

DOI: 10.51981/2588-0039.2023.46.009

ЗАВИСИМОСТЬ МРВ-ИНДЕКСА ОТ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ И ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

А.А. Любич¹, И.В. Дэспирак¹, Р. Вернер²

¹Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

²Институт космических исследований и технологий Болгарской академии наук, Стара Загора, Болгария

Аннотация

В работе анализируется связь величины МРВ-индекса, введенного для анализа проявлений суббуревой активности на средних широтах, с уровнем геомагнитной активности и с параметрами межпланетной среды. Показано, что величина МРВ-индекса растет с ростом геомагнитной активности на разных широтах, экстремально большие значения МРВ-индекса регистрируются во время развития сильных и очень сильных геомагнитных бурь. Величина МРВ-индекса растет с увеличением как величины, так и модуля компонент межпланетного магнитного поля и скорости солнечного ветра.

Введение

Участники ежегодного Апатитского семинара «Физика авроральных явлений», если повезет с погодой и состоянием Солнца, могут наблюдать динамические формы полярных сияний. Мелкие недостатки, такие как холод и возможная боль в шее после длительного смотрения вверх, с лихвой компенсируются красотой зрелища. Быстро меняющиеся по форме и по положению на небе сияния обычно сопровождают взрывную фазу суббури. Онлайн участники конференции со средних широт тоже иногда могут воочию наблюдать полярные сияния, но такая возможность выпадает редко, только во время сильных магнитных бурь. Тем не менее, оба типа явлений – бури и суббури – сопровождаются магнитными возмущениями на средних широтах. Их анализу и посвящена данная статья.

Характерным признаком типичной суббури является развитие токового клина. Во время взрывной фазы суббури происходит частичное разрушение поперечного (утро-вечернего) тока ближнего хвоста магнитосферы, например, за счет пересоединения силовых линий геомагнитного поля. Как нас учит Кирхгоф, электрическая цепь должна замкнуться. Она и замыкается через ионосферу – в утреннем секторе возникает втекающий продольный ток, далее он течет по ионосфере в высоких широтах в виде западного электроджета и возвращается в магнитосферу в вечернем секторе в виде продольного тока, создаваемого высыпавшимися ускоренными электронами. Отметим, что сверхсильная суббуря, так называемая суперсуббуря, может формировать дополнительный токовый клин противоположного направления на вечерней стороне (например, *Fu et al.*, 2021; *Zong et al.*, 2021; *Дэспирак и др.*, 2022).

Благодаря Био, Савару и Лапласу можем рассчитать магнитные эффекты на поверхности Земли от токового клина суббури. Эти эффекты наблюдаются на разных широтах, в том числе и на средних. Опишем их, следуя, например, *McPherron et al.* [1973], где на графике показан долготный профиль вариаций магнитного поля на широте 30°. Во-первых, будет наблюдаться положительная магнитная бухта в X-компоненте магнитного поля с максимумом на ночной стороне, посередине между втекающим и вытекающим продольными токами. Во-вторых, Y-компонента будет иметь максимум и минимум на долготе вытекающего и втекающего тока, соответственно, обращаясь в ноль посередине. Используя это обстоятельство, был предложен специальный МРВ-индекс (Mid-latitude Positive Bays - индекс) для анализа суббурь по данным среднеширотных магнитных станций [*Chu*, 2015; *McPherron and Chu*, 2017, 2018]. Авторами индекса (*McPherron and Chu*) были описаны две слегка отличающиеся методики расчета индекса. Различия в методиках расчета можно найти, например, в работе *McPherron and Chu* (2017). Одно из отличий 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 $20^\circ < |\lambda_{\text{mag}}| < 52^\circ$. Первый список можно найти в дополнительной информации к интернет-версии статьи *McPherron and Chu* [2018]. Он включает одномоментные значения полной мощности горизонтальных вариаций магнитного поля, то есть $\Delta X^2 + \Delta Y^2$, за период где-то с февраля 1980 года по конец 2012 года (до конца 1984 года данные являются эпизодическими, нерегулярными). Список *Chu* включает отдельно вариации ΔX^2 (далее МРВ-X), ΔY^2 (далее МРВ-Y), а также их сумму с начала 1991 года по конец 2019 года. Не знаем, есть ли он в открытом доступе, нам он был любезно предоставлен *Chu*, с этим списком и будем работать в дальнейшем. Отметим только, что из-за различий в методике расчетов между

двумя списками индексов существуют различия, как правило, незначительные. Цель исследования – статистический анализ МРВ-индекса, его связи с другими одноминутными геомагнитными индексами, а также с параметрами солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного поля (ММП).

