

УДК 523.72:550.385.27

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АВРОРАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ И ВОЗМУЩЕНИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СРЕДНИХ ШИРОТАХ

© 2023 г. Р. Вернер¹, В. Гинева¹, И. В. Дэспирак^{2, *}, А. А. Любчик², П. В. Сецко²,
А. Атанасов¹, Р. Божилова³, Л. Райкова¹, Д. Валев¹

¹Институт космических исследований и технологий Болгарской академии наук,
Стара Загора, Болгария

²Полярный геофизический институт, Апатиты (Мурманская обл.), Россия

³Национальный институт геофизики, геодезии и географии Болгарской академии наук,
София, Болгария

*e-mail: despirak@gmail.com

Поступила в редакцию 23.12.2022 г.

После доработки 25.03.2023 г.

Принята к публикации 28.03.2023 г.

По данным магнитометров сетей INTERMAGNET, SuperMAG и IMAGE проведен статистический анализ суббуревой активности в авроральных широтах за 2007–2020 гг. и ее связи с магнитными возмущениями на средних широтах. Появления и развитие магнитных возмущений в авроральных широтах контролировалось по IL -индексу (подобен AL -индексу, но рассчитан по данным IMAGE). За период 2007–2020 гг. были отобраны события, которые наблюдались около меридиана сети IMAGE, в ночном секторе (21–03 MLT). Использовались две выборки событий: 1) $IL < -200$ нТл не менее 10 мин, с дополнительным критерием наличия или отсутствия положительных бухт на станции Панагюриште в Болгарии; 2) изолированные суббури, наблюдавшиеся на меридиане IMAGE, согласно списка Ohtani and Gjerloev [2020]. Получены распределения IL -индекса, эмпирической и теоретической кумулятивной функции распределения, а также проведены оценки появления экстремальных событий. Показано, что, в целом, распределения IL хорошо описываются экспоненциальными функциями, и из всех событий в ~65% случаях наблюдались события, сопровождающиеся среднеширотными положительными бухтами, причем с ростом интенсивности возмущений их доля увеличивалась. Оказалось, что события с положительными бухтами в средних широтах и изолированные суббури лучше описываются распределением Вейбулла для экстремальных событий. Из обоих распределений выделены годовая и полугодовая вариации: годовые вариации имеют летний минимум и зимний максимум, полугодовые — максимумы около дней равноденствия, что, скорее всего, связано с эффектом Рассела-Макферрона. Показано также, что полугодовая вариация более выражена для событий с сопутствующими среднеширотными положительными бухтами.

DOI: 10.31857/S0016794022600727, EDN: OQIRYV

1. ВВЕДЕНИЕ

Как известно, суббури связаны с импульсным высвобождением накопленной магнитосферной энергии из хвоста магнитосферы [например, McPherron, 1970; Sergeev et al., 2011]. В отличие от магнитных бурь, продолжительность суббури в среднем составляет 0.5–2 ч. Трехмерная система токов суббури связана с развитием в ионосфере авроральных электроджетов (восточного и западного), расположенных между втекающими и вытекающими токами [Iijima and Potemra, 1978; Kamide and Akasofu, 1975]. По данным наземных магнитометров развитие магнитной суббури проявляется как появление отрицательных бухт горизонтальной компоненты магнитного поля на авро-

ральных широтах и положительных бухт (Mid-latitude Positive Bays — MPB) в средних широтах [Akasofu and Meng, 1969; McPherron et al., 1973]. При этом отрицательные бухты соответствуют усилению и движению к полюсу западного электроджета, развивающегося на ночной стороне во время взрывной фазы суббури, а положительные бухты в средних широтах связаны с развитием продольных токов токового клина суббури, через которые западный электроджет замыкается на разрыв тока в плазменном слое магнитосферы [McPherron et al., 1973; McPherron, 1978; Kerko et al., 2015].

Для описания интенсивности суббуревой активности были разработаны различные геомагнитные индексы, которые созданы на основе

наблюдений наземных обсерваторий. Индексы авроральной электроструи AE , AL , AU были введены в 1966 году с помощью анализа вариаций магнитного поля на 12 обсерваториях, расположенных в авроральных широтах [Davis and Sugiura, 1966]. Отметим, что использование только 12 станций в авроральной зоне недостаточно для определения суббуревых возмущений на высоких или низких широтах, такого типа возмущения будут слабо проявляться в AE , AL , AU -индексах. Однако с появлением большой сети магнитных обсерваторий SuperMAG (<https://supermag.jhuapl.edu/>), расположенных по всему миру, этот недостаток удалось преодолеть. Индексы SME (SML , SMU), рассчитанные по данным SuperMAG, аналогичны AE (AL , AU) индексу [Gjerloev, 2009; Newell and Gjerloev, 2011a]. Существует также сеть магнитометров IMAGE (<https://space.fmi.fi/image/www/>), которая была создана в 1991 году для изучения магнитных возмущений в Скандинавии. Меридиональный профиль магнитометров IMAGE протягивается от субавроральных до высоких широт (от $\sim 52^\circ$ до $\sim 79^\circ$ географической широты). В отличие от других индексов, геомагнитные индексы, рассчитанные на основе данных IMAGE, обозначаются как IE , IU и IL [Viljanen et al., 2006].

Недавно был предложен MPB (Mid-latitude Positive Bay) индекс [Chu, 2015; McPherron and Chu, 2017, 2018]. Существуют два немного отличающихся списка MPB индекса за период примерно с 1982 года, их можно найти в дополнительной информации к интернет-версии статьи McPherron and Chu (2018). Различия в методиках расчета описаны, например, в работе McPherron and Chu (2017). Главное различие состоит в том, что список McPherron получен по данным 35 станций с геомагнитной широтой λ_{mag} между -45° и 45° , тогда как список Chu составлен по данным 41 станции северного и южного полушарий с $20^\circ < |\lambda_{\text{mag}}| < 52^\circ$. Основное преимущество нового индекса состоит в использовании наблюдений среднеширотных станций, что дает возможность отслеживать суббуревые возмущения даже в случаях отсутствия данных на более высоких широтах.

Отметим, что для описания интенсивности магнитных бурь также используются различные геомагнитные индексы, которые характеризуют общие планетарные возмущения (Kp , Ap , ap , Am , am , Aa , aa , Dst) [Яновский, 1978; Murayama, 1974; Matzka et al., 2021].

Существование полугодовых и годовых вариаций геомагнитной активности известно с середины 19го века [Broun, 1848; Sabine, 1852]. Вариации наблюдаются на всех широтах. На низких широтах, в Dst -индексе, вариации описаны, например, в работах [Cliver et al., 2000; O'Brien and McPherron, 2002]. На средних широтах вариации в Am , Ap

и Kp индексах изучались Berthelier [1976], Ranganathan and Iyemori [1997], Нусинов и др. [2015]. В авроральных широтах Sing et al. [2013], Guo et al. [2012] анализировали вариации авроральных индексов и показали, что AE , AL , SME , SML имеют значительную сезонную зависимость с максимумом в дни равноденствий, тогда как индексы AU и SMU имеют только летний максимум. Fu et al. [2021] исследовали частоту возникновения суббурь и показали, что число суббурь максимально в период равноденствий. Полугодовые вариации являются более значительными для интенсивных суббурь. Аналогичные сезонные характеристики имеют локальные индексы IE , IL и IU . Guo et al. [2014] исследовали сезонные вариации силы тока западного и восточного электроджета. Они показали, что сезонные вариации представляют собой комбинации годовых и полугодовых циклов. Сравнение вариаций геомагнитной активности на разных широтах, включая полярную шапку, проводилось Lyatsky and Tan [2003]. Авторы пришли к выводу, что абсолютная амплитуда вариаций в Dst , Ap , Am и AL -индексах является близкой по величине, тогда как относительная амплитуда резко уменьшается с ростом широты.

Для объяснения полугодовых и годовых вариаций геомагнитной активности было предложено несколько “геометрических” гипотез, основанных на взаимной ориентации осей вращения Земли и Солнца, направления их магнитных полей, наклона эклиптики и так далее. Сюда можно отнести эффект Рассела–Макферрона [Russell and McPherron, 1973], равноденственный эффект [McIntosh, 1959; Boller and Stolov, 1970; Svalgaard et al., 2002], осевой эффект [Cortie, 1912; Bartels, 1932] и эффекты асимметрии в солнечном ветре и в солнечных магнитных полушариях [Mursula et al., 2011]. Подробное обсуждение гипотез можно найти, например, в статьях Yoshida [2009] и Lockwood et al. [2020] и приведенных в них ссылках. До сих пор нет единого мнения, какой из эффектов вносит основной вклад в наблюдаемые полугодовые и годовые вариации геомагнитной активности. Обычно предпочтение отдается эффекту Рассела–Макферрона, объясняющего вариации относительной ориентацией осей вращения Солнца и Земли к плоскости эклиптики и ориентацией оси магнитного диполя Земли.

