

ДЛИННОПЕРИОДНЫЕ ГЕОМАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ КАК ЭЛЕМЕНТ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

LONG-PERIOD GEOMAGNETIC PULSATIONS AS AN ELEMENT OF THE SPACE WEATHER INFLUENCE ON TECHNOLOGICAL SYSTEMS

Н.В. Ягова 

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Москва, Россия, nyagova@ifz.ru
Геофизический центр РАН,
Москва, Россия

Я.А. Сахаров

Геофизический центр РАН,
Москва, Россия, sakharov@pgia.ru
Полярный геофизический институт,
Апатиты, Россия

В.А. Пилипенко 

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Москва, Россия, pilipenko_va@mail.ru
Геофизический центр РАН,
Москва, Россия

В.Н. Селиванов

Центр физико-технических проблем энергетики Севера
КНЦ РАН,
Апатиты, Россия, v.selivanov@ksc.ru

N.V. Yagova

Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,
Moscow, Russia, nyagova@ifz.ru
Geophysical Center RAS,
Moscow, Russia

Ya.A. Sakharov

Geophysical Center RAS,
Moscow, Russia, sakharov@pgia.ru
Polar Geophysical Institute,
Apatity, Russia

V.A. Pilipenko

Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,
Moscow, Russia, pilipenko_va@mail.ru
Geophysical Center RAS,
Moscow, Russia

V.N. Selivanov

Northern Energetics Research Center,
Apatity, Russia, v.selivanov@ksc.ru

Аннотация. Исследуются вариации геоиндуцированных токов (ГИТ) и широтной B_y -компоненты геомагнитного поля в диапазоне от 1 до 20 мГц. Для анализа использованы данные наблюдений ГИТ на Кольском полуострове и геомагнитного поля на станциях сети IMAGE за 2017 г. с шагом 10 с. Это позволило включить в исследование пульсации частотных диапазонов Pc5/Pi3 и Pc4/Pi2 и рассмотреть полигармонические пульсации со спектральными максимумами, попадающими в оба диапазона. Показано, что ГИТ эффективно возбуждаются на частотах выше 5 мГц. Полигармонические пульсации потенциально более опасны, чем моногармонические, поскольку для них больше отношение амплитуд пульсаций тока и магнитного поля и время существования однопольного ГИТ.

Ключевые слова: космическая погода, геомагнитные пульсации, геоиндуцированные токи.

Abstract. We analyze variations in geomagnetically induced currents (GIC) and pulsations of the geomagnetic field latitudinal B_y component in the frequency range 1–20 mHz. The analysis is based on the data from GIC registration at the Kola Peninsula and magnetic data from IMAGE network stations, obtained with 10 s sampling in 2017. This allows us to include pulsations of both Pc5/Pi3 and Pc4/Pi2 frequency range in the analysis and examine polyharmonic pulsations with spectral maxima in both ranges. It is shown that GICs are effectively generated at frequencies above 5 mHz. Polyharmonic pulsations are potentially more dangerous than monoharmonic ones because the ratio of GIC to magnetic field pulsations' amplitude is higher and the lifetime of unipolar GIC is longer.

Keywords: space weather, geomagnetic pulsations, geomagnetically induced currents.

ВВЕДЕНИЕ

Наведение геоиндуцированных токов (ГИТ) в протяженных проводниках является наиболее опасным и принципиально неустрашимым наземным эффектом возмущений космической погоды. Среди последствий ГИТ самыми масштабными являются каскадные отключения электрооборудования. Их экономические и гуманитарные последствия могут быть сравнимы с наиболее разрушительными природными

катастрофами [Pulkkinen et al., 2008; Love et al., 2022].

Как во время магнитных бурь, так и в магнитно-спокойные периоды эффективным источником ГИТ являются геомагнитные пульсации. Рекордные амплитуды ГИТ связаны с длиннопериодными пульсациями Pc5/Pi3 [Apatenkov et al., 2004; Wik et al., 2008; Heyns et al., 2021]. В работах [Yagova et al., 2021; Sakharov et al., 2022] для оценки эффективности возбуждения ГИТ пульсациями (далее — ГИТ-эффективность)

используется отношение R_{IB} амплитуды вариаций ГИТ к амплитуде геомагнитных пульсаций. Значение R_{IB} даже в одной точке существенно зависит от спектрального состава пульсаций: ГИТ-эффективность оказывается выше для пульсаций с несколькими спектральными максимумами [Sakharov et al., 2022].

В работе [Yagova et al., 2021] на основе анализа данных измерений пульсаций ГИТ и геомагнитных пульсаций в диапазоне 1–5 мГц было установлено, что более высокие значения R_{IB} наблюдаются для пульсаций, у которых поле волны слабо меняется на пространственных масштабах порядка длины проводника (далее — крупномасштабные пульсации). Для связанных с ГИТ приложений пространственное распределение поля геомагнитных пульсаций в направлениях, параллельном и нормальном к наземному проводнику, различаются по характеру влияния и по параметрам, которые следует учитывать. Влияние пространственного масштаба в нормальном к проводнику направлении имеет «технический» характер и связано с конечным расстоянием между магнитометром и точкой измерения ГИТ. Для пульсаций с высокой спектральной когерентностью и близким к единице отношением амплитуд вдоль этого направления ошибка интерполяции или экстраполяции данных будет мала. В противном случае могут возникать как ошибки типа «ложной тревоги», если амплитуда пульсаций вблизи проводника меньше, чем в точке измерения, так и «пропуска цели», если амплитуда пульсаций вблизи проводника выше амплитуды в точке измерения. Для направления вдоль проводника существенным становится также распределение фазы геомагнитных пульсаций, поскольку в случае малой разности фаз ЭДС индукции суммируется по всей длине проводника.

Для количественной оценки ГИТ требуется учет временных и пространственных характеристик геомагнитного возмущения [Pulkkinen et al., 2006], распределения проводимости Земли и параметров электрических сетей [Boteler, Pirjola, 2017], следовательно, необходима модель проводимости земной коры, основанная на измерениях геомагнитного и электротеллурического полей с высоким пространственным разрешением [Cherevatova et al., 2015; Hartinger et al., 2020]. В реалистичных моделях проводимости для расчета электротеллурического поля и ГИТ используется численное моделирование [Bedrosian, Love, 2015; Juusola et al., 2020]. Однако даже для районов, где распределение проводимости известно с высоким пространственным разрешением, наблюдаются существенные различия между измеренными и расчетными значениями ГИТ [Nakamura et al., 2018]. Для некоторых регионов и диапазонов частот упрощенные модели среды дают приближенные оценки, мало отличающиеся от результатов расчетов в моделях с квазиреальным распределением проводимости [Gannon et al., 2017].

В задаче о влиянии поляризации пульсаций на возбуждение ГИТ можно выделить два предельных случая. Для горизонтально-однородной проводимости Земли доминирует вклад перпендикулярной ЛЭП компоненты магнитного поля, а в противоположном предельном случае, когда масштаб горизон-

тальной неоднородности порядка или меньше длины ЛЭП, обе компоненты дают вклад одного порядка. Анализ одновременно измеренных вариаций ГИТ и геомагнитных пульсаций в авроральной зоне, выполненный в работе [Сахаров и др., 2021], показал, что для квазимеридиональной ЛЭП вклад в возбуждение ГИТ дают обе компоненты, но корреляция между геомагнитными пульсациями и вариациями ГИТ выше для широтной B_y -компоненты.

Связанные с ГИТ сбои в работе энергосистем наблюдались не только на авроральных широтах, где преобладают пульсации Pc5/Pi3, но и на субавроральных, и даже на средних [Marshall et al., 2012; Lotz, Danskin, 2017; Zhang, Ebihara, 2022]. Это ставит вопрос о ГИТ, возбуждаемых типичными для этих регионов пульсациями Pc3-4. Кроме того, в диапазон Pc4 попадают иррегулярные пульсации Pi2 и высшие гармоники более низкочастотных пульсаций [Fukunishi, Lanzerotti, 1974]. В этом случае возмущения с частотами выше частоты Найквиста могут исказить результаты анализа взаимосвязи ГИТ и пульсаций при шаге оцифровки 60 с [Trichtchenko, 2021; Hartinger et al., 2023].