Экстремально большие значения МРВ-индекса

Иногда МРВ-индекс достигает очень больших значений. Мы отобрали все случаи, когда $MPB-X > 10\,000$ нТл² (то есть, $\Delta X > 100$ нТл). Видимо, надо пояснить, почему за критерий отбора тут был взят не полный индекс, а его X-компонента. Дело в том, что *Werner et al.* [2021] предложили модификацию процедуры вычисления индекса, добавив данные болгарской станции Панагюриште (Panagjurishte (PAG), 42.5°N, 24.2°E, 556 м н.у.м.; ~37° GMLat, ~ 97° GMLon), а также включив возможность вычислений вариаций на отдельной среднеширотной магнитной станции. В этом случае вариации X-компоненты будут соответствовать положению токового клина вблизи долготы станции. Оказалось, что все экстремально большие значения МРВ-индекса наблюдались во время магнитных бурь разной интенсивности.

Meng et al. [2019] привели таблицу супербурь, когда индекс *Dst* опускался ниже –250 нТл, за период с 1957 по 2018 год, всего 39 событий. Из них 14 супербурь были зарегистрированы с 1991 года. Как оказалось, все они сопровождалось экстремально большими значениями МРВ-индекса. Результаты суммированы в Таблице 1. Отметим, что во время двух бурь (4-ой и 9-ой) МРВ-X был большим, но не достигал до 10 000 нТл², хотя полный МРВ-индекс превышал 10 000 нТл².

Таблица 1. Супербури, зарегистрированные с 1991 года, ранжированные по величине минимального значения *Dst*-индекса. Первые семь столбцов взяты из Таблицы 1 в статье *Meng et al.* [2019]. Восьмой столбец – наше творчество. В столбцах последовательно номер солнечного цикла (1); время регистрации *Dst*_{min} (2); его величина (3); величина и время регистрации SYM-H_{min} (4); величина и время регистрации внезапного импульса SI⁺ (5); тип бури по характеру изменения *Dst*-индекса (6); структура в солнечном ветре, вызвавшая магнитную бурю (7); величина и время регистрации экстремального значения МРВ-индекса (8).

