

УДК 550.386

ГЕОМАГНИТНАЯ АКТИВНОСТЬ КАК ОТРАЖЕНИЕ ПРОЦЕССОВ В МАГНИТОСФЕРНОМ ХВОСТЕ. 1. ИСТОЧНИК СУТОЧНОЙ И ПОЛУГОДОВОЙ ВАРИАЦИЙ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2013 г. **А. А. Данилов**, Г. Ф. Крымский, Г. А. Макаров

Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН, г. Якутск

e-mail: gmakarov@ikfia.ysn.ru

Поступила в редакцию 03.08.2011 г.

После доработки 21.05.2012 г.

Исследуются суточная и полугодовая вариации геомагнитной активности. Установлено, что имеется внутримангнитосферный источник магнитной активности, зависящий от угла ϕ между плоскостями плазменного слоя хвоста магнитосферы и геомагнитного экватора. Показано, что суточная и полугодовая вариации магнитной активности создаются изменением величины этого угла.

DOI: 10.7868/S0016794013040056

1. ВВЕДЕНИЕ

Давно известно, что геомагнитная активность обладает полугодовыми вариациями с максимумами в равноденственные периоды. Ранее для объяснения этой вариации были выдвинуты две гипотезы: равноденственная [Bartels, 1932; McIntosh, 1959] и аксиальная [Cortie, 1912]. Равноденственная гипотеза связывает полугодовые вариации с изменением ориентации геомагнитного диполя относительно линии Солнце–Земля, аксиальная гипотеза – с изменением гелиошироты Земли. Были выдвинуты и другие гипотезы, исходящие из того, что причиной полугодовой вариации являются внешние относительно магнитосферы источники, однако ясного представления о физической природе полугодовой вариации магнитной активности все еще нет.

Исследование геометрического эффекта в авроральном поглощении радиоволн, возникающего при изменении наклона геомагнитного диполя относительно направления на Солнце, показало, что в субавроральной зоне, куда проектируются силовые линии замкнутой магнитосферы, наблюдается ярко выраженная полугодовая вариация с максимумом в равноденственные периоды, тогда как в полярной шапке такой эффект отсутствует [Данилов и Соколов, 2001]. Это означает, что полугодовая вариация радиоволн является свойством устойчивой магнитосферы. В работе [Данилов и Макаров, 2006] показано, что в возмущенные периоды на средних широтах суточная и полугодовая вариации зависят от положения плазменного слоя хвоста магнитосферы относительно геомагнитного экватора.

Целью статьи является исследование суточной и полугодовой вариаций магнитной активности, связанных с изменением расположения плазменного слоя хвоста относительно геомагнитного экватора, а также выяснение физической причины полугодовой вариации геомагнитной активности.

2. СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ МАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

Для анализа используются трехчасовые геомагнитные индексы a_n и a_s и их среднесуточные значения A_n и A_s за 1968–1975 гг. [Geomagnetic Data, 1972–1976].

Пространственно-временные изменения магнитной активности состоят из нескольких простых мод. Во-первых, в связи с тем, что сезоны в северном и южном полушариях Земли противоположны, имеется мода, зависящая от освещенности полушарий. Эта мода легко выделяется, если образовать разности среднемесячных и трехчасовых значений этих индексов. При этом выделяется мода, связанная с летним периодом местного сезона. Во-вторых, имеется мода, зависящая от знака межпланетного магнитного поля (ММП). Магнитная активность возрастает в осенние месяцы и в утренние часы в случае положительного знака ММП ($+B_y$) и в весенние месяцы и в вечерние часы в случае отрицательного ММП ($-B_y$). Этот секторный эффект протекает в северном и южном полушариях синфазно. Для исключения эффекта секторной структуры ММП данные в периоды $+B_y$ и $-B_y$ суммируются. В-третьих, магнитная активность обладает существенной асимметрией, заключающейся в том, что в северном полушарии в положительном сек-

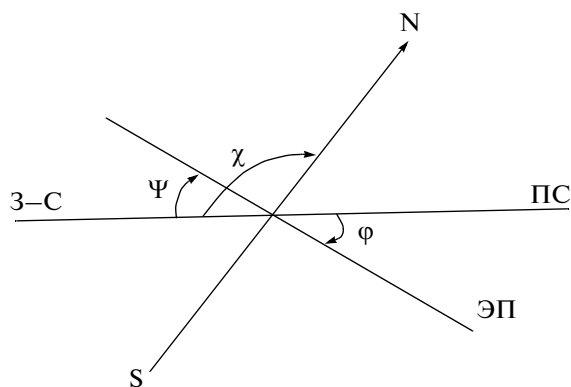


Рис. 1. Схема расположения угла атаки χ , угла ψ и угла ϕ между плазменным слоем (ПС) и геомагнитным экватором (ЭП), показаны геомагнитная ось (NS) и линия Земля–Солнце (З–С).

