

УДК 523.72; 550.385.27

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЯЗИ МЕЖДУ АМПЛИТУДОЙ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ БУХТ НА СРЕДНИХ ШИРОТАХ, ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТЬЮ И ПАРАМЕТРАМИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

© 2025 г. А. А. Любич¹, *, И. В. Дэспира¹, **, Р. Вернер², ***

¹Полярный геофизический институт, Анадырь (Мурманская обл.), Россия

²Институт космических исследований и технологий Болгарской Академии Наук, Стара Загора, Болгария

*e-mail: lubchich@pgia.ru

**e-mail: despirak@gmail.com

***e-mail: rolwer52@yahoo.co.uk

Поступила в редакцию 03.03.2024 г.

После доработки 23.06.2024 г.

Принята к публикации 25.07.2024 г.

Во время взрывной фазы суббури наблюдается скачок сияний к полюсу (брейкап) и расширение авроральной выпуклости. Расширение сопровождается отрицательной магнитной бухтой под полярными сияниями и положительной магнитной бухтой на средних широтах. Величина отрицательной бухты характеризуется авроральным *AL*-индексом. Для характеристики положительной бухты ранее был предложен *MPB*-индекс (*Mid-latitude Positive Bay index*). В работе исследована статистическая связь *MPB*-индекса с геомагнитной активностью на разных широтах и с параметрами солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Показано, что все экстремально большие значения *MPB*-индекса (выше 10 000 нТл²) наблюдаются во время сильных геомагнитных бурь (когда *Dst*-индекс опускается ниже –100 нТл), все экстремально сильные геомагнитные бури (когда *Dst*-индекс опускается ниже –250 нТл) сопровождаются экстремально высокими значениями *MPB*-индекса. Статистически *MPB*-индекс растет с увеличением геомагнитной активности на любой широте. *MPB*-индекс, в среднем, растет с увеличением модуля межпланетного магнитного поля и любой из его компонент. Но для *Bz*-компоненты большие значения *MPB*-индекса наблюдаются при ее южной ориентации. Для плазменных параметров солнечного ветра *MPB*-индекс сильнее всего растет с ростом его скорости. Также сильна зависимость от динамического давления и от величины *E_y*-компоненты электрического поля солнечного ветра. Однако *MPB*-индекс слабо зависит от плотности и температуры солнечного ветра.

Ключевые слова: геомагнитные индексы, магнитные бури, солнечный ветер, межпланетное магнитное поле, статистический анализ

DOI: 10.31857/S0016794025010069, EDN: AEFWUR

1. ВВЕДЕНИЕ

Скачок сияний к полюсу (брейкап) и расширение авроральной выпуклости являются важными признаками магнитосферной суббури. Расширение авроральной выпуклости сопровождается развитием отрицательных магнитных бухт на авроральных широтах и положительных магнитных бухт на средних широтах. Появление магнитных бухт вызвано развитием токового клина суббури, возникающего из-за частичного разруше-

ния поперечного (утро-вечернего) тока ближнего хвоста магнитосферы, например, за счет пересечения силовых линий геомагнитного поля. В результате формируется крупномасштабная трехмерная токовая система, в которой участок разрушенного тока хвоста магнитосферы перенаправляется вдоль силовых линий геомагнитного поля в ионосферу, замыкается в авроральных широтах западным электроджетом и возвращается в магнитосферу в вечернем секторе в виде продольного тока, создаваемого высывающимися

ускоренными электронами. Очень интенсивные суббури, во время которых *SML*-индекс геомагнитной активности опускается ниже -2500 нТл, часто выделяются в отдельный класс – суперсуббури [Tsurutani et al., 2015; Hajra et al., 2016 и др.]. Во время суперсуббури может формироваться дополнительный токовый клин противоположного направления на вечерней стороне (например, [Fu et al., 2021; Zong et al., 2021; Дэспирак и др., 2022]).

Среднеширотная положительная магнитная бухта в *X*-компоненте магнитного поля на станциях в околополуночном секторе, связанная с развитием токового клина суббури, состоит из короткой, длительностью порядка 20 мин, фазы роста и обычно чуть более медленной фазы спада. В фиксированный момент времени пространственное распределение положительных вариаций в *X*-компоненте представляет собой профиль гауссовой формы, симметричный относительно центра токового клина. Пространственная вариация в *Y*-компоненте похожа на один цикл синусоидальной волны с максимумом в вечернем секторе, на долготе вытекающего тока, и минимумом в утреннем секторе, на долготе втекающего тока (детали показаны, например, на рис. 9 из работы McPherron et al. [1973]). Таким образом, положение экстремумов северной и восточной компонент магнитного поля может быть использовано для характеристики суббурового токового клина.

Используя это обстоятельство, для анализа проявлений суббуровой активности на средних широтах недавно, в 2015 году, был введен в обращение новый одноминутный геомагнитный *MPB*-индекс (*Mid-latitude Positive Bay index*). Методика его вычисления подробно описана в [Chu, 2015; McPherron and Chu, 2017, 2018]. Индекс характеризует мощность возмущений горизонтальной компоненты магнитного поля на среднеширотных станциях во время развития токового клина суббури. Он определяется суммой квадратов возмущений северной и восточной компонент магнитного поля.

Авторами индекса (McPherron and Chu) были предложены две отличающиеся в деталях методики расчета, что привело к созданию двух похожих, но все же немного разных, наборов значений *MPB*-индекса. Описание отличий в методиках расчета можно найти, например, в работе McPherron and Chu [2017]. Одно из отличий состоит в том, что первый набор (назовем его списком McPherron) получен по данным 35 станций с геомагнитной широтой λ_{mag} между -45° и 45° , тогда как второй набор (список Chu) составлен по данным 41 станции Северного и Южного полушарий с $20^\circ < |\lambda_{mag}| < 52^\circ$.

Первый список можно найти в дополнительной информации к интернет-версии статьи McPherron and Chu [2018]. Он включает одноминутные значения полной мощности горизонтальных вариаций магнитного поля, то есть $\Delta X^2 + \Delta Y^2$, за период с февраля 1980 г. по конец 2012 г. (до конца 1984 года данные являются эпизодическими, нерегулярными). Список Chu, в момент его представления, включал отдельно одноминутные вариации ΔX^2 (обозначим их как *MPB-X*), ΔY^2 (*MPB-Y*), а также их сумму с начала 1991 г. по конец 2019 г. Его и будем использовать в нашей работе. Поэтому опишем кратко алгоритм получения *MPB*-индекса по методике Chu. Сначала из исходных данных измерений магнитного поля на 41-ой станции удаляются вековые вариации и солнечно-суточные *Sq*-вариации. Первые удаляются с помощью линейного тренда, вторые – с помощью метода наложения эпох за 21 день. Затем удаляются оставшиеся низкочастотные вариации с помощью фильтра верхних частот с частотой среза на 12 часах. Далее оставляются только данные станций, находящихся в данный момент в ночном секторе, ± 5 ч от 23.5 ч местного времени. Эти данные возвращаются в квадрат и усредняются по всем “ночным” станциям. В итоге получаются значения *MPB-X* и *MPB-Y*. Их сумма дает полный *MPB*-индекс в данный момент времени.

Иногда представляет интерес анализ вариаций магнитного поля на конкретной магнитной станции на средних широтах. Такая возможность описана в [Werner et al., 2021], где была предложена усовершенствованная методика вычисления *MPB*-индекса. В частности, были учтены данные болгарской ст. Панагюриште (Panagjurishte (PAG), 42.5° N, 24.2° E; $\lambda_{mag} \approx 37^\circ$).

Отметим, что иногда анализируются вариации не самого *MPB*-индекса, а квадратного корня из него (например, [Sergeev et al., 2020; Tsyganenko et al., 2021]).

В работе проведен статистический анализ *MPB*-индекса, а также исследована его связь как с геомагнитной активностью на разных широтах, так и с параметрами солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного поля (ММП).