1	2	3	4	5	6	7	8
Solar cycle	<i>Dst</i> _{min} time (yyyy-mm-dd UT)	<i>Dst</i> _{min} (nT)	SYM-H _{min} /time (nT)/(mm-dd UT)	SI ⁺ /time (nT)/(mm-dd UT)	Type	Interplanetary Case	MPB (nT ²)/(mm-dd UT)
SC23	2003-11-20 20:30	–422	–490/11-20 18:17	49/11-20 08:06	III	Sheath+MC Bxz-	~69 000/11-20 17:03
SC23	2001-03-31 08:30	–387	–437/03-31 08:06	129/03-31 01:00	I	Sheath+MC Bxz-	~26 000/03:31 06:09 ~21 000/03:31 15:53
SC23	2003-10-30 22:30	–383	–432/10-30 22:55	76/10-30 20:08	III	Sheath	~46 000/10-30 21:35
SC23	2004-11-08 06:30	–374	–394/11-08 05:55	92/11-07 19:20	I	Sheath+MC Bxz-	~27 000/11-08 01:19 [MPB X~9 300]
SC22	1991-11-09 01:30	–354	–402/11-09 01:32	49/11-08 13:15	I	Unknown	~575 000/11-08 22:20
SC23	2003-10-30 00:30	–353	–391/10-30 01:48	81/10-29 06:14	III	Sheath+MC Bxz-	~69 000/10-29 19:56
SC23	2000-07-16 00:30	–301	–347/07-15 21:54	93/07-15 15:04	II	MC Bxz-	~23 000/07-15 21:48
SC22	1991-03-25 00:30	–298	–337/03-25 03:41	118/03-24 03:55	II	Unknown	~105 000/03-24 21:33 ~24 000/03-24 04:06
SC23	2001-11-06 00:30	–292	–320/11-06 04:06	88/11-06 01:54	II	PICME+sheath	~11 000/11-06 02:05 [MPB X~6 300]
SC22	1992-05-10 14:30	–288	–363/05-10 14:15	81/05-09 20:02	II	Likely sheath+MC	~28 000/05-10 18:29
SC23	2000-04-07 00:30	–288	–320/04-07 00:09	46/04-06 16:45	III	Sheath	~60 000/04-06 23:27
SC23	2001-04-11 23:30	–271	–280/04-11 23:57	26/04-11 15:53	III	Sheath	~24 000/04-11 21:37 ~23 000/04-12 00:16
SC23	2004-11-10 10:30	–263	–282/11-10 09:31	46/11-09 18:51	III	Sheath+MC Bxz+	~31 000/11-09 20:32
SC22	1991-10-29 07:30	–254	–284/10-29 08:02	51/10-28 11:03	III	Sheath+MC Bxz+	~223 000/10-28 16:06

Мы проанализировали оставшиеся случаи наблюдения экстремально больших значений МРВ-индекса. Для этого, используя сайт https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_final/index.html, посмотрели поведение *Dst*-индекса во время этих случаев. Оказалось, что все оставшиеся случаи с $MPB-X > 10\,000$ нТл² наблюдались во время сильных магнитных бурь (*Dst*_{min} < –100 нТл). Результаты суммированы в Таблице 2. Использовались часовые значения *Dst*-индекса, поэтому время во втором столбце кратно 30 минутам – середине часа (или двухчасового интервала для бури 1992-02-26) с минимальным значением *Dst*-индекса. Индекс SYM-H, с одноминутным разрешением, был взят из базы данных OMNI с сайта <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>. Первую в списке бурю

можно назвать «пограничной». Некоторые исследователи (например, *Gonzalez et al.*, 2011) включают ее в список супербури, приписывая ей $Dst_{min} = -263$ нТл, но *Meng et al.* [2019] категоричны – только -247 нТл, и раз недотягивает 3 нТл до -250 нТл, то нечего и претендовать на роль супербури. Отметим необычное, с нашей точки зрения, обстоятельство – для двух бурь среднечасовое значение Dst-индекса оказывается меньше минимального минутного значения индекса SYM-H. Видимо, сказываются различия в выборе базовых станций, в нюансах методики вычислений и так далее. Сравнению Dst и SYM-H индексов посвящена, например, статья *Wanliss and Showalter* [2006].

Таблица 2. Сильные бури, во время которых наблюдались экстремально большие значения МРВ-индекса. Структура подобна Таблице 1, но без 5, 6 и 7 столбцов.

Solar cycle	Dst_{min} time (yyyy-mm-dd UT)	Dst_{min} (nT)	SYM-H _{min} /time (nT)/(mm-dd UT)	MPB (nT ²)/(mm-dd UT)
SC23	*2005-05-15 08:30	-247	-305/05-15 08:20	~38 000/05-15 08:50
SC22	1991-06-05 19:30	-223	-238/06-05 16:56	~50 000/06-05 17:14
SC23	2001-11-24 16:30	-221	-234/11-24 12:37	~49 000/10-30 07:15
SC22	1991-11-01 23:30	-196	-200/11-01 19:37 20:22	~36 000/11-01 20:30
SC22	1991-07-13 15:30	-183	-238/07-13 15:42	~42 000/07-13 16:20
SC23	2002-10-01 16:30	-176	-154/10-01 12:53	~18 000/10-01 16:28
SC24	2018-08-26 06:30	-175	-206/08-26 07:11	~18 000/08-26 07:44
SC22	1992-02-26 22:00	-174	-167/02-26 22:31	~61 000/02-26 19:44
SC22	1992-02-08 16:30	-114	-126/02-08 15:18	~41 000/02-08 15:35

Подведем итоги раздела. Все экстремально большие значения МРВ-индекса наблюдаются во время сильных и очень сильных магнитных бурь. Можно предположить, что эти экстремальные значения вызваны смещением овала полярных сияний к экватору. Просто на время, неожиданно для себя, средние широты становятся авроральными или близкими к ним.