торе ММП активность выше, чем в южном, а в отрицательном секторе ММП, наоборот, активность выше в южном полушарии, чем в северном.

Магнитная активность сильно зависит от межпланетных параметров, что сильно осложняет анализ. Для ослабления этого эффекта весь материал разделялся на пять независимых друг от друга групп. Так в первую группу вошли дни, имеющие суточную сумму ΣKp в диапазоне 0–12 баллов, во вторую – 13–18, в третью – 19–23, в четвертую – 24–33, в пятую – более, чем 34 балла. Обработка выполнялась методом наложенных эпох.

Геофизические явления зависят от геомагнитных координат и от ориентации геомагнитного диполя в межпланетном пространстве, в частности, относительно направления на Солнце. На отдельной станции суточные вариации геомагнитного поля протекают по местному времени. Индексы a_n и a_s получены по данным 5 северных и 7 южных обсерваторий, расположенных на разных долготах. В этом случае вариации по местному времени исключаются, а вариации по мировому времени выделяются. В литературе в качестве мирового (планетарного) времени используется лондонское время UT. При этом, чтобы определить направление дипольной оси от Солнца и к Солнцу, авторы вычитают от UT 4 ч 30 мин и 16 ч 30 мин. Если приходится пользоваться мировым временем часто, то эта процедура весьма неудобна. В настоящей статье в качестве мирового (планетарного) времени принято солнечное время северного геомагнитного полюса GMT, отличающееся от UT на 4 ч 30 мин ($GMT = UT - 4.5$). Это время однозначно определяет ориентацию геомагнитного диполя в межпланетном пространстве. Так, в 12 и 24 ч GMT геомагнитная ось направлена соответственно в сторону Солнца и от Солнца.

В статье анализируются изменения индекса $a_m = 1/2(a_n + a_s)$ при изменении наклона геомагнитного диполя в сторону Солнца и от Солнца, характеризуемого углом ϕ . На рисунке 1 приведена схема, показывающая расположение угла ϕ в хвосте и угла атаки χ . Хвост магнитосферы ориентируется по направлению скорости солнечного ветра, поэтому плазменный слой располагается, вероятно, на продолжении линии Земля–Солнце. Угол атаки χ между солнечным ветром и лобовой частью магнитосферы равен углу между линией Солнце–Земля и геомагнитной осью, угол ϕ образуется прямыми: продолжением линии Солнце–Земля в хвосте и линией пересечения плоскости XZ с плоскостью экватора Земли. Согласно схеме угол атаки $\chi = 90^\circ + \psi$, где ψ – переменная по сезонам часть угла атаки, отсчитываемая от геомагнитного экватора ($\sin \chi = \sin(90^\circ + \psi) = \cos \psi$). Углы ϕ и ψ равны, как накрест лежащие при двух пересекающихся прямых. Отметим, что углы ϕ и ψ равны только по величине, но они характеризуют два разных источника: угол ψ определяет падение плазмы солнечного ветра на магнитосферу, а угол ϕ – инжекцию потока заряженных частиц из хвоста во внутреннюю магнитосферу. В дальнейшем для краткости угол ψ будем называть углом атаки солнечного ветра, а угол ϕ – углом между плазменным слоем и геомагнитным экватором.