2. ДАННЫЕ

Для анализа взяты одноминутные значения *MPB*-индекса за период с 1991 по 2019 год. За этот же период были взяты одноминутные значения других геомагнитных индексов, характеризующих магнитную активность на разных широтах. Перечислим их, двигаясь от полюса к экватору.

— Для характеристики возмущенности в северной полярной шапке будем использовать $PC(N)$ -индекс [Troshichev and Andrezen, 1985; Troshichev et al., 1988; Трошичев, 2010]. Значения индекса доступны в базе данных OMNI на сайте (<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>). Как известно, PC -индекс вычисляется по данным одной станции, расположенной около геомагнитного полюса. В Северном полушарии, для индекса $PC(N)$, — это ст. Каанаак (Туле) (Qaanaaq (Thule)) (THL), 77.5° N, 290.8° E; $\lambda_{mag} \approx 86.7^\circ$), в южном полушарии, для $PC(S)$, — это станция Восток. PC -индекс пропорционален геоэффективному межпланетному электрическому полю и является индикатором количества энергии, поступающей в магнитосферу Земли [Troshichev and Andrezen, 1985; Troshichev et al., 1988; Трошичев, 2010].

— Возмущения в авроральной зоне характеризуются индексами семейства AE (AE, AL, AO, AU), определяемыми по данным 12-ти авроральных станций. Индексы AL и AU определяются максимальным для этих станций отрицательным и положительным отклонением H -составляющей геомагнитного поля от спокойного уровня и зависят от интенсивности западного и восточного тока аврорального электроджета. Индекс AE определяет суммарный размах отклонений H -компоненты геомагнитного поля, то есть, он равен сумме модулей AL - и AU -индексов. AO -индекс равен полусумме AL - и AU -индексов. Индексы размещены на сайте (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/index.html>).

— Индексы SML и SMU определяются аналогично AL и AU индексам, но по данным всех магнитных станций проекта SuperMAG с геомагнитными широтами от $+40$ до $+80^\circ$. Индексы доступны на сайте (<http://supermag.jhuapl.edu/indices/>). Они лучше описывают процессы в авроральном овале в сильно возмущенных условиях, например, во время магнитных бурь, когда авроральный овал может сильно отклоняться к экватору от своего положения в спокойных условиях. При таких отклонениях станции, используемые при вычислении индексов семейства AE , могут оказаться вне области аврорального овала; как следствие, AE -индекс перестанет отражать интенсивность электроджетов [Feldstein, 1992].

— Индексы $ASY-H$, $ASY-D$ и $SYM-H$, $SYM-D$ размещены на сайте (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/index.html>). Процедура вычисления и анализ индексов, например, за 1992 год, один из первых анализируемых в этой работе годов, подробно описаны в [Iyemori et al., 1994]. Используются данные девяти геомагнитных станций, расположенных на средних и низких широтах,

включая три станции, используемые для вычисления Dst -индекса. Ежемесячно индексы рассчитываются по шести станциям из девяти, в разные месяцы выбор шести станций может быть разным. $SYM-H$ является, по сути, усредненным отклонением H -компоненты геомагнитного поля от спокойного уровня на выбранных станциях с поправкой на их геомагнитные широты, аналогично процедуре вычисления Dst -индекса. $SYM-D$ вычисляется по усредненным отклонениям D -компоненты геомагнитного поля, но без внесения поправки на широты станций. Индексы $SYM-H$ и $SYM-D$ характеризуют долготно-симметричную часть кольцевого тока. Индексы $ASY-H$ и $ASY-D$ определяют диапазон между максимальными и минимальными значениями H - и D -компонент геомагнитного поля на шести станциях после вычитания из поля возмущений соответствующих симметричных частей и, таким образом, характеризуют долготно-асимметричную часть кольцевого тока. Будем относить $ASY-H$ и $ASY-D$ к среднеширотным индексам, поскольку при их вычислении используются в том числе данные среднеширотных станций. Wanliss and Showalter [2006] пришли к выводу, что, как правило, индекс $SYM-H$ мало отличается от низкоширотного Dst -индекса, и его можно использовать в качестве Dst -индекса с высоким (одноминутным) разрешением. На этом основании мы отнесем $SYM-H$ и $SYM-D$ к низкоширотным индексам.

— Среднечасовые значения Dst -индекса — с сайта (https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_final/index.html).

Одноминутные значения модуля ММП B_T и его компонент B_x , B_y , B_z (в системах GSE и GSM) и данные по СВ (величина скорости и ее компоненты, плотность, температура, динамическое давление, а также E_y -компоненты электрического поля и отношение плазменного давления к магнитному β) взяты из базы данных OMNI с сайта (<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Случаи наблюдения экстремально больших значений MPB -индекса

Большинство возрастаний MPB -индекса связаны с суббуровой активностью. Критерием определения момента суббури по вариациям MPB -индекса является превышение пиковым значением MPB -индекса 25 нТл 2 [McPherron and Chu, 2017, 2018]. Но иногда MPB -индекс достигает очень больших значений. Нами были отобраны все слу-