В последние десятилетия активно развиваются статистические методы анализа распределения геомагнитных индексов. Они, в частности, позволяют корректно определить наиболее вероятные значения индексов. Например, Mikhailov et al. [2005], анализируя распределение Ap -индекса, показали, что распределение достигает максимума при Ap около 5, после чего начинается почти экспоненциальный спад. Кроме этого, можно оценить вероятность экстремальных событий. Используя логнормальное распределение для

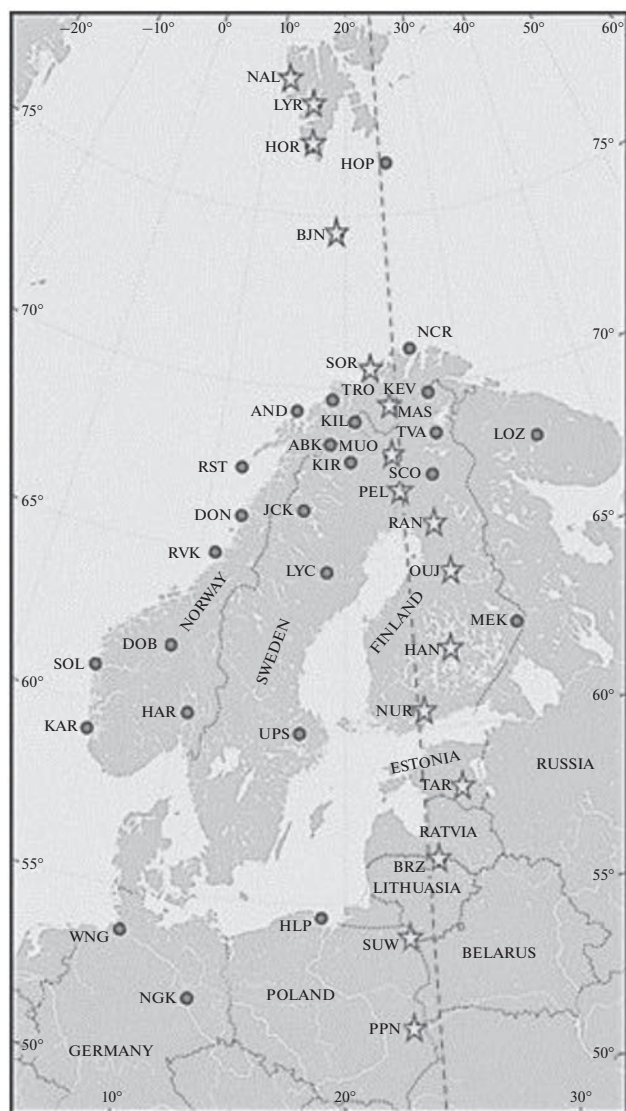


Рис. 1. Карта расположения магнитометров сети IMAGE, кружками отмечены все станции IMAGE, звёздочками — станции меридиональной цепочки PPN-NAL. Пунктирной линией отмечен меридиан, на котором находится болгарская ст. Панагюриште.

Dst -индекса, Love et al. [2015] пришли к выводу, что геомагнитная буря с $Dst \leq -850$ нТл (событие Кэррингтона; минимальная оценка интенсивности) должна происходить примерно 1.13 раз в столетие. Yermolaev et al. [2013], предполагая степенное распределение в области больших отрицательных Dst и используя верхнюю оценку интенсивности события Кэррингтона ($Dst = -1760$ нТл), установили, что такое событие может происходить не чаще одного раза в 500 лет. Gopalswamy [2018], используя распределение Вейбулла, исследовал экстремальные события на Солнце и их влияние на процессы на Земле. Были получены оценки параметров событий, которые можно

ожидать раз в столетие и раз в тысячелетие. Распределение пиковых значений Dst во время геомагнитных бурь аппроксимировалось экспоненциальным законом [Echer et al. 2011] и распределением Парето [Tsubouchi and Omura, 2007; Riley, 2012]. Обобщенное распределение Парето использовалось для изучения индексов AL , AU и AE [Nakamura et al., 2015], а также для анализа вариаций магнитного поля в Европе и скорости его изменения [Thomson et al., 2011].

В настоящей работе на основе методов статистической обработки вариаций магнитного поля по данным болгарской станции Панагюриште (PAG) на средних широтах и индекса IL авроральной электроструи по сети IMAGE на авроральных и высоких геомагнитных широтах проведен анализ появления суббуревых возмущений за период с 2007 по 2020 года. Надо отметить, что кроме отбора суббурь путем визуального контроля магнитограмм, существуют программные алгоритмы их обнаружения, в том числе, на основе анализа вариаций геомагнитных индексов. Так, например, с помощью анализа вариаций IL -индекса был создан алгоритм обнаружения суббурь по сети IMAGE, в котором суббуря определяется как событие, при котором быстрое уменьшение IL превышает 80 нТл/15 мин [Tanskanen, 2009]. В нашей работе использован иной критерий, который подробно описан в разделе 3. Исследования проводились для двух выборок суббуревых событий ($IL < -200$ нТл), когда наблюдалась или отсутствовала положительная бухта (MPB) в горизонтальной компоненте на станции PAG. Кроме того, проводилось сравнение полученных результатов с результатами, полученными по выборке изолированных суббурь на меридиане IMAGE, сделанной на основе списка суббурь Ohtani and Gjerloev [2020].

2. ДАННЫЕ

Геомагнитная активность на скандинавском меридиане IMAGE определялась по IL -индексу, который вычисляется по той же методике, что и AL -индекс [Davis and Sugiura, 1966], но по данным наблюдений выбранных станций сети IMAGE (https://space.fmi.fi/image/www/il_index_panel.php). Здесь при расчетах IL -индекса мы использовали две меридиональные цепочки станций PPN-SOR и PPN-NAL. На рис. 1 в географических координатах показана карта станций IMAGE, где кружками отмечены станции IMAGE, звёздочками — станции меридиональной цепочки PPN-NAL. Отметим, что PPN-SOR-цепочка состоит из 12 станций, расположенных от 51.4° (47.1°) до 70.5° (67.3°) географической (геомагнитной) широты, а PPN-NAL-цепочка заканчивается севернее, на архипелаге Шпицберген, на станции NAL (~78.9°(76.2°) географической (геомагнитной)

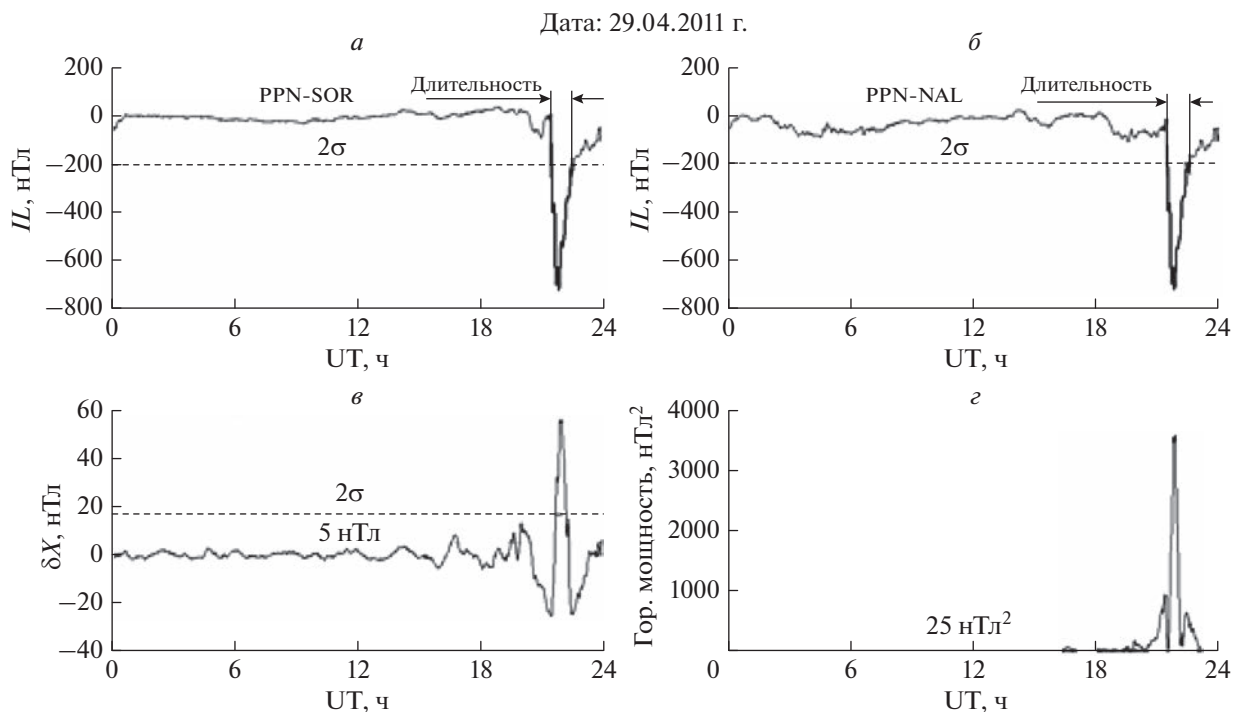


Рис. 2. Событие 29.04.2011: вариации IL -индекса, рассчитанного по цепочке PPN-SOR (а), по цепочке PPN-NAL (б), вариации X -компоненты магнитного поля (в) и горизонтальной мощности на станции PAG (г). Горизонтальными пунктирными линиями показаны величины 2σ , 5 нТл и 25 нТл². Вертикальными линиями отмечены моменты, по которым определялась длительность события.

широты), т.е. цепочка PPN-NAL состоит из 4 дополнительных станций на высоких широтах (https://space.fmi.fi/image/www/station_selection.html). Были проанализированы вариации IL -индекса, рассчитанного по данным двух цепочек за период с 2007 по 2020 гг. Следует заметить, что с 2007 по 2014 год меридиональная цепочка станций началась на более высоких широтах, на станции TAR ($\sim 58.2^\circ$ (54.5°) географической (геомагнитной) широты), с января 2015 ее продлили на более низкие широты, добавив две станции BRZ и SUW станции ($\sim 54^\circ$ (50°) географической (геомагнитной) широты), а с января 2018 года добавили еще станции PPN. Но в статье, для единообразия, мы будем обозначать эту цепочку как PPN-NAL для всего исследуемого периода, с 2007 по 2020 год.