Эффективность возбуждения ГИТ пульсациями существенно зависит от пространственного распределения поля волны, которое различается для разных типов пульсаций. Пространственная структура пульсаций Pi2 исследована от авроральных до низких широт [Yumoto et al., 1994; Nosé et al., 2006; Wang et al., 2017]. По характеру пространственного распределения амплитуды и фазы можно выделить несколько классов пульсаций Pc4. Для резонансных пульсаций пространственный масштаб вдоль меридиана определяется добротностью магнитосферно-ионосферного альфвеновского резонатора [Baransky et al., 1995]. В этом случае на Земле основная мощность сосредоточена в меридиональной компоненте магнитного поля B_x , а в широтной компоненте B_y особенность вблизи резонансной оболочки выражена слабее [Лифшиц, Федоров, 1986]. К отдельному классу относятся высокодобротные пульсации P_g, проявляющиеся в основном в широтной компоненте магнитного поля и локализованные в узкой широтной зоне [Motoba et al., 2015]. Пространственное распределение амплитуды и фазы дневных пульсаций Pc3-4, когерентных на нескольких станциях сети IMAGE, было исследовано Howard и Menk [2005]. Авторы выделили несколько типов вариаций амплитуды и фазы, как соответствующих структуре альфвеновского резонанса, так и отличающихся от нее. Вместе с тем параметры пространственного распределения пульсаций диапазона Pc4/Pi2, включая нерегулярные «шумы» и высшие гармоники доминирующих на авроральных широтах Pc5, не изучены с точностью, достаточной для связанных с ГИТ задач.

Опасность ГИТ для электрооборудования связана не только с экстремальными ГИТ в сотни ампер, способными вызвать прямые повреждения [Pulkkinen et al., 2005; Boteler, 2019], но и с искажением гармонического состава тока промышленной частоты, приводящим к некорректной работе релейных защит [Гусев и др., 2020а, б]. Расчет воздействия квазипостоянного тока на трансформатор с учетом частных

петель гистерезиса показал, что наиболее опасной является область амплитуд ГИТ, когда зависимость намагниченности от тока уже нелинейна, но насыщение еще не достигнуто. Поскольку настройка релейных защит осуществляется по отношению амплитуд гармоник тока промышленной частоты, вероятность некорректного срабатывания оказывается выше для уровня постоянного тока, при котором это отношение максимально. Для рассмотренной в работе [Гусев и др., 20206] модели силового трансформатора на линии 500 кВ область наиболее опасных ГИТ приходится на 4–10 А. Такой уровень ГИТ типичен для пульсаций диапазона Pc5/Pi3, возникающих на авроральных широтах при умеренной геомагнитной возмущенности. Поскольку условием некорректного срабатывания релейной защиты является совпадение во времени переходного процесса (как при штатной работе, так и после короткого замыкания) с достаточным уровнем намагниченности сердечника постоянным током, то, помимо амплитуды ГИТ, становится важным время существования однополярного тока I_{asym} . Каждому значению времени усреднения T_1 соответствует некоторый уровень I_{asym} . Для квазимонохроматической пульсации значения I_{asym} порядка амплитуды вариаций ГИТ наблюдаются при $T_1 < T/2$, где T — период пульсации. Для ГИТ, вызываемых геомагнитными пульсациями с несколькими максимумами в спектре, значение T_1 может быть значительно больше, но этот параметр до сих пор не изучался экспериментально.

В настоящей работе исследуются ГИТ, связанные с геомагнитными пульсациями в полосе частот от 1.5 до 20 мГц, включая диапазоны Pc5/Pi3 и Pc4/Pi2. Для пульсаций диапазона Pc4/Pi2 рассматривается связь отношения R_{IB}^2 с параметрами пространственного распределения поля пульсаций, влияние которых было подтверждено ранее для Pc5/Pi3. Кроме того, для всего исследуемого диапазона рассматривается влияние спектрального состава пульсаций на значение R_{IB}^2 и время существования однополярного тока.

1. ДАННЫЕ И ОБРАБОТКА

Для анализа были выбраны данные за 2017 г., поскольку для этого периода доступны измерения ГИТ на ст. «Выходной» (VKH) с временным разрешением 10 с. Станция является частью системы измерений ГИТ на квазимеридиональной ЛЭП «Северный Транзит», расположенной на северо-западе РФ [Баранник и др., 2012]. Анализ геомагнитных пульсаций проводился по данным трех станций магнитометрической сети IMAGE [Tanskanen, 2009]. Взаимное расположение ЛЭП, пункта измерения ГИТ и магнитометров схематически показано на рис. 1. Координаты станций и время местной магнитной полуночи даны в табл. 1. Так же, как и в работе [Yagova et al., 2021], анализ пространственного распределения поля волны выполнялся по парам станций KEV-KIL и KEV-SOD, расположенных соответственно вдоль магнитных параллели и меридиана. Анализируются геомагнитные пульсации и вызванные ими вариации ГИТ с размахом колебаний более 10 А. Для оценки

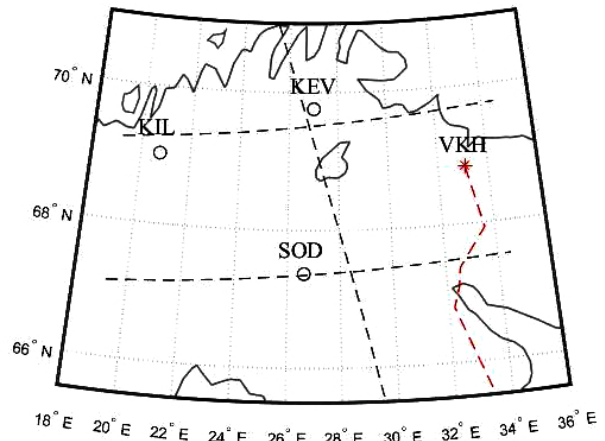


Рис. 1. Схема расположения ЛЭП (красные штрихи), пункта измерения ГИТ (VKH) и трех станций сети IMAGE; черными штрихами показаны геомагнитные координаты (рисунок заимствован из работы [Yagova et al., 2021])

спектральной плотности мощности (Power Spectral Density, PSD), спектральной когерентности γ^2 и разности фаз $\Delta\phi$ используется метод Блэкмана—Тьюки [Дженкинс, Ваттс, 1972] для интервала длительностью 512 точек (~85 мин) с шагом 10 мин. Метод и значения параметров были выбраны так, чтобы обеспечить общность методики и возможность сравнения результатов с результатами предыдущих работ. Как и в работах [Yagova et al., 2021; Sakharov et al., 2022; Сахаров и др., 2024], в настоящей работе исследуется связь пульсаций ГИТ и B_y -компоненты магнитного поля. Отбирались интервалы, для которых когерентность вариаций ГИТ и B_y на частоте главного спектрального максимума $\gamma_{\text{IB}}^2(f_1)$ превышала 0.5. Пульсации считались полигармоническими, если хотя бы один спектральный максимум отвечал условию $R_N > R_b$. Здесь $R_N = P_{wN}/P_{w1}$, где индексы 1 и N относятся к главному и любому из остальных спектральных максимумов соответственно, а функция $P_w(f)$ — спектр, который получается из PSD исключением линейного тренда из зависимости $\log(\text{PSD})$ от логарифма частоты. Пороговое значение $R_b = 0.22$, что обеспечивает близкие количества интервалов для пульсаций с одной и несколькими гармониками и максимальный контраст в отношении R_{IB} между этими группами пульсаций.

Включение в анализ пульсаций диапазона Pc4/Pi2 ставит вопрос об их ГИТ-эффективности. С одной стороны, если пространственный масштаб геомагнитного возмущения велик по сравнению с длиной проводника, R_{IB} возрастает с частотой f как $f^{1/2}$ при однородно проводящей земле или даже как f в модели тонкого проводящего слоя, которая часто оказывается достаточной для оценки ГИТ на региональных масштабах [Love et al., 2016]. С другой стороны, пространственный масштаб пульсаций выше для низкочастотных пульсаций и при включении в анализ пульсаций более высокочастотного диапазона необходимо оценить параметры пространственного распределения поля пульсаций, влияющие на их ГИТ-эффективность.