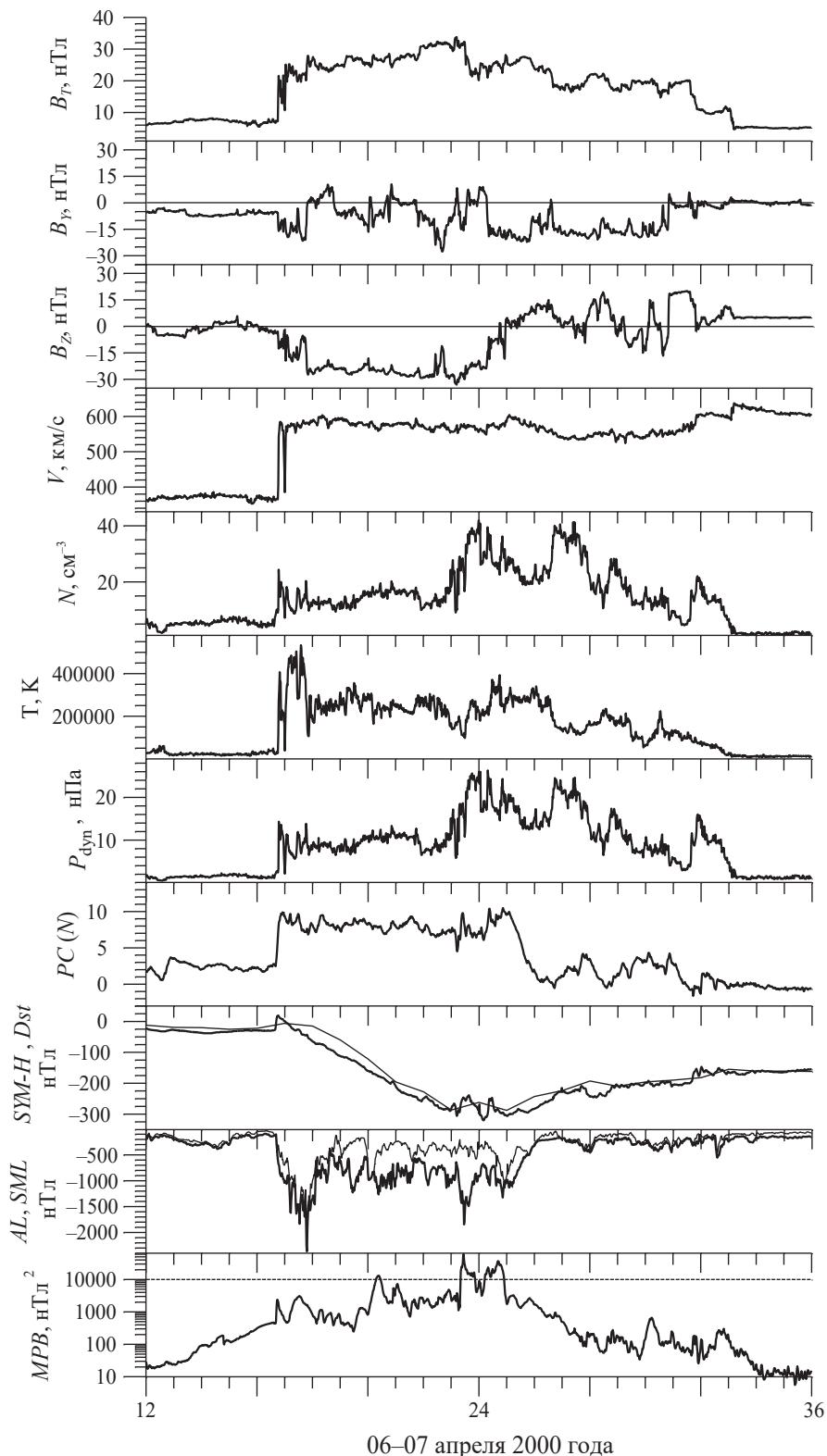


Рис. 1. Пример наблюдения экстремально больших значений MPB -индекса в течение суток начиная с 12:00 UT 06.04.2000 г. Сверху вниз показано поведение модуля $MM\pi$, By - и Bz -компонент $MM\pi$ в координатной системе GSM , скорости, плотности, температуры и динамического давления солнечного ветра, а также геомагнитных индексов $PC(N)$, $SYM-H$ и Dst , AL и SML , MPB .

чи превышения *MPB-X* 10 000 нТл² (то есть, когда вариация ΔX превышала 100 нТл).

Пример такого события представлен на рис. 1, где показаны значения модуля и двух компонент ММП, нескольких величин СВ и геомагнитных индексов за 24 ч начиная с 12:00 UT 06.04.2000 г. Видно, что *MPB*-индекс превышает 10 000 нТл² (это значение показано на графике пунктирной линией), достигая $\sim 60\,000$ нТл² во время главной фазы магнитной бури с $Dst_{min} = -288$ нТл. Часто магнитные бури делят на группы по величине Dst_{min} . К сильным (*intense*) магнитным бурям принято относить бури с $Dst_{min} < -100$ нТл [например, Gonzalez and Tsurutani, 1987]. Tsurutani et al. [1992] рассмотрели пять очень интенсивных (*great*) маг-

нитных бурь с Dst_{min} от -249 нТл и ниже. MacMahon and Gonzalez [1997] назвали такие очень интенсивные магнитные бури супербуями, используя критерий $Dst_{min} < -240$ нТл. Позже, в работах [Gonzalez et al., 1999, 2002], был уточнен численный критерий для очень интенсивных магнитных бурь: $Dst_{min} < -250$ нТл. Этим уточненным критерием мы и будем пользоваться в дальнейшем. Согласно этому критерию, экстремально высокие значения *MPB*-индекса, показанные на рис. 1, наблюдались во время супербури. На рис. 1 видно, что различия между индексами *SYM-H* и *Dst*, если не учитывать их разное разрешение по времени, незначительны, что оправдывает отнесение *SYM-H* к низкоширотным индексам. Также

Таблица 1. Список супербури, зарегистрированных с 1991 по 2019 гг. включительно, ранжированный по величине минимального значения *Dst*-индекса

Dst_{min} time (dd.mm.yyyy UT)	Dst_{min} (nT)	<i>SYM-H</i> _{min} /time (nT)/(dd.mm UT)	<i>SI⁺</i> /time (nT)/(dd.mm UT)	Interplanetary Case	<i>MPB</i> /time (nT ²)/(dd.mm UT)
20.11.2003 20:30	-422	-490/20.11 18:17	49/20.11 08:06	Sheath+MC <i>Bxz</i> -	$\sim 69\,000$ /20.11 17:03
31.03.2001 08:30	-387	-437/31.03 08:06	129/31.03 01:00	Sheath+MC <i>Bxz</i> c-	$\sim 26\,000$ /31.03 06:09 $\sim 21\,000$ /31.03 15:53
30.10.2003 22:30	-383	-432/30.10 22:55	76/30.10 20:08	Sheath	$\sim 46\,000$ /30.10 21:35
08.11.2004 06:30	-374	-394/08.11 05:55	92/07.11 19:20	Sheath+MC <i>Bxz</i> -	$\sim 27\,000$ /08.11 01:19 [<i>MPB X</i> $\sim 9\,300$]
09.11.1991 01:30	-354	-402/09.11 01:32	49/08.11 13:15	Unknown	$\sim 575\,000$ /08.11 22:20
30.10.2003 00:30	-353	-391/30.10 01:48	81/29.10 06:14	Sheath+MC <i>Bxz</i> -	$\sim 69\,000$ /29.10 19:56
16.07.2000 00:30	-301	-347/15.07 21:54	93/15.07 15:04	MC <i>Bxz</i> -	$\sim 23\,000$ /15.07 21:48
25.03.1991 00:30	-298	-337/25.03 03:41	118/24.03 03:55	Unknown	$\sim 105\,000$ /24.03 21:33 $\sim 24\,000$ /24.03 04:06
06.11.2001 00:30	-292	-320/06.11 04:06	88/06.11 01:54	PICME+sheath	$\sim 11\,000$ /06.11 02:05 [<i>MPB X</i> $\sim 6\,300$]
10.05.1992 14:30	-288	-363/10.05 14:15	81/09.05 20:02	Likely sheath+MC	$\sim 28\,000$ /10.05 18:29
07.04.2000 00:30	-288	-320/07.04 00:09	46/06.04 16:45	Sheath	$\sim 60\,000$ /06.04 23:27
11.04.2001 23:30	-271	-280/11.04 23:57	26/11.04 15:53	Sheath	$\sim 24\,000$ /11.04 21:37 $\sim 23\,000$ /12.04 00:16
10.11.2004 10:30	-263	-282/10.11 09:31	46/09.11 18:51	Sheath+MC <i>Bxz</i> +	$\sim 31\,000$ /09.11 20:32
29.10.1991 07:30	-254	-284/29.10 08:02	51/28.10 11:03	Sheath+MC <i>Bxz</i> +	$\sim 223\,000$ /28.10 16:06

Примечание. Первые пять столбцов взяты из табл. 1 в статье Meng et al. [2019]. В них последовательно время регистрации Dst_{min} (1); его величина (2); величина и время регистрации *SYM-H*_{min} (3); величина и время регистрации внезапного импульса *SI⁺* (4); структура в солнечном ветре, вызвавшая магнитную бурю (5). В последнем столбце величина и время регистрации экстремального значения *MPB*-индекса (6).

Таблица 2. Сильные бури, ранжированные по величине Dst_{min} , во время которых наблюдались экстремально большие значения MPB -индекса

Dst_{min} time (dd.mm.yyyy UT)	Dst_{min} (nT)	$SYM-H_{min}/time$ (nT)/(dd.mm UT)	$MPB/time$ (nT ²)/(dd.mm UT)
15.05.2005 08:30	-247	-305/15.05 08:20	~38 000/15.05 08:50
05.06.1991 19:30	-223	-238/05.06 16:56	~50 000/05.06 17:14
24.11.2001 16:30	-221	-234/24.11 12:37	~49 000/24.11 07:15
01.11.1991 23:30	-196	-200/01.11 19:37 20:22	~36 000/01.11 20:30
13.07.1991 15:30	-183	-238/13.07 15:42	~42 000/13.07 16:20
01.10.2002 16:30	-176	-154/01.10 12:53	~18 000/01.10 16:28
26.08.2018 06:30	-175	-206/26.08 07:11	~18 000/26.08 07:44
26.02.1992 22:00	-174	-167/26.02 22:31	~61 000/26.02 19:44
08.02.1992 16:30	-114	-126/08.02 15:18	~41 000/08.02 15:35

Примечание. В столбцах последовательно время регистрации Dst_{min} (1); его величина (2); величина и время регистрации $SYM-H_{min}$ (3); величина и время регистрации экстремального значения MPB -индекса (4).

