

УДК 551.510.535

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГЕОМАГНИТНЫХ СОБЫТИЙ, ИДЕНТИФИЦИРОВАННЫХ ПО РАЗЛИЧНЫМ ИНДЕКСАМ

© 2024 г. К. Г. Ратовский^{1, *}, М. В. Клименко², А. М. Веснин¹, К. В. Белюченко¹, Ю. В. Ясюкевич¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени “Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук”, Иркутск, Россия

²Калининградский филиал федерального государственного бюджетного учреждения науки “Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н. В. Пушкова Российской академии наук”, Калининград, Россия

*E-mail: ratovsky@iszf.irk.ru

Поступила в редакцию 24.08.2023

После доработки 13.11.2023

Принята к публикации 30.11.2023

Представлены результаты сравнительного анализа геомагнитных событий, идентифицированных по различным индексам. За основу идентификации выбран ранее разработанный метод выделения геомагнитных бурь на основе индекса Dst. Аналогичный метод был реализован для идентификации геомагнитных событий по индексам ар и AE. Сравнительный анализ включает в себя: выявление общих геомагнитных событий, идентифицированных по различным индексам; выявление случаев, когда некое событие является сильным геомагнитным возмущением по одному из индексов (Dst, ар, AE) и при этом не является геомагнитным событием по хотя бы одному из двух оставшихся индексов, и сравнительный анализ суточного и сезонного распределения количества геомагнитных событий, идентифицированных по различным индексам.

DOI: 10.31857/S0367676524030023, EDN: QNHQUW

ВВЕДЕНИЕ

Ранее авторским коллективом был разработан метод статистического анализа ионосферного отклика на геомагнитные бури [1–3]. Метод включал в себя идентификацию геомагнитных бурь на основе Dst-индекса геомагнитной активности и расчет эталонного ионосферного отклика на магнитную бурю, представляющего собой результат усреднения возмущений ионосферных параметров для бурь одного типа методом наложения эпох. Метод был реализован с временным разрешением одни сутки, а в качестве ключевой даты для метода наложения эпох использовался день, соответствующий минимуму индекса Dst. В дальнейшем планируется вместо индекса Dst использовать индексы AE и AL, поскольку именно эти индексы являются управляющими параметрами для модельных расчетов ионосферного отклика на основе глобальной самосогласованной модели термосферы, ионосферы и протоносферы (ГСМ ТИП) [4]. В связи с этим становится актуальной задача сравнительного анализа геомагнитных событий, идентифицированных по различным индексам.

Выбор индекса Dst в качестве индекса геомагнитной активности был обусловлен тем, что для этого индекса разработана концепция главной фазы и фазы восстановления магнитной бури, а также идентификация и классификация магнитных бурь в зависимости от минимального значения Dst-индекса [5, 6]. Альтернативой индекса Dst является индекс ар (либо его логарифмический аналог индекс Кр). Для этих индексов также разработаны идентификация и классификация магнитных бурь в зависимости от максимального значения Кр [7]. По сравнению с индексом Dst индексы Кр и ар обладают двумя недостатками: 1) 3-часовое временное разрешение вместо часового и 2) отсутствие концепции главной фазы и фазы восстановления магнитной бури.

Для модельных расчетов ионосферного отклика на эталонную магнитную бурю перспективно использовать индекс AE в качестве индекса геомагнитной активности, поскольку этот индекс является одним из управляющих параметров для расчетов на основе ГСМ ТИП [8]. Использование индекса AE в качестве индикатора геомагнитного события обусловлено тем, что в ионосферных исследованиях представляет интерес индекс геомагнитной

активности, который был бы наиболее тесно связан с ионосферным откликом на геомагнитную бурю. Физической причиной использования индекса АЕ в качестве индикатора геомагнитного события является хорошая корреляция этого индекса с джоулевым нагревом высокоширотной и авроральной ионосферы во время геомагнитных бурь [9, 10]. В свою очередь нагрев высокоширотной и авроральной ионосферы является одной из основных причин ионосферных возмущений [1]. В настоящее время для АЕ-индекса отсутствует метод идентификации и классификации магнитных бурь в зависимости от максимального значения АЕ-индекса.