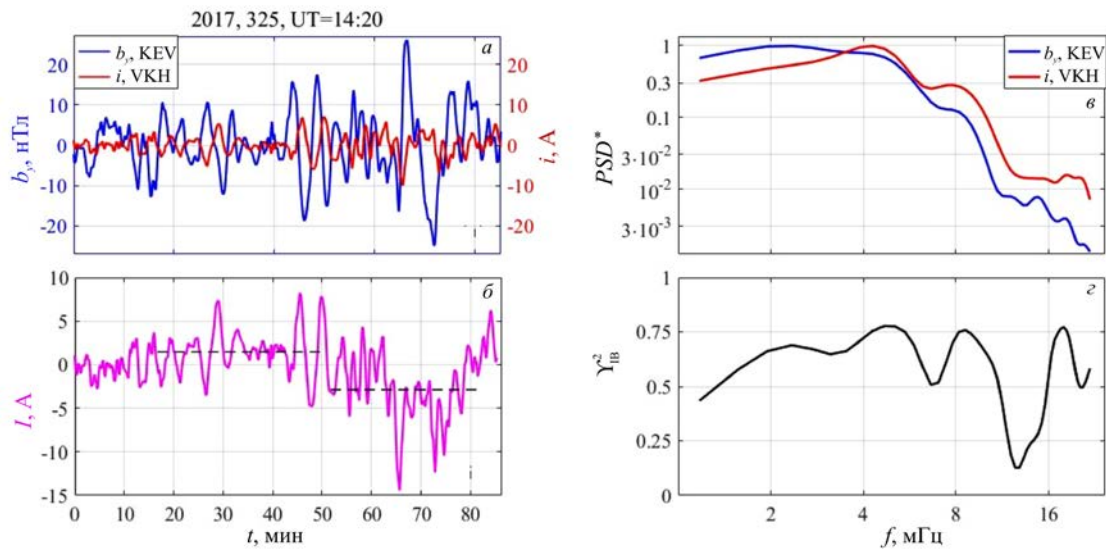


Рис. 2. Возбуждение ГИТ геомагнитными пульсациями 21 ноября 2017 г.: *a* — пульсации ГИТ (красная кривая) и компоненты B_y геомагнитного поля (синяя кривая); *б* — нефильТРованный ГИТ, черными штрихами показаны средние значения однополярного тока I_{asym} ; *в* — нормированные PSD; *г* — спектральная когерентность

Таблица 1

Координаты и местное магнитное время станций наблюдения

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

Для описания пространственного распределения поля волны используются, как и в работе [Yagova et al., 2021], пять кросс-спектральных параметров геомагнитных пульсаций, определенных по парам станций вдоль параллели (направление EW) и меридиана (NS). Для направления EW рассчитываются спектральная когерентность γ_{EW}^2 и отношение PSD R_{EW}^2 , а для направления NS — γ_{NS}^2 , R_{NS}^2 и разность фаз $\Delta\phi_{NS}$. Эти параметры определяются в окрестности спектральных максимумов для интервалов с надпороговой когерентностью γ_{IB}^2 .

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ

2.1. Пример возбуждения ГИТ пульсациями

Двадцать первого ноября 2017 г. (день 325) произошла слабая магнитная буря с минимальным $Dst = -42$ нТл около 8 UT. Условия перед ударной волной характеризовались ростом скорости солнечного ветра (СВ) с 350 до 600 км/с, поворотом межпланетного магнитного поля (ММП) к югу (минимум $B_z = -10$ нТл) и ростом динамического давления СВ P_{SW} до почти 10 нПа. Всплеск авроральной активности с максимальным $AE \sim 1000$ нТл наблюдался на главной фазе одновременно с минимумом Dst . Второй всплеск авроральной активности с $AE = 500-700$ нТл начался около 14 UT, когда ст. KEV и VKH

находились в вечернем секторе. Пульсации ГИТ и геомагнитного поля (компонента B_y) и их спектры показаны на рис. 2 для интервала 14:20–15:40 UT. Для исключения тренда была проведена высокочастотная фильтрация с частотой отсечки 0.9 мГц. Пульсации компоненты B_y имели средний размах 20–30 нТл и максимальный до 50 нТл и вызвали пульсации ГИТ с размахом 10–15 А (см. рис. 2, *a*). Для полигармонических пульсаций несбалансированный однополярный ГИТ I_{asym} может существовать несколько видимых периодов пульсаций. Чтобы проиллюстрировать этот эффект, на рис. 2, *б* показан исходный (нефильтрованный) ГИТ и средние значения I_{asym} на двух интервалах длительностью 35–40 мин. Величины I_{asym} составляют для этих интервалов +2 А и –3 А. В спектрах пульсаций B_y и ГИТ максимумы приходятся на частоты 4.5 и 8 мГц, а также виден слабый максимум на 18 мГц (см. рис. 2, *в*). Соотношение амплитуд пульсаций тока и геомагнитных пульсаций, определенное по волновым формам, составляет 0.25–0.4 А/нТл, а отношение PSD в 2.5 раза выше на частоте второго максимума по сравнению со значением на частоте первого (главного) максимума.

Спектральная когерентность $\gamma_{IB}^2 > 0.5$ для $1.5 < f < 11$ мГц и вблизи 18 мГц. В окрестности максимумов PSD наблюдаются максимумы когерентности с $\gamma_{IB}^2 \geq 0.75$ (см. рис. 2, *г*).

Таблица 2

Число событий и длительности интервалов

Число максимумов в спектре N_{max}	Частота спектрального максимума (мГц)	Обозначение	Количество Интервалов	Суммарная длительность (часы)
1	≤ 5.5	L_1	104	51.5
1	> 5.5	H_1	199	114
1	все	1	303	153
> 1	$f_1 < 5.5$	L_N	260	128
> 1	$f_2 > 5.5$	H_N	327	172
> 1	все	N	340	172
Все			643	260

Рассмотренный пример показывает генерацию ГИТ полигармоническими геомагнитными пульсациями, у которых частота главного максимума попадает в диапазон Pc5, а частоты гармоник — в диапазон Pc4. Пульсации возникают в вечернем секторе во время слабой магнитной бури (спустя 6–8 ч после минимума *Dst*). Важной особенностью этих пульсаций является существование несбалансированного ГИТ величиной до 3 А (20 % от размаха колебаний ГИТ) в течение примерно 10 видимых периодов пульсаций.

2.2. Пространственные распределения пульсаций двух поддиапазонов

Рассмотрим статистические закономерности для ГИТ, связанных с геомагнитными пульсациями в диапазоне частот 1–20 мГц. В работе [Yagova et al., 2021] верхняя граница исследуемого диапазона составляла 5 мГц, что несколько ниже границы номинального диапазона Pc5. В настоящем исследовании мы проводим сравнение отношения R_{IB}^2 и параметров пространственного распределения для пульсаций с одним и несколькими максимумами в спектре для диапазонов 1–5.5 и 5.5–20 мГц, что обеспечивает сравнимые размеры выборок и преемственность с предыдущими нашими исследованиями. Моногармонические пульсации (группа 1) делятся на низко- и высокочастотные (L и H), а для полигармонических (группа N) спектральные параметры определяются отдельно по каждому из двух главных максимумов. В результате выделяются несовпадающие интервалы для групп L_1 и H_1 и частично совпадающие — для групп L_N и H_N . Число исследуемых интервалов и их суммарные длительности представлены в табл. 2. Данные о суммарной длительности полигармонических пульсаций в зависимости от частот спектральных максимумов показывают, что большая часть полигармонических пульсаций охватывает оба частотных поддиапазона, так что низкочастотный максимум приходится на диапазон Pc5/Pi3, а высокочастотный — Pc4/Pi2, как в показанном на рис. 2 случае.