видно, что в главную фазу бури разница между индексами SML и AL действительно может быть значительной — индексы могут различаться по величине в два раза и более.

Супербури являются редким явлением, с 1957 по 2018 гг. было зафиксировано всего 39 событий, список которых приведен в работе [Meng et al., 2019], из них только 14 наблюдались с 1991 года, когда есть данные по величине MPB -индекса в используемом нами списке Chu. Анализ показал, что во время всех 14 событий были наблюдения экстремально больших значений MPB -индекса. Это видно из табл. 1, в которой супербури, зарегистрированные с 1991 г., ранжированы по величине минимального значения Dst -индекса. Первые пять столбцов взяты из табл. 1 в статье Meng et al. [2019]. В последнем столбце приведены величина и время регистрации экстремально-го значения MPB -индекса.

Отметим, что во время двух бурь — 08.11.2004 г. и 06.11.2001 г. — $MPB-X$ оказался ниже заданного порогового значения, тем не менее полный MPB -индекс превышал 10 000 нТл².

Как правило максимальные значения MPB -индекса регистрировались недалеко от момента минимума Dst , средняя разница по времени между этими событиями оказалась ~3 ч. Но в двух последних супербурях (10.11.2004 г. и 29.10.1991 г.) момент максимума MPB -индекса

оказался ближе к моменту наблюдения внезапного импульса SI^+ .

Оставшиеся события с экстремально большими значениями MPB -индекса ($MPB-X > 10 000$ нТл²) были во время сильных магнитных бурь ($Dst_{min} < -100$ нТл). Соответствующие результаты приведены в табл. 2. Так как Dst -индекс имеет часовое разрешение, время во втором столбце оказывается кратным 30 мин — середине часа или, для бури 26.02.1992 г., середине двухчасового интервала с минимальным значением Dst -индекса. Первую в таблице бурю с $Dst_{min} = -247$ нТл иногда также относят к супербурам (например, [Gonzalez et al., 2011]). В большинстве случаев экстремальные значения MPB -индекса наблюдались вблизи момента регистрации минимального значения индекса $SYM-H$.

Отметим, что еще девять супербуров были зарегистрированы с 1980 по 1990 гг., когда есть данные по MPB -индексу из первого списка [McPherron and Chu, 2018]. Во время всех этих супербуров также регистрировались аномально высокие значения MPB -индекса (>10 000 нТл²).

3.2. Статистическая связь MPB -индекса с геомагнитными индексами

Были взяты все одноминутные данные по MPB -индексу за весь анализируемый интервал с 1991 по 2019 года, при этом дополнительный

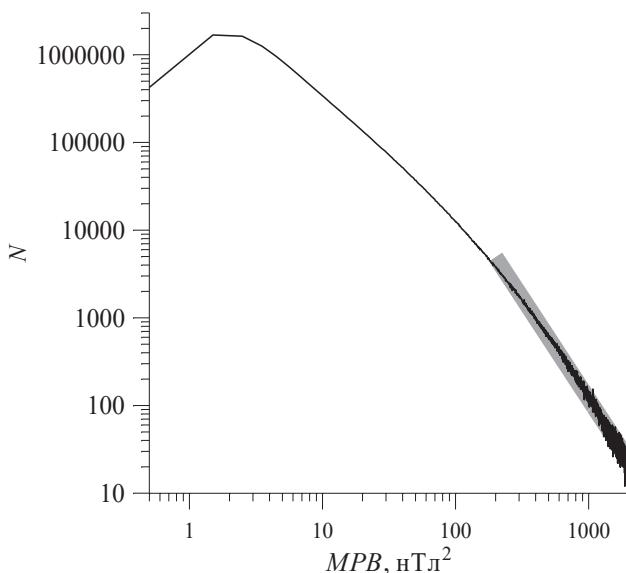


Рис. 2. Распределение MPB -индекса по значениям, построенное в двойном логарифмическом масштабе. Шаг по горизонтальной оси – 1 нТл^2 . Широкой серой линией показана линейная аппроксимация хвоста распределения (выше 200 нТл^2) в билогарифмической системе координат.

анализ, сопровождались ли наблюдаемые вариации развитием суббури или нет, не проводился.

Распределение MPB -индекса по значениям показано на рис. 2. Хвост распределения в двойном логарифмическом масштабе хорошо аппроксимируется прямой линией с отрицательным наклоном ~ -2.3 (широкая серая линия на графике), то есть имеет степенной вид: $N \approx b \times MPB^{-2.3}$. График построен с шагом по значениям MPB -индекса 1 нТл^2 , в том числе хорошо описывающим область малых значений индекса, до суббуревого порогово-

го значения 25 нТл^2 . График с шагом в 100 нТл^2 , описывающий область выше порогового значения, приведен в [Любич и др., 2023]. Он хорошо описывается степенным законом во всей области значений с близким показателем степени: -2.5 .

Такое степенное распределение можно рассматривать как частный случай распределения Парето (например, [Arnold, 2015]). Степенные распределения спадают медленнее экспоненциальных, в силу чего часто используются для анализа распределения экстремальных значений. Например, [Tsubouchi and Omura, 2007] использовали распределение Парето для анализа вероятности возникновения сильных магнитных бурь. Они показали, что распределение бурь по интенсивности становится степенным при $Dst < -280 \text{ нТл}$. Это пороговое значение близко к критерию супербури, что подтверждает статистическую обоснованность введения этого отдельного класса бурь. [Nakamura et al., 2015] с помощью распределения Парето анализировали распределение AL -, AU - и AE -индексов и пришли к выводу, что должны существовать предельные значения индексов: $AL \sim -4200 \text{ нТл}$ и $AU \sim 2000 \text{ нТл}$, то есть в западном и восточном электроджете ток должен иметь предельное значение. Они анализировали период с 1996 г. по 2012 г. В нашей работе рассматривается интервал 1991–2019 гг. Самое низкое значение AL -индекса за наш интервал оказалось равно -4141 нТл и пришлось на главную фазу самой мощной магнитной бури (20.11.2003, $Dst_{min} = -422 \text{ нТл}$).

Примером другого типа распределений, используемых, в том числе, в теории экстремальных значений, является распределение Вейбулла [Weibull, 1951; Coles, 2001]. Вернер и др. [2023] показали, что распределение числа событий с положительной бухтой на средних широтах

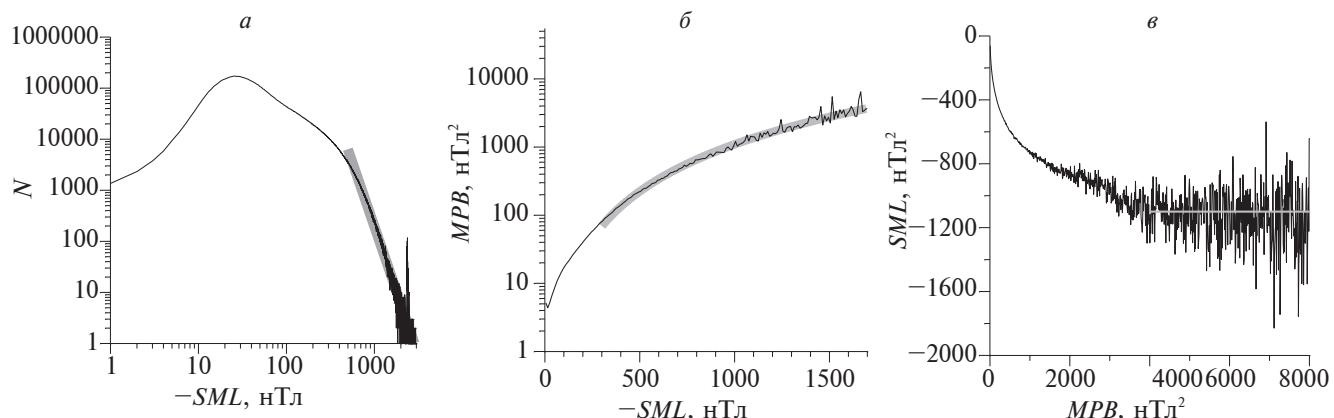


Рис. 3. Распределение $-SML$ -индекса по значениям в двойном логарифмическом масштабе (а), линии регрессии $MPB(SML)$ (б) и $SML(MPB)$ (в). Серыми линиями показаны аппроксимационные зависимости.

