

УДК 550.385.4

## ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И ГЕОМАГНИТНЫХ УСЛОВИЙ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ГИТ НА СТАНЦИИ ВЫХОДНОЙ (2012–2018)

© 2023 г. Д. А. Шевелева<sup>1,\*</sup>, С. В. Апатенков<sup>2,1</sup>, Я. А. Сахаров<sup>3</sup>, В. Н. Селиванов<sup>4</sup>, Е. И. Гордеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Харбинский Политехнический Университет, Харбин, Китай

<sup>3</sup>Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

<sup>4</sup>Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, Апатиты, Россия

\*st035310@student.spbu.ru

Поступила в редакцию 12.03.2022 г.

После доработки 30.06.2022 г.

Принята к публикации 01.09.2022 г.

В работе исследовались 140 событий с наибольшими амплитудами геоиндуцированных токов (ГИТ) на станции Выходной (65 *MLat*) зарегистрированные в 2012–2018 гг. Показаны отличия параметров солнечного ветра и геомагнитных индексов от типичных значений. Видны характерные увеличения скорости солнечного ветра и динамического давления, пониженная *Bz* компонента ММП. Существенно сдвинуты от обычных значений индексы *Kp*, *AE*, *AL*, *Dst*, а также скорость роста (падения) *Dst/dt*. Проанализирована связь с ударными волнами в солнечном ветре.

DOI: 10.31857/S0023420623010053, EDN: FHVPGT

### ВВЕДЕНИЕ

Геоиндуцированные токи (ГИТ) появляются в протяженных проводящих объектах, таких как линии электропередач, при сильных вариациях магнитного поля Земли. Такие наземные магнитные возмущения вызваны изменяющимися ионосферными и магнитосферными токами [5, 7]. Несмотря на продолжительные исследования ГИТ, пока нет работ, которые опираются на большую статистику наблюдений, в частности из-за недоступности однородных непрерывных наблюдений ГИТ до недавнего времени. Из недавних работ можно отметить ряд статистических исследований: определение типов солнечного ветра при больших ГИТ [3], статистика параметров солнечного ветра и *Kp* индекса при больших производных наземного магнитного поля [1], исследование изолированных магнитных возмущений в ночном секторе [2].

### ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ

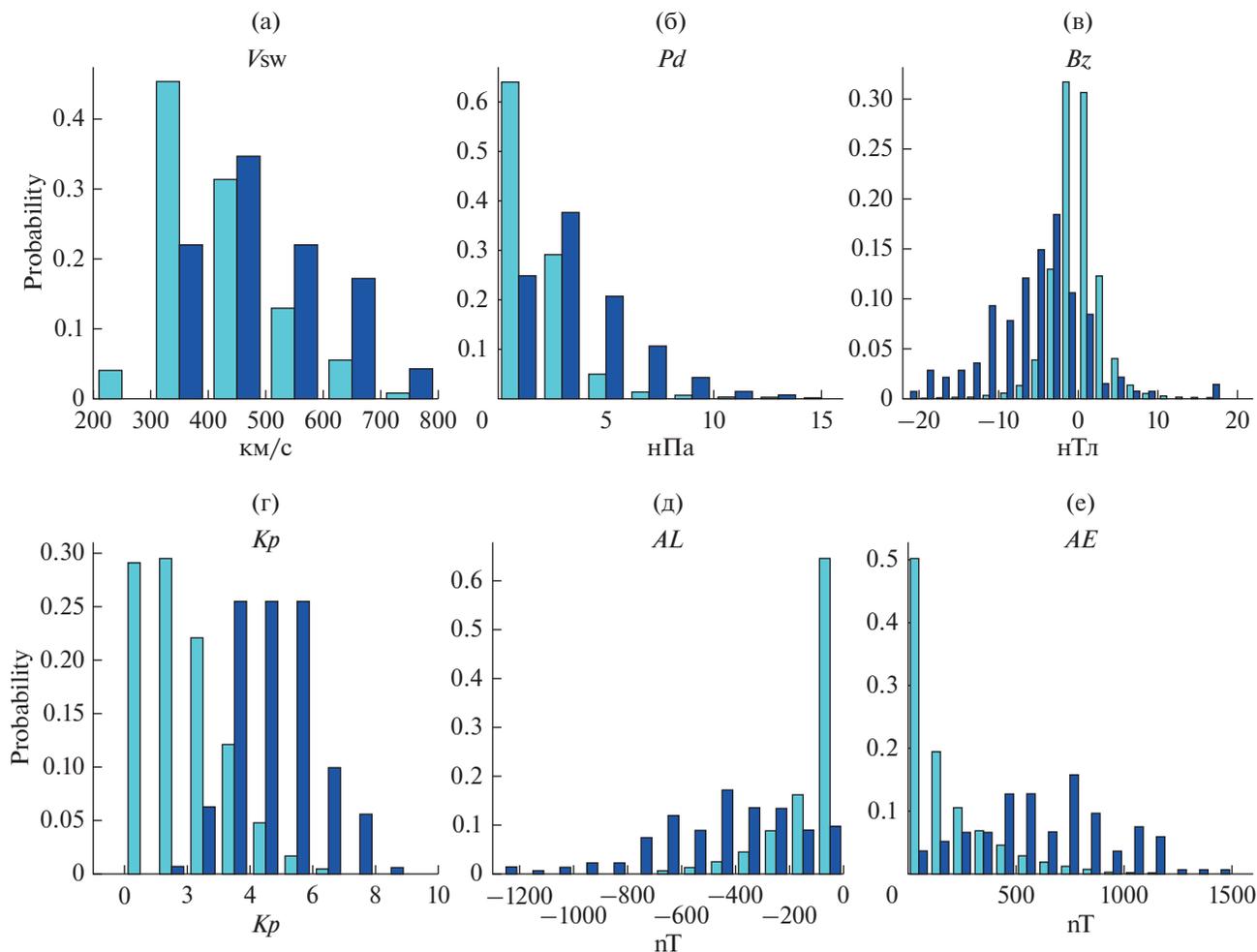
Целью нашей работы было выяснить характерные особенности магнитосферы и параметры солнечного ветра для событий с большими ГИТ, зафиксированными на станции Выходной в авроральных широтах. Задачи исследования: определить, при каких параметрах солнечного ветра

(давление, скорость, *Bz*) и геомагнитных индексов (*AE*, *AL*, *Kp*, *Dst*) создаются большие ГИТ; проверить предположение о том, что большие ГИТ могут быть вызваны ударными волнами; определить время появления ГИТ по индексу *Dst*, то есть, в какую фазу магнитных бурь обычно фиксируется ГИТ.

### МЕТОДЫ И ДАННЫЕ

Измерения ГИТ, используемые в данной работе, проводились на станции Выходной [6]. Станция Выходной расположена на Кольском полуострове, географические координаты 68.5 с.ш., 33 в.д., находится в авроральной зоне на 65 градусах магнитной широты. Токи измеряются в нейтрале трансформатора линии электропередач 330 кВ. Для исследования использовался список событий экстремальных ГИТ, за период с 2012–2018 гг. были выбраны часовые максимумы, всего 140 событий, амплитуды токов в этой выборке 17 А и более, максимум 140 А.

Для сравнения с параметрами солнечного ветра использовались данные из баз NASA <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>, <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/index.html/> (дата обращения 20.11.2022) [4]. Спутниковые измерения, большинство которых произведено в точке Лагранжа L1, снесены по времени к головной ударной волне, использова-



**Рис. 1.** Гистограммы с вероятностью наблюдения определенных параметров солнечного ветра и геомагнитных индексов. Все данные OMNI 2012–2018 – голубой, события с экстремальными ГИТ – синий. (а) скорость солнечного ветра, (б) динамическое давление, (в)  $B_z$  компонента ММП, (г)  $K_p$  индекс, (д)  $AL$  индекс, (е)  $AE$  индекс. Вертикальная ось – степень вероятности.