На рисунке 2 представлены трехчасовые изменения a_m в возмущенные дни ($\Sigma Kp = 24–33$) и $\cos \phi$ для зимнего (а) и летнего (б) сезонов. Отметим, что соответствие между изменениями a_m и $\cos \phi$ недостаточное. Фаза максимума суточной вариации a_m приходится на 14.4 GMT и 4.0 GMT для зимы и лета соответственно, тогда как соответствующие максимумы $\cos \phi$ приходятся на 12.0 GMT и 24.0 GMT. Сдвиг фазы в a_m связан с наличием отмеченных выше простых мод магнитной активности по трем причинам: 1) в декабрьское солнцестояние электропроводимость ионосферы в S полушарии выше, чем в N полушарии, а в июньское солнцестояние, наоборот, электропроводимость в N полушарии выше, чем в S полушарии; 2) магнитная активность в положительном секторе ММП доминирует в N полушарии, а в отрицательном секторе ММП в S полушарии; 3) в положительном секторе ММП активность возрастает в 6 ч GMT, а в отрицательном секторе ММП – в 18 ч GMT. В силу этих причин в зимние месяцы максимум суточной вариации a_m сдвигается на 14.4 ч GMT, а в летние – на 4.0 ч GMT. В равноденствия угол ϕ практически не изменяется по времени суток, поэтому отсутствуют и вариации a_m .

Для определения корреляции Δa_m с $\Delta \phi$ в течение года были вычислены амплитуда R и фаза максимума T первой гармоники, имеющей суточ-

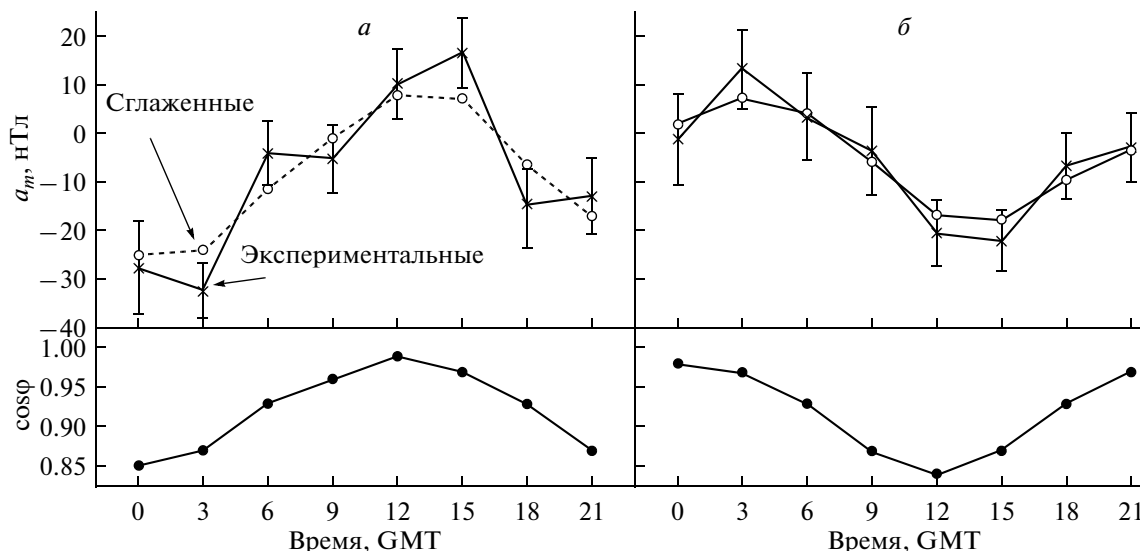


Рис. 2. Суточные вариации геомагнитного индекса a_m в возмущенные дни ($\Sigma Kp = 24-33$) и $\cos\phi$ в зимние (ноябрь–декабрь–январь) (а) и летние (июнь–июль–август) (б) месяцы (учетверенные значения a_m), для экспериментальных данных приведены среднеквадратичные ошибки a_m .

ный период. Далее вектор суточной вариации R был разложен на две компоненты $a_x = R\cos\omega(t + T)$ и $a_y = R\sin\omega(t + T)$. Компонента a_x определяет суточные изменения a_m , возникающие при изменении наклона диполя в солнечном (0–12 ч GMT) направлении, компонента a_y – в перпендикулярном (6–18 ч GMT) направлении. Реальные сезонные изменения, зависящие от $\Delta\phi$ наблюдаются только в компоненте a_x . Изменения a_y в положительном и отрицательном секторах ММП противоположны по фазе [Данилов, 1993] и при образовании их суммы они нейтрализуются.