в зависимости от локального *AL*-индекса, определяемого по выбранным станциям сети магнитометров IMAGE (*International Monitor for Auroral Geomagnetic Effects*) (*IL*-индекс – IMAGE *electrojet Lower index*), хорошо описываются распределением Вейбулла. В частности, была оценена повторяемость событий с заданными экстремальными значениями *IL*-индекса.

Мы проанализировали статистическую связь *MPB*-индекса с другими одноминутными геомагнитными индексами. Для этого были построены линии регрессии *MPB*-индекса относительно упомянутых в Разделе 2 индексов. Зависимость какой-либо величины Y от величины X проявляется в изменении средних значений Y при изменении X . Для определения этой зависимости массив X разбивался на равномерные отрезки X_i , и на каждом отрезке вычислялось среднее значение \bar{Y} . Аналогично можно определить и зависимость X от Y . Как известно, если прямая функциональная связь отсутствует, то зависимости $Y(X)$ и $X(Y)$ не будут совпадать.

Связь *MPB*-индекса с индексом *SML* показывает рис. 3. На рис. 3 a показано распределение индекса *SML* по значениям. По аналогии с рис. 2 график построен в двойном логарифмическом

масштабе, поэтому был взят модуль *SML*. Хвост распределения в двойном логарифмическом масштабе аппроксимирован прямой линией с наклоном ~ -5.2 (широкая серая полоса на графике). Как видно из рис. 3 b , *MPB*-индекс монотонно растет с увеличением авроральной активности, индикатором которой является индекс *SML*. Зависимость *MPB* от модуля *SML* близка к степенной – аппроксимация показана на рис. 3 b для значений $SML < -300$ нТл, показатель степени ~ 2.3 . Обратная зависимость, показанная на рис. 3 c , имеет другой вид: *SML*-индекс сначала уменьшается (растет по модулю) с ростом *MPB*, затем, при достижении $MPB \sim 4000$ нТл 2 , выходит на горизонтальную асимптоту, равную примерно -1100 нТл (горизонтальный отрезок на графике).

Рис. 4 демонстрирует статистическую зависимость *MPB*-индекса от геомагнитных индексов, характеризующих возмущения в полярной шапке (рис. 4 a , *PC(N)*-индекс), на средних (рис. 4 b , индекс *ASY-H*) и низких (рис. 4 c , индекс *SYM-H*) широтах. *MPB*-индекс сильнее зависит от положительных величин *PC(N)*-индекса, монотонно увеличиваясь с их ростом. При $PC(N) > 2$ возрастание близко к степенному с показателем степени немногим выше двойки (2.35) (показано серой по-

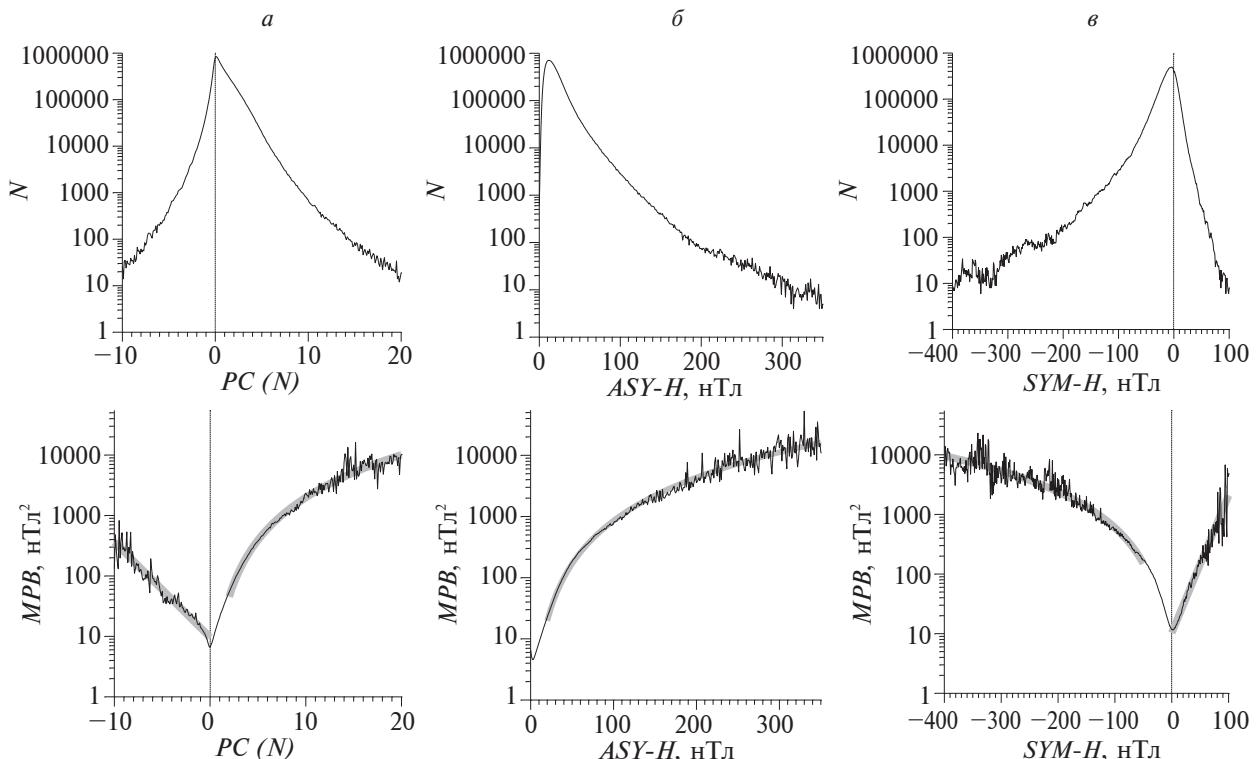


Рис. 4. Распределение индексов по значениям (вверху) и зависимость от них индекса *MPB* (внизу). Слева (a) для индекса *PC(N)*, в центре (b) для индекса *ASY-H* и справа (c) для индекса *SYM-H*. Широкими серыми линиями показаны аппроксимационные зависимости.

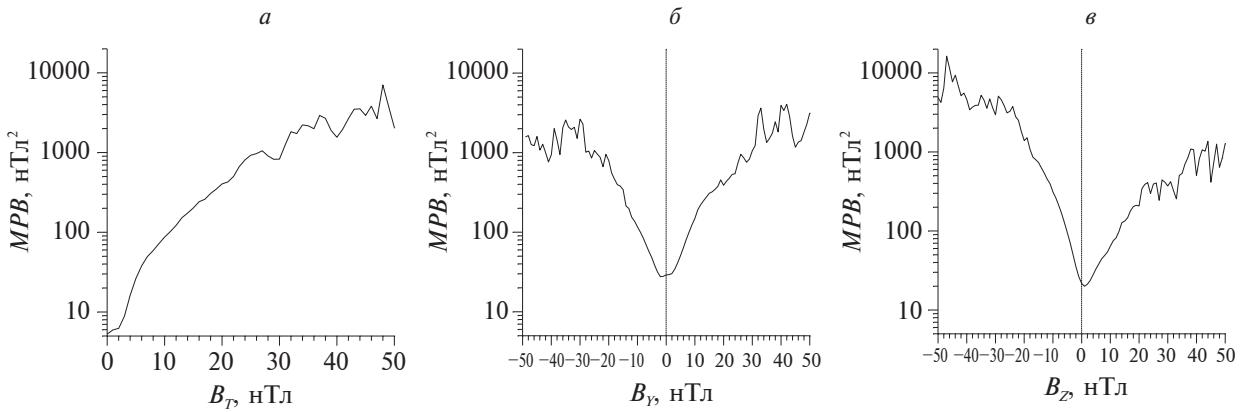


Рис. 5. Зависимость MPB -индекса от модуля ММП (а) и от B_y (б) и B_z (в) компонент ММП в координатной системе *GSM*.

