 2020. — No. 2. — P. 20–25. — EDN: [CWOZQJ](#) ; (in Russian).
- Gvozdarev A. Yu., Kazantzeva O. V., Uchaikin E. O., et al. Estimation of geomagnetically induced currents in the Altai Republic power system according to the Baygazan magnetic station data // *Vestnik KRAUNC. Physical and Mathematical Sciences*. — 2023. — Vol. 45, no. 4. — P. 190–200. — <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2023-45-4-190-200>.
- Hartinger M. D., Shi X., Rodger C. J., et al. Determining ULF Wave Contributions to Geomagnetically Induced Currents: The Important Role of Sampling Rate // *Space Weather*. — 2023. — Vol. 21, no. 5. — E2022SW003340. — <https://doi.org/10.1029/2022sw003340>.
- Hejda P. and Bochníček J. Geomagnetically induced pipe-to-soil voltages in the Czech oil pipelines during October–November 2003 // *Annales Geophysicae*. — 2005. — Vol. 23, no. 9. — P. 3089–3093. — <https://doi.org/10.5194/angeo-23-3089-2005>.
- Heyns M. J., Lotz S. I. and Gaunt C. T. Geomagnetic Pulsations Driving Geomagnetically Induced Currents // *Space Weather*. — 2021. — Vol. 19, no. 2. — e2020SW002557. — <https://doi.org/10.1029/2020sw002557>.
- 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, no. 2. — e2023SW003769. — <https://doi.org/10.1029/2023sw003769>.

- Kappenman J. G. An overview of the impulsive geomagnetic field disturbances and power grid impacts associated with the violent Sun-Earth connection events of 29-31 October 2003 and a comparative evaluation with other contemporary storms // *Space Weather*. — 2005. — Vol. 3, no. 8. — S08C01. — <https://doi.org/10.1029/2004sw000128>.
- Liu T. Z., Shi X., Hartinger M. D., et al. Global Observations of Geomagnetically Induced Currents Caused by an Extremely Intense Density Pulse During a Coronal Mass Ejection // *Space Weather*. — 2024. — Vol. 22, no. 10. — e2024SW003993. — <https://doi.org/10.1029/2024sw003993>.
- 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, no. 8. — P. 1020–1038. — <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, no. 6. — e2025SW004388. — <https://doi.org/10.1029/2025sw004388>.
- Marshall R. A., Dalzell M., Waters C. L., et al. Geomagnetically induced currents in the New Zealand power network // *Space Weather*. — 2012. — Vol. 10, no. 8. — S08003. — <https://doi.org/10.1029/2012sw000806>.
- Marshall R. A., Gorniak H., Van Der Walt T., et al. Observations of geomagnetically induced currents in the Australian power network // *Space Weather*. — 2013. — Vol. 11, no. 1. — P. 6–16. — <https://doi.org/10.1029/2012sw000849>.
- Matandirotya E., Cilliers P. J. and 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, no. 3. — P. 185–195. — <https://doi.org/10.1002/2014sw001135>.
- Nechaev S. A. Guide for Stationary Geomagnetic Observations. — Irkutsk : V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, 2006. — EDN: [QKGDNL](#) ; (in Russian).
- On Approval of the Scheme and Program for the Prospective Development of the Electric Power Industry of the Republic of Khakassia for 2023-2027. — Decree of the Government of the Republic of Khakassia dated April 27, 2022 No. 31-PP, 2022. — (In Russian).
- Pilipenko V. A. Space weather impact on ground-based technological systems // *Solnechno-Zemnaya Fizika*. — 2021. — Vol. 7, no. 3. — P. 72–110. — <https://doi.org/10.12737/szf-73202106>. — (In Russian).
- Potapov A. S., Tsemmed B. and Polyushkina T. N. Contribution of global Pc5 oscillations to the magnetic disturbance during geomagnetic storms // *Solnechno-Zemnaya Fizika*. — 2008. — Vol. 125, no. 12–1. — P. 142–147. — EDN: [KKODTX](#) ; (in Russian).
- Scheme and Program "Development of the Electric Power Industry of Altai Krai 2022-2026". — Decree of the Governor of Altai Krai dated April 26, 2021 No. 64, 2021. — (In Russian).
