УДК 550.375

ГЕОМАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ Рс5/Рі3 И ГЕОИНДУЦИРОВАННЫЕ ТОКИ

© 2021 г. Я. А. Сахаров¹, Н. В. Ягова^{2, 3, *}, В. А. Пилипенко^{2, 3}

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия ²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия ³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр Российской академии наук, Москва, Россия *E-mail: nyagova@ifz.ru Поступила в редакцию 25.09.2020 г. После доработки 20.10.2020 г. Принята к публикации 27.11.2020 г.

Исследуется влияние геомагнитных пульсаций с частотами порядка первых миллигерц (диапазон Pi3/Pc5) на интенсивность геоиндуцированных токов (ГИТ) в линии электропередач (ЛЭП) "Северный Транзит" на авроральных широтах. Показано, что параметры ГИТ зависят не только от амплитуды геомагнитных пульсаций, но и от их поляризации, частоты и пространственного масштаба. Корреляция крупномасштабных возмущений с ГИТ выше, чем мелкомасштабных. Предложен и апробирован для квазимеридиональной ЛЭП интегральный по частоте параметр, определяющий взаимную зависимость спектральной мощности ГИТ и геомагнитных пульсаций.

DOI: 10.31857/S0367676521030236

введение

Актуальность задачи о геоиндуцированных токах (ГИТ) связана как с авариями во время экстремальных геомагнитных возмущений [1, 2], так и с экономическими потерями при возмущениях, хотя и не приводящим к масштабным отключениям, но увеличивающим нагрузку на энергосистему [3]. Проблема негативного воздействия ГИТ на работу энергетических систем особенно актуальна для России из-за большой протяженности высоковольтных ЛЭП, в том числе расположенных на высоких широтах [4]. Сбои в работе электрооборудования могут быть вызваны преждевременным старением компонентов высоковольтных трансформаторов из-за кумулятивного воздействия даже умеренных по величине ГИТ [5]. Из-за гистерезисных явлений в трансформаторах даже ГИТ порядка первых Ампер могут создать потенциальную угрозу для корректной работы релейных защит [6].

Не существует однозначной связи между амплитудой геомагнитного возмущения и наведенного ГИТ. Это связано с интегральным характером связи между ЭДС, наведенной в "контуре", образуемым ЛЭП, заземлением, и проводящими слоями земной коры, и возмущением геомагнитного поля. Размер такого эффективного конура зависит от частотного и пространственного масштаба геомагнитного возмущения. Даже умеренные возмущения геомагнитного поля могут приводить к генерации интенсивных ГИТ [7]. Более того, растет число публикаций о связанных с ГИТ повреждениях на средних и низких широтах [8], где характерные амплитуды возмущений меньше, чем на высоких широтах.

В исследованиях ГИТ основное внимание уделяется анализу магнитных бурь и суббурь, т.е. апериодических бухтообразных возмущений с резким началом. Отмечались события, когда всплески ГИТ экстремальной амплитуды вызывались Рі3 пульсациями — квазипериодической серией магнитных импульсов [9, 10]. При этом, практически нет исследований ГИТ, вызванных геомагнитными пульсациями Рс5, хотя длительное существование (несколько часов) ГИТ умеренной интенсивности, индуцированных этими пульсациями, может быть более опасным для долговременной эксплуатации сетей, чем кратковременные всплески ГИТ во время начал суббурь и бурь.

Настоящая работая посвящена исследованию ГИТ, зарегистрированных на станции Выходной (VKH), и геомагнитных пульсаций диапазона 1.4–5.6 мГц, по данным ближайших к VKH стан-

Код станции	Географические		Геомагнитные		Мировое время местной
	Широта	Долгота	Широта, Ф	Долгота, Л	магнитной полуночи
KIL	69.02	20.79	66.13	102.80	21:28
KEV	69.76	27.01	66.65	108.35	21:06
SOD	67.37	26.63	64.22	106.52	21:13
VKH	68.83	33.08	65.53	112.73	20:49

Таблица 1. Координаты и некоторые другие параметры станций наблюдения

ций магнитометрической сети IMAGE [11]. Рассмотренный частотный диапазон включает квази-монохроматические пульсации Рс5 (с преобладающими частотами f > 2 мГц) и более широкополосные пульсации Рі3 (с преобладающими частотами f < 2 мГц).