лосой на правой части рис. 4а). Как известно, положительный $PC(N)$ -индекс характеризует воздействие геоэффективного межпланетного электрического поля; суббури и магнитные бури начинаются, когда PC -индекс превышает пороговое значение ~ 2 мВ/м [Трошичев, 2010]. А отрицательные значения PC -индекса связаны с воздействием на магнитосферу северной компоненты ММП. В этой области рост MPB -индекса близок к экспоненциальному (серая широкая прямая в левой части рис. 4а, для $PC(N) < 0$). MPB -индекс монотонно растет с ростом индекса $ASY-H$, при $ASY-H > 20$ нТл зависимость является степенной (показана серой линией на рис. 4б), причем показатель степени оказался таким же, как при $PC(N) > 2$. MPB -индекс монотонно растет и с ростом модуля индекса $SYM-H$, сильнее зависит от его отрицательных значений. При $SYM-H < -50$ нТл рост является степенным, квадратичным, то есть $|SYM - H| \sim \sqrt{MPB}$. При положи-

тельных значениях рост MPB -индекса близок к экспоненциальному. Обе зависимости показаны серыми линиями на рис. 4в.

3.3. Корреляция MPB -индекса с параметрами солнечного ветра и межпланетного магнитного поля

Для анализа будем использовать минутные данные из базы OMNI: магнитуда ММП и величина его компонент в двух декартовых системах координат – *GSE* и *GSM*, величина и направление скорости СВ, его плотность, температура и динамическое давление, а также геоэффективная компонента электрического поля и параметр β , равный отношению теплового давления плазмы к магнитному давлению.

Зависимость MPB -индекса от характеристик межпланетного магнитного поля показана на рис. 5. Как видно из рис. 5а, MPB -индекс моно-

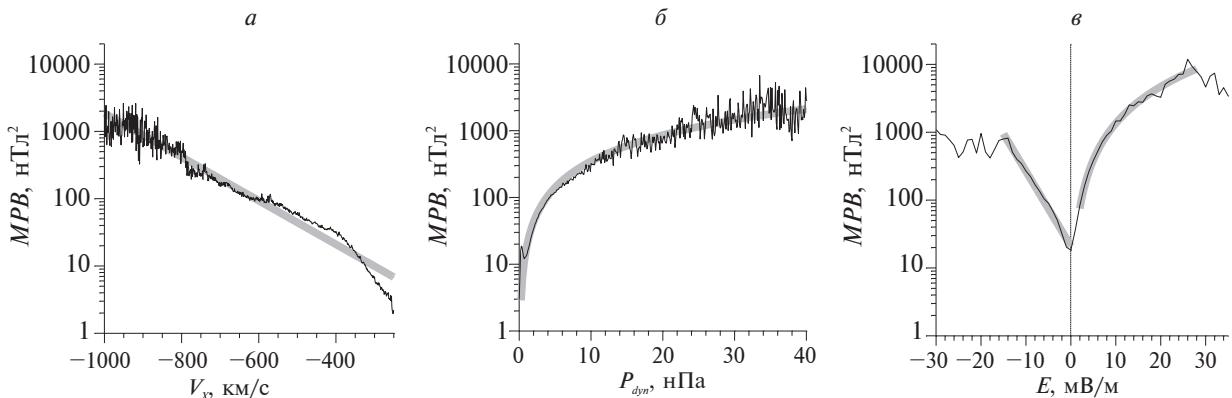


Рис. 6. Зависимость MPB -индекса: (а) от V_x -компоненты скорости СВ, (б) от динамического давления СВ и (в) от геоэффективной компоненты электрического поля E_{YGS} солнечного ветра. Серыми линиями показаны аппроксимационные зависимости.

тонно растет с ростом модуля ММП B_T , приближаясь к экстремальным значениям при очень больших значениях B_T . Линия регрессии по B_U -компоненте ММП слабо зависит от знака компоненты, то есть график почти симметричен относительно нулевого значения B_U (рис. 5б). MPB -индекс растет с увеличением модуля B_Z -компоненты ММП (рис. 5в), но он намного выше при отрицательных значениях B_Z – например, MPB в ~ 10 раз больше при $B_Z = -30$ нТл, чем при $B_Z = +30$ нТл. Рисунок 5 построен в GSM координатной системе. Соответствующие зависимости для компонент ММП в системе GSE приведены в [Любич и др., 2023].

Наиболее влияющими на MPB -индекс плазменными параметрами солнечного ветра являются его скорость V (и радиальная компонента V_x), а также динамическое давление P_{dyn} . Зависимость MPB -индекса от V_x близка к экспоненциальной (аппроксимация показана на рис. 6а серой линией). При изменении скорости в четыре раза, от 250 до 1000 км/с, MPB -индекс меняется почти от нуля до $\sim 2\,000$ нТл². Зависимость MPB -индекса от динамического давления солнечного ветра для значений $P_{dyn} \leq 40$ нПа близка к степенной, с показателем степени 1.3 (серая линия на рис. 6б). MPB -индекс меняется примерно в тех же пределах, что и на рис. 6а. MPB -индекс растет почти линейно с ростом плотности солнечного ветра, но диапазон изменений индекса относительно не большой – от ~ 30 до ~ 300 нТл², поэтому зависимость MPB -индекса от плотности СВ можно считать слабой. В силу этого при очень больших значениях динамического давления СВ ($P_{dyn} > 40$ нПа), наблюдаемых обычно при высокой плотности и не очень высокой скорости солнечного ветра, зависимость MPB -индекса от P_{dyn} достигает насыщения ($MPB \sim 2\,000$ нТл²) или даже начинается небольшое уменьшение значений MPB -индекса при дальнейшем росте динамического давления солнечного ветра. Однако, этот результат является статистически недостоверным ввиду малого числа таких экстремальных событий. При температуре СВ до 10 000 К имеем $MPB \approx 40$ нТл², затем значение MPB уменьшается почти в два раза, достигая своего минимального значения при $T \approx 14\,000$ К, а затем начинает монотонно, почти линейно, расти, достигая 700 нТл² при температуре миллион градусов Кельвина. MPB -индекс сильно зависит от геоэффективной компоненты электрического поля солнечного ветра ($E_{Y,GSM}$). Зависимость MPB -индекса от $E_{Y,GSM}$ (рис. 6в) подобна зависимости от $PC(N)$ -индекса (рис. 4а). По аналогии с рис. 4а в левой части рис. 6в, для $E_{Y,GSM}$ от -15 мВ/м до 0, показана экспоненциальная аппроксимация, а в правой, для $E_{Y,GSM}$ от 2 до 30 мВ/м – степенная. MPB -индекс практически не зависит от величины плазменной β .

4. ОБСУЖДЕНИЕ

В разделе 3.1. было показано, что все случаи наблюдения экстремально больших значений MPB -индекса были во время развития сильных (-250 нТл $< Dst_{min} \leq -100$ нТл) и очень сильных ($Dst_{min} \leq -250$ нТл) магнитных бурь (супербуль). Во время магнитных бурь происходит расширение и смещение овала полярных сияний к экватору. В это время средние широты, где расположены магнитные станции, используемые для вычисления MPB -индекса, по своим свойствам становятся авроральными или близкими к ним, что и объясняет обнаруженную зависимость.

Во время двух сильных магнитных бурь, приведенных в табл. 2 (01.10.2002 г. и 26.02.1992 г.), даже минимальные одноминутные значения индекса $SYM-H$ оказывались больше среднечасового значения Dst_{min} . Можно предположить, что это связано с различиями в списке используемых станций, в методике определения базовых линий и так далее. Сопоставление Dst и $SYM-H$ индексов проводится, например, в [Wanliss and Showalter, 2006].