Статистический анализ связи МРВ-индекса с другими геомагнитными индексами

Возьмем все данные по МРВ-индексу за весь период с 1991 по 2019 года. То есть, не проводя дополнительный анализ, наблюдаются ли его вариации во время суббурь или нет. На Рис. 1 построено распределение МРВ-индекса в двойном логарифмическом масштабе. В таком масштабе график спадает почти линейно, с наклоном ~ -2.5 , то есть $\ln N \approx -2.5 \times \ln MPB + b$. Отметим, что при вычислении МРВ-индекса, фактически, основной вклад вносят станции с максимальными вариациями. Поэтому можно ожидать, что его распределение будет не гауссовым, а лучше соответствовать распределению экстремальных событий. Например, Вернер и др. [2023] показали, что распределение числа событий с положительной бухтой на средних широтах в зависимости от локального AL-индекса (IL-индекс) хорошо описываются распределением Вейбулла.

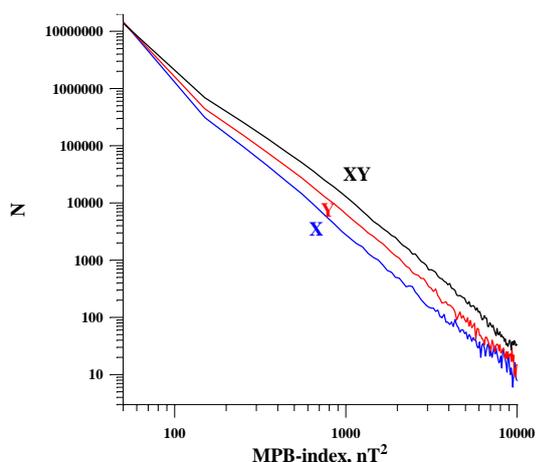


Рисунок 1.

Распределение МРВ-Х, МРВ-У и полного МРВ-индекса. Показано число случаев, попадающих в интервал полушириной 50 нТл^2 , центрированный к $50 + i \cdot 100$, где $i = 0, 1, 2, 3, \dots$. График построен в двойном логарифмическом масштабе.

Мы проанализировали статистическую связь МРВ-индекса с другими одномоментными геомагнитными индексами. Двигаясь от полюса к экватору, были выбраны:

– PC(N)-индекс, характеризующий возмущенность в северной полярной шапке (взят из базы данных OMNI с сайта <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>);

- Индексы семейства AE (AE, AL, AO, AU), взятые с сайта <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/index.html> и характеризующие возмущения в авроральных широтах;
- Индексы SML и SMU, взятые с сайта <http://supermag.jhuapl.edu/indices/> и характеризующие возмущенность в расширенной области вокруг авроральных широт;
- Индексы ASY-H, ASY-D для средних широт и SYM-H, SYM-D для низких широт. Взятые с сайта <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/index.html>.

Для определения статистической связи построим линии регрессии MPB-индекса относительно других индексов. Для построения линии регрессии $Y(X)$ разбиваем X на отрезки $X_i \pm \Delta/2$, где $\Delta = X_{i+1} - X_i$, и на каждом отрезке вычисляем среднее значение Y_i , зависимость Y_i от X_i и будет искомой линией регрессии. Аналогично можно построить и линию регрессии $X(Y)$. Если между Y и X нет прямой функциональной связи, то линии регрессии $Y(X)$ и $X(Y)$ не будут совпадать. На Рис. 2 показана связь MPB-индекса с индексом SML. С ростом возмущенности (уменьшение индекса SML) монотонно возрастает MPB-индекс. Зависимости MPB(SML) и SML(MPB), как и можно было ожидать, не совпадают. С ростом MPB-индекса SML-индекс сначала уменьшается, затем остается почти постоянным на уровне около -1100 нТл.