Как следует из рис. 3, средние значения R_{IB}^2 выше для полигармонических пульсаций, причем для более высокочастотных пульсаций среднее значение R_{IB}^2 примерно в два раза выше, чем для низкочастотных (единственное заметное отклонение отме-

чается на частоте 9.2 мГц, где пульсации с одним главным максимумом демонстрируют $R_{IB}^2 > 0.1$ А²/нТл²). Таким образом, пульсации с высокочастотным главным максимумом и полигармонические пульсации статистически демонстрируют высокую ГИТ-эффективность. Это позволяет предположить, что доля крупномасштабных пульсаций для диапазона Pc4/Pi2 сопоставима с таковой для диапазона Pc5/Pi3.

Рассмотрим распределения основных параметров, характеризующих пространственное поле пульсаций (рис. 4). Средняя по диапазонам спектральная когерентность $\gamma^2 > 0.5$ как для широтного (рис. 4, а), так и для меридионального (рис. 4, в) направлений, но для высших гармоник полигармонических пульсаций для отдельных частот когерентность оказывается ниже 0.5. Отношение R_{EW}^2 в широтном направлении отличается от 1 не более чем в три раза для всех частот (рис. 4, б), а среднее по диапазону значение — не более чем в 1.5 раза.

Наибольшее влияние на эффективность возбуждения ГИТ оказывает пространственное распределение поля пульсаций вдоль ЛЭП, т. е. в меридиональном (NS) направлении. Значения когерентности $R_{NS}^2 > 0.6$ для всех частот, а средние по диапазонам значения превышают 0.7 (рис. 4, в). Среднее значение PSD спадает от высоких широт к низким, что выражается в значениях $R_{NS}^2 > 1$ (рис. 4, з). Значения R_{NS}^2 выше для пульсаций с одним спектральным максимумом, чем для полигармонических. Для учета влияния разности фаз $\Delta\phi$ на ГИТ наиболее информативным является параметр $\mu = \cos(\Delta\phi)$ (рис. 4, д). Средние значения $\mu > 0.8$ для всех частот, а средние по диапазонам значения превышают 0.9 для всех полигармонических пульсаций и пульсаций группы H_1 . Таким образом, сочетание более равномерного распределения PSD вдоль меридиана и большего значения μ делает наиболее эффективной генерацию ГИТ на частоте высокочастотного максимума полигармонических пульсаций (H_N). Пункт измерения ГИТ «Выходной» (VKH) лежит к востоку от магнитометрической станции KEV, поэтому эффект большего отношения R_{IB}^2 для пульсаций H_N может усиливаться более высоким средним отношением R_{EW}^2 по сравнению с другими группами пульсаций.

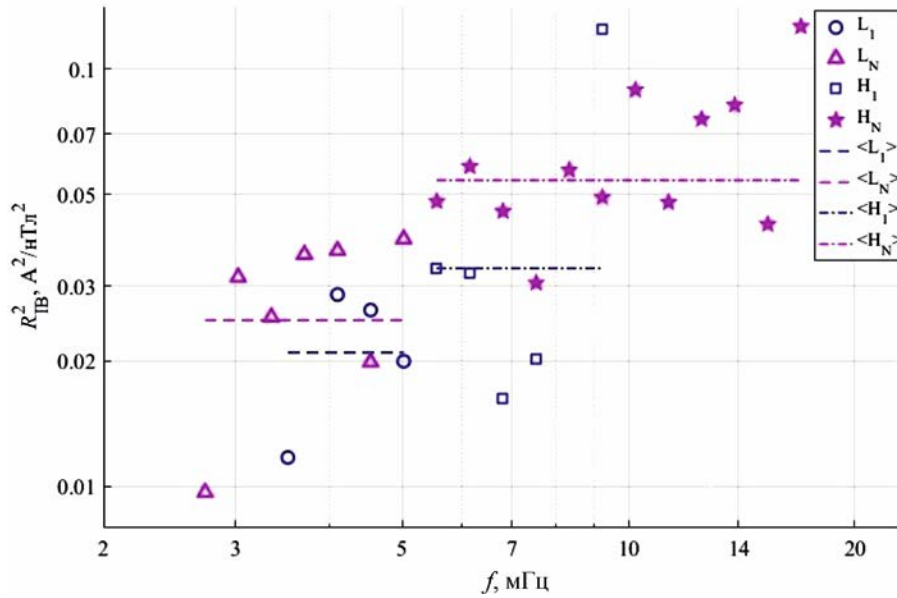


Рис. 3. Среднее за год отношение PSD R_{IB}^2 в зависимости от частоты спектрального максимума для моно- и полигармонических пульсаций. Средние для групп пульсаций показаны штриховыми и штрихпунктирными линиями

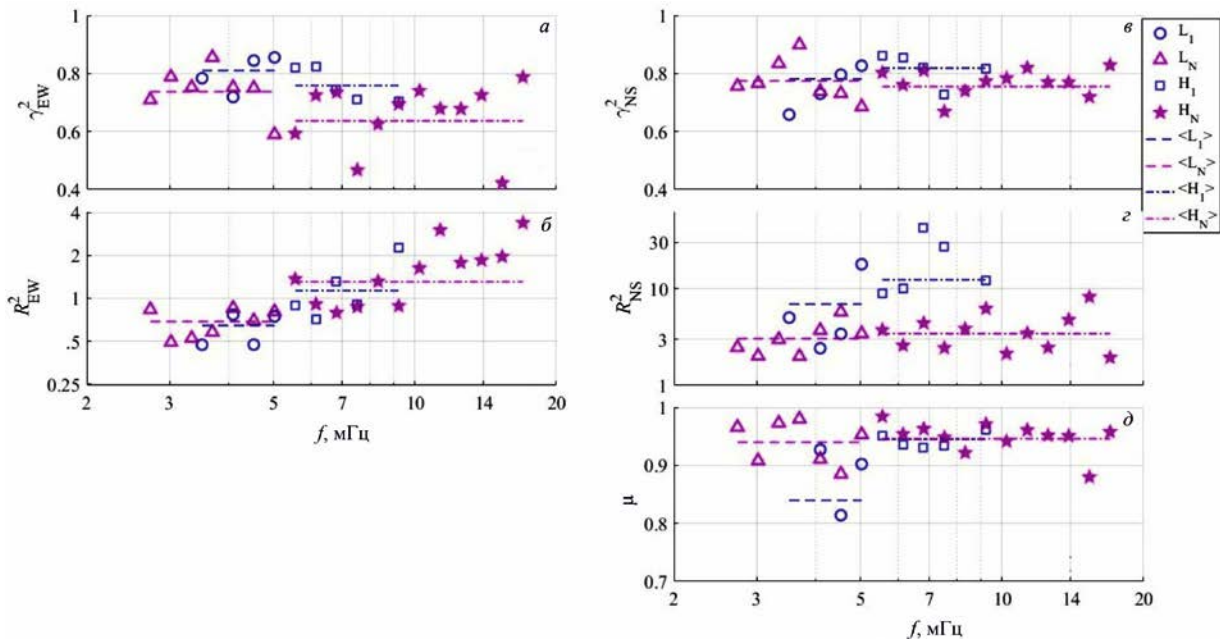


Рис. 4. Средние за год параметры пространственного распределения поля пульсаций в зависимости от частоты спектрального максимума и средние по группам: а — спектральная когерентность для направления EW; б — отношение PSD в направлении EW; в — спектральная когерентность для направления NS; г — отношение PSD в направлении NS; д — $\mu = \cos(\Delta\phi)$ в направлении NS

2.3. Время существования однополярного тока

Для исследования зависимости среднего значения однополярного ГИТ I_{asym} от времени усреднения T_1 использовался исходный нефильтрованный сигнал и рассматривались значения T_1 от 10 мин до 3 ч. Параметры I_{asym} показаны на рис. 5 для моно- и полигармонических пульсаций. На рис. 5, а показана зависимость модуля I_{asym} от времени усреднения. Для всех значений T_1 большие величины однополярного тока наблюдаются для полигармонических пульсаций. Для обеих групп пульсаций I_{asym} слабо

