

## Поляризация геомагнитных пульсаций Pc3/Pc4 в Северном и Южном полушариях: экспериментальные данные и численное моделирование

А. В. Зализовский, В. Г. Сеницын, Ю. М. Ямпольский

*Радиоастрономический институт НАН Украины,  
61002, г. Харьков, ул. Краснознаменная, 4*

*Статья поступила в редакцию 2 августа 2001 г.*

В работе анализируются суточные вариации параметров поляризации геомагнитных пульсаций классов Pc3 и Pc4, измерения которых проводились в Антарктике на станции “Академик Вернадский” и в Северном полушарии вблизи Харькова. Обнаружены два типа суточного хода позиционного угла эллипса поляризации: вращение большей оси вслед за Солнцем (эффект “подсолнуха”) и “арка” на плоскости “угол – время”. В теоретической модели дана интерпретация обоих эффектов. Показано, что суточные вариации поляризации пульсаций связаны как с изменениями проводимостей нижней ионосферы, так и с движением эффективного источника магнитозвуковой волны. Поляризационные особенности пульсаций можно использовать для определения пространственного спектра магнитогидродинамических волн выше отражающей ионосферной границы.

У роботі аналізуються добові варіації параметрів поляризації геомагнітних пульсацій класів Pc3 та Pc4, вимірювання яких проводилися в Антарктиці на станції “Академік Вернадський” та в Північній півкулі поблизу Харкова. Виявлено два типи добового ходу позиційного кута еліпса поляризації пульсацій: обертання більшої осі слідом за Сонцем (ефект “соняшника”) та “арка” на площині “позиційний кут – час”. У теоретичній моделі наведено інтерпретацію обох ефектів. Показано, що добові варіації поляризації пульсацій пов’язані як із змінами провідностей нижнього шару іоносфери, так і з рухом ефективного джерела магнітозвучової хвилі. Поляризаційні особливості пульсацій можна використовувати для визначення просторового спектру магнітогідродинамічних хвиль вище відбиваючої іоносферної границі.

### Введение

Вариации магнитного поля Земли, характеризующиеся периодами от нескольких секунд до десятков минут (геомагнитные пульсации), переносятся в околоземной плазме магнитогидродинамическими (МГД) волнами, частоты которых удовлетворяют условию  $\omega < \Omega_i$ , где  $\Omega_i$  – гирочастота ионов. Такие МГД возмущения играют важную роль в энергообмене между магнитосферой и ионосферой,

и измерения их характеристик могут быть использованы для диагностики параметров земной плазменной оболочки. В частности, в работе [1] была предложена методика оценки поперечных ионосферных проводимостей по радарным измерениям амплитуд и фаз МГД волн в пространственно разнесенных точках верхней ионосферы.

На поверхности Земли пульсации регистрируются в виде ультранизкочастотных (УНЧ) электромагнитных колебаний, характери-

ки которых также несут информацию об эффективных параметрах ионосферы и условиях распространения волновых возмущений в околоземной плазме.

В настоящей работе рассматриваются особенности суточного хода параметров поляризации геомагнитных пульсаций классов Pc3 и Pc4 (периоды  $10 \div 45$  и  $45 \div 150$  с соответственно). Наземные измерения вариаций геомагнитного поля в диапазоне  $10^{-3} \div 10^{-1}$  Гц проводились с помощью трехкомпонентного магнитометра в Южном полушарии Земли на антарктической станции “Академик Вернадский” ( $65^{\circ}15'$  ю. ш.,  $64^{\circ}16'$  з. д.) [2] и двухкомпонентного магнитометра в Северном полушарии в обсерватории Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина вблизи Харькова ( $49^{\circ}40'$  с. ш.,  $36^{\circ}50'$  в. д.).

Физическими причинами суточных вариаций поляризации УНЧ волн могут быть изменения со временем углового спектра падающих на ионосферу МГД возмущений, временные вариации проводимостей плазмы в E-слое и пространственная неоднородность их распределения [3, 4]. Поперечные относительно геомагнитного поля проводимости нижней ионосферы определяют условия отражения МГД колебаний на границе с нейтральной атмосферой и их трансформации в электромагнитное поле [1, 5]. С помощью численного моделирования в работе исследована эффективность “временных” механизмов при формировании суточных изменений поляризации УНЧ поля.