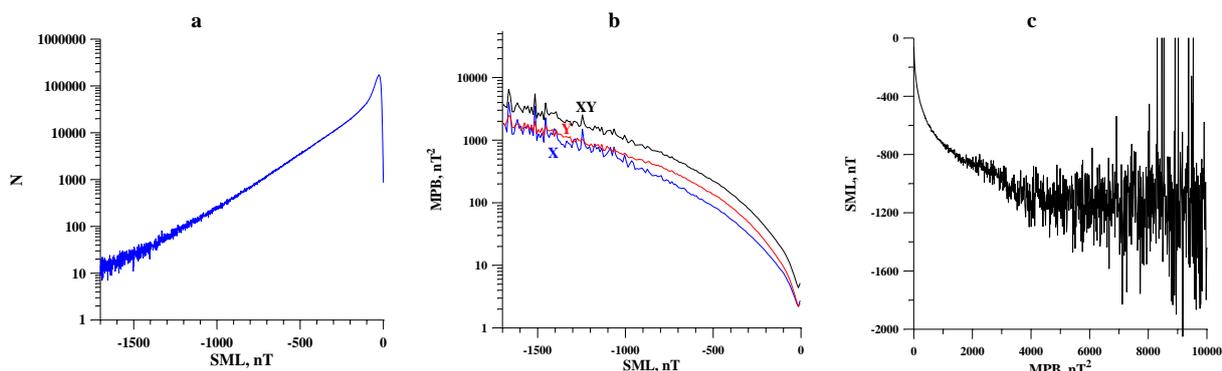


Рисунок 2. Распределение SML-индекса по значениям (a); линии регрессии MPB(SML) (b) и SML(MPB) (c). На средней панели показаны зависимости для MPB-X, MPB-Y и полного MPB.

Как оказалось, это справедливо и для других геомагнитных индексов – чем сильнее отклоняется от спокойного уровня любой индекс, тем выше, в среднем, величина MPB. Это демонстрирует Рис. 3 для индексов, введенных для разных широт.

