

## Поляризационные исследования пульсаций Pc3, Pc4 на антарктической станции “Академик Вернадский” (“эффект подсолнуха”)

А. В. Зализовский<sup>1</sup>, Ю. М. Ямпольский<sup>1</sup>, В. Е. Корепанов<sup>2</sup>, И. Ф. Доценко<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Радиоастрономический институт НАН Украины  
61002, Харьков, ул. Краснознаменная, 4  
E-mail: zaliz@rian.kharkov.ua

<sup>2</sup>Львовский центр Института космических исследований НАНУ и НКАУ  
290601, Львов, ул. Наукова, 5-А

<sup>3</sup>Карпатское отделение  
Института геофизики НАНУ  
290601, Львов, ул. Наукова, 3-Б

Статья поступила в редакцию 11 ноября 1999 г., после переработки 17 января 2000 г.

В работе приводятся результаты измерений геомагнитных пульсаций класса Pc3 и Pc4 на Украинской антарктической станции “Академик Вернадский” (65°15' ЮШ, 64°16' ЗД). Рассматриваются распределение пульсаций по частотам в суточном цикле и поляризационная структура колебаний с периодами 20÷100 с. Для пульсаций с периодами 50÷100 с обнаружены различия в поведении параметров эллипса поляризации в дневное и ночное время. В дневное время направление главной оси эллипса поляризации в горизонтальной плоскости ориентируется на Солнце, тогда как ночью ориентация вектора произвольна. Такое суточное поведение эллипса поляризации названо “эффектом подсолнуха”. Днем эллиптичность пульсаций в области частот Pc4 много больше, чем ночью. Вектор магнитного поля пульсаций ночью вращается преимущественно против часовой стрелки, днем – по часовой стрелке. В статье обсуждаются следствия обнаруженных поляризационных особенностей для постановки задач диагностики ионосферной и магнитосферной плазмы.

У роботі наведено результати вимірювань геомагнітних пульсацій класу Pc3 та Pc4 на українській антарктичній станції “Академік Вернадський” (65°15' ПШ, 64°16' ЗД). Розглядаються розподілення пульсацій за частотами у добовому циклі та поляризаційна структура коливань з періодами 20÷100 с. Для пульсацій з періодами 50÷100 с знайдено різницю в поведінці параметрів еліпса поляризації вдень та вночі. В денний час напрямок головної осі еліпса поляризації у горизонтальній площині орієнтується на Сонце, тоді як вночі орієнтація еліпса вільна. Таку поведінку еліпса поляризації названо ефектом “соняшника”. Вдень еліптичність пульсацій Pc4 набагато більша, ніж вночі. Вектор магнітного поля пульсацій вночі обертається переважно проти стрілки годинника, вдень – за стрілкою. В статті розглядаються знайдені поляризаційні особливості пульсацій з точки зору діагностики іоносферної та магнітосферної плазми.

### Введение

Геомагнитные пульсации являются откликом магнитосферы на спорадическую корпускулярную активность Солнца и несут в себе информацию как об источнике их возбуждения, так и о состоянии околоземной плазмы [1]. В работе экспериментально исследованы микропульсации двух типов – Pc3 и Pc4. Они, как правило, вызываются резонансными магнито-гидродинамическими (МГД) колебаниями в дневной магнитосфере. МГД-волны частично отражаются от ионосферы, а частично трансформируются в электромагнитные волны, которые распространяются в промежутке Земля-ионосфера и регистрируются на поверхности

Земли магнитометрами. Как известно, Е-область ионосферы существует лишь в дневные часы, а поскольку МГД-волны отражаются от нее, в дневное время формируются условия для возникновения резонатора. Его образуют геомагнитные трубки, “закрепленные” в магнитосопряженных точках. Собственные частоты резонатора определяются геомагнитной широтой наблюдателя и состоянием околоземной плазмы.