Среднеширотные положительные бухты определялись по данным станции Панагюриште ($\sim 42.5^\circ$ географической и $\sim 36.9^\circ$ геомагнитной широты), которая расположена немного западнее (на географической (геомагнитной) долготе $\sim 24.2^\circ$ ($\sim 97.2^\circ$)) меридиональной цепочки PPN-NAL сети IMAGE, но, в целом, ее можно считать, как продолжение этой цепочки на более низкие широты. Данные наблюдений в Панагюриште взяты из базы данных INTERMAGNET (<https://intermag.net.github.io>). Отметим, что за период с 2007 года по 2020 гг. данные по магнитному полю имеют

лишь небольшие пробелы, за исключением временного интервала с сентября по октябрь 2017 года, когда в обсерватории был установлен резервный магнитометр. Данные были получены с помощью системы загрузки данных, разработанной в Национальном институте геофизики, геодезии и географии Болгарской академии наук [Божилова, 2017].

Изолированные суббури определялись согласно списку событий, размещенному на сайте SuperMAG (<https://supermag.jhuapl.edu/substorms/>). Список был создан на основе анализа вариаций SML -индекса, содержит информацию о моменте начала и локализации наиболее сильных возмущений суббури [Ohtani and Gjerloev, 2020]. На основе этого списка с 2010 по 2019 гг. были выбраны для анализа только события, которые наблюдались около меридиана сети IMAGE, т.е. с 18 до 01 ч UT (21:04 MLT).

3. ОТБОР СОБЫТИЙ

В нашей работе использован следующий критерий определения суббуревых возмущений: $IL < -200$ нТл с длительностью отрицательного пика в IL -индексе не менее 10 мин. Чтобы определить длительность события, были рассчитаны дисперсии и среднеквадратичные отклонения σ

для IL -индекса для каждого дня. Пример выбора события для анализа представлен на рис. 2, где показан IL -индекс для 29 апреля 2011 г., рассчитанный по станциям цепочки PPN-SOR (рис. 2а) и по цепочке PPN-NAL (рис. 2б). Горизонтальной штриховой линией на рисунках показан нижний предел интервала 2σ , моменты пересечения линии 2σ с графиком IL показаны вертикальными линиями, интервал между ними показывает длительность события. На рис. 2в представлена вариация X -компоненты магнитного поля (на рис. 2 обозначена как δX) на станции PAG, горизонтальными пунктирными линиями обозначены значения 2σ и 5 нТл, которые используются для определения наличия положительной бухты на станции PAG. Мы считаем, что положительная бухта (MPB) наблюдалась, только если около пика IL -индекса вариация X -компоненты магнитного поля (δX) превышала 5 нТл и одновременно превышала предел 2σ , где σ -квадратичное отклонение, рассчитанное по вариациям X -компоненты для данного дня.

Надо отметить, что события стационарной магнитосферной конвекции (SMC) также попадают в нашу статистику, так как во время этих событий могут быть магнитные возмущения — конвективные бухты (конвективные суббури). И если они достаточно интенсивные $IL < -200$ нТл, то тоже включены в статистику, так как мы не выделяли и не удаляли их из рассмотрения, т.е. рассматриваются все возмущения, превышающие пороговое значение IL .

На рис. 2г представлена горизонтальная мощность магнитного поля на станции PAG, которая фактически представляет собой MPB-индекс, рассчитанный по данным только одной станции PAG. Для расчета горизонтальной мощности была разработана программа, основанная на алгоритме расчетов MPB-индекса [Chu, 2015; McPherron and Chu, 2017], но с некоторыми небольшими изменениями. Дополнительно к исходному алгоритму были введены процедуры обнаружения пробелов и пиков в данных. Кроме того, мы заменили процедуру обнаружения дней с сильной возмущенностью магнитного поля, использовавшуюся McPherron and Chu [2017], на процедуру, основанную на критерии выбросов Граббса [Grubbs and Beck, 1972]. Все процедуры обработки данных и расчеты подробно описаны в статье Werner et al. [2021]. На рис. 2г пунктирная горизонтальная линия показывает величину 25 нТл², соответствующую критерию выбора положительной бухты по критерию $\delta X > 5$ нТл, так как горизонтальная мощность пропорциональна квадратам X - и Y -компонент. Отметим, что графики, подобные представленным на рис. 2в и рис. 2г, были построены для каждого дня и загружены в интернет, на сайт (https://magnetic.nuclearmodels.net/Catalog_MPB/). Таким образом, для наших ста-

тистических исследований были созданы две выборки событий для суббуревых возмущений, сопровождающихся и не сопровождающихся положительными бухтами в Панагюриште. Выборки сделаны для ночного сектора, т.е. с 18:00 до 24:00 UT (с 21:00 до 03:00 MLT), где обычно происходят суббури. Далее в тексте эти выборки событий, где использованы только данные сети IMAGE, обозначим как IMAGE-PPN-NAL и IMAGE-PPN-SOR.

Для сравнения результатов и контроля, что выбранные события представляют собой суббуревые возмущения, мы взяли еще одну выборку событий. Она основана на списке изолированных суббурь, который находится на сайте SuperMAG [Ohtani and Gjerloev, 2020]. Этот список создан на основе вариаций SML -индекса и содержит информацию о моменте начала изолированных суббурь с 1995 по 2019 г. Мы отобрали для анализа только события с 2010 по 2019 гг.; рассматривался интервал UT, когда станции сети IMAGE находились в ночном секторе. Каждому моменту начала изолированной суббури было сопоставлено минимальное значение IL -индекса, наблюдаемое за 2 ч после момента начала. Расчеты IL -индекса проводились по данным IMAGE для двух меридиональных цепочек станций PPN-NAL и PPN-SOR. Далее в статье для отличия наших выборок событий будем обозначать события по списку изолированных суббурь (isolated substorm — IS) как IS-PPN-NAL и IS-PPN-SOR.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

4.1. Статистические исследования распределения IL -индекса

Важной характеристикой статистического ансамбля является его распределение. На рис. 3а представлены гистограммы IL -индекса, полученные по выборкам событий IMAGE-PPN-NAL (черным цветом) и IMAGE-PPN-SOR (серым цветом). Для всего исследуемого интервала (2007–2020 гг.) значения IL -индекса были отсортированы по интенсивности и распределены по классам. Ширина класса была выбрана 50 нТл. Отметим, что выборка событий для PPN-NAL включает выборку для PPN-SOR, но примерно на треть больше нее.

Видно, что обе гистограммы IMAGE-PPN-NAL и IMAGE-PPN-SOR убывают почти экспоненциально. На дополнительной маленькой панели на рис. 3а более подробно показаны события с $IL < -1200$ нТл. Видно, что было всего несколько интенсивных событий. Причем, события с $IL < -2200$ нТл относятся к суперсуббуре 7–8 сентября 2017 г. Это одна из нескольких суперсуббурь, которые наблюдались, когда станции IMAGE находились в ночном секторе, и на них были заре-

гистрированы экстремально сильные возмущения магнитного поля [Дэспирак и др., 2020].

Обе гистограммы IMAGE-PPN-NAL и IMAGE-PPN-SOR были аппроксимированы экспоненциальным распределением. Эмпирическая функция плотности вероятности (DPF) f получается по нормализованной гистограмме N_i/A .

Теоретическая экспоненциальная DPF определяется выражением

$$f_{\text{exp}}(x) = \lambda \exp^{-\lambda x}, \quad x \geq 0, \quad (1)$$

где x в нашем случае равен $x = -(IL + 200 \text{ нТл})$ и $IL \leq -200 \text{ нТл}$. За значения x надо взять середины интервалов.

Эмпирическая кумулятивная функция распределения (CDF) F_i определяется простым суммированием $F_i = \sum_{j=1}^i N_j/N$. Теоретическая CDF

F задается формулой $F(x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt$. Для экспоненциальной CDF получается

$$F_{\text{exp}}(x) = 1 - \exp^{-\lambda x}, \quad x \geq 0, \quad (2)$$

и она определяет вероятность $P(X < x)$ случайной величины X . Параметр λ может быть оценен как $\frac{1}{\bar{x}}$, чтобы эмпирическая функция CDF соответствовала теоретической.

Эмпирические функции CDF для обеих цепочек представлены на рис. 3б вместе с их аппроксимацией теоретической экспоненциальной функцией CDF. Видно, что оба распределения очень похожи, а параметры $\lambda_{\text{PPN-SOR}} = 0.00465/\text{нТл}$ и $\lambda_{\text{PPN-NAL}} = 0.00487/\text{нТл}$ практически идентичны. Мы проверили с помощью теста Колмогорова-Смирнова для двух выборок, что распределения не различаются на уровне значимости 0.05. Это означает, что они происходят из одного и того же статистического ансамбля.

Вероятность того, что случайная переменная X больше определенного x $P(X > x)$, определяется как $1 - P(X < x) = 1 - F(x)$, и для экспоненциального распределения получим $P(X > x) = \exp^{-\lambda x}$. Таким образом, графическое представление $\sum_{j=1}^i N_j/N$ в логарифмическом масштабе для экспоненциального распределения представляет собой прямую линию с наклоном λ .