ны часовые средние. Мы используем массовую скорость солнечного ветра ( $V$ ), динамическое давление ( $P_d$ ) и  $B_z$  компоненту межпланетного магнитного поля. Геомагнитные индексы:  $AE$ ,  $AL$ ,  $Dst$  (часовые данные),  $K_p$  индекс (трехчасовые значения). Кроме того, в работе использовался список ударных волн за период с 1995 по 2017 г. по [Oliveira D. et al., 2018] / <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/action/downloadSupplement?doi=10.1029%2F2018SW001880&file=swe20694-sup-0002-supplementary.txt> (дата обращения 20.11.2022)

### ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 приведены гистограммы распределений по параметрам солнечного ветра и геомагнитным индексам. Голубым цветом показаны все значения из базы OMNI за 2012–2018 гг. (“номинальные”), 65000 часовых средних. Синими столбиками – значения, зафиксированные во время

экстремальных ГИТ на станции Выходной, 140 событий. На всех гистограммах видны существенные сдвиги распределений для ГИТ относительно номинальных в сторону больших значений, максимумы распределений сдвинуты на 100–200 км/с и 2–4 нПа, соответственно. Максимум распределения  $B_z$  сдвинут примерно на 5 нТл в сторону отрицательных значений. Дополнительно отметим, что более 85% событий из списка ГИТ наблюдались при отрицательной  $B_z$ .

Наиболее существенные сдвиги гистограмм видны в наземных индексах  $K_p$ ,  $AL$  и  $AE$  индексах. Например, 85% событий списка ГИТ наблюдались при  $K_p = 4$  и более, тогда как обычно интервалы с таким  $K_p$  составляют менее 10% всего времени наблюдений. Очевидно, что существенные магнитные возмущения, необходимые для ГИТ, как раз и отражены в геомагнитных индексах.

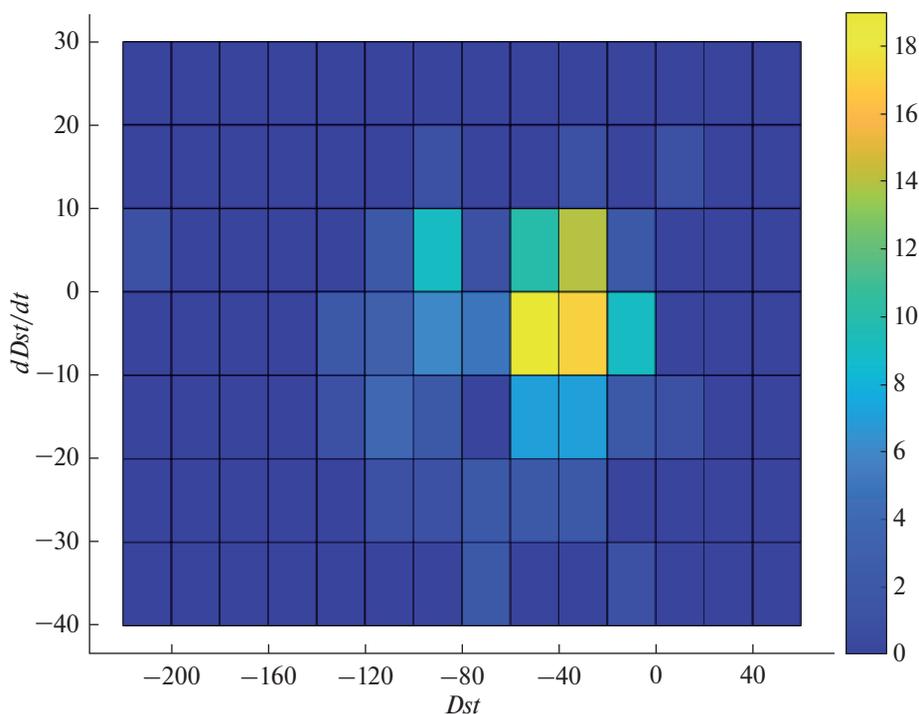


Рис. 2. Двумерная гистограмма с распределением 140 событий с большими ГИТ в пространстве параметров  $Dst$  и  $dDst/dt$ . Цветом показаны количества событий в ячейке.