меняется при $T_1 < 45$ мин, а при больших временах спадает по степенному закону. В результате вблизи этой границы при $I_{asym} \approx 5-6$ А для полигармонических пульсаций T_1 примерно в два раза больше, чем для пульсаций с одним спектральным максимумом. Для задачи о воздействии ГИТ на электрооборудование важно не только среднее значение несбалансированного ГИТ, но и вероятность появления тока с амплитудой выше заданной. Зависимость вероятности появления $I_{asym} > 3$ А от T_1 показана на рис. 5, б. Для этого параметра различие между моно- и полигармоническими пульсациями составляет около 20 % для $T_1 < 40$ мин. При дальнейшем росте T_1 различие

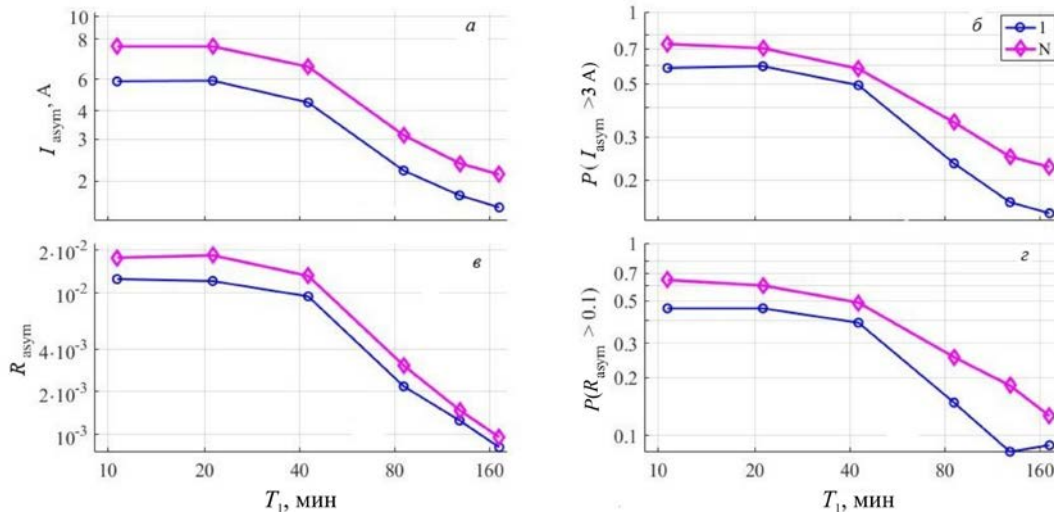


Рис. 5. Зависимость параметров среднего по интервалу однополярного ГИТ I_{asym} от длительности интервала T_1 : *a* — среднее значение $|I_{\text{asym}}|$; *б* — доля интервалов с $|I_{\text{asym}}| > 3$ А; *в* — отношение R_{asym} величины $|I_{\text{asym}}|$ к амплитуде вариаций ГИТ; *г* — вероятность появления $R_{\text{asym}} > 0.1$

в частотах появления надпороговых I_{asym} растет и при $T_1 = 80$ мин достигает 50 %.

На результат, показанный на рис. 5, *a, б*, влияют как волновые формы вариаций тока, так и их амплитуда. Чтобы исключить влияние амплитуды, в качестве меры относительной величины однополярного тока выбран параметр R_{asym} , определенный как отношение величины I_{asym} к вычисленной по дисперсии амплитуде вариаций ГИТ в полосе 1–20 мГц (рис. 5, *в, г*). Значения R_{asym} выше для полигармонических пульсаций во всем диапазоне времен усреднения. Для $T_1 < 80$ мин значения R_{asym} для полигармонических пульсаций примерно в полтора раза больше, чем для пульсаций с одним максимумом, а при больших временах усреднения различие уменьшается до 20 % (рис. 5, *в*). При этом зависимость от времени усреднения доли интервалов с $R_{\text{asym}} > 0.1$ (рис. 5, *г*) качественно повторяет зависимость для доли надпороговых величин I_{asym} — различие между моно- и полигармоническими пульсациями меняется от ~20 % при $T_1 < 40$ мин до почти двукратного при $T_1 > 80$ мин. Таким образом, помимо более высокого отношения R_{asym} полигармонические пульсации характеризуются и большим временем существования однополярного ГИТ величиной несколько ампер.

2.4. Условия возникновения полигармонических пульсаций

В работе [Сахаров и др., 2024] рассматривались условия вне и внутри магнитосферы, благоприятные для генерации пульсаций с высокой ГИТ-эффективностью. При этом исследовались только пульсации в диапазоне частот до 5 мГц. Включение в анализ более высоких частот подтвердило большую потенциальную опасность полигармонических пульсаций. Это связано как с их большей ГИТ-эффективностью, так и большими временами существования однополярных ГИТ. Рассмотрим, какие условия являются наиболее благоприятными для возникновения полигармонических пульсаций в диапазоне до 20 мГц.

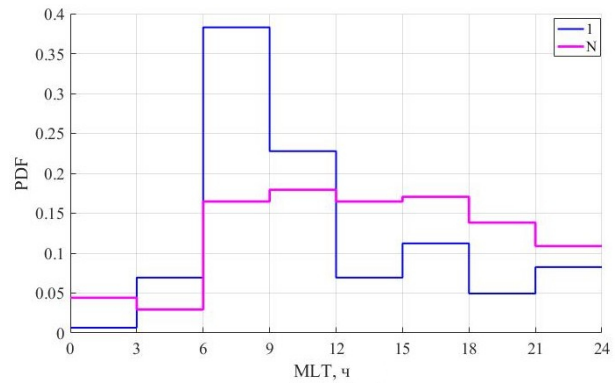


Рис. 6. Зависимость эмпирической плотности вероятности (PDF) числа интервалов с моно- и полигармоническими пульсациями от местного магнитного времени

Частота появления регулярных пульсаций Pc3-5 имеет утренний и вечерний максимумы, причем утренний является более выраженным [Greenstadt et al., 1979; Lee, Olson, 1980]. На рис. 6 представлен суточный ход вероятности появления двух групп пульсаций в виде зависимости эмпирической плотности вероятности (Probability density function, PDF) от местного магнитного времени (MLT). Главный максимум суточного хода PDF моногармонических пульсаций приходится на утренние часы (6–9 MLT), и два слабых максимума наблюдаются в вечернем (15–18 MLT) и предполуночном (21–24 MLT) секторах. Первые два максимума совпадают с известными для пульсаций Pc3-5, а ночной, вероятно, связан с сериями Pi2 [Гульельми, Троицкая, 1973]. Суточный ход вероятности появления полигармонических пульсаций сглажен — наблюдается широкий максимум с 6 до 21 MLT.

Рассмотрим, различаются ли условия генерации для этих двух групп пульсаций. Для учета геомагнитных бурь и авроральных суббурь использованы индексы Dst и AE , а из внемагнитосферных факторов рассмотрены абсолютное значение и уровень флуктуаций динамического давления солнечного ветра P_{sw} , компонента B_z межпланетного магнитного