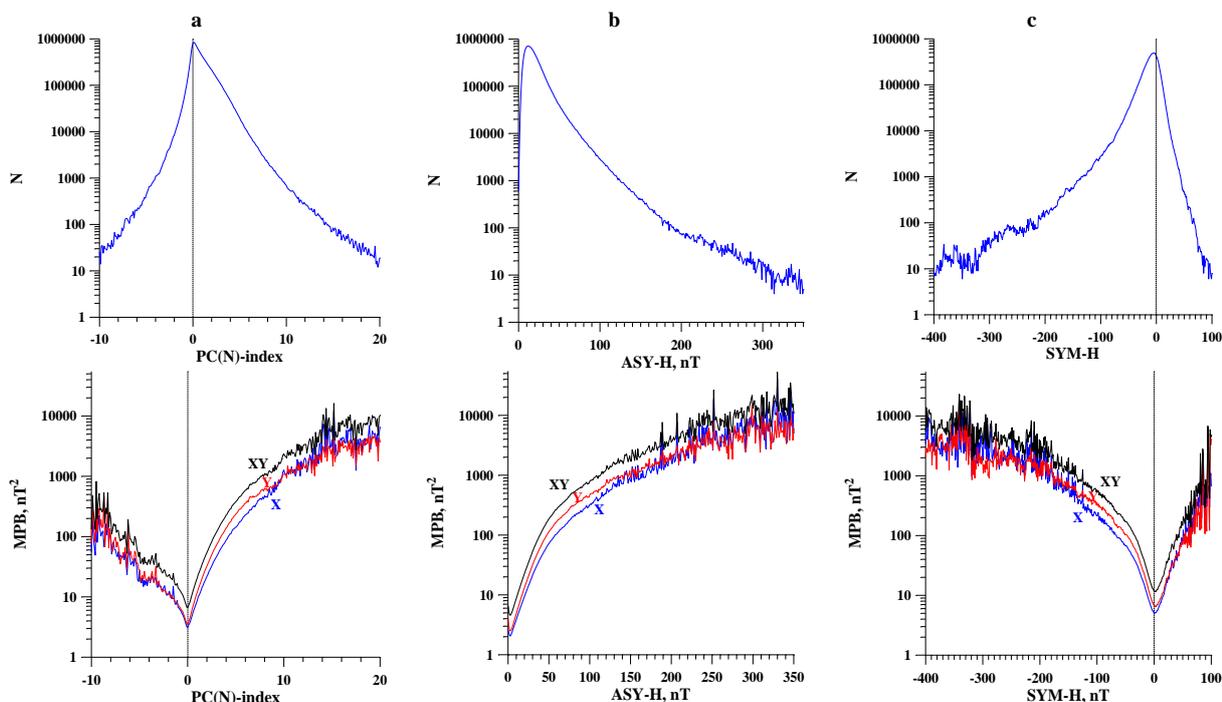


Рисунок 3. Вверху распределение индексов по значениям, внизу зависимость MPB от этих индексов – для полярной шапки (PC(N)-индекс – а), для средних широт (индекс ASY-H – б) и низких широт (индекс SYM-H – в).

Среднестатистический рост МРВ-индекса, введенного для описания суббуравных возмущений на средних широтах, в зависимости от роста отклонения от спокойного уровня других геомагнитных индексов, не удивителен. С ростом геомагнитной активности на авроральных широтах, она, эта активность, как правило, распространяется и на другие широты. Мы построили линии регрессии SML-индекса по отношению к индексам PC(N), AL, ASY-H и SYM-H. Полученные зависимости оказались близки к линейным. AL и SML-индексы вообще ведут себя почти как близнецы-братья: $AL \approx 0.80 \times SML - 33.71$ (Подчеркнем – эта зависимость относится к линии регрессии, а не к линейной регрессии, для которой зависимость будет: $AL \approx 0.98 \times SML - 24.44$. В первом случае экстремальные точки будут иметь больший вес), коэффициент корреляции между AL и SML близок к единице: $R \approx 0.95$. Чуть слабее связь PC(N) и SML: $PC(N) \approx -0.0051 \times SML + 0.66$, $R \approx -0.79$. Далее идет индекс для средних широт: $ASY - H \approx -0.086 \times SML + 3.14$, $R \approx -0.73$. Слабее всего связь для индекса низких широт: $SYM - H \approx 0.073 \times SML + 1.31$, $R \approx 0.60$.

Статистический анализ связи МРВ-индекса с параметрами солнечного ветра и ММП

Возьмем из базы данных OMNI с сайта <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/> одноминутные значения модуля ММП V_T и его компонент V_X , V_Y , V_Z (в системах GSE и GSM) и данные по СВ (величина скорости и ее компоненты, плотность, температура, динамическое давление, а также Y-компоненту электрического поля и отношение плазменного давления к магнитному β).

Как оказалось, МРВ-индекс, в среднем, сильно зависит как от модуля ММП (монотонно растет с ростом ММП), так и от его компонент. Зависимость от компонент ММП демонстрирует Рис. 4. С ростом модуля любой компоненты ММП растет, в среднем, величина МРВ-индекса. От X- и Y-компонент рост более-менее симметричный, то есть, не видно явной зависимости от знака компоненты ММП. Для V_Z -компоненты, как и можно было ожидать, величина МРВ-индекса оказывается выше при отрицательных значениях Z-компоненты ММП. На зависимость от Y- и Z-компонент слабо влияет выбор системы координат – GSE или GSM. Очень большие значения МРВ-индекса при экстремально больших значениях как компонент ММП, так и его модуля, видимо, вызваны со следующим обстоятельством. Экстремально большие значения межпланетного магнитного поля обычно связаны с геоэффективными крупномасштабными структурами солнечного ветра, например, с магнитными облаками. Их воздействие на магнитосферу Земли может приводить к развитию геомагнитных бурь, которое и будет проявляться в том числе и в высоких значениях МРВ-индекса (см. Раздел 1).