На рис. 3в показана интенсивность потока событий, т.е. число наблюдений с индексом IL , меньшим определенного значения IL , отнесенное к одному году. Наклон прямой линии на этом графическом представлении равен λ/y , где y — количество лет наблюдений. Из рис. 3в видно, что частота появления событий с $IL < -1500 \text{ нТл}$ равна 4 событиям в 10 лет, для событий с $IL < -1750$ —

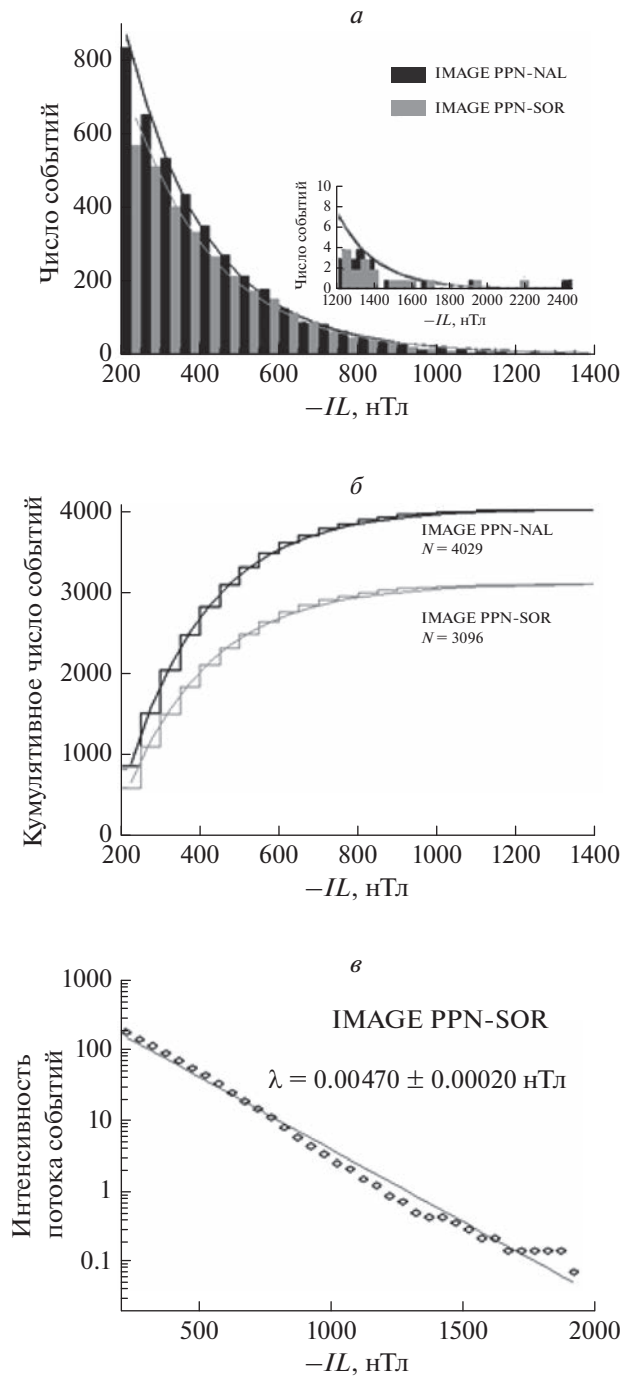


Рис. 3. Гистограммы IL -индекса, рассчитанного по двум цепочкам PPN-SOR (серый цвет) и PPN-NAL (черный цвет). Сплошными линиями показаны их аппроксимации экспоненциальными распределениями. Гистограммы больших значений $IL < -1200 \text{ нТл}$ представлены на дополнительной панели (а). Эмпирическая кумулятивная частота и теоретическая кумулятивная частота, рассчитанные с одним и тем же параметром λ (б). Интенсивность потока событий в год для PPN-NAL. Эмпирическая зависимость показана кружками, а теоретическое приближение — сплошной линией (в).

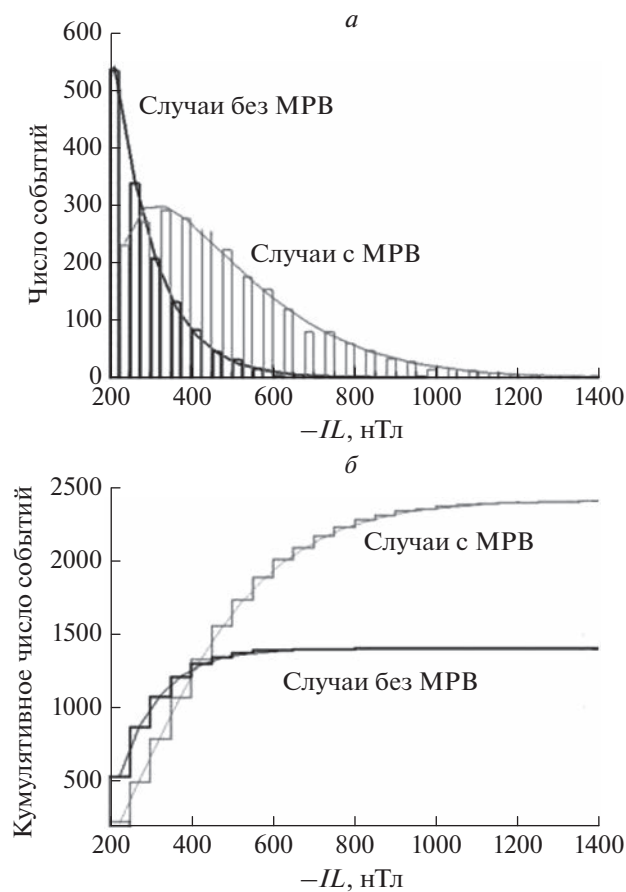


Рис. 4. Гистограммы распределения IL -индекса для событий с положительной бухтой (МРВ) в Панагюриште (серый цвет) и без положительной бухты (черный цвет). Сплошными линиями показана аппроксимация гистограмм распределением Вейбулла (а); подобные гистограммы для кумулятивного числа событий (б).

один раз в 10 лет. Отметим, что это получено только для выбранной меридиональной цепочки и ограниченного по MLT сектора (21–24 ч).

Рассмотрим распределение суббуревых событий, когда на станции Панагюриште регистрировались положительные бухты (МРВ) и когда бухты МРВ не наблюдались. Гистограммы распределения IL -индекса для событий с положительными бухтами (серый цвет) и без них (черный цвет) представлены на рис. 4. Число случаев без МРВ монотонно падает с ростом модуля IL . Распределение IL для случаев с МРВ вначале возрастает с ростом модуля IL так, что при ~ -300 нТл наблюдается почти равное количество событий с МРВ и без МРВ. При $IL < -600$ нТл почти все события сопровождаются среднеширотными бухтами МРВ. На рис. 4б показаны подобные гистограммы для кумулятивного числа событий, формат рис. 4б подобен формату рис. 4а. Видно, что кумулятивная функция CDF для событий без по-

ложительных бухт МРВ насыщается очень быстро и не превышает $\sim 35\%$ всех событий. Соответственно в $\sim 65\%$ случаев наблюдались события, сопровождающиеся среднеширотными положительными бухтами.

Для описания эмпирического хода IL -индекса хорошо подходит распределение Вейбулла [Weibull, 1951; Coles, 2001]. Отметим, что, хотя распределения IL -индекса без МРВ бухт может быть также описано экспонентой, но оказалось, что использование распределения Вейбулла дает гораздо лучшее приближение. Для распределения Вейбулла известны различные параметризации. Мы используем следующее определение PDF:

$$f_{\text{Weib}}(x) = \alpha\beta[(\alpha x)^{\beta-1}] \exp[-(\alpha x)^{\beta}]. \quad (3)$$

Кумулятивная функция CDF имеет вид

$$F_{\text{Weib}}(x) = 1 - \exp[-(\alpha x)^{\beta}]. \quad (4)$$

Параметры распределения α и β были получены с помощью программы Statistica. Для событий, когда не было положительных бухт МРВ, мы нашли $\alpha = 0.00996$ и $\beta = 1.0334$, а для событий с сопутствующими бухтами МРВ мы получили $\alpha = 0.00340$ и $\beta = 1.3154$. Эмпирическая функция CDF представлена на рис. 4б вместе с теоретической, рассчитанной по уравнению (4). Из графика видно, что распределения Вейбулла подходят для описания наблюдаемого распределения IL -индекса. Это неудивительно, поскольку определение $IL(t)$ как минимальной величины $IL_n(t)$, где n – номер станции, приводит к экстремальному распределению значений IL . Одним из трех основных типов распределений экстремальных значений как раз является распределение Вейбулла. Следует отметить, что экспоненциальное распределение является частным случаем распределения Вейбулла при $\beta = 1$. Действительно, значение $\beta = 1.0334$, наблюдаемое для распределения для событий, когда не было сопутствующих МРВ, выглядит как экспоненциальное распределение и β не отклоняется значительно от 1. Таким образом, все распределения индекса IL аврорального электроджета ($IL < -200$ нТл) как для выборки событий за весь период 2007–2020 гг., так и для выборок с положительными бухтами МРВ и без них, могут быть описаны распределениями экстремальных значений Вейбулла.

4.2. Годовые и полугодовые вариации

Рассмотрим полугодовые и годовые вариации IL -индекса для наших выборок событий. На рис. 5 представлено распределение по месяцам IL -индекса, полученное для изолированных суббурь в период с 2010 по 2019 г. IL -индекс рассчитывался двумя способами: по данным всех скандинавских станций (без Шпицбергена) (серый цвет) или по