Вариации напряженности магнитного поля, вызванные микропульсациями исследуемых классов, составляют десятые и сотые доли нанотесла, поэтому для их регистрации на поверхности Земли используются чувствительные магнитометры. Вариации магнитного поля в

ионосфере приводят к возникновению дрейфа плазмы, что в свою очередь проявляется в доплеровском смещении частоты зеркально отраженных от ионосферы сигналов [2]. Авторы этой работы и ряд других исследователей ранее наблюдали МГД-волны в F-области ионосферы с помощью радара обратного резонансного рассеяния КВ-сигналов на искусственной ионосферной турбулентности [3,4]. В таких экспериментах МГД-волны проявлялись в квазипериодических вариациях доплеровского смещения частоты (ДСЧ) пробных рассеянных сигналов, а иногда и в вариации их интенсивности [5]. Ранее была решена задача о восстановлении коэффициентов отражения МГД-волн [6] и интегральных проводимостей нижней ионосферы [7] по вариациям ДСЧ рассеянных сигналов. В предыдущих радарных экспериментах измерялась, как правило, лишь одна составляющая вариаций скорости дрейфа плазмы в ионосфере – в направлении вектора рассеяния пробной волны, что не позволяло реконструировать поляризационную структуру МГД пульсаций.

Целью настоящей работы является анализ трехкомпонентных записей магнитного поля, изучение тонких спектральных характеристик и поляризационной структуры геомагнитных пульсаций в области частот 10÷60 МГц. Рассматриваются лишь регулярные пульсации. В исследуемый диапазон частот попадают два класса регулярных пульсаций: Pc3 (частоты 22.2÷60 МГц) и Pc4 (10÷22.2 МГц).

Измерения проводились на Украинской антарктической станции (УАС) "Академик Вернадский", расположенной вблизи Антарктического полуострова на Аргентинских островах. Географическое положение станции таково, что она находится в высоких географических (65°15' ЮШ) и средних геомагнитных (геомагнитная широта УАС 49°) широтах. До февраля 1996 года станция принадлежала Великобритании и называлась "База F", затем "Фарадей". На станции расположена магнитная обсерватория "Аргентинские острова" – АИА.

Начиная с шестидесятых годов на станции ведутся непрерывные измерения магнитного поля и мониторинг ионосферы с помощью установки вертикального зондирования. С 1974 года проводятся измерения магнитного поля с помощью трехкомпонентного феррозондового магнитометра модели FM 100 В [8]. Большой массив накопленной информации о поведении магнитного поля и ионосферы, с одной стороны, и значительное отличие между географической и геомагнитной широтами, с другой стороны, явились побудительным мотивом для расширения радиофизических измерений на УАС. И в 1998 году во время 3-й Украинской антарктической экспедиции измерительный комплекс был дополнен высокочувствительными трехкомпонентными магнитометрами, что позволило провести систематический анализ геомагнитных пульсаций.

### 1. Экспериментальная установка и методика измерений

С 22.03 по 31.03.1998 были впервые проведены измерения магнитного поля с помощью более чувствительного магнитометра ЛЕМІ-004 параллельно с базовыми инструментами.

Магнитовариационная станция (МВС) ЛЕМІ-004 разработана и изготовлена во Львовском центре Института космических исследований НАНУ и НКАУ на базе феррозондового датчика (ФЗД), специально предназначенного для полевых исследований. Параметры магнитометров FM 100 В и ЛЕМІ-004 представлены в табл. 1. Кроме собственно метрологических преимуществ, МВС имеет удобные средства управления, что позволяет быстро проводить ее полную установку и настройку для условий конкретного пункта наблюдения. Следует также отметить, что МВС ЛЕМІ-004 (см. табл. 1) при гарантированной разрешающей способности 0.1 нТл на цифровом выходе

Таблица 1

Сравнение основных параметров базового магнитометра FM 100 В и магнитометра ЛЕМІ-004

Параметр	FM 100 В	ЛЕМІ-004
Полный диапазон измерений	±5 мкТл	±120 мкТл
Разрешающая способность	1 нТл	0.1 нТл (цифровой выход) 0.01 нТл (аналоговый выход)
Временной дрейф	5 нТл/год	<2 нТл/год
Температурный дрейф	2.2 нТл/°С	< 0.1 нТл/°С
Неортогональность осей	<30'	< 30'
Потребляемая мощность	10 Вт	2.5 Вт

позволяет при необходимости на порядок повысить порог чувствительности магнитных измерений. Уровень шумов на аналоговом выходе в серийных образцах не превышает 20 пТл, а для специальных условий может быть снижен до 3÷5 пТл. Это стало возможным благодаря использованию принципиально новых режимов собственно ФЗД, а также оригинальному использованию функциональных узлов [9].