ДАННЫЕ И ОБРАБОТКА

На Кольском полуострове и в Карелии действует уникальная сеть регистрации ГИТ на сети подстанций магистральной ЛЭП 330 кВ [12]. Измерения тока в нейтрали трансформатора возможно в диапазоне от 1 до 120 А [13] с частотой опроса 1 мин.

Для анализа геомагнитных пульсаций используются данные ближайшей к VKH станции KEV магнитометрической сети IMAGE, и станций KIL и SOD, расположенных к западу и к югу от станции KEV. Координаты станций приведены в табл. 1. Исходное временное разрешение станций сети IMAGE составляет 10 с, в настоящей работе они приведены к общему с данными измерений ГИТ одноминутному шагу.

Отбор геомагнитных пульсаций проводился автоматически в технике, описанной в [14], с последующим выборочным визуальным контролем. Для отобранных интервалов геомагнитных и ГИТ пульсаций оценивалась спектральная плотность мощности (Power Spectral Density, PSD) методом Блэкмана-Тьюки [15] в скользящем окне длительностью 64 точки (3840 с) с шагом в 300 с. Для оценки пространственного масштаба пульсаций вычислялся кросс-спектр пульсаций, измеренных на двух станциях и учитывались следующие параметры: спектральная когерентность γ^2 , разность фаз $\Delta \phi$ и отношение спектральных плотно-стей мощности $R = S_{11}/S_{22}$, где S_{11} и S_{22} – автоспектры мощности пульсаций, измеренных в точках 1 и 2. Спектральная когерентность представляет собой нормированный кросс-спектр мощности $\gamma^2 = S_{12}S_{11}^{-1/2}S_{22}^{-1/2}$, где S_{12} – кросс-спектр мощности. Спектральная когерентность γ^2 меняется в пределах от 0 до 1, и близкое к 1 значения γ^2 в широком диапазоне частот означает практически одинаковый спектральный состав и

постоянную для каждой частоты разность фаз на исследуемом временном интервале.

Анализ выполнялся для двух горизонтальных компонент геомагнитного поля B_X и B_Y , ориентированных вдоль географических меридиана и параллели, соответственно. Перевод к геомагнитным координатам не проводился, так как для исследуемых точек угол между географическим и геомагнитным меридианами мал.

Типичные Pc5 пульсации демонстрируют близкие амплитуды в обеих горизонтальных компонентах и высокую когерентность [16], что позволило вводить при изучении ГИТ параметры, оценивающие суммарную амплитуду [17]. В настоящей работе анализируется зависимость от каждой из компонент отдельно, чтобы выявить возможное влияние поляризации пульсаций на генерацию ГИТ.

По рассчитанным спектрам для каждой частоты вычислялись коэффициенты корреляции между временными вариациями логарифмов PSD ГИТ $P_j(f)$ и компонент магнитного поля $P_b(f)$ и коэффициенты линейной регрессии зависимости P_j от P_b . Учет пространственного масштаба выполнялся путем разделения пульсаций на крупнои мелкомасштабные в заданном направлении.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Пример одновременного наблюдения пульсаций в компонентах геомагнитного поля и ГИТ показан на рис. 1. Пульсации со средним размахом колебаний около 20 нТл наблюдаются в обеих горизонтальных компонентах на станции KEV в течение, по крайней мере, трех часов в утреннем секторе местного магнитного времени (MLT). Видимый период колебаний составляет около 4 минут. Аналогичные колебания видны и в показаниях тока со средним размахом около 10 А. Колебания развиваются вне магнитной бури — в течение семи суток до рассматриваемого интервала *D_{st}* индекс не опускался ниже – 25 нТл. Авроральная активность, определенная по АЕ индексу, остается низкой (AE < 100 нТл) до 5 ч мирового времени (UT), т.е., пульсации начинают развиваться без существенных авроральных возмущений.