Данная статья посвящена сравнительному анализу геомагнитных событий, идентифицированных по различным индексам. За основу идентификации выбран ранее разработанный метод выделения геомагнитных бурь на основе индекса Dst [1–3]. Аналогичный метод был применен для идентификации геомагнитных событий по индексам ар и АЕ. Пороговые значения индексов ар и АЕ определялись таким образом, чтобы количество всех геомагнитных событий и сильных геомагнитных событий было максимально близким к количеству всех магнитных бурь и сильных магнитных бурь, идентифицированных по индексу Dst. Первой целью анализа является выявление общих геомагнитных событий, идентифицированных по различным индексам. Вторая цель анализа состоит в выявлении противоречивых случаев, когда некое событие является сильным геомагнитным возмущением по одному из индексов (Dst, ар, АЕ) и при этом не является геомагнитным событием по хотя бы одному из двух оставшихся индексов. Третьей целью является сравнительный анализ суточного и сезонного распределения количества геомагнитных событий, идентифицированных по различным индексам.

В сравнительном анализе использовалась база данных индексов геомагнитной активности за 1999–2018 гг. Выбор первого года (1999) обусловлен тем, что для дальнейшего статистического анализа ионосферного отклика на геомагнитные бури планируется использовать глобальные ионосферные карты, а 1999 является первым годом, для которого глобальные ионосферные карты составлены полностью. Выбор последнего года (2018) обусловлен тем, что это — последний год, для которого полностью рассчитаны значения АЕ-индекса в используемой нами открытой базе данных. Анализ индексов осуществлен с часовым временным разрешением, значения индекса ар на 3-часовом временном интервале полагались константой. Нами проводился анализ усредненных в течение часа индексов АЕ с часовым временным разрешением, чтобы исключить из анализа кратковременные (~10 мин) усиления суббуревой активности.

МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ГЕОМАГНИТНЫХ СОБЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ИНДЕКСОВ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

Для идентификации геомагнитных бурь и геомагнитных событий разработаны различные критерии. В работе [11] критерием бури являлось наличие в поведении Dst четко определяемого начала бури, минимума $Dst \leq -50$ нТл и фазы восстановления, при этом выбор событий осуществлялся визуальной проверкой. В работе [12] описан автоматический алгоритм идентификации бурь на основе выполнения двух критериев: (1) минимум $Dst \leq -50$ нТл при длительности основной фазы бури не менее 2 ч и (2) абсолютное значение диапазона изменения Dst на основной фазе не менее 50 нТл. В работе [13] для идентификации событий высокоинтенсивной, длительной и непрерывной активности аврорального электроджета (HILDCAA) используется индекс АЕ, а автоматический алгоритм идентификации событий HILDCAA включает в себя четыре критерия: 1) максимум $AE \geq 1000$ нТл; 2) событие должно длиться не менее 2 сут; 3) в течение этих 2 сут АЕ не должен быть ниже 200 нТл в течение более чем 2 ч; 4) авроральная активность должна продолжаться вне основной фазы геомагнитной бури.

В наших предыдущих исследованиях [1–3] метод идентификации геомагнитных бурь был разработан на основе индекса Dst. Событие рассматривалось как геомагнитная буря при выполнении двух условий:

- 1) $Dst(t_0)$ является наименьшим значением Dst на временном интервале $t_0 \pm 12$ ч;
- 2) $Dst(t_0) \leq Dst1$,

где t_0 — время, соответствующее минимуму Dst, а $Dst1 = -50$ нТл — пороговое значение Dst для идентификации геомагнитной бури.

Для идентификации сильной геомагнитной бури использовалось пороговое значение $Dst2 = -100$ нТл.

Аналогичный метод был применен для идентификации геомагнитных событий по индексам ар и усредненным за 1 ч индексом АЕ:

- 1) $AE(t_0) / ar(t_0)$ являются наибольшими значениями АЕ / ар на временном интервале $t_0 \pm 12$ ч;
- 2) $AE(t_0) / ar(t_0) \geq AE1 / ar1$,

где t_0 — время, соответствующее максимуму АЕ / ар. Критерием сильной геомагнитной бури является превышение пороговых значений $AE2 / ar2$.