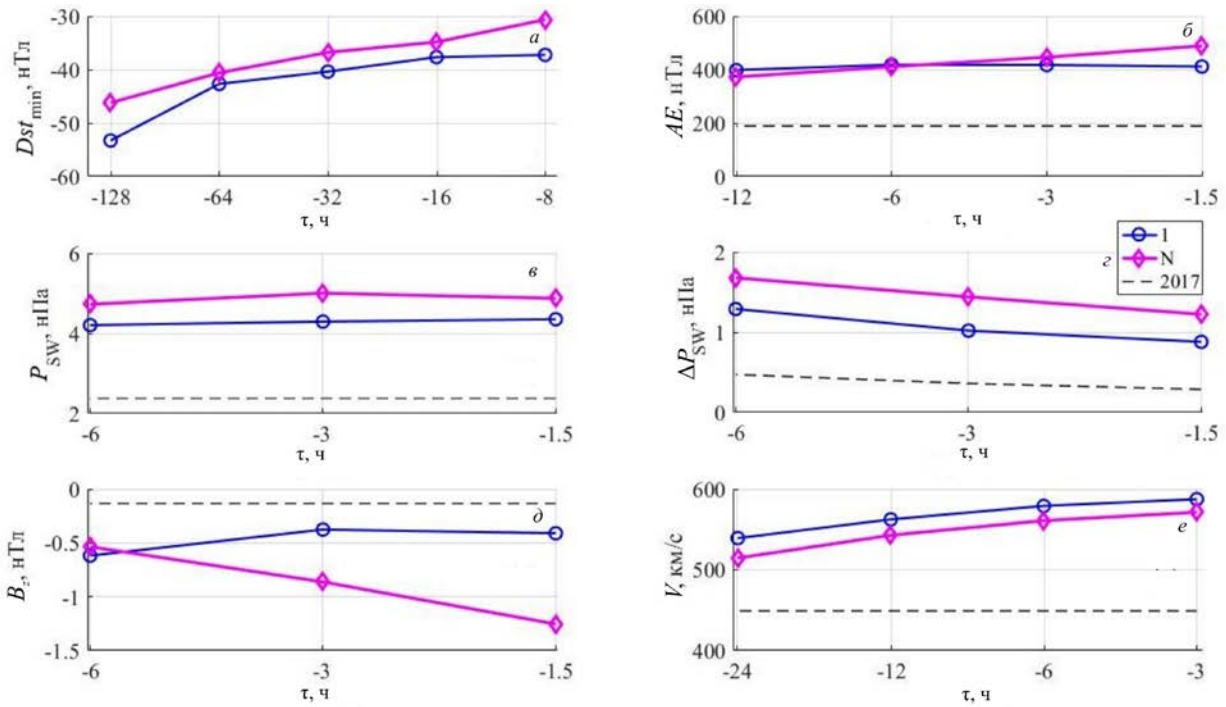


Рис. 7. Зависимость индексов геомагнитной активности и параметров ММП и СВ на интервале $[-\tau, 0]$ от τ , где 0 соответствует началу интервала, когда регистрировались моно- и полигармонические пульсации: а — минимум Dst ; б — AE ; в — динамическое давление СВ P_{SW} ; г — амплитуда флуктуаций P_{SW} ; д — B_z ММП; е — скорость СВ; штриховыми линиями показаны среднегодовые значения.

поля и скорость солнечного ветра V . Рассматриваются значения каждого параметра в течение интервала $[-\tau, 0]$, где 0 соответствует началу интервала регистрации пульсаций каждой группы. Для индекса Dst используется минимальное по каждому интервалу $[-\tau, 0]$ значение Dst_{min} , а для остальных параметров — средние значения. Результаты для двух групп пульсаций показаны на рис. 7 в виде зависимости исследуемого параметра от длины интервала τ . Для сравнения на рисунке приведены также среднегодовые значения исследуемых параметров. На рис. 7, а представлены средние для пульсаций двух групп значения Dst_{min} . Они соответствуют уровню слабой магнитной бури. Полигармонические пульсации наблюдаются в среднем при более слабых бурях, а максимальные различия между условиями для двух групп пульсаций наблюдаются при самых малых и самых больших значениях τ . Результаты для индекса AE представлены на рис. 7, б. Пульсации обоих видов наблюдаются при повышенном уровне авральной активности, а различия между двумя группами возникают только при малых значениях τ и составляют примерно 100 нТл. В обоих случаях разница между условиями для двух групп пульсаций меньше, чем между среднегодовыми значениями параметра и его значениями при возбуждении связанных с пульсациями ГИТ.

В работе [Сахаров и др., 2024] рассматривалась только интенсивность флуктуаций P_{SW} , но в данном исследовании рассматриваются также абсолютные значения P_{SW} , поскольку от него зависит положение магнитопаузы, которое влияет на пространственное распределение альфвеновской скорости и, следовательно, на частотный состав пульсаций. Значения P_{SW}

для интервалов, когда наблюдались обе группы пульсаций, выше, чем среднегодовое значение (2.4 нПа), и составляют 4.2 нПа для моногармонических пульсаций и 4.9 нПа для полигармонических (рис. 7, в). Аналогичная картина наблюдается для интенсивности флуктуаций P_{SW} (рис. 7, г): при среднегодовом значении $\Delta P_{SW}=0.4$ нПа значение $\Delta P_{SW}=1$ нПа для интервалов с моногармоническими пульсациями и 1.5 нПа — с полигармоническими.

Наиболее существенные различия между группами пульсаций как в абсолютных значениях, так и в характере зависимости от τ наблюдаются для B_z -компоненты ММП (рис. 7, д). При среднегодовом значении $B_z=-0.1$ нТл для интервалов с моногармоническими пульсациями B_z составляет -0.4 нТл, а для интервалов с полигармоническими меняется от -0.5 нТл при $\tau=-6$ ч до -1.3 нТл при $\tau=-1.5$ ч.

Результаты для скорости солнечного ветра показаны на рис. 7, е. При среднегодовом значении $V=445$ км/с скорость СВ меняется в интервале 540–585 км/с для моногармонических пульсаций и 520–570 км/с — для полигармонических.

Таким образом, полигармонические пульсации возникают на фоне более сильных отличий от среднегодовых значений, чем моногармонические, индекса AE , B_z -компоненты ММП, абсолютного значения P_{SW} и интенсивности флуктуаций ΔP_{SW} . Для AE и B_z эффект наблюдается при малых τ , а для P_{SW} и ΔP_{SW} — для всего диапазона τ . Для индекса Dst и скорости солнечного ветра V возникает обратная ситуация, когда более сильные отличия от среднего уровня наблюдаются для интервалов регистрации моногармонических пульсаций.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ ГИТ, связанных с геомагнитными пульсациями в частотном диапазоне 1–20 мГц, показал, что пульсации на частотах выше 5 мГц также являются эффективными источниками ГИТ. Потенциально наиболее опасны полигармонические пульсации, у которых частота одного из спектральных максимумов лежит выше 5 мГц. Физически это связано с прямой зависимостью R_{IB}^2 от частоты и достаточно высокой долей крупномасштабных пульсаций при $f > 5$ мГц. Таким образом, для эффективного мониторинга необходимы измерения ГИТ с шагом оцифровки не более 10 с.

Время существования T_1 однополярного тока I_{asym} заданной интенсивности важно в задаче о влиянии ГИТ на силовые трансформаторы, но ранее не исследовалось экспериментально. Этот параметр больше для полигармонических пульсаций, причем наибольшие различия наблюдаются для токов 5–6 А, для которых T_1 составляет 40–50 мин и примерно вдвое превышает соответствующий показатель для моногармонических пульсаций.

Вероятность появления ГИТ, связанных с пульсациями обеих групп, возрастает на восстановительной фазе магнитной бури, но полигармоническим пульсациям соответствуют более слабые бури. Пульсации обеих групп развиваются при повышенной авроральной активности, определенной как по текущим значениям AE , так и при усреднении значений индекса на интервале $[-\tau, 0]$, где τ меняется от 1.5 до 12 ч. Различия между группами пульсаций проявляются при $\tau < 3$ ч.

Из параметров солнечного ветра и межпланетной среды на вероятность появления двух групп пульсаций влияют динамическое давление солнечного ветра P_{SW} , интенсивность его флуктуаций ΔP_{SW} и значения B_z ММП. Для обеих групп пульсаций значения P_{SW} и ΔP_{SW} выше, а B_z ниже, чем среднегодовые. Дополнительное усиление этого эффекта наблюдается для полигармонических пульсаций. Учитывая положительную корреляцию между амплитудами флуктуаций P_{SW} и компонент ММП, минимальное по интервалу значение B_z также ниже для полигармонических пульсаций.

Обе группы пульсаций наблюдаются при повышенных скоростях СВ. Как было обнаружено в работе [Сахаров и др., 2024], долговременное существование умеренно повышенных скоростей сравнимо по эффекту с кратковременным существованием более высокой скорости. При этом большие значения V (почти 600 км/с) соответствуют моногармоническим пульсациям. Это позволяет объяснить отмеченный в работе [Сахаров и др., 2024] эффект насыщения влияния скорости СВ на ГИТ-эффективность пульсаций. Наиболее благоприятными для генерации полигармонических пульсаций оказываются скорости около 550 км/с.