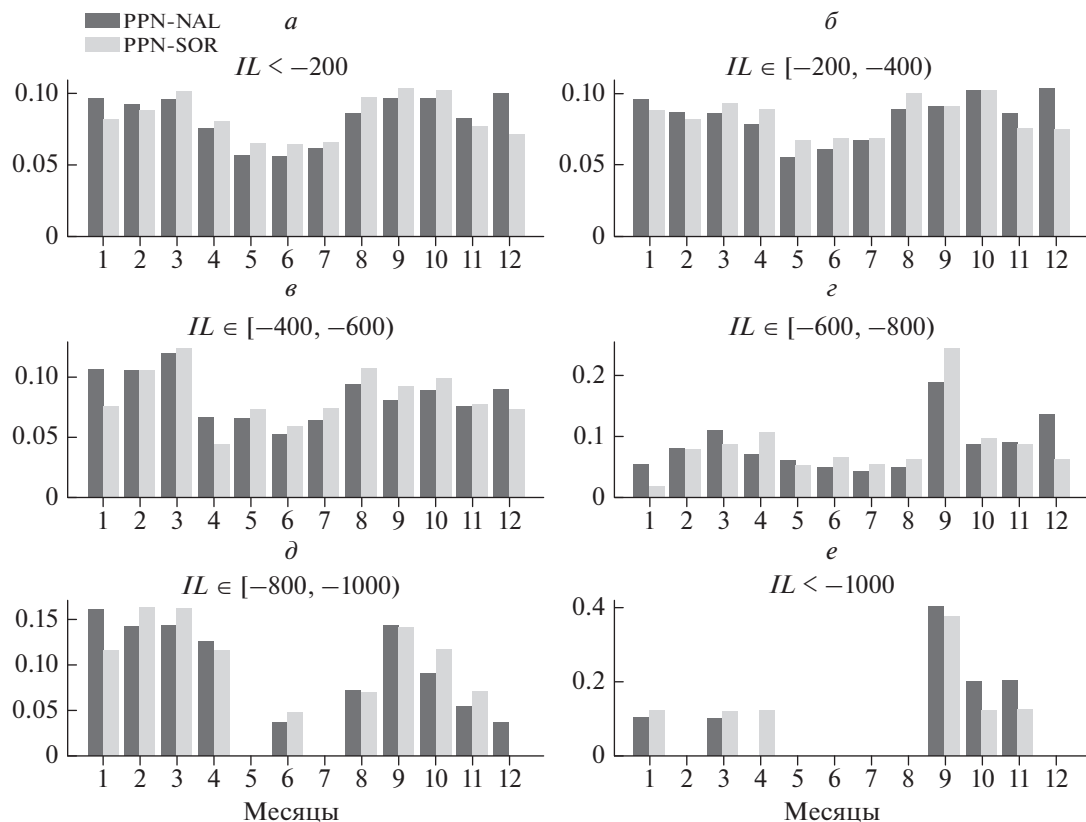


Рис. 5. Распределение по месяцам IL -индекса для событий списка изолированных суббурь во время 2010–2019 гг. Индекс IL рассчитывался по всем скандинавским станциям (без Шпицбергена) (серые столбики) и по цепочке станций PPN-NAL (черные столбики): (а) – для всех событий с $IL < -200$ нТл; (б, в, г, д, е) – для событий, разделенных на классы: $-400 \text{ нТл} \leq IL < -200 \text{ нТл}$; $-600 \text{ нТл} \leq IL < -400 \text{ нТл}$; $-800 \text{ нТл} \leq IL < -600 \text{ нТл}$; $-1000 \text{ нТл} \leq IL < -800 \text{ нТл}$; $IL \leq -1000 \text{ нТл}$.

данным цепочки PPN-NAL (черный цвет). Видно, что сезонная зависимость наблюдается при любом способе вычисления IL -индекса. Кроме того, осенне-весенние максимумы наблюдались как для всех событий (рис. 5а), так и для событий, разделенных на разные классы по интенсивности IL : $-400 \text{ нТл} \leq IL < -200 \text{ нТл}$; $-600 \text{ нТл} \leq IL < -400 \text{ нТл}$; $-800 \text{ нТл} \leq IL < -600 \text{ нТл}$; $-1000 \text{ нТл} \leq IL < -800 \text{ нТл}$; $IL \leq -1000 \text{ нТл}$. (рис. 5б–5е). При этом амплитуда сезонных вариаций составляла ~40 случаев, что соответствует ~25% от среднемесячного значения. Во время максимумов в период равноденствий наблюдалось около 200 суббурь, а во время летнего минимума – около 120 суббурь. Из рис. 5б–5е видно, что с ростом интенсивности западного аврорального электроджета полугодовой эффект становится более ярко выраженным: летний минимум исчезает, преобладают осенне-весенние максимумы.

Интересно сравнить сезонный ход для событий изолированных суббурь и для событий с сопутствующими положительными бухтами на станции Панагюриште. Распределение по месяцам нормированного числа событий для случаев с MPB

представлено на рис. 6 (формат рис. 6 подобен формату рис. 5). IL -индекс рассчитывался по данным двух цепочек станций: PPN-SOR (серый цвет) и PPN-NAL (черный цвет). Для обоих распределений хорошо видна сезонная зависимость, наличие осеннего и весеннего максимума, но амплитуда сезонных колебаний немного больше для событий, рассчитанных по цепочке PPN-SOR, чем по PPN-NAL. Кроме того, максимумы равноденствий находятся между 0.11 и 0.12, при этом летний минимум составляет около 0.045. Максимальные отклонения от среднегодового значения 0.0833, разница 0.115–0.08, составляет ~45%, что почти в два раза больше, чем получилось для распределения событий изолированных суббурь (рис. 5).

Из распределения по месяцам с помощью Фурье гармоник были выделены годовая и полугодовая вариации, результат представлен на рис. 7 для двух выборок событий, когда расчеты IL -индекса производились по цепочке PPN-NAL (рис. 7а) и PPN-SOR (рис. 7б). Сезонные вариации показаны сплошной жирной линией, выделенные из них годовая и полугодовая вариации – пунктир-

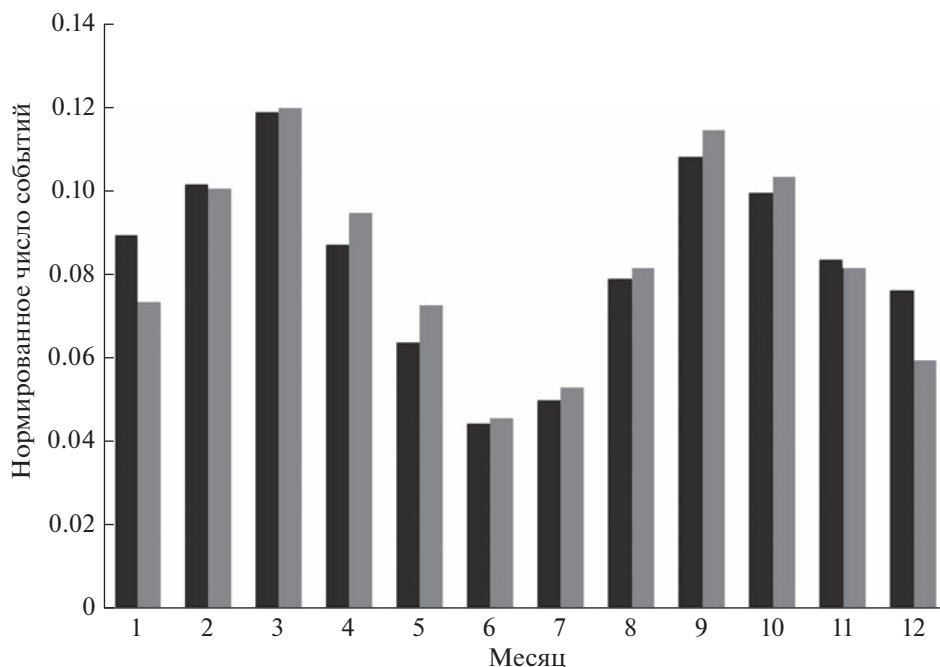


Рис. 6. Распределение по месяцам нормированного количества случаев IL -индекса во время событий с положительными бухтами (МРВ) в Панагюриште. Индекс IL по цепочке PPN-SOR — показан серыми столбиками, по цепочке PPN-NAL — черными столбиками. Формат рисунка подобен формату рис. 5.

ной и штрихпунктирной линиями, соответственно. Сумма годовой и полугодовой составляющих показана тонкой сплошной линией. Годовые и полугодовые вариации были выделены с помощью гармоник Фурье из месячного распределения (рис. 6) следующим образом:

$$\begin{aligned}
 RN(n) = & a_{an} \sin\left(\frac{2\pi n}{T}\right) + b_{an} \cos\left(\frac{2\pi n}{T}\right) + \\
 & + a_{san} \sin\left(\frac{2\pi n}{\frac{T}{2}}\right) + b_{san} \cos\left(\frac{2\pi n}{\frac{T}{2}}\right) + \varepsilon(n) \quad (5)
 \end{aligned}$$

для $n = 0, \dots, 11$.

Коэффициенты детерминации (R^2) составляют 0.952 и 0.975 для цепочек PPN-NAL и PPN-SOR, соответственно. С помощью критерия Стьюдента мы проверили значимость коэффициентов гармонического ряда Фурье. Оказалось, что для обеих групп событий (рис. 7а и рис. 7б) в годовой вариации значим только член с косинусом (cos), уровень значимости 0.05. Остаточные значения $\varepsilon(n)$ не показывают каких-либо периодических изменений и распределены случайным образом.

Из рис. 7 следует, что сумма годовых и полугодовых вариаций (тонкая линия) хорошо соответствуют исходному распределению по месяцам (жирная линия). Видно, что годовой ход имеет летний минимум и зимний максимум, причем вариации сильнее для цепочки PPN-NAL, что связа-

но, возможно, с большей освещенностью в летние месяцы на севере. Полугодовые вариации показывают максимумы во время равноденствий. Полугодовые вариации максимума равноденствия для цепочки PPN-SOR составляют около 0.30 и немного сильнее, чем вариации, наблюдаемые для цепочки PPN-NAL, где максимум равноденствия составляет около 0.25. Более детальный расчет показывает, что максимумы приходятся не точно на дни равноденствий, а наблюдаются 3 апреля/3 октября для цепочки PPN-NAL и 7 апреля/6 октября для цепочки PPN-SOR.