На рисунке 3а представлены изменения a_x по месяцам для четырех групп дней с разной магнитной активностью (данные по группе $\Sigma Kp > 34$ не приведены в связи с их малой статистикой). На рисунке 3б приведены аналогичные графики $\Delta\cos\phi = 1/2 (\cos\phi_{12} - \cos\phi_{24})$, где индексы 12 и 24 обозначают часы суток по GMT. Видно, что в зимние месяцы компонента a_x направлена в сторону Солнца, в летние – от Солнца. Также меняет знак от зимы к лету величина $\Delta\cos\phi$. Наибольшие значения a_x и $\Delta\cos\phi$ приходятся на солнцестояния, а в равноденствия графики переходят через нуль. В таблице приведены для четырех групп дней коэффициенты регрессии β и корреляции r , полученные по данным рис. 3. Из таблицы видно, что коэффициенты корреляции достаточно высоки, особенно по группам возмущенных дней. Таким образом, по данным рис. 3 и таблицы можно утверждать, что между изменениями a_x и косинуса угла ϕ имеется полная корреляция.

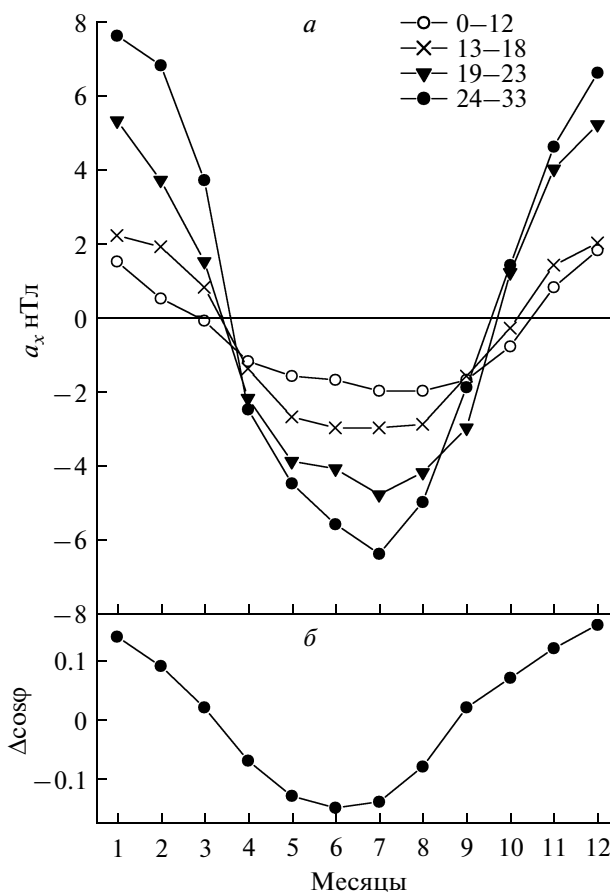


Рис. 3. Изменения 0–12-часовой компоненты a_x (сглаженные значения размаха суточной волны) индекса a_m для 4-х уровней магнитной активности ΣKp (а) и разности $\Delta\cos\phi = 1/2 (\cos\phi_{12} - \cos\phi_{24})$, где индексы 12 и 24 обозначают часы суток по GMT (б) по месяцам.

Коэффициенты регрессии β и корреляции r между размахом суточной волны индекса a_m и $\cos\varphi$ при разном уровне магнитной активности

Группа магнитной активности, ΣKp	Коэффициенты регрессии β , нТл/0.1	Коэффициенты корреляции r
0–12	11.6	0.88
13–18	20	0.95
19–23	37.3	0.97
24–33	48.8	0.97

3. ГОДОВЫЕ ВАРИАЦИИ МАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

Пространственно-временные изменения индексов A_n и A_s по времени года содержат три простые моды, связанные с изменением освещенности полушарий Земли, эффектом секторной структуры ММП и асимметрией магнитной активности в северном и южном полушариях. При использовании индекса $A_m = 1/2(A_n + A_s)$, а также суммы $(A_m^+ + A_m^-)$, где знаки (+) и (–) обозначают сектора ММП, эти простые вариации практически нейтрализуются.

Выше показано, что суточные изменения a_m связаны с изменением угла $\varphi = (D \pm 11.5^\circ)$ между плазменным слоем хвоста и геомагнитным экватором, где D – склонение Солнца. Можно ожидать, что магнитная активность содержит полуго-

довые вариации, обусловленные изменением D , имеющего полугодовой период.