## 1. Экспериментальные данные

Измерения магнитного поля Земли в пункте, где теперь находится станция “Академик Вернадский”, непрерывно проводились с конца 50-х годов (магнитометрическая обсерватория AIA – Аргентинские острова, параметр Мак-Илвейна  $L = 2.4$ ). В марте 1998 г. обсерватория была оснащена высокочувствительным (0.1 нТл) трехкомпонентным магнитометром ЛЕМИ-004 с насыщенным сердечником [2], что позволило начать систематические измерения геомагнитных пульсаций. Статистическая обработка полученных данных в спек-

тральной области показала, что частота пульсаций, которую можно связать с резонансом силовых линий на широте станции, лежит в диапазоне Pc4 и составляет  $16 \div 18$  мГц.

Измерения в Северном полушарии (обсерватория ХНУ, номер магнитной оболочки  $L = 2$ ) были проведены раньше (октябрь 1997 года) магнитометром индукционного типа ИМ-II.

В обоих случаях исследовалось поведение двух параметров поляризационного эллипса: позиционного угла большей оси (относительно меридионального направления к экватору: в Южном полушарии – на север, в Северном – на юг) и коэффициента эллиптичности. Угол считался положительным при отклонении оси к востоку. Коэффициент эллиптичности – отношение длин малой и большой осей – также введен с учетом знака. Он положителен, если горизонтальная проекция вектора магнитного поля волны вращается против часовой стрелки. Следует отметить, что вращение вектора  $\vec{H}$  в Южном полушарии происходит преимущественно против часовой стрелки, а в Северном – по часовой, причем в дневные часы модуль коэффициента эллиптичности всегда близок к нулю. Далее основное внимание будет уделено вариациям позиционного угла.

Суточные вариации поляризации длиннопериодных пульсаций исследовались многими авторами [3, 4, 6-8]. В работе [3] описан поворот эллипса поляризации пульсаций класса Pc3 к востоку в утренние часы на низкоширотной станции ASO, в работах [6, 7] обращено внимание на поворот эллипса поляризации пульсаций классов Pc4, Pc5 к западу в вечернее время на средних и высоких геомагнитных широтах.

Анализ большого массива данных, полученных на станции “Академик Вернадский”, позволил выделить два разных типа суточных вариаций для параметров эллипса поляризации вектора  $\vec{H}$  в горизонтальной плоскости. Первый представляет собой поворот оси поляризационного эллипса вслед за видимым положением Солнца на небесной сфере. Для пульсаций класса Pc4 он был описан в работе [8] и назван “эффектом подсолнуха” (рис. 1). Вариации второго типа состоят во вращении оси

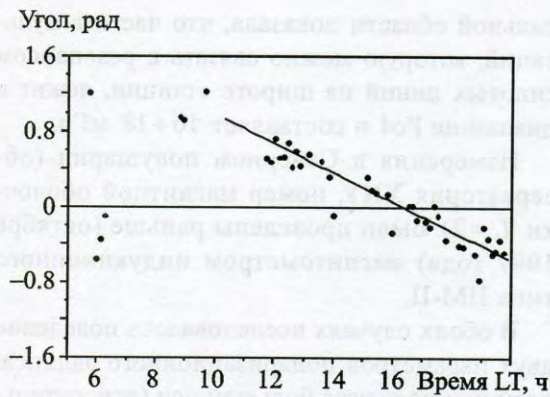


Рис. 1. Позиционный угол эллипса поляризации для пульсаций класса Pc4 ("подсолнух") по измерениям на станции "Академик Вернадский" 31.03.1998 г.