Рис. 1. Пример Рс5 пульсаций, зарегистрированных одновременно в показаниях тока в нейтрали трансформатора на станции VKH и геомагнитном поле на станции KEV 11 марта 2015 г. (день 70).

Так как магистральная линия ЛЭП ориентирована с севера на юг, то ГИТ должны быть связаны преимущественно с пульсациями В_у компоненты магнитного поля. Этот эффект действительно проявляется статистически при обработке спектров пульсаций, зарегистрированных в течение длительного времени. На рис. 2 показана зависимость от частоты f осредненного по всем Pc5/Pi3 интервалам за 2015 г. линейного коэффициента корреляции С между логарифмами PSD для тока и каждой из компонент магнитного поля. Качественно зависимость C(f) сходна для двух компонент: наблюдается слабый максимум в области низких частот $(f = 1.5 \text{ м}\Gamma \mu)$, минимум на частоте 2.7 м $\Gamma \mu$ и рост на высокочастотном участке спектра с двумя широкими максимумами на частотах 3.3 и 4.8 мГц. При этом, во всем исследуемом диапазоне частот коэффициент корреляции с ГИТ для В_у компоненты выше, чем для B_{χ} .

На рис. 26 показан спектр коэффициента линейной регрессии K между логарифмами PSD ГИТ и горизонтальных компонент магнитного поля $P_j(f) = K(f)P_b(f)$ + const. Полученные значения K = 0.65-0.8 соответствуют росту P_j с увеличением P_b более медленному, чем линейный. Зависимость для B_Y компоненты на всех частотах сильнее, чем для B_X , и поэтому для дальнейшего анализа взаимосвязи Pc5/Pi3 пульсаций и ГИТ будем использовать данные по B_Y компоненте.

ETDE-S OT C B_Y aTAM C 0.80 - /

Роль пространственного масштаба пульсаций

в генерации ГИТ может различаться в зависимо-

сти от угла между направлением ЛЭП и направле-

нием изменения поля пульсаций. Для нормального



Рис. 2. Частотная зависимость коэффициента корреляции (*a*) и коэффициента линейной регрессии (δ) между логарифмами спектральной мощности вариаций ГИТ и горизонтальных компонент магнитного поля, осредненная по всем отобранным Pc5 интервалам за 2015 г.



Рис. 3. Частотная зависимость коэффициента корреляции между логарифмами спектральной мощности вариаций ГИТ и B_Y компоненты магнитного поля, осредненная по всем отобранным Pc5/Pi3 интервалам за 2015 г. для групп пульсаций, выделенным по масштабу вдоль параллели (*a*) и меридиана (*б*). На рисунке результаты для пульсаций большого масштаба обозначаются *L*, малого – *S*, а индексы *EW* и *NS* используются для направлений вдоль параллели и меридиана, соответственно.

к ЛЭП направления, важны отношение амплитуд пульсаций и когерентность. Введем критерий разделения геомагнитных пульсаций на крупно- и мелкомасштабные в широтном направлении (запад-восток). Колебания считаются широтно-крупномасштабными, если (1) спектральная когерентность между расположенными вдоль параллели станциями KEV и KIL больше порогового значения $\gamma^2 > \gamma_b^2$; (2) отношение спектральных мощно-стей *R* близко к единице $|R - 1| < \delta$. Аналогичный критерий можно вести для меридионального направления (север-юг) по данным пары станций KEV-SOD. Кроме того, для направления вдоль ЛЭП необходимо учитывать разность фаз, так как она определяет временной интервал, на котором связанное с пульсациями изменение магнитного потока имеет одинаковый знак на участке контура. Поэтому к условиям 1 и 2 добавляется условие малой разности фаз $|\Delta \phi| < \phi_b$.