Более ясно полугодовая вариация проявляется в частоте встречаемости буревых дней. На рисунке 4 представлены месячные изменения числа дней N в периоды с различной магнитной активностью. Слева (*a*) – по данным за 1966–1975 гг. Здесь данные сгруппированы согласно нашей выборке. Справа (*б*) – месячные изменения числа буревых и спокойных дней за 1932–1961 гг. [Мишин и Шеломенцев, 1975]. Видно, что полугодовые изменения N с максимумом в равноденственные периоды наблюдаются в возмущенные дни (слева – кривая для $\Sigma Kp = 24–33$ и справа – кривая D). Отметим, что полугодовые изменения N наблюдаются и в спокойные дни, но фаза максимума этой вариации противоположна возмущенным дням. Возрастание числа спокойных дней в солнцестояния говорит о том, что в эти месяцы число буревых дней уменьшается. Следовательно, этот факт косвенно свидетельствует о наличии полугодовой вариации магнитной активности – в возмущенные дни полугодовая вариация образуется в результате возрастания буревых дней в равноденствия, а в спокойные периоды – в результате понижения магнитной активности в солнцестояния.

Теперь рассмотрим полугодовые вариации магнитной активности по данным индекса A_m . На рисунке 5 приведены сезонные изменения A_m , определенные двумя способами. Во-первых, месячные суммы ΣA_m , полученные наложением

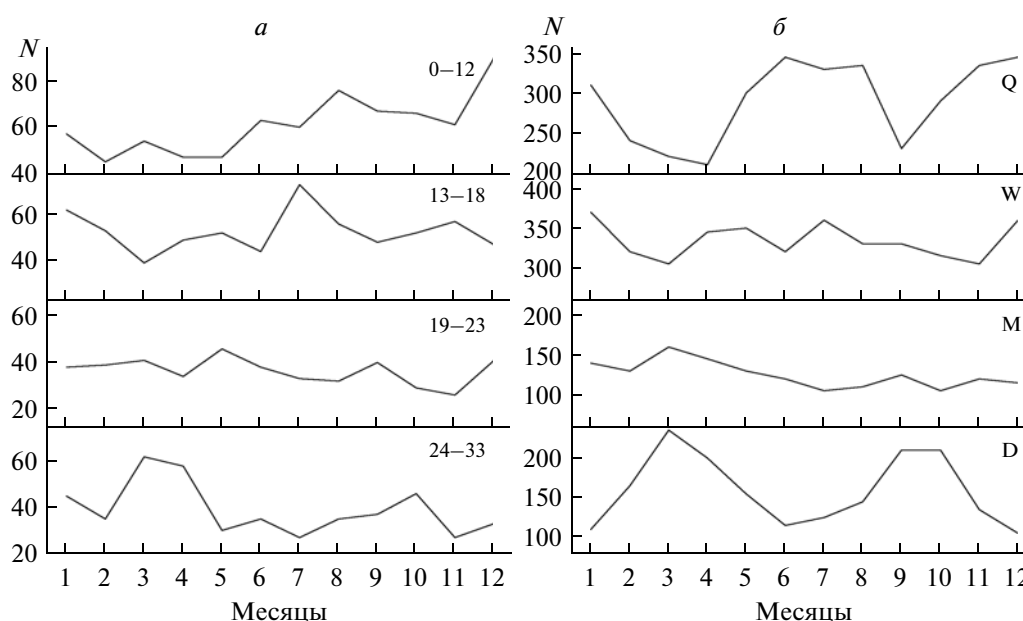


Рис. 4. Годовой ход числа дней с различной магнитной активностью, *a* – за период 1968–1975 гг., *б* – 1932–1961 гг. [Мишин и Шеломенцев, 1975]: *Q* – спокойные дни, *W* – слабые возмущения, *M* – умеренные возмущения, *D* – сильные возмущения.