Геомагнитные пульсации вызываются как вынужденными колебаниями, связанными с возмущениями магнитопаузы квазипериодическими вариациями P_{SW} и проникновением в магнитосферу вариаций ММП, так и системой колебаний и волн, разви-

вающихся внутри магнитосферы. Рассмотрим с этой точки зрения обнаруженные закономерности возникновения двух групп пульсаций. Моногармонические пульсации развиваются при высокой скорости солнечного ветра, преимущественно в утреннем секторе и на восстановительной фазе магнитных бурь и авроральных суббурь. Эти условия соответствуют эффективному возникновению внутримангнитосферных колебаний. Полигармонические пульсации развиваются во время авроральных активизаций, при высоком уровне флуктуаций динамического давления солнечного ветра и отрицательных значениях B_z . Для них суточный ход характеризуется широким максимумом в дневное время. Таким образом, полигармонические пульсации возникают при высокой интенсивности внешних флуктуаций и благоприятных условиях для их проникновения в магнитосферу. Это позволяет предположить, что вклад внешних флуктуаций в пульсации этой группы выше, чем в случае моногармонических пульсаций.

Кроме проблемы мониторинга потенциально опасных ГИТ, для приложений важна возможность их прогноза. Для возмущений с явным внешним триггером в межпланетной среде прогноз возможен и реализован как в виде функциональных зависимостей [Temerin, Li, 2006], так и методами машинного обучения [Tasistro-Hart et al., 2021]. Таким образом, средства прогноза магнитной бури могут использоваться и для прогноза связанных с бурей ГИТ, которые в настоящее время исследованы наиболее полно [Kataoka, Pulkkinen, 2008; Schillings et al., 2022]. Прогноз же геомагнитных пульсаций менее эффективен [Pilipenko et al., 2023]. Это связано с тем, что амплитуда, спектральный состав и пространственное распределение поля волны существенно зависят от параметров внутри магнитосферы. Анализ связанных с пульсациями ГИТ показал, что эти ограничения касаются в большей степени моногармонических пульсаций. В то же время полигармонические пульсации, которые являются более эффективным источником потенциально опасных ГИТ, обнаруживают и более сильную, чем моногармонические, зависимость от уровня внемагнитосферных флуктуаций. В результате возникает принципиальная возможность реализовать прогноз параметров пульсаций этой группы и связанных с ними ГИТ.

ВЫВОДЫ

1. ГИТ эффективно возбуждаются как геомагнитными пульсациями диапазона Pc5/Pi3, так и более высокочастотными пульсациями диапазона Pc4/Pi2.
2. Наиболее эффективным источником ГИТ являются полигармонические пульсации, имеющие спектральный максимум на частоте выше 5 мГц.
3. Полигармонические пульсации приводят к длительному существованию однополярных ГИТ, что усиливает потенциальную опасность этого вида возмущений для электрооборудования.
4. Благоприятные условия для возбуждения полигармонических пульсаций, вызывающих ГИТ надпороговой амплитуды, возникают во время повышенной авроральной активности и/или на восста-

новительной фазе магнитных бурь, включая слабые. Такие условия в межпланетной среде характеризуются южным направлением B_z ММП, скоростью солнечного ветра 500–600 км/с и повышенными абсолютным значением и интенсивностью флуктуаций динамического давления солнечного ветра.

Работа поддержана грантом РФФ № 21-77-30010.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баранник М.Б., Данилин А.Н., Катькалов Ю.В., Колобов В.В., Сахаров Я.А., Селиванов В.Н. Система регистрации геоиндуцированных токов в нейтральных силовых автотрансформаторов. *Приборы и техника эксперимента*. 2012. № 1. С. 118–123.
- Гульельми А.В., Троицкая В.А. *Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы*. М.: Наука, 1973. 208 с.
- Гусев Ю.П., Лхамдондог А., Монаков Ю.В. и др. Оценка воздействия геоиндуцированных токов на пусковые режимы силовых трансформаторов. *Электрические станции*. 2020а. № 2. С. 54–59.
- Гусев Ю.П., Лхамдондог А.Д., Монаков Ю.В., Ягова Н.В. Влияние знакопостоянного тока на баланс потоковцеплений первичных и вторичных обмоток силового трансформатора. *Релейная защита и автоматизация*. 2020б. № 2 (39). С. 20–25.
- Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. Т. 2. М.: Мир, 1972. 287 с.
- Лифшиц А.Е., Федоров Е.Н. Гидромагнитные колебания ионосферно-магнитосферного резонатора. *Докл. АН СССР*. 1986. Т. 287. С. 90–95.
- Сахаров Я.А., Ягова Н.В., Пилипенко В.А. Геомагнитные пульсации Pc5/Pi3 и геоиндуцированные токи. *Известия РАН. Серия физическая*. 2021. Т. 85. С. 445–450. DOI: [10.31857/s0367676521030236](https://doi.org/10.31857/s0367676521030236).
- Сахаров Я.А., Ягова Н.В., Билин В.А. и др. Параметры, влияющие на эффективность возбуждения геоиндуцированных токов геомагнитными пульсациями Pc5-6/Pi3 вне магнитной бури. *Известия РАН. Серия физическая*. 2024. Т. 88. (В печати).
- Apatenkov S.V., Sergeev V.A., Pirjola R., Viljanen A. Evaluation of the geometry of ionospheric current systems related to rapid geomagnetic variations. *Ann. Geophys.* 2004. Vol. 22. P. 63–72. DOI: [10.5194/angeo-22-63-2004](https://doi.org/10.5194/angeo-22-63-2004).
- Baransky L.N., Fedorov E.N., Kurneva N.A., et al. Gradient and polarization methods of the ground-based hydromagnetic monitoring of magnetospheric plasma. *J. Geomagn. Geoelect.* 1995. Vol. 47. P. 1293–1309.
- Bedrosian P.A., Love J.J. Mapping geoelectric fields during magnetic storms: Synthetic analysis of empirical United States impedances. *Geophys. Res. Lett.* 2015. Vol. 42. P. 10160–10170. DOI: [10.1002/2015GL066636](https://doi.org/10.1002/2015GL066636).
- Boteler D.H. A 21st century view of the March 1989 magnetic storm. *Space Weather*. 2019. Vol. 17. P. 1427–1441. DOI: [10.1029/2019SW002278](https://doi.org/10.1029/2019SW002278).
- Boteler D.H., Pirjola R.J. Modeling geomagnetically induced currents. *Space Weather*. 2017. Vol. 15. P. 258–276. DOI: [10.1002/2016SW001499](https://doi.org/10.1002/2016SW001499).
- Cherevatova M., Smirnov M.Yu., Korja T., et al. Electrical conductivity structure of north-west Fennoscandia from three-dimensional inversion of magnetotelluric data. *Tectonophysics*. 2015. Vol. 653. P. 20–32. DOI: [10.1016/j.tecto.2015.01.008](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.01.008).
- Fukunishi H., Lanzerotti L.J. ULF pulsation evidence of the plasmapause: 1. Spectral studies of Pc3 and Pc4 pulsations near $L=4$. *J. Geophys. Res.* 1974. Vol. 79, iss. 1. P. 142–158. DOI: [10.1029/JA079i001p00142](https://doi.org/10.1029/JA079i001p00142).
- Gannon J.L., Birchfield A.B., Shetye K.S., Overbye T.J. A comparison of peak electric fields and GICs in the Pacific Northwest using 1-D and 3-D conductivity. *Space Weather*. 2017. Vol. 15. P. 1535–1547. DOI: [10.1002/2017SW001677](https://doi.org/10.1002/2017SW001677).
- Greenstadt E.W., Singer H.J., Russell C.T., Olson J.V. IMF orientation, solar wind velocity, and Pc3–4 signals: A joint distribution. *J. Geophys. Res.* 1979. Vol. 84, iss. A2. P. 527–532. DOI: [10.1029/JA084iA02p00527](https://doi.org/10.1029/JA084iA02p00527).
- Hartering M.D., Shi X., Lucas G.M., et al. Simultaneous observations of geoelectric and geomagnetic fields produced by magnetospheric ULF waves. *Geophys. Res. Lett.* 2020. Vol. 47, iss. 18, E2020GL089441. DOI: [10.1029/2020GL089441](https://doi.org/10.1029/2020GL089441).
- Hartering 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, iss. 5, E2022SW003340. DOI: [10.1029/2022SW003340](https://doi.org/10.1029/2022SW003340).
- Heys M.J., Lotz S.I., Gaunt C.T. Geomagnetic pulsations driving geomagnetically induced currents. *Space Weather*. 2021. Vol. 19, iss. 2, E2020SW002557. DOI: [10.1029/2020SW002557](https://doi.org/10.1029/2020SW002557).
- Howard T.A., Menk F.W. Ground observations of high-latitude Pc3–4 ULF waves. *J. Geophys. Res.* 2005. Vol. 110, iss. A4, A04205. DOI: [10.1029/2004JA010417](https://doi.org/10.1029/2004JA010417).
- Juusola L., Vanhamäki H., Viljanen A., Smirnov M. Induced currents due to 3D ground conductivity play a major role in the interpretation of geomagnetic variations. *Ann. Geophys.* 2020. Vol. 38. P. 983–998. DOI: [10.5194/angeo-38-983-2020](https://doi.org/10.5194/angeo-38-983-2020).
- Kataoka R., Pulkkinen A. Geomagnetically induced currents during intense storms driven by coronal mass ejections and corotating interacting regions. *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113, iss. A3, A03S12. DOI: [10.1029/2007JA012487](https://doi.org/10.1029/2007JA012487).
- Lee L.C., Olson J.V. Kelvin-Helmholtz instability and the variation of geomagnetic pulsation activity. *Geophys. Res. Lett.* 1980. Vol. 7. P. 777–780. DOI: [10.1029/GL007i010p00777](https://doi.org/10.1029/GL007i010p00777).
- Lotz S.I., Danskin D.W. Extreme value analysis of induced geoelectric field in South Africa. *Space Weather*. 2017. Vol. 15, iss. 10. P. 1347–1356. DOI: [10.1002/2017SW001662](https://doi.org/10.1002/2017SW001662).
- Love J.J., Coisson P., Pulkkinen A. Global statistical maps of extreme-event magnetic observatory 1 min first differences in horizontal intensity. *Geophys. Res. Lett.* 2016. Vol. 43, iss. 9. P. 4126–4135. DOI: [10.1002/2016GL068664](https://doi.org/10.1002/2016GL068664).
- Love J.J., Lucas G.M., Rigler E.J., et al. Mapping a magnetic superstorm: March 1989 geoelectric hazards and impacts on United States power systems. *Space Weather*. 2022. Vol. 20, e2021SW003030. DOI: [10.1029/2021SW003030](https://doi.org/10.1029/2021SW003030).
- Marshall R.A., Dalzell M., Waters C.L., et al. Geomagnetically induced currents in the New Zealand power network. *Space Weather*. 2012. Vol. 10, S08003. DOI: [10.1029/2012SW000806](https://doi.org/10.1029/2012SW000806).
- Motoba T., Takahashi K., Rodriguez J.V., Russell C.T. Giant pulsations on the afternoonside: Geostationary satellite and ground observations. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015. Vol. 120. P. 8350–8367. DOI: [10.1002/2015JA021592](https://doi.org/10.1002/2015JA021592).
- Nakamura S., Ebihara Y., Fujita S., et al. Time domain simulation of geomagnetically induced current (GIC) flowing in 500-kV power grid in Japan including a three-dimensional ground inhomogeneity. *Space Weather*. 2018. Vol. 16. P. 1946–1959. DOI: [10.1029/2018SW002004](https://doi.org/10.1029/2018SW002004).
- Nosé M., Liou K., Sutcliffe P.R. Longitudinal dependence of characteristics of low-latitude Pi2 pulsations observed at Kakioka and Hermanus. *Earth Planet Space*. 2006. Vol. 58. P. 775–783. DOI: [10.1186/BF03351981](https://doi.org/10.1186/BF03351981).
- Pilipenko V., Kozyreva O., Hartinger M., et al. Is the global MHD modeling of the magnetosphere adequate for GIC prediction: the May 27–28, 2017 storm. *Cosmic Res.* 2023. Vol. 61. P. 120–132. DOI: [10.1134/S0010952522600044](https://doi.org/10.1134/S0010952522600044).
- Pulkkinen A., Lindahl S., Viljanen A., Pirjola R. Geomagnetic storm of 29–31 October 2003: Geomagnetically induced currents and their relation to problems in the Swedish high-voltage power transmission system. *Space Weather*. 2005. Vol. 3, S08C03. DOI: [10.1029/2004SW000123](https://doi.org/10.1029/2004SW000123).
- Pulkkinen A., Klimas A., Vassiliadis D., et al. Spatiotemporal scaling properties of the ground geomagnetic field variations. *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111, A03305. DOI: [10.1029/2005JA011294](https://doi.org/10.1029/2005JA011294).