Результаты корреляционного анализа вариаций PSD ГИТ и геомагнитных пульсаций, рассчитанных для всех отобранных Pc5/Pi3 интервалов, показаны на рис. 3. Для разграничения пульсаций на крупно- и мелкомасштабные использованы следующих пороговые значения: $\gamma_b^2 = 0.7$, $\delta = 0.33$, $\phi_b =$ $= 30^{\circ}$. В области Різ частот ($f < 2 \,\mathrm{MFu}$) коэффициенты корреляции ~0.75 практически не зависят от масштаба пульсаций в направлении восток-запад и север-юг. В высокочастотной области спектра (f > 2 мГц для широтно-крупномасштабных и f >> 3 мГц для меридионально-крупномасштабных пульсаций) корреляция между PSD ГИТ и крупномасштабных геомагнитных пульсаций растет с частотой и ее максимальное значение достигает 0.85.

Хотя в интегральных по частоте параметрах связи между ГИТ и геомагнитными пульсациями теряются детали частотных зависимостей, подобных показанным на рис. 2 и 3, для приложений, связанных с прогнозом интенсивности ГИТ, интегральные по частоте параметры удобнее из-за простоты использования. В общем случае слоисто-неоднородной среды связь между амплитудами ГИТ и геомагнитного возмущения определяется импедансом земной поверхности [17]. На практике детальная информация о распределении проводимости часто недоступна и используются упрощенные модели, приводящие к простым аналитическим выражениям. Рассмотрим. как повлияет на выбор интегрального по частоте критерия наличие в спектре пульсаций выделенной частоты f и возможные варианты распределения проводимости с глубиной:

1) "электротехническая" модель, когда размер контура не зависит от частоты и $J \sim dB/dt$ ($J \sim fB$, где J и B компоненты спектра Фурье) может реализоваться при наличии узкого проводящего слоя на конечной глубине;

2) при постоянной по глубине проводимости земной коры возникает зависимость от вида частоты $J \sim f^{1/2}B$ [18];

3) при исследовании отдельных квазимонохроматических пульсаций можно использовать зависимость вида $J \sim B$.

Для выбора интегрального по частоте параметра связи между спектральной мощностью ГИТ и геомагнитных пульсаций все отобранные за год Pc5/Pi3 интервалы были разбиты на подпоследовательности равной длины и проанализировано распределение по частичным коэффициентам корреляции для каждой из моделей. Результаты для длины подпоследовательности N = 240 представлены на рис. 4 в виде кумулятивной функции вероятности, т.е., вероятности $P(C_1) = P(C > C_1)$. Существенная разница в области высоких коэффициентов корреляции С > 0.6 наблюдается между моделями 1/2 и 3, при этом различие между моделями 1 и 2 пренебрежимо мало. Таким образом, для описания связи между амплитудами пульсаций геомагнитного поля диапазона Pc5/Pi3 (1.4-5.6 мГц) и ГИТ, индуцированных в квази-меридиональной ЛЭП на Кольском полуострове, можно использовать зависимость вида $J = cW_{BY}$ где $c = \text{const}, W_{BY} = f^{\alpha} B_{Y}$. Параметр W_{BY} описывает интегральную по всему исследуемому диапазону связь между амплитудой пульсаций ГИТ и В_у компоненты магнтитного поля, а показатель степени α определяется в основном пространственным распределением проводимости и для исследуемого региона лежит в диапазоне от 0.5 до 1.



Рис. 4. Кумулятивная функция вероятности для частичных (N = 240) коэффициентов корреляции между интегральными по полосе 1.4–5.6 мГц логарифмами спектральной мощности вариаций ГИТ и B_Y компоненты магнитного поля, осредненная по всем отобранным Pc5/Pi3 интервалам за 2015 г. для весовых функций, соответствующих разным моделям проводимости.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Проанализированные интервалы Pc5/Pi3 пульсаций, зарегистрированных одновременно в геомагнитном поле и ГИТ, показали, что для ЛЭП, вытянутой в меридиональном направлении, связь спектральной мощности геомагнитных пульсаций и ГИТ проявляется сильнее для широтной (B_{γ}), чем для меридиональной (B_{χ}) компоненты геомагнитного поля. Это выражается как в более высоком коэффициенте корреляции, так и в большем коэффициенте линейной регрессии.