- Scheme and Program for the Prospective Development of the Electric Power Industry of Kemerovo Region - Kuzbass for 2021-2025. — Approved by the Order of the Governor of Kemerovo Region - Kuzbass dated April 30, 2020 No. 58-rg, 2020. — (In Russian).
- Scheme and Program for the Prospective Development of the Electric Power Industry of Krasnoyarsk Krai for the Period 2023-2027. — Appendix to the Order of the Governor of Krasnoyarsk Krai dated April 29, 2022 No. 246-rg, 2022. — (In Russian).
- Selivanov V. N., Aksenovich T. V., Bilin V. A., et al. Database of geomagnetically induced currents in the main transmission line "Northern Transit" // *Solnechno-Zemnaya Fizika*. — 2023. — Vol. 9, no. 3. — P. 100–110. — <https://doi.org/10.12737/szf-93202311>. — (In Russian).
- Sivokon V. P. A New Method for Detecting Geomagnetically Induced Currents // *Russian Electrical Engineering*. — 2021. — Vol. 92, no. 11. — P. 685–690. — <https://doi.org/10.3103/s1068371221110146>.
- Sokolova O. N., Sakharov Ya. A., Gritsutenko S. S., et al. Utilization-based energy optimization energy storage // *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*. — 2019. — No. 5. — P. 33–52. — <https://doi.org/10.1134/s0002331019050145>. — (In Russian).
- Švanda M., Smičková A. and Výboštovková T. Modelling of geomagnetically induced currents in the Czech transmission grid // *Earth, Planets and Space*. — 2021. — Vol. 73, no. 1. — P. 229. — <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01555-5>.
- 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, no. 4. — S04004. — <https://doi.org/10.1029/2006sw000282>.
- Uchaikin E. O. and Gvozdarev A. 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 : IEEE, 2023. — P. 450–454. — <https://doi.org/10.1109/apeie59731.2023.10347597>.

- Uchaikin E. O., Kudin D. V. and Gvozdarev A. Yu. Design of induction coil magnetometer based on INT-1 sensor and results of monitoring of magnetical station "Baygazan" // Interaction of Fields and Radiation with Matter. — Irkutsk: Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, 2015. — P. 267–268. — EDN: [TUAHEN](#) ; (in Russian).
- Vakhnina V. V., Kuvshinov A. A., Chernenko A. N., et al. Emission of magnetizing current harmonics of a block transformer in the stator winding circuit of a synchronous generator under geomagnetic disturbances // Voprosy elektrotehnologii. — 2024. — No. 1. — P. 77–86. — EDN: [NREKNB](#) ; (in Russian).
- Vorobev A. V., Pilipenko V. A., Sakharov Ya. A., et al. Statistical relationships between variations of the geomagnetic field, auroral electrojet, and geomagnetically induced currents // Solnechno-Zemnaya Fizika. — 2019. — Vol. 5, no. 1. — P. 48–58. — <https://doi.org/10.12737/szf-51201905>. — (In Russian).
- Watari S., Nakamura S. and Ebihara Y. Measurement of geomagnetically induced current (GIC) around Tokyo, Japan // Earth, Planets and Space. — 2021. — Vol. 73, no. 1. — P. 102. — <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01422-3>.
- Wik M., Viljanen A., Pirjola R., et al. Calculation of geomagnetically induced currents in the 400 kV power grid in southern Sweden // Space Weather. — 2008. — Vol. 6, no. 7. — S07005. — <https://doi.org/10.1029/2007sw000343>.
- Yagova N. V., Pilipenko V. A., Sakharov Ya. A., et al. Spatial scale of geomagnetic Pc5/Pi3 pulsations as a factor of their efficiency in generation of geomagnetically induced currents // Earth, Planets and Space. — 2021. — Vol. 73, no. 1. — <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01407-2>.
- Yagova N. V., Sakharov Ya. A., Pilipenko V. A., et al. Long-period geomagnetic pulsations as an element of the space weather influence on technologocal systems // Solnechno-Zemnaya Fizika. — 2024. — Vol. 10, no. 3. — P. 146–156. — <https://doi.org/10.12737/szf-103202415>. — (In Russian).
- 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, no. 10. — P. 643–655. — <https://doi.org/10.1002/2015sw001263>.