5. ДИСКУССИЯ

Для периода 2007–2020 г. получены распределения IL -индекса и кумулятивной функции распределения для выборки событий с $IL < -200$ нТл (IMAGE-PPN-NAL и IMAGE-PPN-SOR), а также проведены оценки появления экстремальных событий (рис. 3). Видно, что распределение IL -индекса содержит лишь несколько событий интенсивных суббурь $IL < -1500$ нТл. Это объясняется тем, что был выбран довольно узкий долготный интервал регистрации событий (меридиональные цепочки PPN-NAL и PPN-SOR) и ограниченный сектор по MLT (21–3 ч). Получилось, что за 14 лет только 5 событий с $IL < -1500$ нТл было зарегистрировано на цепочке PPN-SOR в интервале 18–24 UT, т.е. 0.35 событий в год. Эта величина несколько занижена, так как известно, что бывают

суббури с $IL < -2000$ – 2500 нТл, но целью работы было не показать общее распределение событий по интенсивности, а исследовать соотношение между суббуриями, наблюдавшимися в авроральной зоне, на меридиане IMAGE, и положительными бухтами в средних широтах, на станции Панагюриште.

Проанализировав события с МРВ и без них за 2007–2020 гг., мы получили, что событий без положительных бухт МРВ было в ~ 2 раза меньше, чем событий с МРВ (рис. 4). Кумулятивная функция (CDF) для событий без положительных бухт МРВ составляла $\sim 35\%$, т.е. $\sim 65\%$ событий сопровождалась среднеширотными положительными бухтами. Известно, что положительные бухты на средних широтах являются индикатором наличия токового клина суббури [McPherron et al., 1973; Керко et al., 2015], и, следовательно, можно утверждать, что в 65% случаях отобранные события являлись суббуриями. Из рис. 3 следует также, что с ростом интенсивности событий доля кумулятивной функции без положительных бухт МРВ резко уменьшается, а начиная примерно с $IL < -600$ нТл практически все события сопровождалось положительными бухтами, т.е. были суббуревыми возмущениями.

На наш взгляд, интересно сравнить полученные результаты с результатами, полученными по случаям, которые заведомо были суббуриями, т.е. по выборке изолированных суббурь [Ohtani and Gjerloev, 2020], которые наблюдались на том же меридиане IMAGE в период 2009–2019 гг., в ночном секторе (от 18 до 01 UT). Результат статистического исследования представлен на рис. 8. Показаны гистограммы IL -индекса, формат рис. 8 подобен формату рис. 3, расчеты по IS-PPN-SOR показаны серым цветом, по IS-PPN-NAL – черным цветом. Эти распределения также подходят для описания распределением Вейбулла, при этом распределение событий для цепочки IS-PPN-NAL ближе к экспоненциальному распределению, а для цепочки IS-PPN-SOR – ближе к распределению событий с сопровождающими положительными бухтами (МРВ). Разница в результатах по двум цепочкам станций, возможно, связана с тем, что в распределение IS-PPN-NAL дают вклад суббури, которые наблюдаются на очень высоких широтах, над Шпицбергенем, так называемые полярные суббури [Дэспирак и др., 2014]. И хотя было показано, что эти суббури также сопровождаются положительными бухтами, но эти бухты часто наблюдались на широтах выше станции Панагюриште [Дэспирак и др., 2022].

На рис. 8б представлены кумулятивные функции распределения событий для двух разных цепочек станций PPN-NAL и PPN-SOR. Отметим, что количество изолированных суббурь было примерно в два раза меньше, чем число событий,

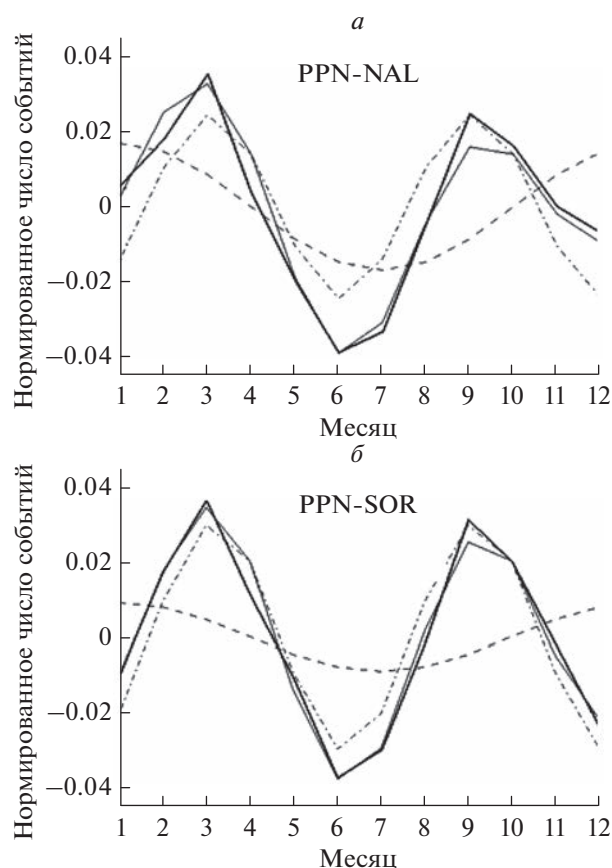


Рис. 7. Распределение по месяцам нормированного количества случаев IL -индекса (жирная черная линия) для разных цепочек: (а) PPN-SOR; (б) PPN-NAL; годовая (пунктирная) линия и полугодовая (пунктирно-точечная) линия. Линия аппроксимации сумм годовой и полугодовой составляющих (тонкая линия): (а) для месячных значений цепочки PPN-SOR и (б) для месячных значений цепочки PPN-NAL.

представленных на рис. 3. Надо отметить, что и в список изолированных суббурь Ohtani and Gjerloev [2020] включены не все события суббурь, так как одним из условий является начало суббури на относительно спокойном фоне ($SML > -100$ нТл для $-30 \leq T \leq -1$ мин). Это условие фактически ограничивает количество интенсивных суббурь, так как они обычно начинаются на фоне возмущенных условий ($SML < -100$ нТл).

Для двух наших выборок событий – изолированных суббурь (IS-PPN-NAL и IS-PPN-SOR) и событий с положительными бухтами (IMAGE-PPN-SOR и IMAGE-PPN-NAL) – были проанализированы сезонные вариации, из которых были выделены годовая и полугодовая вариации (рис. 5–7). Годовые вариации для цепочки PPN-NAL сильнее, чем для цепочки PPN-SOR из-за большей освещенности в летние месяцы на севере. Показано, что для IL -индекса также существует сезонный ход с максимумами около

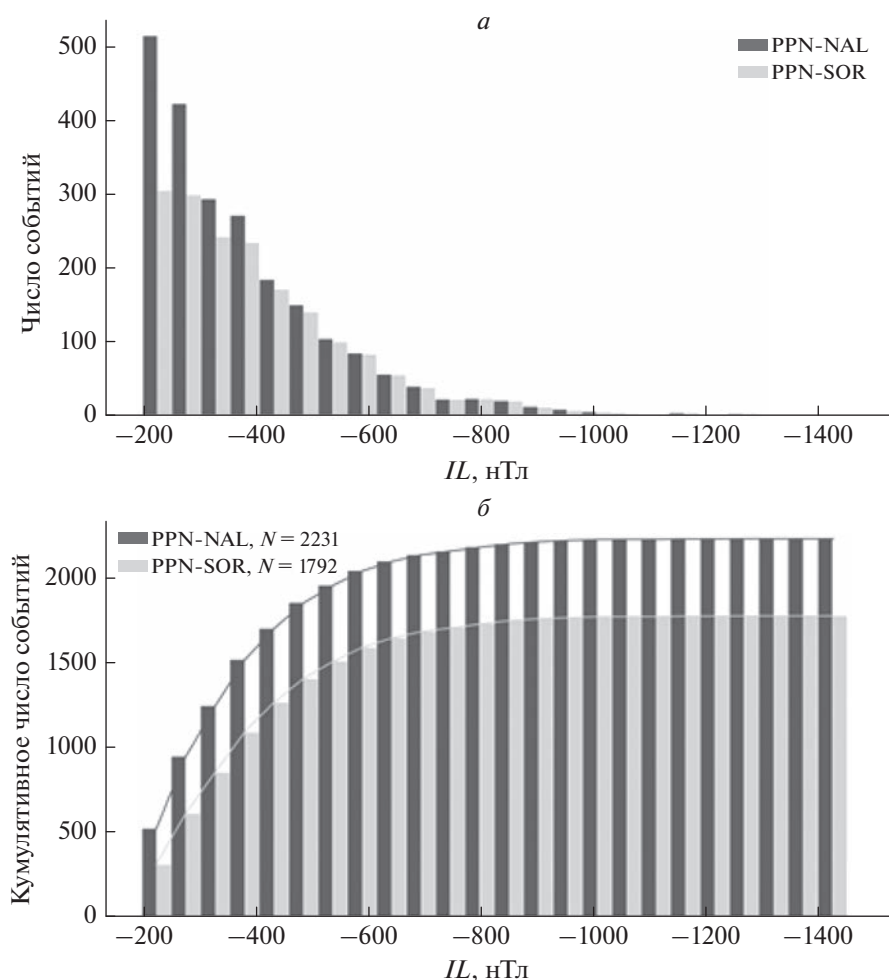


Рис. 8. Гистограммы IL -индекса (а) и кумулятивное число событий для изолированных суббурь (б), формат рисунка подобен формату рис. 3а и рис. 3б. IL -индекс рассчитывался по двум цепочкам IS-PPN-SOR (серый цвет) и IS-PPN-NAL (черный цвет).

дней равноденствия, подобно другим геомагнитным индексам [Sing et al., 2013]. Кроме того, с ростом IL этот эффект становится более выраженным, что согласуется с результатами работы Fu et al. [2021], где авторы показали, что полугодовые вариации являются более значительными для интенсивных суббурь. Сравнение результатов, полученных по двум разным выборкам событий (рис. 5, 6), приводит к выводу, что более сильная полугодовая вариация наблюдается для событий с сопутствующими положительными бухтами МРВ, чем для событий изолированных суббурь. При этом, появление максимумов полугодовых вариаций в апреле и октябре может быть связано с эффектом Рассела-МакФеррона.