Пороговые значения индекса Dst для идентификации геомагнитных бурь ($Dst1 = -50$ нТл и $Dst2 = -100$ нТл) были выбраны исходя из классификации магнитных бурь в зависимости от минимального значения Dst-индекса [5, 6]. Пороговые

значения индекса ap и усредненного за 1 ч индекса AE определялись таким образом, чтобы количество всех геомагнитных событий и сильных геомагнитных событий было максимально близким к количеству всех магнитных бурь и сильных магнитных бурь, идентифицированных по индексу Dst .

Анализ индекса Dst за 1999–2018 гг. выявил 554 геомагнитные бури и 100 сильных геомагнитных бурь. Поиск пороговых значений для индексов AE и ap , обеспечивающих наиболее близкое число геомагнитных событий к бурям, полученным по Dst -критерию, дал следующие результаты: $AE1 = 930$ нТл и $ap1 = 48$ нТл идентифицируют 556 и 615 геомагнитных события соответственно; $AE2 = 1280$ нТл и $ap2 = 111$ нТл идентифицируют 103 и 105 сильных геомагнитных событий соответственно.

Необходимо отметить, что $ap1 = 48$ нТл соответствует значению индекса $Kp = 5$, что полностью согласуется с пороговым значением геомагнитной бури по Kp -критерию согласно NOAA Space Weather Scales [7]. Полученное пороговое значение сильной бури $ap2 = 111$ нТл соответствует значению индекса $Kp = 7$ -, что близко к пороговому значению сильной геомагнитной бури ($Kp = 7$) согласно NOAA Space Weather Scales [7]. Пороговое значение усредненного за 1 ч индекса AE , $AE1 = 930$ нТл, близко к пороговому значению $AE = 1000$ нТл, используемому в работе [13] для идентификации событий HILDCAA. Эти соответствия косвенно подтверждают обоснованность выбранного способа определения пороговых значений.

В дальнейшем геомагнитные события, идентифицированные по индексам Dst , ap и усредненному за 1 ч индексу AE обозначаются как Dst -бури, ap -бури и AE -бури соответственно. При этом Dst -бури являются геомагнитными бурями в соответствии с критерием [5, 6], а ap -бури являются геомагнитными бурями в соответствии с критерием [7]. AE -бури представляют собой полярные суббури при величине усредненного за 1 ч индекса AE не менее 930 нТл. AE -бури могут происходить

как во время геомагнитных бурь, так и в небуревых условиях в зависимости от поведения индексов Dst и ap .

Как показали наши предыдущие исследования [1–3], все бури (независимо от силы) полезно разделить на изолированные (временной интервал между соседними бурями $t_0 \geq 5$ дней) и неизолированные (указанный интервал не превышает 5 дней). В соответствии с этим критерием Dst -бури, ap -бури и AE -бури были разделены на изолированные и неизолированные.

ОБЩИЕ ГЕОМАГНИТНЫЕ СОБЫТИЯ ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПО РАЗЛИЧНЫМ ИНДЕКСАМ

Первой целью сравнительного анализа является выявление общих геомагнитных событий, идентифицированных по различным индексам. Поскольку общие геомагнитные события являются геомагнитными бурями по критерию Dst и/или ap , эти события обозначаются как общие бури.

В табл. 1 показано количество всех геомагнитных событий, сильных событий и изолированных событий, идентифицированных по индексам Dst , AE и ap , а также количество общих бурь (для всех типов), идентифицированных по различным индексам. Из табл. 1 можно сделать вывод о том, что Dst -буря в 85% случаев будет также идентифицирована, как AE -буря, а в 94% случаев — как ap -буря. Несколько другая ситуация возникает при переходе к сильным геомагнитным событиям: здесь количество общих сильных бурь уменьшается до 62% для индексов Dst и усредненного за 1 ч AE , и до 77% для индексов Dst и ap . При переходе к изолированным геомагнитным событиям количество общих геомагнитных событий уменьшается до 48% для индексов Dst и AE , и до 51% для индексов Dst и ap . Таким образом, сильная Dst -буря не обязательно является сильной AE -бурей либо сильной ap -бурей. Изолированная Dst -буря только в приблизительно

