

ОТКЛИК ВЫСОКОШИРОТНОЙ ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЫ НА ИЗМЕНЕНИЯ ОРИЕНТАЦИИ ВЕКТОРА ПОЙНТИНГА ВБЛИЗИ ОРБИТЫ ЗЕМЛИ ОТНОСИТЕЛЬНО ОРИЕНТАЦИИ ГЕОМАГНИТНОГО МОМЕНТА

Т.В. Кузнецова и А.И. Лаптухов

RESPONSE OF THE HIGH-LATITUDE POLAR IONOSPHERE TO CHANGES IN THE POYNTING VECTOR ORIENTATION NEAR THE EARTH ORBIT RELATIVE TO THE GEOMAGNETIC MOMENT ORIENTATION

T.V. Kuznetsova, A.I. Laptukhov

Впервые проведено исследование влияния взаимной ориентации вектора плотности электромагнитной энергии Умова–Пойнтинга \mathbf{P} в солнечном ветре и вектора магнитного момента Земли \mathbf{M} (с учетом его орбитального и суточного движений) на геомагнитную активность на основе измерений параметров солнечного ветра на орбите Земли в 1963–2005 гг. Показано, что компонента P_m вектора \mathbf{P} вдоль вектора \mathbf{M} имеет четкую годовую вариацию с экстремумами в ноябре и мае и UT-вариацию с экстремумами в ~6 и 18 UT. Анализ показал, что фазы этих вариаций определяются только геометрическими параметрами и не зависят от знака секторной структуры межпланетного магнитного поля (ММП). Приведены экспериментальные данные о планетарной и высокоширотной геомагнитной активности, что является откликом на изменение ориентации \mathbf{P} по отношению к \mathbf{M} . Оценена мощность источников электромагнитной энергии солнечного ветра во время больших геомагнитных возмущений.

For the first time, the research has been carried out into effect of the mutual orientation between Poynting vector \mathbf{P} of the electromagnetic energy density in the solar wind and the vector \mathbf{M} of the Earth's magnetic moment (with regard to its orbital and diurnal motions) on the geomagnetic activity. Measurements of solar wind parameters in the Earth's orbit (1963–2005) were used. The P_m component of the \mathbf{P} vector along the \mathbf{M} vector is shown to have a clear yearly variation with the extrema in November and May, and the UT variation with the extrema at ~6 and 18 UT. As shown by the analysis, the phases of the variations are determined only by geometric parameters and do not depend on the sector structure sign of the interplanetary magnetic field (IMP). The paper presents the experimental data on planetary and high-latitude geomagnetic activity that is the response to changes in \mathbf{P} orientation relative to \mathbf{M} . The power of the solar wind electromagnetic energy sources during strong geomagnetic disturbances is also estimated.

Вектор Пойнтинга $\mathbf{P} = c/4\pi[\mathbf{E}, \mathbf{B}]$ (в гауссовой системе) характеризует количество энергии, переносимой через единицу поверхности, перпендикулярной направлению распространения энергии, за единицу времени. Поскольку взаимная ориентация \mathbf{P} и \mathbf{M} меняется при годовом орбитальном и суточном движениях Земли, мы прежде всего провели исследование годовой и UT-вариации компоненты вектора Пойнтинга вдоль геомагнитного момента \mathbf{M} . Статистическая годовая вариация компоненты вектора Пойнтинга вдоль геомагнитного момента P_m для восьми трехчасовых интервалов UT, полученная на основе измерений компонент ММП и скорости солнечного ветра вблизи орбиты Земли в 1963–2005 гг., показана на рис. 1 (P_m показан в произвольных единицах: $k10^4$ Вт/м², где k определялось удобством построения графика). Видно, что с ноября по февраль $P_m < 0$ (поток энергии направлен из северной полярной шапки), а с апреля по август $P_m > 0$ (поток энергии направлен в северную полярную шапку). Действительно, запишем компоненту P_m вектора \mathbf{P} вдоль вектора \mathbf{M} как $P_m = (\mathbf{P}, \mathbf{M}) = V(B_x B_y M_y - M_x B_y^2)$. Принимая во внимание, что $M_z B_z = 0$ (M_z мало изменяется и сохраняет знак: $M_z < 0$, $B_z \sim 0$) для большой статистики, а среднестатистическое ММП описывается спиралью Паркера, можно записать: $P_m = AVB_y 2\sin(\theta - \pi/4)$, где θ – угол, определяющий положение Земли при ее орбитальном движении, который отсчитывается от зимнего солнцестояния в северной полусфере; V – скорость солнечного ветра, B_y – азимутальная компонента ММП в системе координат GSE, $A = \text{const}$. Из выражения для P_m видно, что $P_m = 0$ при $\theta = \pi/4$ (февраль) и