Используемый в работе индекс IL в первую очередь характеризует уровень геомагнитной активности. Отметим, что большое значение имеет также скорость изменения геомагнитной активности. Оценка статистических распределений ва-

риабельности геомагнитного поля важны, например, для оценивания вероятностей опасных уровней ГИТ в ЛЭП [Воробьев и др., 2019; Tsurutani and Hajra, 2021; Дэспирак и др., 2022]. Это важный вопрос, который стоит исследовать более подробно в будущих работах.

6. ВЫВОДЫ

Статистический анализ геомагнитной активности по двум выборкам событий на меридиане IMAGE показал, что:

1) эмпирические распределения для событий IMAGE-PPN-NAL и IMAGE-PPN-SOR хорошо описываются экспоненциальными функциями, при этом распределения для цепочек PPN-NAL и PPN-SOR статистически неразличимы. Определена интенсивность потока событий, частота встречаемости событий с $IL < -1500$ нТл около 0.35 случаев/год.

2) эмпирические распределения для событий с сопутствующими положительными бухтами MPB на ст. Панагюриште (IMAGE-PPN-SOR) и эмпирические распределения для изолированных суббурь (IS-PPN-NAL и IS-PPN-SOR) описываются распределением Вейбулла, что свидетельствует о том, что это события из одинаковых статистических ансамблей.

3) в ~65% случаев IMAGE-PPN-NAL наблюдались события, сопровождающиеся среднеширотными положительными бухтами, с ростом интенсивности их доля увеличивалась, и начиная примерно с $IL < -600$ нТл практически все события сопровождались MPB, т.е. являлись суббуревыми возмущениями.

4) для обоих выборок событий выделяются годовая и полугодовая вариации. Полугодовая вариация имеет максимумы около дней равноденствия, что на наш взгляд, связано с эффектом Рассела–Макферрона. При этом для выборки IMAGE-PPN-SOR с MPB вариации сильнее, чем для изолированных суббурь.

5) годовые вариации имеют летний минимум и зимний максимум, причем для событий по цепочке PPN-NAL вариации сильнее, чем для цепочки PPN-SOR, возможно, из-за большей освещенности в летние месяцы на высоких широтах.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность создателям базы данных IMAGE (<http://space.fmi.fi/image/>), SuperMAG (<http://supermag.jhuapl.edu/>), INTERMAGNET (<https://intermagnet.github.io/>) за возможность их использования в работе. Мы также благодарим за возможность использования списка изолированных суббурь, полученного по методике Ohtani и Gjerloev [Ohtani and Gjerloev, 2020], индексов *SMU* и *SML* [Newell and Gjerloev, 2011b]; и сотрудничество с SuperMAG [Gjerloev, 2012]. Мы выражаем благодарность Институту геофизики, геодезии и географии Болгарской академии наук и коллективу сотрудников, обеспечивающих поддержку работы приборов обсерватории Панагюриште (Болгария), за возможность использования в работе данных обсерватории Панагюриште.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа Р. Вернера, В. Гиневой, А. Атанасова, Р. Божиловой, Л. Райковой и Д. Валева выполнена при поддержке проекта Национального научного фонда Болгарии (проект № КП-06-Русия/15). Работа И.В. Дэспирак, А.А. Любича и П.В. Сецко выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Национального научного фонда Болгарии (проект № 20-55-18003).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Божилова Р. Автоматизирана система за събиране на геофизични данни — приложение XLV // Сборник на “Национална конференция по въпроси на обучение по физика”, София, 6–9 Април 2017. С. 55–59. 2017.
- Воробьев А.В., Пилипенко В.А., Сахаров Я.А., Селиванов В.Н. Статистические взаимосвязи вариаций геомагнитного поля, аврорального электроджета и геоиндуцированных токов // Солнечно-земная физика. Т. 5. № 1. С. 48–58. 2019.
<https://doi.org/10.12737/szf-51201905>
- Дэспирак И.В., Любич А.А., Клейменова Н.Г. “Полярные” и “высокоширотные” суббури и условия в солнечном ветре // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 54. № 5. С. 619–626. 2014.
<https://doi.org/10.7868/S0016794014050046>
- Дэспирак И.В., Клейменова Н.Г., Громова Л.И., Грозов С.В., Малышева Л.М. Суперсуббури во время бурь 7–8 сентября 2017 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 60. № 3. С. 308–317. 2020.
<https://doi.org/10.31857/S0016794020030049>
- Дэспирак И.В., Сецко П.В., Сахаров Я.А., Любич А.А., Селиванов В.Н., Валева Д. Наблюдения геомагнитных индуцированных токов на Северо-Западе России: отдельные случаи // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 62. № 6. С. 721–733. 2022.
<https://doi.org/10.31857/S0016794022060037>
- Нусинов А.А., Руднева Н.М., Гинзбург Е.А., Дремухина Л.А. Сезонные вариации статистических распределений индексов геомагнитной активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 55. № 4. С. 511–516. 2015.
<https://doi.org/10.7868/S0016794015040100>
- Яновский Б.М. Земной магнетизм. Л.: Издательство Ленинградского университета, 1978. 592 с.
- Akasofu S.-I., Meng C.I. A study of polar magnetic substorms // J. Geophys. Res. V. 74. № 1. P. 293–313. 1969.
<https://doi.org/10.1029/JA074i001p00293>
- Bartels J. Terrestrial-magnetic activity and its relation to solar phenomena // Terr. Magn. Atmos. Electr. V. 37. № 1. P. 1–52. 1932.
<https://doi.org/10.1029/TE037i001p00001>
- Berthelier A. Influence of the polarity of the interplanetary magnetic field on the annual and the diurnal variations of magnetic activity // J. Geophys. Res.: Space Physics. V. 81. № 25. P. 4546–4552. 1976.
<https://doi.org/10.1029/JA081i025p04546>
- Boller B.R., Stolo H.L. Kelvin Helmholtz instability and the semiannual variation of geomagnetic activity // J. Geophys. Res. V. 75. № 31. P. 6073–6084. 1970.
<https://doi.org/10.1029/JA075i031p06073>
- Broun J.A. Observations in magnetism and meteorology made at Makerstoun in Scotland, in 1844. The Aurora Borealis // Trans. R. Soc. Edinburgh. V. 18. 401–402. 1848.
<https://doi.org/10.1017/S0080456800039077>
- Chu X. Configuration and generation of substorm current wedge, Los Angeles: University of California, Los Angeles, 2015. (A dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree Doctor of Philosophy in Geophysics and Space Physics).
- Cliver E.W., Kamide Y., Ling A.G. Mountains versus valleys: Semiannual variation of geomagnetic activity // J. Geophys.