Появление больших ГИТ по отношению к магнитным бурям и фазам бурь мы исследуем с помощью  $Dst$  индекса и производной  $Dst$  по времени, сосчитанной как разность  $Dst$  и предыдущего часового значения. Распределения в виде двумерной гистограммы показаны на рис. 2, цвета кодируют количество событий в ячейке параметров. Видно, что все большие ГИТ происходят либо при отрицательном  $Dst$ , либо при отрицательной  $dDst/dt$ . Основную часть событий можно формально отнести к магнитным бурям средней интенсивности,  $Dst$  в диапазоне  $-20...-100$  нТл. Также доминируют отрицательные значения производной  $Dst$ , что говорит или о главной фазе бури или о локальных во времени усилениях активности. Все же около 30% событий происходят на фазе восстановления бурь, то есть при отрицательных  $Dst$  и положительной производной. Визуальный анализ записей  $Dst$  индекса показал, что только два события из 140 наблюдались одновременно или в течение первого часа бури (начала резкого падения  $Dst$ ). Это создает положительные перспективы для систем предупреждений об экстремальных ГИТ.

Мы произвели поиск связи ударных волн (УВ), наблюдаемых в солнечном ветре и событий с экстремальными ГИТ. Всего одно событие из 140 наблюдалось в течение часа после УВ, и 13 событий в течение 12 последующих часов после УВ. Таким образом, в отличие от средних и экваториальных широт, УВ не являются основным источником

больших наземных производных магнитного поля и ГИТ в авроральных широтах.

Период наблюдений 2012–2018 гг. покрывает более половины 24-го солнечного цикла от максимума до минимума. Сравнение чисел Вольфа и частоты наблюдения событий ГИТ не показало связи. Годовые количества событий ГИТ как в максимуме цикла (2012–2014), так и на фазе спада (2015–2018) сравнимы.

## ВЫВОДЫ

1. Распределения параметров солнечного ветра ( $V$ ,  $Pd$ ,  $Bz$ ) и геомагнитные индексы ( $Kp$ ,  $AL$ ,  $AE$ ,  $Dst$ ) для событий с экстремальными ГИТ существенно отличаются от номинальных, наблюдаемых в 2012–2018 гг. Все гистограммы имеют существенный сдвиг в сторону больших значений (меньших для  $Bz$  и  $AL$ ).

2. Основная часть событий с большими ГИТ происходит про отрицательном и убывающем  $Dst$  индексе.

3. В отличие от средних и экваториальных широт не выявлена связь между событиями ГИТ и межпланетными ударными волнами.

Работа проведена в рамках проекта РНФ № 19-77-10016.

Участие в исследовании В.Н. Селиванова и Я.А. Сахарова поддержано за счет гранта Россий-

ского научного фонда № 22-29-00413, <https://rscf.ru/project/22-29-00413/>.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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. V. 22(1). P. 63–72. <https://doi.org/10.5194/angeo-22-63-2004>
2. *Engebretson M.J., Steinmetz E.S., Posch J.L. et al.* Nighttime magnetic perturbation events observed in Arctic Canada: 2. Multiple-instrument observations // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2019. V.124. P. 7459–7476. <https://doi.org/10.1029/2019JA026797>
3. *Huttunen K.E.J., Kilpua S.P., Pulkkinen A. et al.* Solar wind drivers of large geomagnetically induced currents during the solar cycle 23 // *Space Weather*. 2008.V. 6. S10002. <https://doi.org/10.1029/2007SW000374>
4. *King J.H., Papitashvili N.E.* Solar wind spatial scales in and comparisons of hourly Wind and ACE plasma and magnetic field data // *Journal of Geophysical Research*. 2005. V. 110. № A2. A02209. <https://doi.org/10.1029/2004JA010649>
5. *Pulkkinen A., Bernabeu E., Thomson A. et al.* Geomagnetically induced currents: Science, engineering, and applications readiness. // *Space Weather*. 2017. V. 15. P. 828–856. <https://doi.org/10.1002/2016SW001501>
6. *Sakharov Y.A., Danilin A.N., Ostafiychuk R.M.* Registration of GIC in power systems of the Kola Peninsula // *The 7th international symposium on electromagnetic compatibility and electromagnetic ecology*. Saint-Petersburg. Russia. IEEE. 2007. P. 291–292. <https://doi.org/10.1109/EMCECO.2007.4371714>
7. *Weigel R.S., Klimas A.J., Vassiliadis D.* Solar wind coupling to and predictability of ground magnetic fields and their time derivatives // *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 2003. V. 108(A7). <https://doi.org/10.1029/2002JA009627>