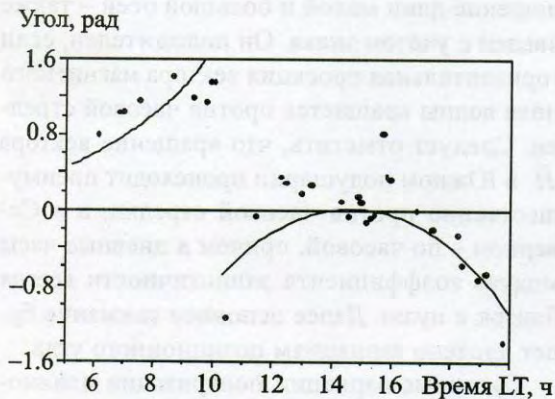


Рис. 2. Позиционный угол эллипса поляризации для пульсаций класса Pc4 ("арка") по измерениям на станции "Академик Вернадский" 23.03.1998 г.

эллипса против движения Солнца утром и появлении характерной "арки" (рис. 2) на координатной плоскости "позиционный угол – время" в послеполуденные часы.

Длительные измерения 1999 г. в Антарктике дали возможность проследить сезонные изменения для суточного хода параметров поляризации. Как оказалось, вариации позиционного угла в виде "арки" (рис. 2) наблюдаются преимущественно в летнее время и в дни с низкой геомагнитной активностью. В зимнее время этот тип суточных вариаций на частотах 0.01–0.1 Гц отмечен не был. Мονотонный поворот эллипса поляризации от

востока к западу (рис. 1, "подсолнух") наблюдается как летом, так и зимой, причем в зимнее время он представляет единственный тип неслучайных суточных вариаций поляризационных параметров. Летом вероятность наблюдения "подсолнуха" повышается с усилением геомагнитной активности. "Подсолнух" фиксировался в широкой полосе частот, тогда как "арка" характерна лишь для резонансных пульсаций.

## 2. Теоретическая модель

Для численного анализа воспользуемся решением задачи о распространении УНЧ волн в плоскостной системе "ионосфера – атмосфера – земля", находящейся в наклонном магнитном поле [1]. Структура рассматривается отдельно для каждого полушария. Такая модель позволяет рассчитать все компоненты волнового поля в точке наблюдения при заданных угловом спектре и модовом составе "падающего" МГД возмущения и известных параметрах среды. Применимость плоской модели ограничивается высотами около 500 км над поверхностью Земли – таким образом, исследуется локальная структура волновых УНЧ полей вдоль малых участков магнитных силовых линий.

В плоской модели ось  $z$  местной прямоугольной системы координат направлена вертикально вниз, ось  $x$  – на север, ось  $y$  – на восток. Верхнее полупространство  $z < 0$  заполнено однородной замагниченной плазмой и представляет верхнюю ионосферу и магнитосферу. В нижнем полупространстве располагаются нейтральная атмосфера ( $0 < z < h$ ) и земля ( $z \geq h$ ), описываемая комплексной

$$\text{диэлектрической постоянной } \epsilon_T = i \frac{4\pi\sigma(\omega)}{\omega},$$

где  $\sigma(\omega)$  – удельная проводимость,  $\omega$  – круговая частота гармонической волны ( $|\epsilon_T| \gg 1$ ).

Граница между ними – анизотропная плоскость  $z = 0$ , по которой текут поверхностные токи, т. е. нижняя ионосфера с параметрами  $\sigma_{P,H} = \Sigma_{P,H} \delta(z)$ , где  $\delta(z)$  – дельта-функция,  $\sigma_{P,H}$  – удельные, а  $\Sigma_{P,H}$  – интегрированные по

высоте проводимости Педерсена и Холла [1, 5]. Здесь происходит отражение МГД волн, приходящих из магнитосферы, и преобразование их в электромагнитное УНЧ поле нейтрального атмосферного промежутка. Вектор внешнего геомагнитного поля составляет угол  $\theta$  с осью  $z$  ( $\theta = \pi/2 \pm I$ , где  $I$  – магнитное наклонение, “+” – для Южного полушария, “-” – для Северного полушария) и угол  $\psi$  с осью  $x$  ( $\psi$  – склонение).