Таблица 1. Количество всех геомагнитных событий, сильных событий и изолированных событий, идентифицированных по индексам Dst , AE и ap , а также количество общих бурь, идентифицированных по различным индексам

Тип события	Dst -буря	AE -буря	ap -буря	Dst -буря
Количество всех событий	554	556	615	554
Общие бури	469 (85%)		519 (94%)	
Количество сильных событий	100	103	105	100
Общие бури	62 (62%)		77 (77%)	
Количество изолированных событий	144	178	192	144
Общие бури	69 (48%)		73 (51%)	

половине случаев является изолированной АЕ-бурей либо изолированной ар-бурей.

Из табл. 1 можно сделать вывод о том, что АЕ-буря в 469 случаях из 566 (т.е. в 84% случаев) возникает во время геомагнитных бурь по Dst-критерию. Таким образом, АЕ-буря в большинстве случаев является магнитной бурей, а в оставшихся случаях — интенсивной суббурей в небуревых условиях.

ВЫЯВЛЕНИЕ ПРОТИВОРЕЧИВЫХ СЛУЧАЕВ

Вторая цель анализа состоит в выявлении противоречивых случаев, когда некое событие является сильным геомагнитным возмущением по одному из индексов (Dst, ap, усредненный за 1 ч АЕ) и при этом не является геомагнитным событием по хотя бы одному из двух оставшихся индексов. Таким образом, противоречивыми случаями являются следующие сочетания геомагнитных событий. Интенсивная полярная суббуря при величине усредненного за 1 ч индекса АЕ не менее 1280 нТл происходит в небуревых условиях по Dst- либо ар-критерию. Сильная геомагнитная буря по Dst-критерию происходит в небуревых условиях по ар-критерию либо в условиях полярной суббури при величине усредненного за 1 ч индекса АЕ менее 930 нТл. Сильная геомагнитная буря по ар-критерию происходит в небуревых условиях по Dst-критерию либо в условиях полярной суббури при величине усредненного за 1 ч индекса АЕ менее 930 нТл.

В итоге список противоречивых случаев включает в себя 21 событие, соответствующее следующим критериям: (1) событие является сильным геомагнитным возмущением по хотя бы одному из индексов (Dst, ap, АЕ) и (2) событие не является геомагнитным событием по хотя бы одному из индексов на интервале ±12 ч относительно времени экстремального значения индекса, по которому событие идентифицировано как сильное геомагнитное возмущение.

Полученный список может быть разделен на три случая. Первый случай (“один против двух”) соответствует ситуации, когда событие является сильным геомагнитным возмущением по одному из индексов и при этом не является геомагнитным событием по двум оставшимся индексам. Второй случай (“двое против одного”) соответствует ситуации, когда событие является сильным геомагнитным возмущением по двум из индексов и при этом не является геомагнитным событием по оставшемуся индексу. Третий случай (“каждый на своем месте”) соответствует ситуации, когда событие является сильным геомагнитным возмущением по одному индексу, умеренным геомагнитным событием по другому индексу и не является геомагнитным событием по третьему индексу. Первый

Таблица 2. События, соответствующие случаю “один против двух”. Курсивом выделены значения, не достигнувшие буревого порога, жирным шрифтом — уровни сильных геомагнитных событий

Год	День года	Dst	АЕ	ap
2000	195	−43	877	132
2002	287	−100	795	39
2016	329	−38	1282	39

Таблица 3. События, соответствующие случаю “двое против одного”. Курсивом выделены значения, не достигнувшие буревого порога, жирным шрифтом — уровни сильных геомагнитных событий

Год	День года	Dst	АЕ	ap
1999	265	−173	823	207
2002	325	−128	880	111
2000	196	−33	1657	154

Таблица 4. События, соответствующие случаю “каждый на своем месте”. Курсивом выделены значения, не достигнувшие буревого порога, жирным шрифтом — уровни сильных геомагнитных событий