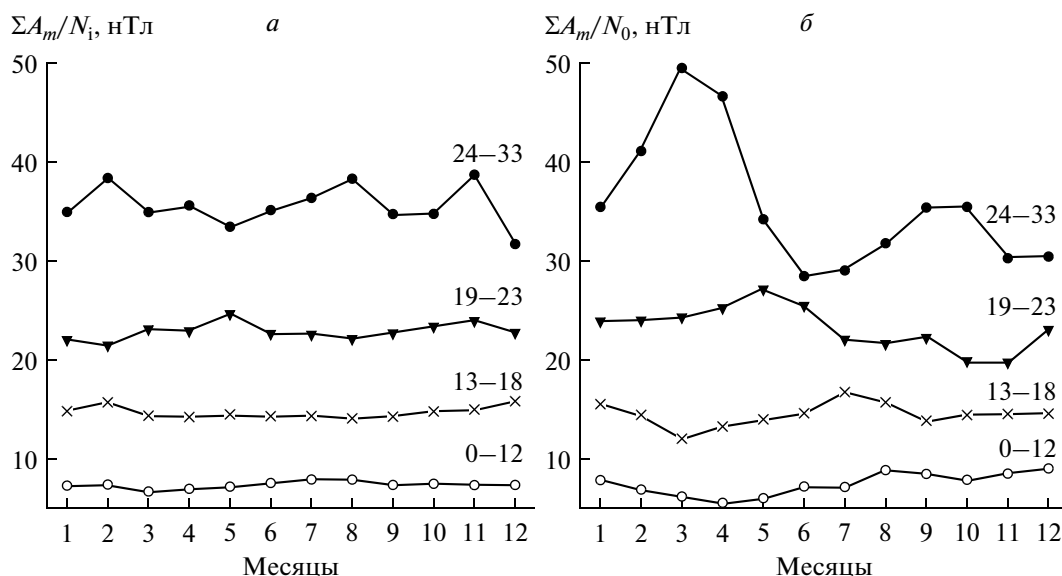


Рис. 5. Годовые вариации A_m при разных уровнях магнитной активности ΣKp : *a* – месячные ΣA_m , деленные на месячное число дней N , *б* – месячные ΣA_m , деленные на среднегодовые N_0 .

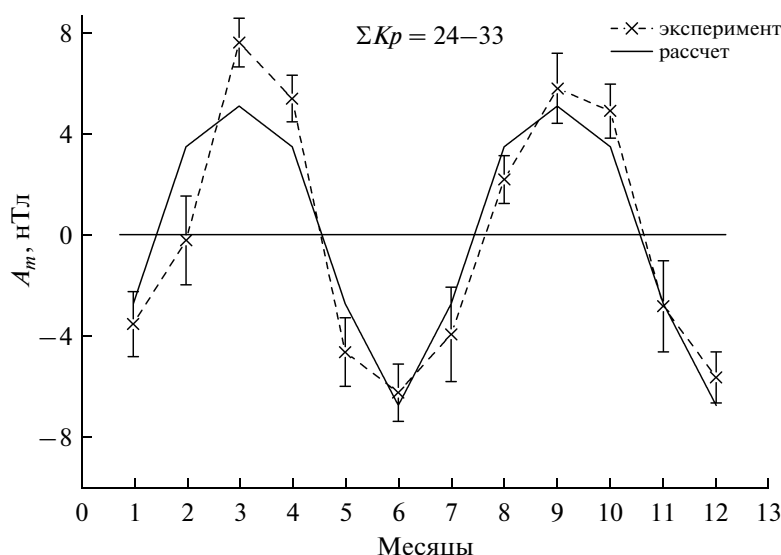


Рис. 6. Полугодовые вариации индекса A_m по возмущенным дням ($\Sigma Kp = 24-33$), точки – значения, вычисленные с помощью коэффициента регрессии $\beta = 78.6$, крестики – экспериментальные значения после исключения годовой волны, приведены среднеквадратичные ошибки A_m .

эпох, делились на число дней в данном месяце N (рис. 5*a*). В этом варианте в возмущенные дни полугодовая вариация практически отсутствует. Это связано с тем, что месячные изменения ΣA_m и числа дней N имеют одинаковые полугодовые вариации. Во втором варианте в качестве делителя принимались среднегодовые числа $N_0 = 1/12 (N_1 + N_2 \dots + N_{12})$, где индексы означают месяцы (рис. 5*б*). Как видно, в этом варианте в возмущенные дни ($\Sigma Kp = 24-33$) наблюдается отчетливое повышение A_m в равноденственные периоды.

Кривая содержит существенные изменения с годовым периодом. Гармонический анализ показал, что амплитуда годовой волны $R = 6.8$ нТл, фаза максимума приходится на 23 марта. Вероятно, эта годовая вариация связана с большей активностью южной полусферы Солнца по сравнению с северной. Но нас интересует полугодовая вариация A_m . Поэтому из данных в возмущенные дни исключена годовая волна A_m и остатки вариаций коррелировались с изменением $\cos^2 D$. Получено, что коэффициент корреляции $r = 0.93$, регрессии $\beta = 78.4$.