Представляя поле УНЧ волны в виде фурье-разложения в плоскости  $(x, y)$ , можно записать горизонтальные компоненты магнитного вектора на поверхности Земли для каждой пространственной гармоникой  $(m, n)$  в следующем виде:

$$H_x(x, y; z = h) = -\frac{e^{imx+iny}}{k_0 v} [mnB_x + (n^2 + v^2)B_y], \quad (1)$$

$$H_y(x, y; z = h) = \frac{e^{imx+iny}}{k_0 v} [(m^2 + v^2)B_x + mnB_y],$$

где

$$B_x = C_x(m, n)e^{ixh} + G_x(m, n)e^{-ixh}, \quad (2)$$

$$B_y = C_y(m, n)e^{ixh} + G_y(m, n)e^{-ixh},$$

$k_0 = \omega/c$ ,  $\chi = (k_0^2 - m^2 - n^2)^{1/2}$ ,  $v = (k_0^2 \epsilon_T - m^2 - n^2)^{1/2}$ . Волновое УНЧ поле при  $z < 0$  (в ионосфере и магнитосфере) представляется совокупностью альфвеновских и быстрых магнитозвуковых (изотропных) мод, которые удобно выражаются в системе координат  $(\xi, \eta, \zeta)$ , связанной с геомагнитным полем  $\vec{B}_0$ :  $\zeta$  – координата вдоль  $\vec{B}_0$ ,  $\xi$  и  $\eta$  – поперечные координаты. Падающие на плоскость  $z = 0$  и отраженные волны имеют вид

$\exp(\pm i\gamma\zeta + iq\xi + ip\eta)$ , где

$$\gamma = \pm k_A = \pm \frac{\omega}{V_A} \quad \text{для альфвеновских волн} \quad (3)$$

$$\gamma = \pm (k_A^2 - q^2 - p^2)^{1/2} \quad \text{для магнитозвуковых,} \quad (4)$$

$$V_A = \frac{B_0}{\sqrt{4\pi N_i M_i}} \quad \text{– альфвеновская скорость, } N_i$$

и  $M_i$  – соответственно концентрация и масса ионов основного сорта. Волновые числа  $m$  и  $n$  связаны с  $p$ ,  $q$  и  $\gamma$  следующим образом:

$$m = \gamma \sin \theta \cos \psi + q \cos \theta \cos \psi - p \sin \psi, \quad (5)$$

$$n = \gamma \sin \theta \sin \psi + q \cos \theta \sin \psi + p \cos \psi.$$

Если “падающее” поле при  $z < 0$  известно, то комплексные амплитуды  $C_{x,y}$  и  $G_{x,y}$  могут быть найдены, исходя из условий на поверхностях раздела  $z = 0$  и  $z = h$ . Эти условия состоят в непрерывности тангенциальных составляющих вектора электрического поля при  $z = \pm 0$  и  $z = h \pm 0$ , непрерывности магнитных компонент при  $z = h \pm 0$  (на поверхности Земли) и скачке  $H_{x,y}$  при  $z = \pm 0$ . Разрыв  $\vec{H}$  вблизи отражающей плоскости обусловлен протеканием в ней поверхностных токов, т. е. токов Педерсена и Холла в E-области ионосферы, которыми замыкается продольный ток МГД волн:

$$\Delta H_x = \frac{4\pi}{c} \Sigma_P [E_y(0)(1 + \text{tg}^2 \theta \sin^2 \psi) + E_x(0) \text{tg}^2 \theta \sin \psi \cos \psi] + \frac{4\pi}{c} \Sigma_H \frac{E_x(0)}{\cos \theta}, \quad (6)$$

$$\Delta H_y = -\frac{4\pi}{c} \Sigma_P \left[ E_x(0)(1 + \operatorname{tg}^2 \theta \cos^2 \psi) + E_y(0) \operatorname{tg}^2 \theta \sin \psi \cos \psi \right] + \frac{4\pi}{c} \Sigma_H \frac{E_y(0)}{\cos \theta}, \quad (7)$$

где  $\Delta H_{x,y} = H_{x,y}(z=+0) - H_{x,y}(z=-0)$ . Задая проводимости  $\Sigma_{P,H}$  и значения полей  $E(0)$ ,  $H(z=-0)$ , можно определить  $H(z=+0)$  и, следовательно,  $C_{x,y}$  и  $G_{x,y}$ .