Год	День года	Dst	АЕ	ap
2000	288	−106	913	67
2000	303	−126	839	80
2001	274	−148	900	80
2001	305	−106	670	48
2002	247	−109	884	94
2002	280	−115	873	67
2010	215	−74	790	111
2015	254	−87	922	132
2000	175	−34	1423	56
2003	207	−49	1354	80
2003	313	−33	1353	67
2016	356	−39	1607	80
2017	286	−48	1429	67
2003	297	−44	1205	111
2013	187	−86	1303	39

случай (“один против двух”) включает в себя три события, представленные в табл. 2. События первого случая распределены равномерно по всем трем индексам, ровно по одному разу индексы Dst, ар и АЕ являются доминирующими. Второй случай (“двое против одного”) включает в себя также три события, представленные в табл. 3. События второго случая распределены по индексам неравномерно, 2 раза “слабым звеном” является индекс АЕ, один раз — индекс Dst, и ни одного раза — индекс ар. Третий случай (“каждый на своем месте”) включает в себя 15 событий, представленных в табл. 4. События третьего случая распределены по индексам неравномерно, 8 раз “слабым звеном” является индекс АЕ, 6 раз — индекс Dst, и один раз — индекс ар. При этом небуревой уровень АЕ сопровождается доминированием Dst в 6 случаях из 8, а небуревой уровень Dst сопровождается доминированием АЕ в 5 случаях из 6.

Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что из трех индексов наименее связаны между собой Dst и АЕ, для 19 из 21 случая событие является сильным геомагнитным возмущением по одному индексу и не является геомагнитным событием по другому индексу. Индекс ар теснее связан с Dst и АЕ, чем эти два индекса между собой, только в 3 случаях из 21 событие не является ар-бурей, будучи сильной Dst-бурей или АЕ-бурей.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СУТОЧНОГО И СЕЗОННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ГЕОМАГНИТНЫХ СОБЫТИЙ, ИДЕНТИФИЦИРОВАННЫХ ПО РАЗЛИЧНЫМ ИНДЕКСАМ

Третьей целью является сравнительный анализ суточного и сезонного распределения количества геомагнитных событий, идентифицированных по различным индексам. Сезонное распределение количества Dst-бурь, ар-бурь и АЕ-бурь показано на рис. 1. Из рис. 1 видно, что для всех индексов наибольшее количество геомагнитных событий наблюдается осенью (~180 Dst- и ар-бурь и ~70 АЕ-бурь). Весна является вторым сезоном по количеству Dst-бурь (~150 бурь) и ар-бурь (~170) и третьим сезоном для АЕ-бурь (~130). Лето является вторым сезоном по количеству событий для АЕ-бурь (~150), третьим сезоном для ар-бурь (~150) и четвертым сезоном для Dst-бурь (~100). Зима является четвертым по количеству событий сезоном для ар-бурь (~100) и АЕ-бурь (~90) и третьим сезоном для Dst-бурь (~110). Как и при анализе противоречивых событий, можно отметить, что индекс ар теснее связан с Dst и АЕ, чем эти два индекса между собой. Общим свойством Dst- и ар-бурь является доминирование по количеству бурь равноденствий над солнцестояниями,

а общим свойством АЕ- и ар-бурь — доминирование по количеству бурь лета над зимой.

Суточное распределение количества Dst-бурь, ар-бурь и АЕ-бурь показано на рис. 2. Из рис. 2 видно, что для 3-часового индекса ар в суточном распределении количества ар-бурь наблюдаются два максимума: первый на интервале 18–21 UT (99 событий) и второй на интервале 3–6 UT (85 событий). Оба максимума согласуются с двумя максимумами суточного распределения количества Dst-бурь (22 UT, 37 событий и 7–9 UT, 34–35 событий). Первые максимумы в распределении количества ар- и Dst-бурь согласуются с главным максимумом суточного распределения количества АЕ-бурь (17 UT, 54 события), тогда как второй максимум в распределениях количества ар- и Dst-бурь (3–6 и 7–9 UT соответственно) практически не заметен в суточном распределении количества АЕ-бурь. Таким образом, суточные распределения количества ар- и Dst-бурь согласуются между собой и отличаются от суточного распределения количества АЕ-бурь.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Индекс АЕ определяется интенсивностью аврорального электроджета, тогда как индекс Dst — возмущениями экваториального кольцевого тока. Индекс ар, будучи показателем среднеширотной геомагнитной активности, имеет связь как с интенсивностью авроральной активности, так и с возмущениями кольцевого тока. Это объясняет тот факт, что ар теснее связан с Dst и АЕ, чем эти два индекса между собой.