Найденная в разделе 3.2. корреляционная связь MPB -индекса, введенного для анализа проявлений суббуровой активности на средних широтах, с возрастанием отклонения от спокойного уровня других геомагнитных индексов может быть объяснена следующим образом. Размеры овала полярных сияний зависят от магнитной активности. В спокойных условиях он похож на кольцо шириной $\sim 2^\circ$. При увеличении магнитной активности размеры овала увеличиваются, причем наиболее значительно это наблюдается на ночной стороне, где расширение идет как к полюсу, так и к экватору. При больших возмущениях ширина овала может превышать 10° [Старков, 2000], что может оказать влияние на магнитные измерения на разных широтах. Были определены линии регрессии индексов $PC(N)$, AL , \sqrt{MPB} , $ASY-H$ и $SYM-H$ по отношению к SML -индексу. Полученные зависимости оказались близки к линейным. Для корня из MPB имеем: $\sqrt{MPB} \approx -0.029 \times SML - 1.09$, для остальных индексов соответствующие выражения приведены в [Любич и др., 2023]. Коэффициент корреляции R между \sqrt{MPB} и SML равен -0.79 . Отметим, что модуль коэффициента корреляции максимальен между индексами AL и SML ($R \approx 0.95$), а минимальен – между индексами $SYM-H$ и SML ($R \approx 0.60$). Чем ближе модуль коэффициента корреляции к единице, тем ближе

зависимость к линейной. С этим результатом, близостью зависимостей к линейным, согласуется полученная выше степенная, почти квадратичная, аппроксимационная зависимость индекса *MPB* от индексов *PC(N) > 2* (показатель степени ~ 2.4), *SML* (2.3), *ASY-H* (2.3) и *SYM-H* (2.0). Разница в динамике индексов *ASY-H* и *SYM-H* во время магнитных бурь обсуждается в [Дремухина и др., 2020].

Экстремально большие значения межпланетного магнитного поля, как правило, связаны с крупномасштабными геоэффективными структурами солнечного ветра — например, с магнитными облаками или, как в примере на рис. 1, с распространением по невозмущенному солнечному ветру коронального выброса массы. Воздействие таких структур на магнитосферу Земли может вызвать развитие геомагнитных бурь, которые, в свою очередь, могут вызвать появление очень больших значений *MPB*-индекса (см. Раздел 3.1.).

Более слабую (степенную) зависимость *MPB*-индекса от динамического давления солнечного ветра (рис. 6б) по сравнению с экспоненциальной зависимостью от его скорости (рис. 6а), несмотря на пропорциональность динамического давления квадрату скорости СВ, можно объяснить тем, что статистически величина динамического давления солнечного ветра слабо растет с увеличением его скорости. При высокой скорости солнечного ветра он, как правило, имеет низкую плотность. Для периода минимума 11-летнего цикла солнечной активности слабая зависимость динамического давления от скорости солнечного ветра была показана, например, в работе Любич и др. [2004].

5. ВЫВОДЫ

Проанализирована связь среднеширотного индекса *MPB* (*Mid-latitude Positive Bays*) с геомагнитной активностью и параметрами солнечного ветра. Получены следующие результаты:

— Все экстремально большие значения *MPB*-индекса наблюдаются во время сильных и очень сильных ($Dst_{min} < -100$ нТл) геомагнитных бурь. Все экстремально сильные ($Dst_{min} < -250$ нТл) геомагнитные бури (супербури) сопровождаются экстремально высокими значениями *MPB*-индекса.

— *MPB*-индекс статистически возрастает с увеличением геомагнитной активности на любой широте, поскольку существует корреляция между геомагнитной активностью на разных широтах.

— *MPB*-индекс статистически возрастает с ростом как магнитуды межпланетного магнитного

поля, так и модуля любой из его компонент. Для B_z -компоненты ММП сильнее является зависимость от ее южной составляющей.

— Сильнее проявляется зависимость *MPB*-индекса от скорости солнечного ветра. Также сильна зависимость от динамического давления и от величины геоэффективной компоненты электрического поля СВ. Зависимость *MPB*-индекса от плотности и температуры солнечного ветра является слабой.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность создателям баз данных IMAGE (<http://space.fmi.fi/image/>), SuperMAG (<http://supermag.jhuapl.edu/>), INTERMAGNET (<https://intermagnet.github.io/>) за возможность их использования в работе. Мы благодарны коллективам, создавшим и поддерживающим работу баз данных World Data Center for Geomagnetism, Kyoto (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>) и OMNI (<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>) и обеспечивающим свободный доступ к данным. Мы также благодарим за возможность использования индексов *SMU* и *SML*.

Авторы выражают признательность Xiangning Chu за любезно предоставленную возможность использовать значения *MPB*-индекса.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа Дэспирац Ирины Вадимовны и Любича Андриса Алексеевича выполнена в рамках Государственного задания ПГИ по теме «Динамические процессы в системе “солнечный ветер – магнитосфера – ионосфера” и их влияние на высокоширотную ионосферу» (FMES-2022-002).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

— Werner R., Гинева В., Дэспирац И.В., Любич А.А., Сецко П.В., Атанасов А., Божилова Р., Райкова Л., Валев Д. Статистические исследования авроральной активности и возмущений геомагнитного поля на средних широтах // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 63. № 4. С. 520–533. 2023. <https://doi.org/10.31857/S0016794022600727>

— Werner R., Guineva V., Despirak I.V., Lubchich A.A., Setsko P.V., Atanassov A., Bojilova R., Raykova L., Valev D. Statistical Studies of Auroral Activity and Perturbations of the Geomagnetic Field at Middle Latitudes // Geomagnetism and Aeronomy. V. 63. № 4. P. 473–485. 2023. <https://doi.org/10.1134/S0016793223600303>

— Дремухина Л.А., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г. Различия в динамике асимметричной части магнитного возмущения в периоды магнитных бурь, индуцированных разными межпланетными источниками // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 60. № 6. С. 727–739. 2020. <https://doi.org/10.31857/S0016794020060036>