Каждый образец МВС ЛЕМІ-004 имеет сертификат поверки, в котором кроме основных метрологических параметров приведены и температурные коэффициенты для трех составляющих ФЗД. Поскольку температура датчика постоянно контролируется и регистрируется наряду с данными измерений, возникает возможность уточнения или коррекции данных при первичной обработке. Если же температуру вокруг МВС поддерживать постоянной в пределах  $\pm 1^\circ\text{C}$ , то, как показала практика обсерваторных исследований, МВС ЛЕМІ-004 может быть использована как базовый магнитометр, который поддерживает международный стандарт INTERMAGNET при периодичности абсолютных измерений не чаще, чем раз в месяц.

Как уже отмечалось выше, на УАС проводилась регистрация вариаций трех компонент магнитного поля:  $\delta H_x$ ,  $\delta H_y$  и  $\delta H_z$  (система координат задана таким образом, что ось  $X$  ориентирована на север,  $Y$  – на восток,  $Z$  – к центру Земли). При обработке магнитометрических данных оцифровывались следующие друг за другом 500-секундные интервалы наблюдений  $T$ , темп дискретизации информации  $\Delta t$  составлял 5 секунд. Число отсчетов единичной реализации  $N = T/\Delta t$  составляло  $N = 100$ .

Первый суточный интервал наблюдений выбирался с 1:00 UT, всего обрабатывались 165 промежутков времени за сутки. На первом этапе анализировались вариации трех компонент геомагнитного поля (для  $i$ -го интервала времени –  $\delta H_x^i(t)$ ,  $\delta H_y^i(t)$ ,  $\delta H_z^i(t)$ ) и рассчитывались Фурье-преобразования для каждой из них:

$$S_{x,y,z}^i(f) = \sum_{k=1}^N \delta H_{x,y,z}^i(t_k) \exp(-i2\pi f t_k) \Delta t. \quad (1)$$

Далее проводилась узкополосная фильтрация в каждом измерительном канале. По наличию узкополосных составляющих в спектрах амплитуд  $\{\text{mod}\{S_x^i(f), S_y^i(f), S_z^i(f)\}\}$  определя-

лось присутствие в  $i$ -ом интервале микропульсаций\*. В результате узкополосной фильтрации регистрировались частота  $F$  и амплитуды  $H_{x_m}^i$ ,  $H_{y_m}^i$ ,  $H_{z_m}^i$  основных энергонесущих компонент в спектрах пульсаций. В тех случаях, когда в одном интервале одновременно наблюдались пульсации на нескольких частотах, анализ проводился отдельно для каждого частотного максимума. После этого определялся сдвиг фаз между пространственными компонентами пульсаций по разности фаз  $\psi_{xy_m}^i$  и  $\psi_{xz_m}^i$  на гармонике с частотой  $F$ .

По амплитудам  $H_{x_m}^i$ ,  $H_{y_m}^i$  и разностям фаз  $\psi_{xy_m}^i$  оценивались параметры эллипса поляризации пульсаций в горизонтальной плоскости. Для этого сначала рассчитывался модуль магнитного поля проекции пульсации на поверхность Земли:

$$H_{hm}^i(t) = \sqrt{H_{x_m}^i{}^2 \cos^2(2\pi Ft) + H_{y_m}^i{}^2 \cos^2(2\pi Ft - \psi_{xy_m}^i)}, \quad (2)$$

после чего находился экстремум функции  $H_{hm}^i(t)$ , соответствующий моменту времени  $t_m$ :

$$t_m = \frac{1}{4\pi F} \text{arctg} \left( \frac{\sin(2\psi_{xy_m}^i)}{\frac{H_{x_m}^i{}^2}{H_{y_m}^i{}^2} + \cos(2\psi_{xy_m}^i)} \right), \quad (3)$$

Затем рассчитывались оси эллипса поляризации  $A_i$  и  $B_i$ :

$$A_i = \sqrt{H_{x_m}^i{}^2 \cos^2(2\pi F t_m) + H_{y_m}^i{}^2 \cos^2(2\pi F t_m - \psi_{xy_m}^i)}, \quad (4)$$