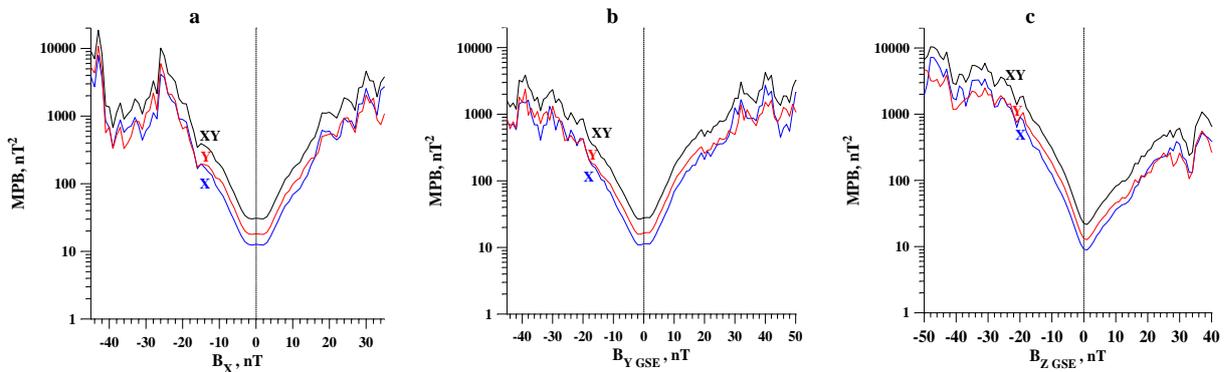


Рисунок 4. Линии регрессии МРВ-индекса по V_X (a), V_Y (b) и V_Z (c) компонентам межпланетного магнитного поля.

Индекс МРВ почти не зависит от величины плазменной β и очень слабо растет с увеличением плотности и температуры солнечного ветра, однако быстро и монотонно растет с ростом скорости СВ (Рис. 5а) и его динамического давления (Рис. 5b). Величина МРВ-индекса оказывается пропорциональной модулю Y- и Z-компонент скорости СВ. Высокая скорость, а также высокие значения Y- и Z-компонент скорости, как правило, наблюдаются в возмущенном солнечном ветре и связаны с крупномасштабными геоэффективными структурами. МРВ-индекс также растет с ростом модуля Y-компоненты электрического поля СВ (Рис. 5с), что неудивительно, учитывая зависимость МРВ-индекса от скорости СВ (см. Рис. 5а) и V_Z -компоненты ММП (см. Рис. 4с).

Зависимость МРВ-индекса от динамического давления (Рис. 5b) выглядит слабее, чем от скорости СВ (Рис. 5а). Этому можно было бы удивиться, учитывая, что динамическое давление пропорционально квадрату скорости. Однако известно, что статистически величина динамического давления солнечного ветра слабо растет с увеличением его скорости по крайней мере в период минимума 11-летнего цикла солнечной активности (Любич и др., 2004).

Связь между среднесуточными значениями индексов SYM-H и ASY-H с основными межпланетными параметрами рассмотрена в следующей статье в этом сборнике (Макаров, 2023).