На коэффициент корреляции пульсаций в высокочастотной части спектра влияет пространственный масштаб пульсаций как в меридиональном, так и в широтном направлении. В низкочастотной ($f < 2 \text{ м} \Gamma \mu$) части исследованного диапазона коэффициенты корреляции слабо зависят от масштаба пульсаций, в то время как в высокочастотной области спектра (f > 2 мГц для широтно-крупномасштабных и f > 3 мГц для меридионально-крупномасштабных пульсаций) корреляция между амплитудой ГИТ и крупномасштабных геомагнитных пульсаций растет с частотой и превышает корреляцию амплитуд ГИТ и мелкомасштабных геомагнитных пульсаций. Таким образом, для Рс5 диапазона связь между геомагнитными пульсациями и ГИТ выражена сильнее для крупномасштабных пульсаций, чем для мелкомасштабных.

Многими авторами (например, [19]) предполагалось, что интенсивность ГИТ пропорциональна производной по времени от вариаций геомагнитного поля dB/dt. Такое приближение мо-

жет выполняться только для специального вида распределения проводимости с глубиной, а в общем случае частотная зависимость между амплитудами ГИТ и вариаций магнитного поля требует численного исследования. Во многих случаях зависимость между амплитудами ГИТ J(f) и геомагнитных пульсаций B(f) на заданной частоте f может быть аппроксимирована степенной зависимостью $J(f) \sim f^{\alpha} B(f)$.

Для частот порядка миллиГерц и типичных значений проводимости земной коры ГИТ проникают на глубины порядка скин-длины. На поверхности Земли выполняется импедансное соотношение $\vec{E}(f) = Z(f)\vec{H}(f)$ между амплитудами векторов горизонтальных электрических $\vec{E} = \{E_X, E_Y\}$ и магнитных $\vec{B} = \{B_X, B_Y\}$ составляющих (приближение плоской волны), где Z(f) – импеданс земной коры, определяемый распределением удельного сопротивления $\rho(z)$ с глубиной. Синтез теллурического поля E(t) можно избежать, вводя прокси-теллурическое поле $E_p(t) = |F^{-1}\{Z(f)B(f)\}|$, где F^{-1} обозначает обратное преобразование Фурье [20], и предполагая проводимость земной коры однородной $Z(f) \sim f^{4/2}$ [21].

Проведенный нами анализ частичных коэффициентов корреляции между спектральной плотностью мощности колебаний Вукомпоненты геомагнитного поля и ГИТ, индуцированных в квази-меридиональной ЛЭП на Кольском полуострове для степенного вида зависимости $J \sim f^{\alpha} B_{\gamma}$ выявил максимальную корреляцию при 0.5 < α < 1. Значения $\alpha = 0.5$ соответствуют среде с постоянной проводимостью, а $\alpha = 1 -$ постоянной эффективной высоте контура, образуемым ЛЭП и токами растекания. Слабая зависимость коэффициента корреляции от параметра α в указанном диапазоне позволяет ограничиться для оценок одной их этих простых моделей. Разница между коэффициентами корреляции, связанная с деталями распределения проводимости с глубиной, для исследуемых пульсаций оказалась меньше, чем различие между крупно- и мелкомасштабными пульсациями.