\* Селекция пульсаций проводилась следующим образом. Анализировался уровень сигнала на выходе каждого узкополосного фильтра (с полосой 2 мГц). Рассматривались только те события, уровень которых превышал фоновые вариации на 6 дБ.

$$B_i = \sqrt{H_{x_m}^i{}^2 \cos^2(2\pi Ft_m + \pi/2) + H_{y_m}^i{}^2 \cos^2(2\pi Ft_m - \psi_{xy_m}^i + \pi/2)} \quad (5)$$

Угол ориентации большой оси эллипса относительно направления на север вычислялся следующим образом:

$$\varphi_i = \begin{cases} \arctg\left(\frac{H_{y_m}^i \cos(2\pi Ft_m - \psi_{xy_m}^i)}{H_{x_m}^i \cos(2\pi Ft_m)}\right), & A_i > B_i; \\ \arctg\left(\frac{H_{y_m}^i \cos(2\pi Ft_m - \psi_{xy_m}^i + \pi/2)}{H_{x_m}^i \cos(2\pi Ft_m + \pi/2)}\right), & A_i < B_i. \end{cases} \quad (6)$$

Коэффициент эллиптичности определялся как отношение длин малой и большой осей эллипса:

$$K_i = \begin{cases} -\text{sign}(\psi_{xy_m}^i) \frac{B_i}{A_i} & \text{при } A_i > B_i, \\ -\text{sign}(\psi_{xy_m}^i) \frac{A_i}{B_i} & \text{при } A_i < B_i. \end{cases} \quad (7)$$

Заметим, что при таком определении коэффициент эллиптичности – знакопеременная величина. Он положительный, если вектор поля вращается против часовой стрелки, и отрицательный, если вращение происходит по часовой стрелке.

В дальнейшем рассматривались зависимости поляризационных параметров  $\varphi_i$  и  $K_i$  от частоты пульсаций и от времени суток.

## 2. Экспериментальные данные

На первом этапе обработки рассчитывались функции распределения вероятностей появления пульсаций для различных частотных интервалов в течение суток, после чего исследовались их поляризационные свойства. Всего было зафиксировано  $M = 884$  случая появления пульсаций за 10 измерительных дней. На рис. 1, а представлена функция распределения вероятности наблюдавшихся пульсаций по частотам. На рис. 1, б – та же функция распределения, но для дневных часов (с 10:00 до 22:00 UT, с 6:00 до 18:00 LT). На рис. 1, в изображен суточный ход числа пульсаций с частотами 24÷60 МГц (Pc3) (данные с 00:00 до 01:00 UT отсутствуют, поскольку в первый час суток по Гринвичу проводилось тестирование аппаратуры).

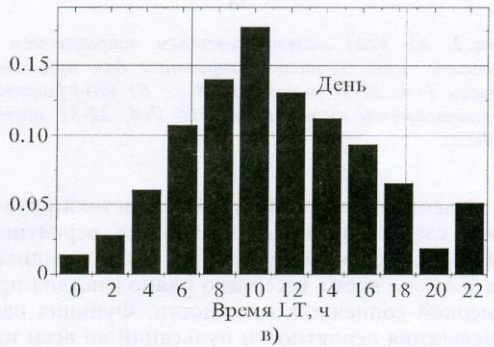
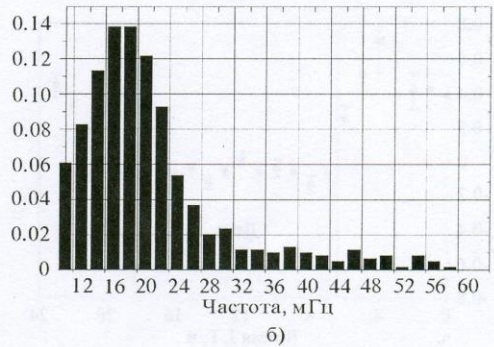
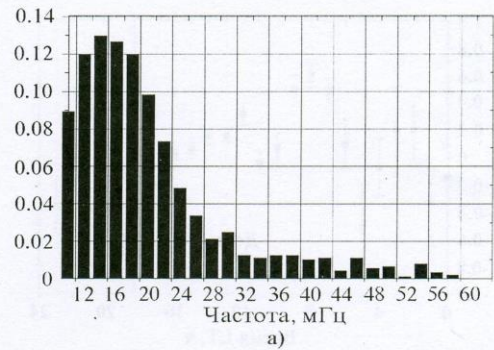


Рис. 1. а) Распределение пульсаций по частотам, 22-31 марта 1998 г.; б) распределение пульсаций по частотам в дневное время, 22-31 марта 1998; в) суточное распределение пульсаций класса Pc3, 22-31 марта 1998 г.