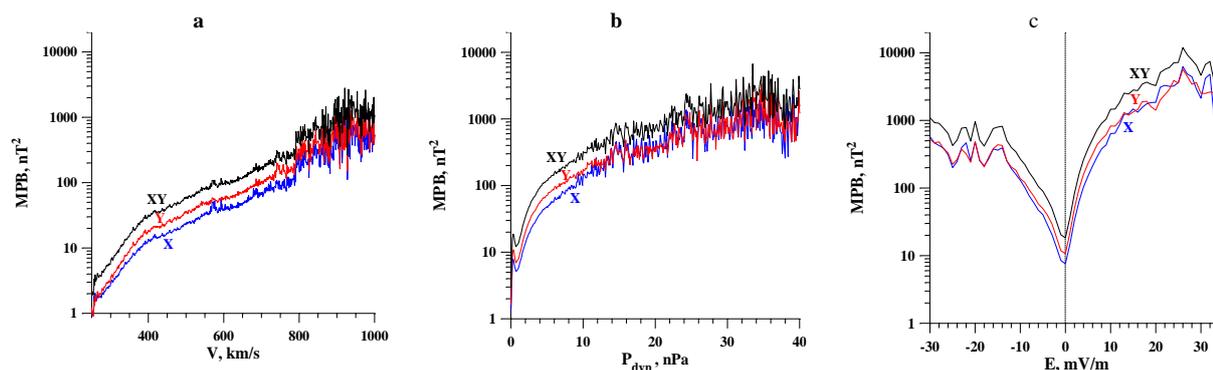


Рисунок 5. Линии регрессии МРВ-индекса по скорости солнечного ветра (а), его динамического давления (б) и Y-компоненты электрического поля СВ (с).

Выводы

Исследована зависимость среднеширотного индекса МРВ (Mid-latitude Positive Bays) от геомагнитной активности и характеристик СВ. Показано, что:

- Экстремально большие величины МРВ-индекса наблюдаются во время геомагнитных бурь. Все экстремально сильные геомагнитные бури сопровождаются экстремально большими величинами МРВ-индекса.
- Статистически МРВ-индекс растет с увеличением геомагнитной активности на любой широте, так как геомагнитная активность на разных широтах не является статистически независимой.
- МРВ-индекс, в среднем, растет с увеличением как модуля ММП, так и модуля любой из его компонент. Для V_z -компоненты ММП сильнее зависимость от ее южной составляющей.
- МРВ-индекс сильнее всего растет с ростом скорости СВ. Также сильна зависимость от динамического давления и от величины Y-компоненты электрического поля СВ. МРВ-индекс слабо зависит от плотности и температуры солнечного ветра.

Благодарности

Авторы выражают признательность Xiangning Chu за любезно предоставленную возможность использовать значения МРВ-индекса. Мы благодарны коллективам, создавшим, поддерживающим работу баз данных SuperMAG (<http://supermag.jhuapl.edu/>), 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.

Литература

- Вернер Р., Гинева В., Дэспирак И.В., Любич А.А., Сецко П.В., Атанасов А., Божилова Р., Райкова Л., Валева Д., Статистические исследования авральной активности и возмущений геомагнитного поля на средних широтах. Геомагнетизм и аэронавигация, 2023, Т. 63, № 4, С. 520-533, DOI: 10.31857/S0016794022600727
- 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 Аэронавигация, 2022, Т. 62, № 3, С. 325-335. DOI: 10.31857/S0016794022030063
- Любич А.А., Дэспирак И.В., Яхнин А.Г., Связь давления и скорости солнечного ветра в минимуме одиннадцатилетнего цикла. Геомагнетизм и аэронавигация, 2004, Т. 44, № 2, С. 143-148.
- Макаров Г.А., Зависимость геомагнитных индексов ASY-H и SYM-H от межпланетных параметров. "Physics of Auroral Phenomena", Proc. XLVI Annual Seminar, Apatity, pp. 48-52, 2023.
- 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).
- 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 Science Reviews, V. 158, No. 1, P. 69-89, 2011. <https://doi.org/10.1007/s11214-010-9715-2>
- 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, No. 4, P. 2831-2850, 2018. <https://doi.org/10.1002/2017JA024766>
- 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, No. 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, No. 6, P. 3926-3948, 2019. <https://doi.org/10.1029/2018JA026425>
- Wanliss J.A., Showalter K.M., High-resolution global storm index: Dst versus SYM-H. J. Geophys. Res., V. 111, No. A2, A02202, 2006. <https://doi.org/10.1029/2005JA011034>
- Werner R., Guineva V., Atanassov A., Bojilova R., Raykova L., Valeva 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, DOI: 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>