при $\theta = 5\pi/4$ (август), P_m достигает максимума при $\theta = 3\pi/4$ (май) и минимума при $\theta = 7\pi/4$ (ноябрь). Из выражения также следует, что амплитуда P_m модулируется $VB_y^2 = E_z B_y$. Следовательно, фаза годовой вариации P_m является чисто геометрическим эффектом и не зависит от знака секторной структуры ММП. Таким образом, анализ выражения для P_m -компоненты позволил сделать вывод о том, что фаза годовой статистической вариации P_m определяется геометрическими параметрами, описывающими изменение ориентации компонент вектора геомагнитного момента в плоскости эклиптики по отношению к ориентации вектора ММП при орбитальном движении магнитного момента Земли. Кроме того, фаза статистической годовой вариации P_m не зависит от знака секторной структуры ММП, описываемой спиралью Паркера. Последнее означает, что P_m может отвечать за ту часть геомагнитных возмущений, которая не связана со знаком секторной структуры ММП. При нарушении секторной структуры ММП фаза годовой вариации P_m будет отличаться от изображенной на рис. 1. Амплитуда годовой вариации P_m модулируется величиной компоненты электрического поля солнечного ветра, перпендикулярной плоскости эклиптики E_z , и модулем азимутальной компоненты B_y ММП. Откликом авроральной и полярной ионосферы на годовую вариацию P_m может быть не зависящая от знака ММП токовая система в полярной шапке, которая имеет годовую вариацию с экстремумами в мае и ноябре. Интенсивность этой эквивалентной токовой системы зависит от UT и времени года, а авторы [2] связывают ее с модулем ММП. В зоне сияний «←» бухты обусловлены западной

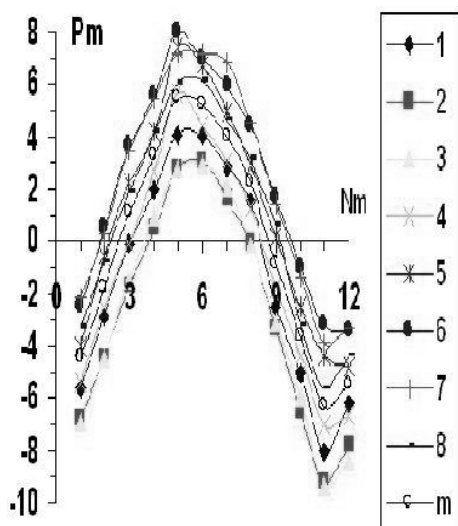


Рис. 1. Годовая вариация компоненты вектора Пойнтинга вдоль геомагнитного момента P_m для восьми трехчасовых интервалов UT, указанных справа, m – для всех интервалов UT, N_m – номер месяца в году.

струей (характеристикой является AL -индекс).

Мода, не зависящая от знака ММП, у AL -индекса имеет экстремумы в годовом ходе в ноябре и мае, а годовая вариация D_{st} , не зависящая от знака ММП, – в июне–мае и ноябре [1]. Фаза наблюдаемой годовой вариации AL и D_{st} , не зависящая от знака ММП, не имеет объяснения. Магнитной активности в зоне сияний свойственна зависимость от скорости солнечного ветра V и B_y ММП [1], что находится в согласии с нашими выводами. Результаты исследования связи K_p -индекса и компоненты P_m представлены на рис. 2. В целом виден рост K_p с увеличением P_m независимо от ее знака. Видна слабая асимметрия K_p относительно знака P_m : при направлении вектора \mathbf{P} вдоль вектора \mathbf{M} (в северную шапку) K_p в среднем выше, чем при противоположном направлении (в южную полярную шапку). Это явление еще предстоит детально исследовать.

Связанные со всемирным временем UT вариации aa -индекса (субавроральной геомагнитной активности) не имеют объяснения в настоящее время. Предложенный нами ранее механизм (зависящий от знака B_y ММП), рассматривающий UT-вариации геомагнитной активности, хорошо объясняет UT-вариацию K_p и D_{st} , но не объясняет UT-вариацию aa . Фаза UT-вариации aa -индекса практически не зависит от сезона года, имеет статистический минимум в 03–06 UT (среднее 04:30), а максимум – в 15–18 UT (16:30) [3]. На рис. 3 показана UT-вариация aa -индекса для различных месяцев в году. Обычно UT-вариацию aa пытаются как-то объяснить изменением проводимости в авроральной зоне в течение суток. Но эту гипотезу следует отбросить, так как самые глубокие минимумы (рис. 3) в течение года достигаются в мае–июне и в декабре; минимум летом несколько глубже зимнего минимума. Поскольку минимумы в UT-вариации aa в течение года достигаются вблизи солнцестояний (т. е. их появление не зависит от освещенности полярной шапки), для их объяснения надо искать другую основную причину, не связанную с проводимостью. Последнее не исключает влияния проводимости. В