Сезонная зависимость количества ар- и Dst-бурь определяется взаимной геометрией магнитного поля Земли и межпланетного магнитного поля [14–18]. Оптимальная геометрия для возникновения геомагнитной бури возникает в периоды равноденствий, что согласуется с полученным в этой работе сезонным распределением количества ар- и Dst-бурь. На сезонную зависимость количества АЕ-бурь также оказывает заметное влияние сезонная зависимость ионосферной проводимости [16, 19], что объясняет доминирование количества летних АЕ-бурь над числом зимних АЕ-бурь, однако не объясняет тот факт, что количество АЕ-бурь весной заметно меньше, чем осенью. В настоящий момент полного объяснения этого факта не существует. Причина может быть связана с различием ионосферных проводимостей весной и осенью. Это в свою очередь может быть обусловлено различием в весенней и осенней перестройке атмосферной циркуляции.

В суточных распределениях количества ар- и Dst-бурь отчетливо наблюдаются два максимума: для Dst 7–9 и 22 UT и для ар 3–6 и 18–21 UT,

что согласуется с результатами работы [18], где максимумы отмечаются в 10 и 23 UT. Некоторое опережение интервала максимума количества бурь по ар-критерию по сравнению с аналогичным интервалом по Dst-критерию объясняется тем, что максимум ар, как правило, предшествует минимуму Dst. Как и в случае сезонной зависимости, двухпиковая структура UT-зависимости количества ар- и Dst-бурь определяется взаимной геометрией магнитного поля Земли и межпланетного магнитного поля [17, 18]. В случае суточного распределения АЕ-бурь наблюдается однопиковая

структура с максимумом в 17 UT, пик на интервале 3—9 UT практически не заметен. Этот факт ранее отмечался в работе [20] и полностью согласуется с зависимостью интенсивности аврорального электроджета от момента начала суббури по UT при прочих равных условиях, полученной по результатам численного моделирования [21]. Как и в случае сезонного распределения, однопиковая структура суточного распределения количества АЕ-бурь может быть связана с UT-зависимости ионосферной проводимости.