- Res. V. 105. № A2. P. 2413–2424. 2000.
<https://doi.org/10.1029/1999JA900439>
- Coles S. An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. Springer, London. 2001.
- Cortie A.L. Sun-spots and terrestrial magnetic phenomena, 1898–1911: the cause of the annual variation in magnetic disturbances // Mon. Not. R. Astron. Soc. V. 73. № 1. P. 52–60. 1912.
<https://doi.org/10.1093/mnras/73.1.52>
- Davis T.N., Sugiura M., Auroral electrojet activity index AE and its universal time variations // J. Geophys. Res. V. 71. № 3. P. 785–801. 1966.
<https://doi.org/10.1029/JZ071i003p00785>
- Despirak I.V., Kleimenova N.G., Lubchich A.A., Malysheva L.M., Gromova L.I., Roldugin A.V., Kozelov B.V., Magnetic Substorms and Auroras at the Polar Latitudes of Spitsbergen: Events of December 17, 2012. Bull. Russian Acad. Sci. Physics. V. 86. № 3. P. 266–274. 2022.
<https://doi.org/10.3103/S1062873822030091>
- Echer E., Gonzalez W.D., Tsurutani B.T. Statistical studies of geomagnetic storms with peak $Dst \leq -50$ nT from 1957 to 2008 // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. V. 73. № 11–12. P. 1454–1459. 2011.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.04.021>
- Fu H., Yue C., Zong Q.-G., Zhou X.-Z., Fu S. Statistical characteristics of substorms with different intensity // J. Geophys. Res.: Space Physics. V. 126. № 8. 2021. e2021JA029318.
<https://doi.org/10.1029/2021JA029318>
- Gjerloev J.W. A global ground-based magnetometer initiative // EOS Trans. AGU. V. 90. № 27. P. 230–231. 2009.
<https://doi.org/10.1029/2009EO270002>
- Gjerloev J.W. The SuperMAG data processing technique // J. Geophys. Res. V. 117. № A9. A09213. 2012.
<https://doi.org/10.1029/2012JA017683>
- Gopalswamy N. Chapter 2 – Extreme Solar Eruptions and their Space Weather Consequences / Extreme Events in Geospace – Origins, Predictability, and Consequences, edited by Natalia Buzulukova, Elsevier. P. 37–63. 2018.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812700-1.00002-9>
- Grubbs F.E., Beck G. Extension of Sample Sizes and Percentage Points for Significance Tests of Outlying Observations // Technometrics. V. 14. № 4. P. 847–854. 1972.
<https://doi.org/10.2307/1267134>
- Guo J., Feng X., Pulkkinen T.I., Tanskanen E.I., Xu W., Lei J., Emery B.A. Auroral electrojets variations caused by recurrent high-speed solar wind streams during the extreme solar minimum of 2008 // J. Geophys. Res. V. 117. № A4. A04307. 2012.
<https://doi.org/10.1029/2011JA017458>
- Guo J., Liu H., Feng X., Pulkkinen T.I., Tanskanen E.L., Liu C., Zhong D., Wang Z. // MLT and seasonal dependence of auroral electrojets: IMAGE magnetometer network observations // J. Geophys. Res.: Space Physics. V. 119. № 4. P. 3179–3188. 2014.
<https://doi.org/10.1002/2014JA019843>
- Iijima T., Potemra T.A. Large-scale characteristics of field aligned currents associated with substorms // J. Geophys. Res. V. 83. № 2. P. 599–615. 1978.
<https://doi.org/10.1029/JA083iA02p00599>
- Kamide Y., Akasofu S.-I. The auroral electrojet and global auroral features // J. Geophys. Res., V. 80. № 25. P. 3585–3602. 1975.
<https://doi.org/10.1029/JA080i025p03585>
- Kepko L., McPherron R.L., Amm O., Apatenkov S., Baumjohann W., Birn J., Lester M., Nakamura R., Pulkkinen T.I., Sergeev V. Substorm Current Wedge Revisited // Space Sci. Rev. V. 190. P. 1–46. 2015.
<https://doi.org/10.1007/s11214-014-0124-9>
- Lockwood M., Owens M.J., Barnard L.A., Haines C., Scott C.J., McWilliams K.A., Coxon J.C. Semi-annual, annual and Universal Time variations in the magnetosphere and in geomagnetic activity: 1. Geomagnetic data // J. Space Weather Space Clim. V. 10. Art. 23. 2020.
<https://doi.org/10.1051/swsc/2020023>
- Love J.J., Rigler E.J., Pulkkinen A., Riley P. On the lognormality of historical magnetic storm intensity statistics: Implications for extreme-event probabilities // Geophys. Res. Lett. V. 42. № 16. P. 6544–6553. 2015.
<https://doi.org/10.1002/2015GL064842>
- Lyatsky W., Tan A. Latitudinal effect in semiannual variation of geomagnetic activity // J. Geophys. Res. V. 108. № A5. 1204. 2003.
<https://doi.org/10.1029/2002JA009467>
- Matzka J., Stolle C., Yamazaki Y., Bronkalla O., Morschhauser A. The geomagnetic Kp index and derived indices of geomagnetic activity // Space Weather. V. 19. № 5. e2020SW002641. 2021.
<https://doi.org/10.1029/2020SW002641>
- McIntosh D.H. On the annual variation of magnetic disturbances // Philos. Trans. R. Soc. London, Series A, Mathematical and Physical Sciences. V. 251. № 1001. P. 525–552, 1959.
<https://doi.org/10.1098/rsta.1959.0010>
- McPherron R.L. Growth phase of magnetospheric substorms. J. Geophys. Res. V. 75. № 28. P. 5592–5599. 1970.
<https://doi.org/10.1029/JA075i028p05592>
- McPherron R.L., Russell C.T., Aubry M.P. Satellite studies of magnetospheric substorms on August 15, 1968: 9. Phenomenological model for substorms, J. Geophys. Res. V. 78. № 16. P. 3131–3149. 1973.
<https://doi.org/10.1029/JA078i016p03131>
- McPherron R.L. The use of ground magnetograms to time the onset of magnetospheric substorms // J. Geomag. Geoelectr. V. 30. № 3. P. 149–163. 1978.
<https://doi.org/10.5636/jgg.30.149>
- McPherron L.R., Chu X. The Mid-Latitude Positive Bay and the MPB Index of Substorm Activity // Space Sci. Rev. V. 206. P. 91–122. 2017.
<https://doi.org/10.1007/s11214-016-0316-6>
- McPherron L.R., Chu X. The midlatitude positive bay index and the statistics of substorm occurrence // J. Geophys. Res.: Space Physics. V. 123. № 4. P. 2831–2850. 2018.
<https://doi.org/10.1002/2017JA024766>
- Mikhailov A.V., Depuev V.Kh., Leschinskaya T.Yu. Geomagnetic activity threshold for F2-layer negative storms onset: Seasonal dependence // International J. Geomagnetism and Aeronomy. V. 6. № 1. 2005.
<https://doi.org/10.1029/2005GI000098>
- Murayama T. Origin of the semiannual variation of geomagnetic Kp indices // J. Geophys. Res.: Space Physics. V. 79. № 1. P. 297–300. 1974.
<https://doi.org/10.1029/JA079i001p00297>

- Mursula K., Tanskanen E., Love J. Spring-fall asymmetry of substorm strength, geomagnetic activity and solar wind: Implications for semiannual variation and solar hemispheric asymmetry // *Geophys. Res. Lett.* V. 38. № 6. L06104. 2011.
<https://doi.org/10.1029/2011GL046751>
- Nakamura M., Yoneda A., Oda M., Tsubouchi K. Statistical analysis of extreme auroral electrojet indices // *Earth, Planets and Space*. V. 67. Art. 153. 2015.
<https://doi.org/10.1186/s40623-015-0321-0>
- Newell P.T., Gjerloev J.W. Evaluation of SuperMAG auroral electrojet indices as indicators of substorms and auroral power // *J. Geophys. Res.* V. 116. № A12. A12211. 2011a.
<https://doi.org/10.1029/2011JA016779>
- Newell P.T., Gjerloev J.W. Substorm and magnetosphere characteristic scales inferred from the SuperMAG auroral electrojet indices // *J. Geophys. Res.* V. 116. № A12. A12232. 2011b.
<https://doi.org/10.1029/2011JA016936>
- O'Brien P., McPherron R.L. Seasonal and diurnal variation of Dst dynamics // *J. Geophys. Res.* V. 107. № A11. 1341. 2002.
<https://doi.org/10.1029/2002JA009435>
- Ohtani S., Gjerloev J.W. Is the substorm current wedge an ensemble of wedgelets?: Revisit to midlatitude positive bays // *J. Geophys. Res.: Space Physics*. V. 125. № 9. e2020JA027902. 2020.
<https://doi.org/10.1029/2020JA027902>
- Rangarajan G.K., Iyemori T. Time variations of geomagnetic activity indices Kp and Ap: an update // *Ann. Geophysicae*. V. 15. № 10. P. 1271–1290. 1997.
<https://doi.org/10.1007/s00585-997-1271-z>
- Riley P. On the probability of occurrence of extreme space weather events // *Space Weather*. V. 10. № 2. S02012. 2012.
<https://doi.org/10.1029/2011SW000734>
- Russell C.T., McPherron R.L. Semiannual variation of geomagnetic activity // *J. Geophys. Res.* V. 78. № A1. P. 92–108. 1973.
<https://doi.org/10.1029/JA078i001p00092>
- Sabine E. On periodical laws discoverable in the mean effects of the larger magnetic disturbances – No. II // *Philos. Trans. R. Soc. London*. V. 142. P. 103–124, 1852.
<https://doi.org/10.1098/rstl.1852.0009>
- Sergeev V.A., Angelopoulos V., Kubyshkina M., Donovan E., Zhou X.-Z., Runov A., Singer H., McFadden J., Nakamura R. Substorm growth and expansion onset as observed with ideal ground-spacecraft THEMIS coverage // *J. Geophys. Res.* V. 116. A0012. 2011.
<https://doi.org/10.1029/2010JA015689>
- Singh A.K., Rawat R., Pathan B.M. On the UT and seasonal variations of the standard and SuperMAG auroral electrojet indices // *J. Geophys. Res.: Space Physics*. V. 118. № 8. P. 5059–5067. 2013.
<https://doi.org/10.1002/jgra.50488>
- Svalgaard L., Cliver E.W., Ling A.G. The semiannual variation of great geomagnetic storms // *Geophys. Res. Lett.* V. 29. № 16. P. 12-1–12-4. 2002.
<https://doi.org/10.1029/2001GL014145>
- Tanskanen E.I. A comprehensive high-throughput analysis of substorms observed by IMAGE magnetometer network: Years 1993–2003 examined // *J. Geophys. Res.* V. 114. № A5. A05204. 2009.
<https://doi.org/10.1029/2008JA013682>
- Thomson A.W.P., Dawson E.B., Reay S.J. Quantifying extreme behavior in geomagnetic activity // *Space Weather*. V. 9. № 10. S10001. 2011.
<https://doi.org/10.1029/2011SW000696>
- Tsubouchi K., Omura Y. Long-term occurrence probabilities of intense geomagnetic storm events // *Space Weather*. V. 5. № 12. S12003. 2007.
<https://doi.org/10.1029/2007SW000329>
- Tsurutani B.T., Hajra R. The interplanetary and Magnetospheric causes of Geomagnetically Induced Currents (GICs) > 10A in the Mäntsälä Finland Pipeline:1999 through 2019 // *J. Space Weather Clim.* V.11. A23. 2021.
<https://doi.org/10.1051/swsc/2021001>
- Viljanen A., Tanskanen E.I., Pulkkinen A. Relation between substorm characteristics and rapid temporal variations of the ground magnetic field // *Ann. Geophys.* V. 24. № 2. P. 725–733. 2006.
<https://doi.org/10.5194/angeo-24-725-2006>
- Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability // *J. Appl. Mech.-Trans. ASME*. V. 18. № 3. P. 293–297. 1951.
- Werner R., Guineva V., Atanasov A., Bojilova R., Raykova L., Valev D., Lubchich A., Despirak I. Calculation of the horizontal power perturbations of the Earth surface magnetic field / *Proceedings of the Thirteenth Workshop “Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere”*, Primorsko, Bulgaria, 13–17 September 2021. P. 159–164. 2021.
<https://doi.org/10.31401/WS.2021.proc>
- Yermolaev Y.I., Lodkina I.G., Nikolaeva N.S., Yermolaev M.Y. Occurrence rate of extreme magnetic storms, *J. Geophys. Res.: Space Physics*. V. 118. № 8. P. 4760–4765. 2013.
<https://doi.org/10.1002/jgra.50467>
- Yoshida A. Physical meaning of the equinoctial effect for semi-annual variation in geomagnetic activity // *Ann. Geophys.* V. 27. P. 1909–1914. 2009.
<https://doi.org/10.5194/angeo-27-1909-2009>