работе [4] эффект зависимости UT-вариации Am -индекса планетарной геомагнитной активности от полярности ММП исключается использованием разности между двумя месяцами в солнцестояниях. Полученная таким образом не зависящая от знака секторной структуры UT-вариация Am -индекса имеет экстремумы в 04:30 и в 16:30 UT. С нашей точки зрения, основной причиной UT-вариации aa может быть UT-вариация P_m . На рис. 4 представлена зависимость P_m для восьми трехчасовых интервалов UT для каждого месяца в году. Видны экстремумы P_m в ~04:30 и в ~16:30 UT для средней кривой (m) в году. Именно в эти часы UT

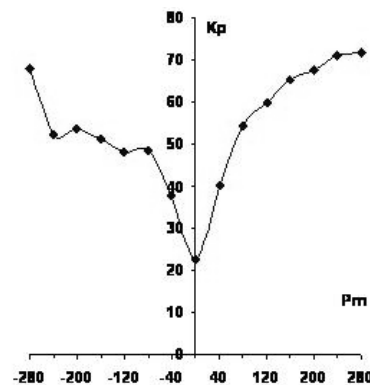


Рис. 2. Зависимость K_p -индекса от компоненты P_m вектора Пойнтинга (на основе измерений 1963–2005 гг.).

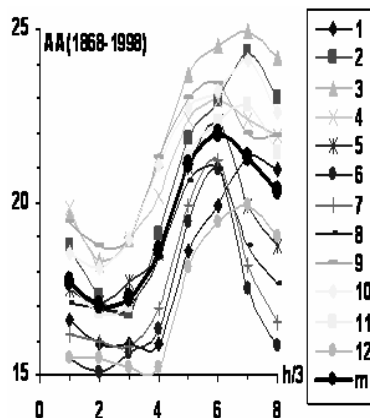


Рис. 3. UT-вариация aa -индекса (восемь трехчасовых интервалов) для каждого из 12 месяцев в году, указанных в колонке справа, m – среднее для всех месяцев в году (на основе ряда aa -индекса за 1868–1998 гг.).

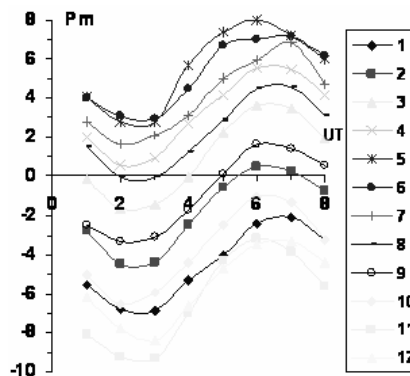


Рис. 4. UT-вариация компоненты P_m (восемь трехчасовых интервалов) для каждого из 12 месяцев в году, указанных в колонке справа (на основе измерений за 1963–2005 гг.).

наблюдаются экстремумы в UT-вариации *aa*-индекса. Таким образом, полученные ранее результаты по высокоширотной и планетарной геомагнитной активности, которая не зависит от знака секторной структуры ММП, могут быть объяснены в рамках нашего подхода.

Оценки мощности источников электромагнитной энергии солнечного ветра представляют значение не только для понимания физического механизма передачи энергии солнечного ветра магнитосфере во время магнитных бурь, но также важны для разработки физических механизмов их влияния и на другие геосферы. Мощность источников энергии в атмосфере составляет 10^{14} – 10^{15} Вт, в океане – 10^{13} Вт, ММП и солнечного ветра – 10^{12} Вт, геомагнитных бурь – 10^{12} Вт, полярных сияний – 10^{11} Вт, землетрясений – 10^{11} Вт [5]. Наши расчеты показывают, что при тех значениях ММП и электрического поля E , которые наблюдаются при геомагнитных бурях, $P = (0.1 \div 0.5) \text{ эрг}/(\text{с} \cdot \text{см}^2) = (1 \div 5) \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/\text{см}^2$. Следовательно, при площади сечения магнитосферы S (с радиусом $R_m = 10R_E$), перпендикулярного скорости солнечного ветра, $PS = (1 \div 6) 10^{12}$ Вт, что находится в согласии с данными других авторов, полученными из других соображений [5]. Эта величина не является верхним пределом мощности источников электро-

магнитной энергии солнечного ветра, если учесть геометрический фактор и то, что энергия во время бури поступает не только к дневной магнитопаузе, но и в высокоширотные области.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 06-05-64998.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилов А.А. Стационарная структура межпланетного магнитного поля и геомагнитная активность. Якутский научный центр СО РАН, Якутск 1993.
2. Мишин В.М. // Геомагнетизм и аэрономия. 1979. Т. 18. № 6. С. 961–991.
3. Кузнецова Т.В., Лаптухов А.И. Годовая и UT вариация геомагнитной активности для различных уровней возмущенности // Конференция «Экспериментальные и теоретические исследования основ прогнозирования гелиогеофизической активности». Сборник трудов. ИЗМИРАН, 10–15 октября, 2005. Санкт-Петербург, 2006. С. 217–222.
4. Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. М.: Мир, 1980. 299 с.
5. Сидоренков Н.С. Физика неустойчивостей вращения Земли. М.: Физматлит, 2002. 380 с.

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН, Троицк