Pulkkinen A., Pirjola R., Viljanen A. Statistics of extreme geomagnetically induced current events. *Space Weather*. 2008. Vol. 6, S07001. DOI: [10.1029/2008SW000388](https://doi.org/10.1029/2008SW000388).

Sakharov Ya.A., Yagova N.V., Pilipenko V.A., Selivanov V.N. Spectral content of Pc5–6/Pi3 geomagnetic pulsations and their efficiency in generation of geomagnetically induced currents. *Russ. J. Earth. Sci.* 2022. Vol. 22, ES1002. DOI: [10.2205/2021ES000785](https://doi.org/10.2205/2021ES000785).

Schillings A., Palin L., Opgenoorth H.J., et al. Distribution and occurrence frequency of dB/dt spikes during magnetic storms 1980–2020. *Space Weather*. 2022. Vol. 20, E2021SW002953. DOI: [10.1029/2021SW002953](https://doi.org/10.1029/2021SW002953).

Tanskanen E.I. A comprehensive high-throughput analysis of substorms observed by IMAGE magnetometer network: Years 1993–2003 examined. *J. Geophys. Res.* 2009. Vol. 114, A05204. DOI: [10.1029/2008JA013682](https://doi.org/10.1029/2008JA013682).

Tasistro-Hart A., Grayver A., Kuvshinov A. Probabilistic geomagnetic storm forecasting via deep learning. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2021. Vol. 126, E2020JA028228. DOI: [10.1029/2020JA028228](https://doi.org/10.1029/2020JA028228).

Temerin M., Li X. *Dst* model for 1995–2002. *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111, A04221. DOI: [10.1029/2005JA011257](https://doi.org/10.1029/2005JA011257).

Trichtchenko L. Frequency considerations in GIC applications. *Space Weather*. 2021. Vol. 19, E2020SW002694. DOI: [10.1029/2020SW002694](https://doi.org/10.1029/2020SW002694).

Wang G.Q., Volwerk M., Zhang T.L., et al. High-latitude Pi2 pulsations associated with kink-like neutral sheet oscillations. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017. Vol. 122, P. 2889–2899. DOI: [10.1002/2016JA023370](https://doi.org/10.1002/2016JA023370).

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, S07005. DOI: [10.1029/2007SW000343](https://doi.org/10.1029/2007SW000343).

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

Yumoto K., Osaki H., Fukao K., et al. Correlation of high- and low-latitude Pi2 magnetic pulsations observed at 210 magnetic meridian chain stations. *J. Geomagn. Geoelectr.* 1994. Vol. 46, P. 925–935. DOI: [10.5636/jgg.46.925](https://doi.org/10.5636/jgg.46.925).

Zhang T., Ebihara Y. Superposed epoch analyses of geoelectric field disturbances in Japan in response to different geomagnetic activities. *Space Weather*. 2022. Vol. 20, E2021SW002893. DOI: [10.1029/2021SW002893](https://doi.org/10.1029/2021SW002893).

Статья подготовлена по материалам Девятнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 5–9 февраля 2024 г., ИКИ РАН, Москва.

Как цитировать эту статью:

Ягова Н.В., Сахаров Я.А., Пилипенко В.А., Селиванов В.Н. Длиннопериодные геомагнитные пульсации как элемент воздействия космической погоды на технологические системы. *Солнечно-земная физика*. 2024. Т. 10, № 3. С. 146–156. DOI: [10.12737/szf-103202415](https://doi.org/10.12737/szf-103202415).