На рисунке 6 представлены полугодовые вариации индекса A_m по возмущенным дням ($\Sigma Kp = 24-33$): экспериментальная вариация (крестики) после исключения годовой волны и рассчитанная вариация с помощью коэффициента регрессии $\beta = 78.4$ (точки). Как видно, рассчитанная кривая полностью соответствует экспериментальной. Отсюда полугодовая вариация магнитной активности зависит от произведения $\cos\psi \cdot \cos\varphi = \cos^2 D$.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование суточных и полугодовых вариаций индекса a_m показало, что в возмущенные периоды магнитная активность обладает суточной вариацией, зависящей от угла φ , и полугодовой вариацией, зависящей от угла D .

Относительно физической причины суточных и полугодовых вариаций магнитной активности были высказаны следующие гипотезы.

Аксиальная гипотеза [Cortie, 1912] связывает полугодовые вариации магнитной активности с изменением гелиошироты Земли. Этот источник не создает суточные вариации, так как в пределах одного дня гелиоширота Земли не изменяется. Полученные нами данные свидетельствуют, что полугодовые и суточные вариации связаны с изменением угла φ . В работе [de La Sayette, 2004] отмечается, что суточные и полугодовые вариации имеют одинаковую физическую причину. Следовательно, отсутствие в гипотезе Корти суточных вариаций указывает на то, что эта гипотеза не может быть принята для объяснения полугодовой вариации магнитной активности.

В работе [Russell, McPherron, 1973] выдвинута гипотеза, согласно которой полугодовая и суточная вариации геомагнитной активности обусловлены эффективной южной ($B_S^{\text{эфф}}$) компонентой ММП. $B_S^{\text{эфф}}$ создается азимутальной компонентой ММП вследствие изменения взаимной ориентации солнечно-эклиптической и солнечно-магнитосферной систем координат. Авторы постулируют, что северная B_N компонента ММП не взаимодействует с магнитосферой. Поэтому они получают две полуволны с максимумами в осенний и весенний периоды в случае $+Vu$ и $-Vu$ секторов ММП соответственно. В работе [Данилов, 1993] на основании регрессионного анализа геомагнитной активности и межпланетных параметров было получено, что зависимость индекса A_m от северной и южной ориентаций вектора B ММП дается одним и тем же выражением $A_m \sim (k_1 V + k_2 B + k_3) \cdot \sin\Theta$, где V — скорость солнечного ветра, B — модуль ММП, Θ — широтный угол ММП; откуда был сделан вывод, что B_N -компонента ММП влияет на геомагнитную активность

A_m так же эффективно, как и B_S -компонента, но с противоположным знаком. Поэтому в периоды $+Vu$ и $-Vu$ получаются две годовые волны с противоположными фазами, которые при наложении друг на друга взаимно нейтрализуются и полугодовая волна не образуется. По этой модели суточная вариация имеет максимумы в 6 и 18 ч GMT, а амплитуда максимальна в периоды равноденствий. Согласно нашим данным, фаза максимума суточной вариации a_m приходится на 12 и 24 ч GMT, а амплитуда волны наибольшая в периоды солнцестояний и уменьшается до нуля в периоды равноденствий. На основании изложенного можно утверждать, что гипотеза [Russell and McPherron, 1973] не подтверждается данными экспериментальных наблюдений.

В работе [Boller and Stolov, 1970] предлагается механизм, согласно которому на флангах магнитосферы возникает неустойчивость Кельвина-Гельмгольца, которая модулирует геомагнитную активность и создает полугодовую и суточную вариации. По этой модели, геомагнитная активность развивается одновременно с воздействием солнечного ветра на геомагнитное поле. Вместе с тем в статье [Green, 1984] приведены результаты анализа индекса A_m за 1866–1980 гг. и A_p за 1932–1980 гг. Автор подтвердил равноденственный механизм полугодовой вариации, а также пришел к выводу, что неустойчивость Кельвина-Гельмгольца не может быть ответственной за геомагнитную активность.