### 3. Численный анализ

Проводимости плазмы E-области, используемые в расчете, вычислялись по реальным данным вертикального зондирования ионосферы на станции "Академик Вернадский". В дни измерений для каждого часового интервала из ионограмм определялись максимальная электронная концентрация E-области  $N_0$  и высота максимума  $h_m$ . Форма профиля электронной концентрации для удобства расчетов аппроксимировалась функцией

$$N_e(h) = N_0 \exp \left[ \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{h-h_m}{D} - \exp \left( -\frac{h-h_m}{D} \right) \right) \right] \quad (8)$$

(чепменовский слой), где  $D$  – высота приведенной атмосферы (в расчетах принималась равной 8 км). Для построения профилей удельных проводимостей

$$\sigma_P = e^2 N_e(z) \left[ \frac{v_e}{m(\Omega_e^2 + v_e^2)} + \frac{v_{in}}{M(\Omega_i^2 + v_{in}^2)} \right], \quad (9)$$

$$\sigma_H = e^2 N_e(z) \left[ \frac{\Omega_e}{m(\Omega_e^2 + v_e^2)} - \frac{\Omega_i}{M(\Omega_i^2 + v_{in}^2)} \right],$$

кроме  $N_e(h)$ , использовались справочные данные о ионном составе ионосферной плазмы и частотах соударений [9]. Проинтегрированные по высоте значения проводимостей

$\Sigma_{P,H} = \int \sigma_{P,H} dz$  усреднялись в каждом часовом интервале за десятидневный цикл измерений. В полученные кривые методом наименьших квадратов были вписаны параболы, которые использовались для моделирования суточного хода  $\Sigma_{P,H}$  (рис. 3) во время измерительной кампании в Антарктике.

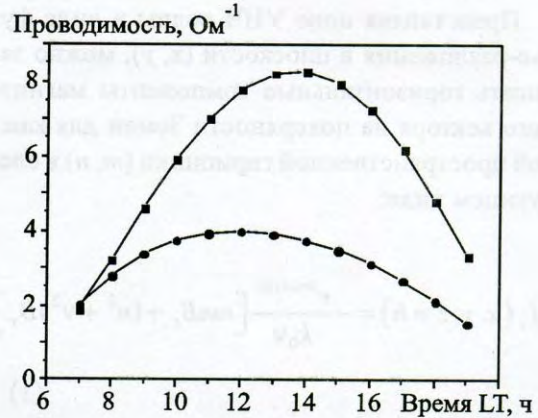


Рис.3. Расчетный суточный ход интегральных холловской (—■—) и педерсеновской (—●—) проводимостей по измерениям на станции "Академик Вернадский" 22.03 – 31.03.1998 г.

При расчете пространственной структуры УНЧ поля в точке наблюдения предполагалось, что пучок МГД волн, приходящих на анизотропную поверхность  $z=0$  из магнитосферы, состоит двух дискретных мод – альфвеновской и магнитозвуковой:

$$\vec{E}(\vec{r}_\perp, z=0) = \vec{e}_\zeta A_a \exp(ik_A \zeta + iq_1 \xi + ip_1 \eta) + \vec{e}_\eta A_f \exp(i\sqrt{k_A^2 - p_2^2 - q_2^2} \zeta + iq_2 \xi + ip_2 \eta). \quad (10)$$

Цель моделирования состоит в нахождении такой комбинации параметров (10) (соотношения амплитуд  $A_a$ ,  $A_f$  и поперечных волновых векторов  $(p_{1,2}; q_{1,2})$ ), при которой воспроизводится наблюдаемый суточный ход поляризационных характеристик поля пульсаций.