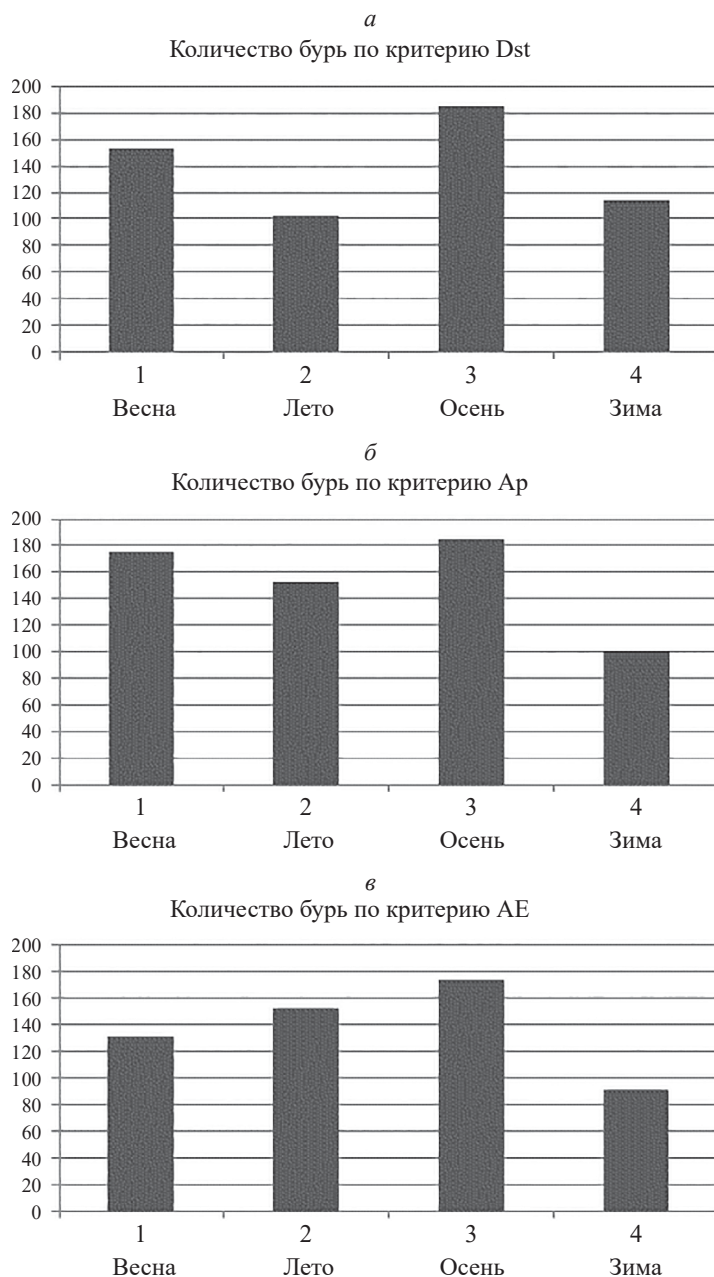


Рис. 1. Сезонное распределение количества Dst-бурь (а), ар-бурь (б) и АЕ-бурь (в).



Рис. 2. Суточное распределение количества Dst-бурь (*a*), ар-бурь (*б*) и AE-бурь (*в*).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительный анализ геомагнитных событий, идентифицированных по различным индексам, позволил получить следующие основные результаты. Ранее разработанная методика идентификации магнитных бурь по индексу Dst была расширена так, чтобы идентифицировать геомагнитные события по индексам ар и усредненному за 1 ч индексу AE. Пороговые значения индексов ар и AE определены таким образом, чтобы количество всех геомагнитных событий и сильных геомагнитных событий было максимально близким к количеству всех магнитных бурь и сильных магнитных бурь, идентифицированных по индексу Dst. Определено количество общих геомагнитных событий, идентифицированных по различным индексам. Выявлен 21 случай, когда некое событие является сильным геомагнитным возмущением по одному

из индексов (Dst, ар, AE) и при этом не является геомагнитным событием по хотя бы одному из двух оставшихся индексов. Осуществлен сравнительный анализ суточного и сезонного распределения количества геомагнитных событий, идентифицированных по различным индексам.

Как правило, наибольшие морфологические различия наблюдаются для геомагнитных событий, идентифицированных по индексу Dst и усредненному за 1 ч индексу AE. Это может объясняться тем, что AE определяется интенсивностью аврорального электроджета, тогда как индекс Dst определяется возмущениями экваториального кольцевого тока; индекс ар, будучи показателем среднеширотной геомагнитной активности, имеет связь как с интенсивностью авроральной активности, так и с возмущениями кольцевого тока.