Механизм, предложенный в работах [Lyatsky et al., 2001; Newell et al., 2002], предполагает, что геомагнитная активность возрастает, когда авроральные зоны на ночной стороне обоих полушарий одновременно находятся в темноте, что случается в равноденствия. При таких условиях нет проводящих путей в ионосфере для цепи солнечный ветер—магнитосфера—ионосфера и геомагнитные возмущения усиливаются. Эта гипотеза нуждается в дальнейшей проверке, так как проводимость ионосферы обеспечивается не только ультрафиолетом, но и вторжением в ионосферу корпускулярных потоков из хвоста магнитосферы.

Во второй части нашей статьи мы рассматриваем процесс формирования магнитосферного хвоста и сопряженный процесс конвекции силовых трубок к Земле. При этом конвекция сопровождается электронными высыпаниями в ионосферу. Параметры хвоста (напряженность магнитного поля в хвосте, электрический потенциал поперек магнитосферы, определяющий поле “утро—вечер”, средняя энергия высыпающихся электронов) и соответственно мощность, выделяемая в высыпаниях, зависят от угла наклона магнитного диполя к скорости солнечного ветра. Эта мощность максимальна, когда диполь не имеет

наклона и, как показали оценки, она снижается на 40%, если угол наклона достигает 23.5° . Этот механизм объясняет одновременно как суточные, так и полугодовые вариации, полученные нами выше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что имеется внутримангнитосферный источник магнитной активности, зависящий от угла φ между плоскостями плазменного слоя хвоста магнитосферы и геомагнитного экватора.

2. Показано, что суточная вариация магнитной активности обусловлена изменением косинуса угла φ , а полугодовая вариация магнитной активности создается изменением $\cos\psi \cdot \cos\varphi = \cos^2 D$, где ψ – угол между скоростью солнечного ветра и геомагнитным экватором, D – склонение Солнца.

Таким образом, установлена физическая причина образования полугодовой и суточной вариаций магнитной активности. Изменение наклона магнитного диполя по отношению к направлению скорости солнечного ветра меняет напряженность магнитного поля в хвосте магнитосферы. Это влечет за собой изменение мощности электронных высыпаний в авроральных широтах (этот вопрос исследуется во второй части статьи).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Данилов А.А. Стационарная структура межпланетного магнитного поля и геомагнитная активность. Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 1993.
- Данилов А.А., Макаров Г.А. Зависимость магнитной активности от расположения плазменного слоя относительно геомагнитного экватора // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 46. № 2. С. 168–174. 2006.
- Данилов А.А., Соколов В.Д. Авроральное поглощение и электрические поля в магнитосфере // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 41. № 4. С. 454–462. 2001.
- Мишин В.М., Шеломенцев В.В. Искусственные и реальные геомагнитные эффекты секторной структуры ММП // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. Вып. 36. С. 74–88. М.: Наука. 1975.
- Bartels J. Terrestrial magnetic activity and its relations to solar phenomena // J. Geophys. Res. V. 37. P. 1–52. 1932.
- Boller B.R., Stolov H.L. Kelvin-Helmholtz Instability and the Semiannual Variation of Geomagnetic Activity // J. Geophys. Res., Space Physics. V. 75. № 31. P. 6073–6084. 1970.
- Cortie A.L. Sunspot and terrestrial magnetic phenomena, 1898–1911: The cause of the annual variation of magnetic disturbances // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. V. 73. P. 52–60. 1912.
- Geomagnetic Data. IAGA Bulletin 1972–1976. № 32, a–h.
- Green C.A. The semiannual variation in the magnetic activity indices Aa and Ap // Planet. Space Sci. V. 32. P. 297–306. 1984.
- de La Sayette P. Empirical simulations for the annual diurnal activity // J. Geophys. Res. V. 109. P. A07207. 2004. doi: 10.1029/2003JA010353.
- Lyatsky W., Newell P.T., Hamza A. Solar illumination as cause of the equinoctial preference for geomagnetic activity // Geophys. Res. Lett. V. 28. P. 2353–2356. 2001.
- McIntosh D.H. On the annual variation of magnetic disturbances // Phil. Trans. Roy. Soc. London. Ser. A. V. 251. P. 525–552. 1959.
- Newell P.T., Sotirelis T., Skura J.P., Meng C.-I., Lyatsky W. Ultraviolet insolation drives seasonal and diurnal space weather variations // J. Geophys. Res. V. 107. № A10. 1305. doi:10.1029/2001JA000296. 2002.
- Russell C.T., McPherron R.L. Semiannual variation of geomagnetic activity // J. Geophys. Res. V. 78. № 1. P. 92–108. 1973.