Прежде всего, перебором различных комбинаций параметров было установлено, что для наблюдаемой структуры поля существенно наличие в ионосфере обеих МГД мод: согласование расчета с экспериментом достигается при  $A_f/A_a \approx 1$ . В отношении направления прихода волн рассматривались две модельные ситуации:

- 1) поперечные компоненты  $p$ ,  $q$  волновых векторов обеих мод постоянны в течение дня;
- 2) направление прихода магнитозвуковой волны изменяется в соответствии с движением подсолнечной точки магнитопаузы, а волновой вектор альфвеновской волны постоянен в течение дня.

Результаты расчета представлены на рис. 4, 5. В первой ситуации суточный ход позиционного угла эллипса поляризации обусловлен только вариациями ионосферных проводимостей. Удовлетворительное согласие с экспериментом (суточный ход типа “арки”) получается, когда альфвеновская волна направлена вдоль  $\vec{B}_0$ , а угол падения на ионосферу магнитозвуковой волны на  $10 \div 20^\circ$  превышает наклонение геомагнитного поля. Перпендикулярные к плоскости магнитного меридиана (“азимутальные”) компоненты обоих волновых векторов  $p$  близки к нулю. Кроме

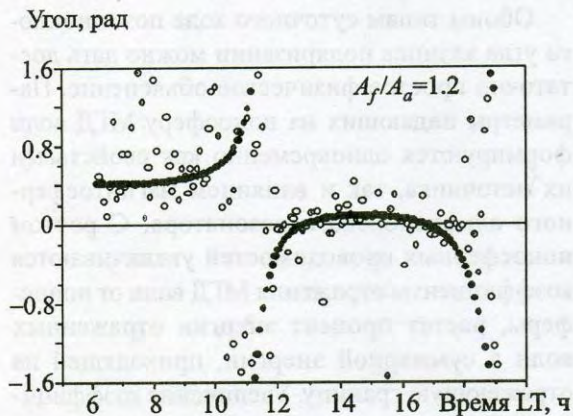


Рис. 4. Позиционный угол эллипса поляризации геомагнитных пульсаций. Результат моделирования для постоянного в течение дня спектра МГД волн:  $\circ$  – с шумами,  $\bullet$  – без шумов

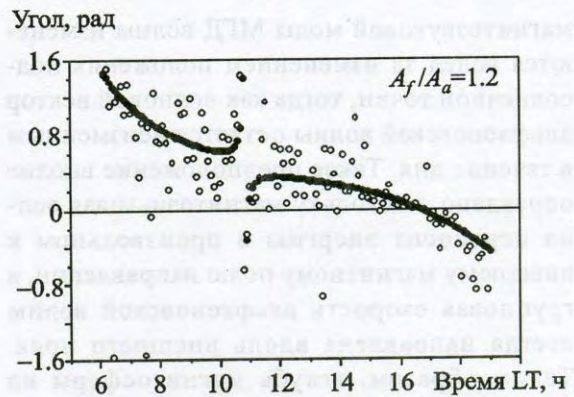


Рис. 5. Позиционный угол эллипса поляризации геомагнитных пульсаций. Результат моделирования для изменяющейся в течение дня азимутальной проекции волнового вектора магнитозвуковой волны:  $\circ$  – с шумами,  $\bullet$  – без шумов

регулярных параметров, модель включала равномерно распределенную случайную добавку к проводимостям  $\Sigma_{P,H}$  и нормально распределенную добавку к амплитудам магнитного поля на поверхности Земли.

Таким образом, плоскостойкая модель позволила определить полную структуру МГД полей выше отражающей границы, что дало возможность оценить направление прихода МГД волн. Эту оценку, в свою очередь, можно использовать для определения положения эффективного источника магнитозвуковой моды в магнитосфере, для чего необходимо выйти за рамки плоскостойкой модели и рассматривать замкнутую магнитосферу, возможно, с учетом возбуждения магнитосферных МГД резонаторов. Тем не менее найденный пространственный спектр МГД волн выше отражающей границы позволяет сделать вывод о том, что магнитозвуковая волна приходит с более высоких L оболочек, по сравнению с местом измерения, тогда как альфвеновская волна распространяется вдоль направления силовых линий геомагнитного поля.