Работа выполнена при поддержке РНФ № 16-17-00121. Авторы выражают признательность институтам, поддерживающим работу сети IMAGE.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Boteler D.H., Pirjola R.J., Nevanlinna H. // Adv. Space. Res. 1998. V. 22. P. 17.
- Pulkkinen A., Pirjola R., Viljanen A. // Space Weather. 2008. V. 6. Art. No. S07001.
- 3. *Forbes K.F., St. Cyr O.C.* // Space Weather. 2004. V. 2. Art. No. S10003.
- 4. *Селиванов В.Н., Сахаров Я.А., Ефимов Б.В. //* Труды КНЦ. Сер. энерг. 2016. № 5. С. 96.

- 5. Molinski T.S. // J. Atm. Terr. Phys. 2002. V. 64. P. 1765.
- 6. *Гусев Ю.П., Лхамдондог А., Монаков Ю.В., Ягова Н.В.* // Электр. 2019. № 9. С. 16.
- Dimmock A.P., Rosenqvist L., Hall J.-O. et al. // Space Weather. 2016. V. 17. P. 989.
- Marshall R.A., Kelly A., Van Der Walt T. et al. // Space Weather. 2017. V. 15. P. 895.
- Belakhovsky V., Pilipenko V., Engebretson M. et al. // J. Space Weath. Space Clim. 2019. V. 9. Art. No. 18.
- Apatenkov S.V., Pilipenko V.A., Gordeev E.I. et al. // Geophys. Res. Lett. 2020. V. 47. Art. No. e2019GL086677.
- 11. *Tanskanen E.I.* // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. Art. No. A05204.
- Сахаров Я.А., Катькалов Ю.В., Селиванов В.Н., Вильянен А. // В сб. Практические аспекты гелиогеофизики. Мат. спец. секции "Практические аспекты науки космической погоды" 11-ой конф. "Физика плазмы в солнечной системе". (Москва, 2016). С. 134.
- Баранник М.Б., Данилин А.Н., Катькалов Ю.В. и др. // ПТЭ. 2012. № 1. С. 118; Barannik M.B., Danilin A.N., Kolobov V.V. et al. // Instr. Exper. Tech. 2012. V. 55. No. 1. P. 110.

- Yagova N., Heilig B., Fedorov E. // Ann. Geophys. 2015.
 V. 33. P. 117.
- 15. *Kay S.M.* Modern spectral estimation: theory and application. New Jersey: Prentice Hall, 1988. 543 p.
- Baker G., Donovan E.F., Jackel B.J. // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. P. 1384.
- 17. *Бердичевский М.Н.* // Прикл. геофиз. 1960. № 28. С. 70.
- 18. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. 624 с.
- Белаховский В.Б., Пилипенко В.А., Сахаров Я.А., Селиванов В.Н. // Физ. Земли. 2018. № 1. С. 56; Belakhovsky V.B., Sakharov Y.A., Pilipenko V.A., Selivanov V.N. // Izv. Phys. Sol. Earth. 2018. V. 54. No. 1. C. 52.
- Kozyreva O., Pilipenko V., Sokolova E. et al. Geomagnetic and telluric field variability as a driver of geomagnetically induced currents: "Problems of Geocosmos–2018". Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer Nature Switzerland AG, 2020.
- 21. Love J.J., Coisson P., Pulkkinen A. // Geophys. Res. Lett. 2016. V. 43. P. 4126.

Pc5/Pi3 geomagnetic pulsations and geomagnetically induced currents

Ya. A. Sakharov^a, N. V. Yagova^{b, c, *}, V. A. Pilipenko^{b, c}

^aPolar Geophysical Institute, Apaity, 184209 Russia ^bSchmidt Institute of Physics of the Earth, Moscow, 123995 Russia ^cThe Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119296 Russia *e-mail: nyagova@ifz.ru

Influence of several milliHertz (Pc5/Pi3) geomagnetic pulsations on geomagnetically induced currents (GIC) in the electric power line "Northern Transit" at auroral latitudes is studied. The dependence on only on pulsations' amplitude, but also on polarization, frequency and spatial scale is found. The correlation with GICs is higher for long-scale than for short-scale pulsations. An integral over frequency criterium for GIC-pulsation spectral power interrelation is suggested and verified for quasi-meridional electric power lines.