На рис. 2 изображены средние за 10 дней суточные зависимости параметров поляризации для всех пульсаций с частотами 10÷22 МГц (Pc4): рис. 2, а – суточная зависимость угла ориентации большой оси эллипса поляризации  $\varphi$ , рис. 2, б – суточная зависимость коэффициента эллиптичности  $K$ . На рис. 3, а и 3, б изображены те же характеристики для пульсаций с частотами 24÷60 МГц (Pc3). Все параметры поляризации (рис. 2, 3) были усреднены по интервалам длительностью 1 час, на рисунках вертикальными отрезками отмечены среднеквадратичные отклонения значений для каждого интервала.

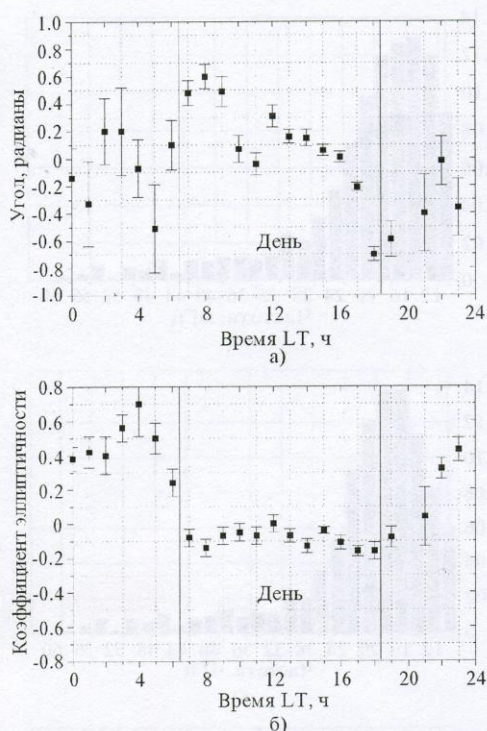


Рис. 2. а) Угол между северным направлением и большой осью эллипса поляризации для пульсаций класса Pc4, 22-31 марта 1998 г.; б) коэффициент эллиптичности пульсаций класса Pc4, 22-31 марта 1998 г.

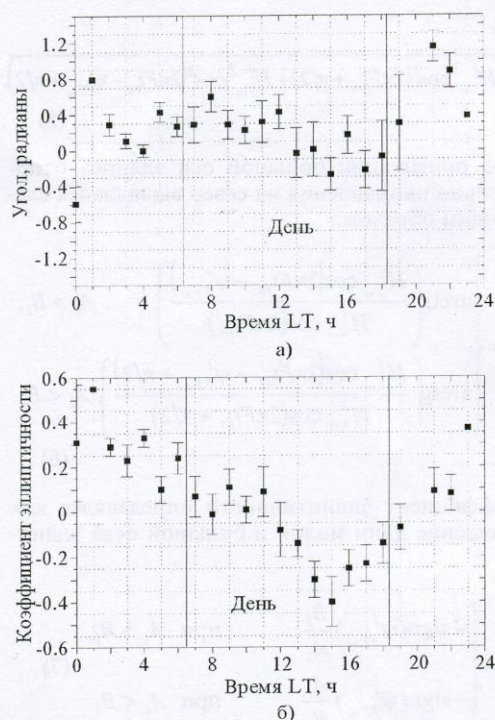


Рис. 3. а) Угол между северным направлением и большой осью эллипса поляризации для пульсаций класса Pc3, 22-31 марта 1998 г.; б) коэффициент эллиптичности для пульсаций класса Pc3, 22-31 марта 1998 г.