- Dremukhina L.A., Yermolaev Y.I., Lodkina I.G. Differences in the dynamics of the asymmetrical part of the magnetic disturbance during the periods of magnetic storms induced by different interplanetary sources // *Geomagnetism and Aeronomy*. V. 60. № 6. P. 714–726. 2020. <https://doi.org/10.1134/S0016793220060031>
- Дэспирак И.В., Клейменова Н.Г., Любич А.А., Сецко П.В., Громова Л.И., Вернер Р. Глобальное развитие суперсуббури 28 мая 2011 года // *Геомагнетизм и аэрономия*. Т. 62. № 3. С. 325–335. 2022. doi 10.31857/S0016794022030063
- Despirak I.V., Kleimenova N.G., Lyubchich A.A., Setsko P.V., Gromova L.I., Werner R. Global Development of the Supersubstorm of May 28, 2011 // *Geomagnetism and Aeronomy*. V. 62. № 3. P. 199–208. 2022. <https://doi.org/10.1134/S001679322030069>
- Любич А.А., Дэспирак И.В., Вернер Р. Зависимость MPB-индекса от геомагнитной активности и характеристики солнечного ветра // Proc. XLVI Annual Seminar. Apatity. Р. 42–47. 2023. <https://doi.org/10.51981/2588-0039.2023.46.009>
- Любич А.А., Дэспирак И.В., Яхнин А.Г. Связь давления и скорости солнечного ветра в минимуме одиннадцатилетнего цикла // *Геомагнетизм и аэрономия*. Т. 44. № 2. С. 143–148. 2004.
- Lyubchich A.A., Despirak I.V., Yakhnin A.G. Correlation between the solar wind pressure and velocity at a minimum of the 11-year cycle // *Geomagnetism and Aeronomy*. V. 44. № 2. P. 143–148. 2004.
- Старков Г.В. Планетарная динамика аврорального свечения / *Физика околоземного космического пространства*. Глава 3, 4. С. 409–499. Апатиты: изд. КНЦ РАН, 706 с. 2000.
- Трошичев О.А. PC-индекс – наземный индикатор поступающей в магнитосферу энергии солнечного ветра // *Проблемы Арктики и Антарктики*. № 2 (85). С. 102–116. 2010.
- Arnold B.C. Pareto Distribution / In Wiley StatsRef: Statistics Reference Online (eds N. Balakrishnan, T. Colton, B. Everitt, W. Piegorsch, F. Ruggeri and J.L. Teugels). 2015. <https://doi.org/10.1002/9781118445112.stat01100.pub2>
- 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).
- Coles S. An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values / Springer, London. 2001.
- Feldstein Y.I. Modelling of the magnetic field of magnetospheric ring current as a function of interplanetary medium parameters // *Space Sci. Rev.* V. 59. P. 83–165. 1992. <https://doi.org/10.1007/BF01262538>
- 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. e2021JA029318. 2021. <https://doi.org/10.1029/2021JA029318>
- Gonzalez W.D., Echer E., Tsurutani B.T., de Gonzalez A.L.C., Dal Lago A. Interplanetary origin of intense, superintense and extreme geomagnetic storms // *Space Sci. Rev.* V. 158. № 1. P. 69–89. 2011. <https://doi.org/10.1007/s11214-010-9715-2>
- Gonzalez W.D., Tsurutani B.T. Criteria of interplanetary parameters causing intense magnetic storms ($Dst < -100$ nT) // *Planetary and Space Science*. V. 35. № 9. P. 1101–1109. 1987. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(87\)90015-8](https://doi.org/10.1016/0032-0633(87)90015-8)
- Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., Clúa de Gonzalez A.L. Interplanetary origin of geomagnetic storms // *Space Sci. Rev.* V. 88. № 3–4. P. 529–562. 1999. <https://doi.org/10.1023/A:1005160129098>
- Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., Lepping R.P., Schwenn R. Interplanetary phenomena associated with very intense geomagnetic storms // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. V. 64. № 2. P. 173–181. 2002. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(01\)00082-7](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(01)00082-7)
- Hajra R., Tsurutani B.T., Echer E., Gonzalez W.D., Gierloev J.W. Supersubstorms (SML < -2500 nT): Magnetic storm and solar cycle dependences // *J. Geophys. Res.* V. 121. P. 7805–7816. 2016. <https://doi.org/10.1002/2015JA021835>
- Iyemori T., Araki T., Kamei T., Takeda M. Mid-latitude Geomagnetic Indices “ASY” and “SYM” (Provisional). № 3. 1992 // Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism Faculty of Science Kyoto University, ISSN 0918-5763, 1994.
- Mac-Mahon R.M., Gonzalez W.D. Energetics during the main phase of geomagnetic superstorms // *J. Geophys. Res.* V. 102. № A7. P. 14199–14207. 1997. <https://doi.org/10.1029/97JA01151>
- 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>
- McPherron R.L., Russell C.T., Aubrey 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>
- Meng X., Tsurutani B.T., Mannucci A.J. The Solar and Interplanetary Causes of Superstorms (Minimum $Dst < -250$ nT) During the Space Age // *J. Geophys. Res.: Space Physics*. V. 124. № 6. P. 3926–3948. 2019. <https://doi.org/10.1029/2018JA026425>
- 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>
- Sergeev V.A., Shukhtina M.A., Stepanov N.A., Rogov D.D., Nikolaev A.V., Spanswick E., Donovan E., Raita T., Kero A. Toward the reconstruction of substorm-related dynamical

- pattern of the radiowave auroral absorption // Space Weather. V. 18. № 3. e2019SW002385. 2020. <https://doi.org/10.1029/2019SW002385>
- Troshichev O.A., Andrezen V.G. The relationship between interplanetary quantities and magnetic activity in the southern polar cap // Planet. Space Sci. V. 33. № 4. P. 415–419. 1985. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(85\)90086-8](https://doi.org/10.1016/0032-0633(85)90086-8)
- Troshichev O.A., Andrezen V.G., Vennerstrøm S., Friis-Christensen E. Magnetic activity in the polar cap – A new index // Planet. Space Sci. V. 36. № 11. P. 1095–1102. 1988. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(88\)90063-3](https://doi.org/10.1016/0032-0633(88)90063-3)
- Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Tang F., Lee Y.T. Great geomagnetic storms // Geophysical Research Letters. V. 19. № 1. P. 73–76. 1992. <https://doi.org/10.1029/91GL02783>
- Tsurutani B.T., Hajra R., Echer E., Gjerloev J.W. Extremely intense (SML < -2500 nT) substorms: isolated events that are externally triggered? // Annales Geophysicae. V. 33. P. 519–524. 2015. <https://doi.org/10.5194/angeo-33-519-2015>
- 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>
- Tsyganenko N.A., Andreeva V.A., Sitnov M.I., Stephens G.K., Gjerloev J.W., Chu X., Troshichev O.A. Reconstructing Substorms via Historical Data Mining: Is It Really Feasible? // J. Geophys. Res.: Space Physics. V. 126. № 10. e2021JA029604. 2021. <https://doi.org/10.1029/2021JA029604>
- Wanliss J.A., Showalter K.M. High-resolution global storm index: Dst versus SYM-H // J. Geophys. Res. V. 111. № A2. A02202. 2006. <https://doi.org/10.1029/2005JA011034>
- Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability // J. Appl. Mech.-Trans. ASME. V. 18. № 3. P. 293–297. 1951. <https://doi.org/10.1115/1.4010337>
- Werner R., Guineva V., Atanassov 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”, September, 2021, Book of Proceedings, <https://doi.org/10.31401/WS.2021.proc>, p. 159–165.
- Zong Q.-G., Yue C., Fu S.-Y. Shock induced strong substorms and super substorms: Preconditions and associated oxygen ion dynamics // Space Sci. Rev. V. 217. № 33. 2021. <https://doi.org/10.1007/s11214-021-00806-x>

Statistical Studies of the Relationship Between the Amplitude of Positive Magnetic Bays at Mid Latitudes, Geomagnetic Activity and Solar Wind Parameters

A. A. Lubchich^{1,*}, I. V. Despirak^{1,**}, R. Werner^{2,***}

¹Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia

²Space Research and Technology Institute, Bulgarian Academy of Sciences, Stara Zagora, Bulgaria

*e-mail: lubchich@pgia.ru

**e-mail: despirak@gmail.com

***e-mail: rolwer52@yahoo.co.uk

During the expansion phase of the substorm, the poleward jump of the aurora (breakup) and the expansion of the auroral bulge are observed. The expansion is accompanied by a negative magnetic bay under the aurora and a positive magnetic bay at the middle latitudes. The amplitude of the negative bay is characterized by the auroral AL-index. To characterize the positive bay, the MPB-index (*Mid-latitude Positive Bay index*) was previously proposed. The paper examines the statistical relationship of the MPB-index with the geomagnetic activity at different latitudes and with the parameters of the solar wind and the interplanetary magnetic field. It is shown that all extremely large values of the MPB-index (above 10.000 nT²) are observed during strong geomagnetic storms (when the Dst-index drops below -100 nT), and all extremely strong geomagnetic storms (when the Dst-index drops below -250 nT) accompanied by extremely high MPB-index values. Statistically, the MPB-index increases with the increasing of geomagnetic activity at any latitudes. The MPB-index, on average, increases with the increasing of the magnitude of the interplanetary magnetic field and any of its components. But for the B_z-component, large values of the MPB-index are observed by its southward direction. For plasma parameters of the solar wind, the MPB-index increases most strongly with the increasing of the solar wind speed. There is also the strong dependence on the dynamic pressure and on the magnitude of the E_y-component of the solar wind electric field. However, the MPB-index weakly depends on solar wind density and temperature.

Keywords: geomagnetic indices, magnetic storms, solar wind, interplanetary magnetic field, statistical analysis