Эффект “подсолнуха” в суточном ходе позиционного угла удалось объяснить, предполагая, что поперечные компоненты волнового вектора падающей из магнитосферы

магнитозвуковой моды МГД волны изменяются вслед за изменением положения подсолнечной точки, тогда как волновой вектор альфвеновской волны остается неизменным в течение дня. Такое предположение вполне оправдано, поскольку магнитозвуковая волна переносит энергию в произвольном к внешнему магнитному полю направлении, а групповая скорость альфвеновской волны всегда направлена вдоль внешнего поля. Таким образом, вглубь магнитосферы на низкие L-оболочки энергия проникает в основном за счет распространения магнитозвуковой моды. Эффективный источник магнитозвуковой волны может перемещаться вслед за подсолнечной точкой по магнитопаузе. Источник альфвеновской волны должен располагаться недалеко от точки, магнитосопряженной с точкой наблюдения, в которой возбуждается эта волна при отражении магнитозвуковой моды. Следовательно, положение эффективного источника альфвеновской волны в течение суток изменяется незначительно, поперечные компоненты волнового вектора остаются существенно меньше продольной, и в первом приближении их можно считать постоянными.

Удовлетворительный суточный ход параметров поляризации был получен для углов падения магнитозвуковой волны на ионосферу, изменяющихся в пределах  $\varphi_0 = \pm 25^\circ$  (рис. 5). Так же, как и в предыдущем случае, в ионосферные проводимости и амплитуды магнитного поля на земле были добавлены случайные компоненты. Полученный модельный суточный ход (рис. 5) весьма напоминает “эффект подсолнуха”, часто наблюдавшийся в эксперименте (рис. 1).

Отметим, что результаты моделирования именно второй ситуации в большей степени соответствуют статистике 10 дней измерений в марте 1998 года (рис. 6). На рисунке приведено сравнение измеренного и модельного суточного хода позиционного угла эллипса поляризации, полученных усреднением данных эксперимента и расчетных данных по часовым интервалам времени.

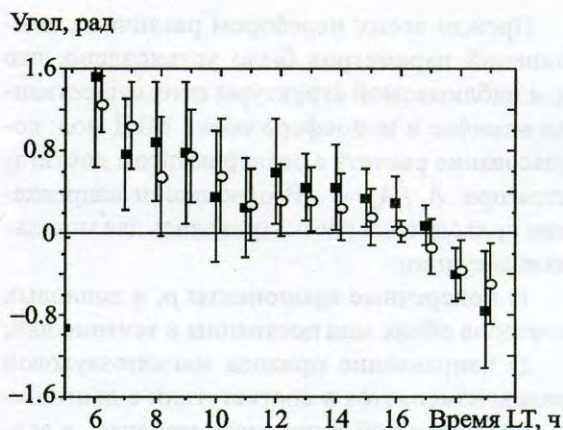


Рис. 6. Позиционный угол эллипса поляризации геомагнитных пульсаций. Сравнение результатов эксперимента (22.03 – 31.03.1998 г. “Академик Вернадский”) и моделирования: ■ – экспериментальные данные, ○ – результат моделирования

#### 4. Обсуждение результатов. Выводы

Поляризационные измерения геомагнитных пульсаций позволили выделить два типа суточного хода позиционного угла эллипса поляризации. В результате численного моделирования определены пространственные спектры МГД волн, которые могут вызывать наблюдаемые особенности в поведении поляризации геопульсаций.

Обоим типам суточного хода позиционного угла эллипса поляризации можно дать достаточно простое физическое объяснение. Параметры падающих на ионосферу МГД волн формируются одновременно как свойствами их источника, так и влиянием магнитосферного альфвеновского резонатора. С ростом ионосферных проводимостей увеличиваются коэффициенты отражения МГД волн от ионосферы, растет процент энергии отраженных волн в суммарной энергии, приходящей на отражающую границу. Увеличение коэффициентов отражения ведет к увеличению добротности альфвеновского магнитосферного резонатора и возникновению резонансных МГД колебаний вдоль силовой линии поля  $\vec{B}_0$ . При этом структура поля, “падающего” на ионосферу, определяется в основном магнитосфер-

ным резонатором и практически не зависит от положения источников МГД волн, возбуждающих резонатор. В такой ситуации суточный ход позиционного угла эллипса поляризации зависит в первую очередь от суточных изменений ионосферных проводимостей и напоминает "арку".