Суточное и сезонное распределение количества геомагнитных событий, идентифицированных по индексам *ap* и *Dst*, может быть объяснено взаимной геометрией магнитного поля Земли и межпланетного магнитного поля. На сезонную зависимость количества геомагнитных событий, определенных по индексу *AE*, также оказывает заметное влияние сезонная зависимость ионосферной проводимости, что объясняет доминирование количества летних бурь над числом зимних бурь, однако не объясняет тот факт, что количество геомагнитных событий весной заметно меньше, чем осенью. УТ-зависимость количества геомагнитных событий, определенных по усредненному за 1 ч индексу *AE*, согласуется с зависимостью интенсивности аврорального электроджета, полученной по результатам численного моделирования.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00213. Данные OMNI были получены через интерфейс GSFC/SPDFOMNI-Web на сайте <https://omniweb.gsfc.nasa.gov>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ратовский К.Г., Клименко М.В., Клименко В.В. и др. // Солн.-земн. физ. 2018. Т. 4. № 4. С. 32; Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Klimenko V.V. et al. // Solar Terr. Phys. 2018. V. 4. No. 4. P. 26.
2. Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Yasyukevich Y.V., Klimenko V.V. // RWP (Kazan, 2019). P. 183.
3. Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Yasyukevich Y.V. et al. // Atmosphere. 2020. V. 11. No. 12. P. 1308.
4. Korenkov Y.N., Klimenko V.V., Förster M. et al. // J. Geophys. Res. Space Phys. 1998. V. 103. P. 14697.
5. Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., Clúa, de Gonzalez A.L. // Space Sci. Rev. 1999. V. 88. P. 529.
6. Gonzalez W.D., Joselyn J.A., Kamide Y. et al. // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. No. A4. P. 5771.
7. <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>.
8. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Ratovsky K.G. et al. // Radio Science. 2011. V. 46. Art. No. RS0D 03.
9. Prölss G.W. // In: Characterising the ionosphere. Art. No. 10. France: Neuilly-sur-Seine, 2006.
10. Lu G., Richmond A.D., Roble R.G., Emery B.A. // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. No. A11. P. 24493.
11. Loewe C.A., Prölss G.W. // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. No. A7. P. 14209.
12. Balan N., Batista I.S., Tulası Ram S. et al. // Geoscience Lett. 2016. V. 3. Art. No. 3.
13. Marques de Souza Franco A., Hajra R., Echer E., Bolzan M.J.A. // Ann. Geophys. 2021. V. 39. P. 929.
14. Malin S.R.C., Mete Isikara A. // Geophys. J. Int. 1976. V. 47. No. 3. P. 445.
15. Макаров Г.А. // Солн.-земн. физ. 2020. Т. 6. № 4. С. 59; Makarov G.A. // Sol.-Terr. Phys. 2020. V. 6. No. 4. P. 50.
16. Marques de Souza Franco A., Hajra R., Echer E., Bolzan M.J.A. // Ann. Geophys. 2021. V. 39. No. 5. P. 929.
17. Данилов А.А., Крымский Г.Ф., Макаров Г.А. // Геомагн. и аэроном. 2013. Т. 53. № 4. С. 469; Danilov A.A., Krymskii G.F., Makarov G.A. // Geomagn. Aeron. 2013. V. 53. No. 4. P. 441.
18. Zhao H., Zong Q.-G. // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. No. A11. P. 222.
19. Lyatsky W., Hamza A.M. // Canad. J. Phys. 2011. V. 79. No. 6. P. 907.
20. Cliver E.W., Kamide Y., Ling A.G. // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. No. A2. P. 2413.
21. Klimenko V., Klimenko M. // Adv. Space Res. V. 56. No. 9. P. 1982.

Comparative analysis of geomagnetic events identified by various indices

K. G. Ratovsky^{1, *}, M. V. Klimenko², A. M. Vesnin¹, K. V. Belyuchenko¹, Y. V. Yasyukevich¹

¹*Institute of Solar-Terrestrial Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, 664033 Russia*

²*West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences, Kaliningrad, 236016 Russia*

**e-mail: ratovsky@iszf.irk.ru*

We presented the results of comparative analysis of geomagnetic events identified by various indices. A previously developed technique is used to identify magnetic storms by the Dst index. As a basis for identification, we chose the previously developed method for identifying geomagnetic storms based on the Dst index. A similar method was implemented to identify geomagnetic events by the ap and AE indices. Comparative analysis includes: (1) identification of common geomagnetic events identified by various indices; (2) identification of cases when an event is a strong geomagnetic disturbance by one of the indices (Dst, ap, AE) and is not a geomagnetic event by at least one of the two remaining indices; and (3) a comparative analysis of the diurnal and seasonal distribution of the number of geomagnetic events identified by different indices.

Keywords: geomagnetic storms, geomagnetic indices Dst, ap, AE, statistics