Накопленная за 10 суток статистика позволяет сделать выводы о наиболее вероятных частотах в спектре пульсаций, наблюдавшихся на УАС во время весеннего равноденствия при высокой солнечной активности. Функция распределения вероятности пульсаций во всем интервале частот (рис. 1, а) имеет максимум на гармонике 14 МГц. В аналогичном распределении для дневного времени (рис. 1, б) максимум смещается в область более высоких частот на 16÷18 МГц. В области частот Pc3, пульсации распределены равномерно.

В суточном распределении пульсаций с частотами 10÷22 МГц (Pc4) наблюдается равномерное увеличение вероятности их появления в дневные часы, тогда как максимальное количество случаев с частотами 24÷60 МГц (Pc3, рис. 1, в) приходится на утро.

Во время измерений время восхода Солнца в точке наблюдения изменялось с 10:20 до 10:50 UT (с 6:20 до 6:50 LT), а захода – с 22:30 до 21:55 UT (с 17:55 до 18:30 LT).

Для пульсаций в области частот 10÷22 МГц (Pc4) наблюдалось регулярное изменение в поведении угла ориентации эллипса поляризации  $\phi$  при переходе от дня к ночи (рис. 2, а).

Днем эллипс ориентирован в направлении на Солнце и вращается с востока на запад против часовой стрелки. После захода Солнца ориентация эллипса поляризации носит случайный характер. Такое поведение  $\phi$  напоминает вращение головки подсолнуха за Солнцем, поэтому наблюдаемое явление мы назвали “эффектом подсолнуха”.

Для пульсаций класса Pc3 суточный ход  $\phi$  не имеет столь ярко выраженной зависимости.

В ночное время вектор магнитного поля пульсаций обоих типов вращается преимущественно против часовой стрелки, а днем – по часовой стрелке (рис. 2, б; 3, б). Коэффициент эллиптичности  $K$  пульсаций класса Pc4 днем значительно меньше, чем ночью (рис. 2, б). Модуль  $K$  для Pc3 растет к полуночи и после полудня, а в утренние и вечерние часы близок к нулю (рис. 3, б).

### Заключение

Впервые организованы систематические измерения геомагнитных пульсаций на УАС “Академик Вернадский”, проведен статистический и спектральный анализ вариаций геомаг-

нитного поля в частотных диапазонах, соответствующих колебаниям классов Pc3 и Pc4, в течение десятидневного цикла наблюдений.

Анализ поведения поляризационных параметров микропульсаций магнитного поля позволяет сделать ряд важных выводов:

1. Максимум функции распределения вероятности по частотам для всех наблюдавшихся за 10 суток пульсаций Pc3, Pc4 лежит на частоте 14 МГц. Для пульсаций, наблюдавшихся в дневные часы, максимум смещается на частоту 18 МГц.
2. Пульсации класса Pc3 наблюдались преимущественно в утренние часы, тогда как Pc4 были равномерно распределены в течение дневного времени суток.
3. Колебания электромагнитного поля на поверхности Земли, стимулированные микропульсациями, имеют эллиптическую поляризацию. Обнаружено вращение главной оси эллипса поляризации геомагнитных пульсаций (Pc4) за Солнцем. Введено название такой зависимости – "эффект подсолнуха".
4. Эллиптичность пульсаций Pc4 днем значительно выше, чем ночью.
5. Ото дня к ночи регулярным образом меняется направление вращения горизонтальной проекции вектора магнитного поля. Днем вектор вращается по часовой стрелке, ночью – против.

Качественный анализ отмеченных выше особенностей поведения поляризационных характеристик позволяет сделать ряд предположений. Во-первых, регулярные суточные зависимости ориентации эллипса поляризации не могут быть вызваны магнитосферными эффектами. Очевидно, они порождены регулярными изменениями ионосферы под действием солнечной радиации. Действительно, с одной стороны, E-область играет роль магнитосферного резонатора, с другой – ее параметры четко отслеживают суточные изменения ионизирующей радиации Солнца. На высотах нижней ионосферы (100÷130 км) своих максимальных значений достигают поперечные педерсеновская и холловская проводимости, которые формируют отражающие свойства магнитосферного резонатора. Проводимости, в свою очередь, определяются электронной концентрацией, ионным составом и частотами соударений частиц – ионосферными параметрами, имеющими ярко выраженный суточный ход. Построение теоретической модели, связывающей поведение поляризационных характеристик резонансных микропульсаций магнитного поля с ионосферными параметрами, позволяет ставить задачу об МГД-диагностике околоземной плазмы.