Если же добротность резонатора невелика или частота наблюдаемых пульсаций достаточно далека от частоты резонанса для данной силовой линии, вариации параметров поляризации в большей степени зависят от положения эффективного источника магнитозвуковой волны. Суточный ход позиционного угла эллипса при этом в большей степени похож на "эффект подсолнуха". Ориентация волнового вектора и поляризация "падающего" на ионосферу МГД поля будут определяться в первую очередь положением эффективного источника магнитозвуковой волны на небесной сфере. В такой ситуации возникает "привязка" позиционного угла эллипса поляризации к положению Солнца, которая и обуславливает "эффект подсолнуха" в суточном ходе позиционного угла.

Авторы благодарят сотрудников кафедры космической радиофизики Харьковского национального университета за предоставленные данные магнитных измерений вблизи Харькова и коллег из Львовского центра Института космических исследований, установивших на станции "Академик Вернадский" магнитомер ЛЕМІ-004. Мы признательны также руководству Украинского антарктического центра за постоянную помощь в проведении исследований в Антарктиде и возможность использования всех экспериментальных данных, полученных на станции.

Работа выполнена в рамках НИР "Антарктида" Министерства образования и науки Украины (договор 2М/118), а также частично подержана УНТЦ (партнерский проект Р-072).

### Литература

1. V. G. Sinitin, M. C. Kelley, Yu. M. Yampolski, D. L. Hysell, A. V. Zalizovski, and P. V. Ponomarenko. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 1999, **61**, pp. 903-912.

2. R. Berkman, V. Korepanov, and B. Bondaruk. *Proceedings of XIV IMEKO World Congress. Tampere, Finland, 1997, IVA*, pp. 121-126.
3. O. Saka, T.-J. Iijima and T. Kitamura. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1980, **42**, pp. 517-520.
4. M. Itonaga, T.-I. Kitamura. *Ann. Geophys.* 1993, **11**, pp. 1018-1025.
5. В. Б. Ляцкий, Ю. П. Мальцев. *Магнитосферно-ионосферное взаимодействие*. Москва, Наука, 1983, 192 с.
6. C. W. S. Ziesolleck and F. H. Chamalaun. *J. Geophys. Res.* 1993, **98**, No. A8, pp. 13703-13713.
7. K. Morrison. *Planet. Space Sci.* 1991, **39**, No. 7, pp. 1017-1023.
8. А. В. Зализовский, Ю. М. Ямпольский, В. Е. Корепанов, И. Ф. Доценко. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2000, **5**, №2, с. 118-124.
9. А. В. Гуревич, Б. А. Шварцбург. *Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере*. Москва, Наука, 1973, 272 с.

### Polarization of Pc3/Pc4 Geomagnetic Pulsations in the Southern and Northern Hemispheres: Experimental Data and Numerical Simulation

A. V. Zalizovski, V. G. Sinitin,  
and Yu. M. Yampolski

Daily variations are analyzed of polarization parameters of the Pc3 and Pc4 geomagnetic pulsations measured in the Antarctic at the "Akademik Vernadsky" station and in the Northern hemisphere near Kharkov. Two distinct types of temporal behavior have been revealed for the tilt angle of the polarization ellipse: i) rotation of the major axis to follow the visible azimuthal position of the Sun during the day ('sunflower' effect), and ii) a characteristic arch in the 'angle - local time' plane. Both effects have been interpreted within a theoretical model. As has been found, the daily variations of the polarization are caused by variations of the ionospheric conductivities and motion of the effective source of the fast magnetosonic mode. Polarization features of pulsations can be used for determining the spatial spectrum of hydromagnetic waves above the reflecting ionospheric boundary.