Прямая задача – расчет поляризационных характеристик пульсаций при заданных свойствах ионосферы – была решена в работе [10]

для низкоширотных наблюдений. Авторы использовали приближение биквадратного долготного распределения интегральных проводимостей ионосферы на дневной стороне Земли. Такая модель не позволила описать особенности поведения позиционного угла эллипса поляризации, коэффициента эллиптичности и направления вращения вектора, наблюдавшиеся на станции "Академик Вернадский".

В дальнейшем для количественной интерпретации экспериментальных данных предполагается применить модель, разработанную при участии авторов [7]. В качестве исходных данных при решении прямой задачи наряду с параметрами поляризации пульсаций планируется использовать реальные синхронные ионосферные данные, полученные на станции "Академик Вернадский".

Авторы благодарны Н. А. Леонову за участие в ионосферных и магнитных измерениях на станции "Академик Вернадский", В. Г. Синицыну за полезные советы при обсуждении полученных данных и Г. П. Милюневскому за помощь в организации измерений.

Данная работа выполнена при частичной поддержке проекта УНТЦ №827 и НИР "Антарктида" Миннауки Украины.

## Литература

1. А. В. Гульельми, В. А. Троицкая. Геомагнитные пульсации и диагностика ионосферы. Москва, Наука, 1973, 208с.
2. P. R. Sutcliffe, and A. W. V. Poole. J. Geophys. Res. 1989, **94**, pp. 13505-13514.
3. А. Ф. Беленов, П. В. Пономаренко, В. Г. Синицын, Ю. М. Ямпольский. Изв. вузов. Радиофизика. 1993, **36Б**, №12, с. 94-99.
4. N. F. Blagoveshchenskaya, O. A. Troshichev. Journal of Atmospheric and Terrestrial physics. 1996, **58**, No. 1-4, pp. 397-406.
5. А. В. Зализовский, П. В. Пономаренко, Ю. М. Ямпольский. Радиофизика и радиоастрономия. 1997, **2**, №4, с. 457-462.
6. В. С. Белей, В. Г. Галушко, А. В. Зализовский, П. В. Пономаренко, Ю. М. Ямпольский. Геомагнетизм и аэрономия. 1997, **23**, №6, с. 91-98.
7. V. G. Sinitin, M. C. Kelley, Yu. M. Yampolski, D. L. Hysell, A. V. Zalizovski, and P. V. Ponomarenko. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 1999, **61**, No 12, pp. 903-909.
8. Г. П. Милюневский. Радиофизика и радиоастрономия. 1997, **2**, №3, с. 255-266.
9. R. Berkman, V. Korepanov, B. Bondaruk. Proceedings of XIV IMEKO World Congress. Tampere, Finland, 1997, **IVA**, pp. 121-126.
10. M. Itonaga, T.-I. Kitamura. Ann. Geophysicae. 1993, **11**, pp. 1018-1025.

**Polarization Effects of Pc3, Pc4 Geomagnetic Pulsations Observed at Vernadsky Antarctic Station ("the Sunflower Effect")**

**A. V. Zalizovsky, Yu. M. Yampolski, V. Ye. Korepanov, and I. F. Dotsenko**

The results of observations of the Pc3, Pc4 geomagnetic pulsations at the Ukrainian Antarctic Station "Academician Vernadsky" (65°15' S, 64°16' W) are presented. The distribution function of pulsation periods and the polarization of magnetic oscillations with the periods 20÷100 s are

examined. A different behavior has been established for the polarization ellipse of Pc4 pulsations during the day and at night. The larger axis of the polarization ellipse is oriented toward the Sun in the daytime, while the ellipse orientation is arbitrary at night. The phenomenon has been named the "sunflower effect". The daytime ellipticity ratio of Pc4 pulsations is greater than the nighttime one. The magnetic field vector of the pulsations rotates preferentially in the counter-clockwise direction at night and clockwise in the daytime. These polarization effects are discussed in connection with possible application to the ionospheric and magnetospheric plasma diagnostics.