

УДК 550.388.2

ДВУХПОЗИЦИОННЫЙ (АНТАРКТИДА-УКРАИНА) МОНИТОРИНГ ГЛОБАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ РЕЗОНАНСОВ ЗЕМЛИ

А.В. Колосков, Н.А. Бару, О.В. Буданов, В.Е. Пазнухов, Ю.М. Ямпольский

Радиоастрономический институт НАН Украины; г. Харьков; koloskov@rian.kharkov.ua

Реферат. Электромагнитное оточення Землі в УНЧ-СНЧ діапазоні хвиль формують дві глобальні резонансні системи: шуманівська (ШР) та іоносферна альфвенівська (ІАР). Вивчення ШР та ІАР має велике значення для геофізики, оскільки дозволяє як досліджувати властивості джерела резонансів (світову грозову активність), так і здійснювати діагностику середовища поширення сигналів (іоносферу та магнітосферу Землі). Дослідження корисні для оцінки глобальних кліматичних змін та відстеження збурень космічної погоди. Це стимулювало в 2002 р. організацію на УАС патруля ШР та ІАР. Загальнопланетарний характер резонансів вимагає проведення вимірювань у просторово рознесених пунктах. Тому в 2007 р. синхронний моніторинг ШР та ІАР було розпочато на Низькочастотній обсерваторії (НЧО) РІ НАНУ в Україні. В роботі описуються апаратне і програмне забезпечення вимірювальних комплексів, методики проведення синхронних спостережень і спільної обробки даних. Аналізуються морфологічні особливості резонансних сигналів, що їх отримано в ході тривалих синхронних двопозиційних вимірювань на УАС та НЧО. Наводяться результати відновлення середньодобових і сезонних варіацій активностей світових грозових центрів. Обговорюються перспективи модернізації та розширення числа пунктів спостереження.

Ключові слова: шуманівський резонанс, іоносферний альфвенівський резонанс, іоносфера, магнітосфера, гроза.

Реферат. Электромагнитное окружение Земли в УНЧ-СНЧ диапазоне волн формируют две глобальные резонансные системы: шумановская (ШР) и ионосферная альфвеновская (ИАР). Изучение ШР и ИАР имеет большое значение для геофизики, поскольку позволяет как исследовать свойства источника резонансов (мировую грозовую активность), так и осуществлять диагностику среды распространения сигналов (ионосферу и магнитосферу Земли). Исследования полезны для оценки глобальных климатических изменений и отслеживания возмущений космической погоды. Это стимулировало в 2002 г. организацию на УАС патруля ШР и ИАР. Общепланетарный характер резонансов требует проведения измерений в пространственно разнесенных пунктах. Поэтому в 2007 г. мониторинг ШР и ИАР был начат на Низкочастотной обсерватории (НЧО) РИНАН в Украине. В работе описываются аппаратное и программное обеспечение измерительных комплексов, методики проведения синхронных наблюдений и совместной обработки данных. Анализируются морфологические особенности резонансных сигналов, полученные в ходе длительных синхронных двухпозиционных измерений на УАС и НЧО. Приводятся результаты восстановления среднесуточных и сезонных вариаций активностей мировых грозовых центров. Обсуждаются перспективы модернизации и расширения числа пунктов наблюдения.

Ключевые слова: шумановский резонанс, ионосферный альфвеновский резонанс, ионосфера, магнитосфера, гроза.

Abstract. The Schumann Resonance (SR) and Ionospheric Alfvén Resonance (IAR) are the global resonance systems which form the electromagnetic surrounding of the Earth in ULF-ELF waveband. Studying of SR and IAR is of a great importance for modern geophysics, allowing researches both the properties of the resonances sources (worldwide thunderstorm activity) and the characteristics of the propagation medium of the signals (ionosphere and magnetosphere of the Earth). The results of the investigations of resonances may clarify the problem of global climate changes and help to track the variability of the space weather. Therefore

the patrol of the SR and IAR signals was started at Ukrainian Antarctic Station (UAS) in 2002. At the same time the global nature of the resonances require realizing the spaced sensor measurements. That's why since 2007 the Low Frequency Observatory (LFO) of the IRA NASU in Ukraine is used as a second observation point. In the paper the hardware and software of the measuring complexes together with the techniques of collective acquisition and processing of the data from UAS and LFO are presented. The morphological features of resonance signals determined from the data of the long-term two-position monitoring at UAS and LFO are analyzed. The results of the evaluation of the diurnal and seasonal behavior of the activity of main worldwide centers of thunderstorms are presented. The perspectives for further improvement of the facilities and increasing the number of observation points are discussed.

Key words: Schumann Resonance, Ionospheric Alfvén Resonance, ionosphere, magnetosphere, thunderstorm

1. Вступление

Наиболее привлекательным регионом для долгосрочных измерений глобальных электромагнитных резонансов Земли, шумановского (ШР) и ионосферного альфвеновского (ИАР), является Антарктика. Данный регион свободен как от промышленных электромагнитных помех, так и от сигналов “ближних” гроз, которые в других регионах играют роль широкополосной помехи. Поэтому на Украинской антарктической станции (УАС) Академик Вернадский с 2002 года установлен сверхнизкочастотный приемный комплекс (Безродный и др., 2003). Это позволило воссоздать суточную, сезонную и многолетнюю зависимости основных характеристик шумановского резонатора и мировых грозных центров (Колосков и др., 2005). Однако однопозиционный мониторинг УНЧ-СНЧ полей имеет достаточно грубое пространственное разрешение при локализации отдельных центров излучения и не позволяет определять координаты сверхмощных молниевых разрядов (Колосков и др., 2004). Более перспективными являются многопозиционные измерения сигналов ШР. Это же относится и к альфвеновским резонансам, мониторинг которых на УАС производится с 2005 г. Наши исследования показали, что их характеристики определяются главным образом свойствами ионосферы вблизи пункта наблюдения (Колосков и др., 2008). Поэтому анализ ИАР желательно производить для разнесенных на значительные расстояния пунктов с различными ионосферными условиями. Вот почему специалистами РИ НАНУ, ЛЦ ИКИ и НАНЦ было инициировано создание системы многопунктового приема УНЧ-СНЧ полей, основной измерительной базой которого стали два пункта с разнесом около 15 000 км: УАС (Антарктика) и Низкочастотная обсерватория (НЧО) РИ НАН Украины (Харьков). Базовым инструментом для регистрации ШР в Антарктике является магнитометр LEM1-112, а вблизи Харькова использована приемная система производства РИ НАНУ. В статье описан двухпозиционный аппаратно-программный комплекс УНЧ-СНЧ мониторинга, рассмотрены алгоритмы регистрации, обработки и визуализации данных, обсуждаются результаты, полученные за первые несколько лет наблюдений. Поскольку исследованию ИАР посвящена отдельная статья, включенная в данное издание, основное внимание в работе уделено восстановлению и анализу характеристик ШР.

2. Аппаратура и методика поляризационной обработки данных

Установленный на УАС магнитометрический комплекс LEM1-112 разработан в ЛЦ ИКИ НАНУ-НКАУ. Он выполняет мониторинговые измерения вариаций геомагнитного поля в диапазоне частот 0,01–300 Гц. Комплекс состоит из пяти магнитных зондов индукционного типа, двух электрических каналов, коммуникационного блока (CAM Unit) с GPS приемником для привязки данных к мировому времени UTC и регистрирующего компьютера с платой АЦП. Для анализа характеристик ШР и ИАР используются данные ортогональных горизонтальных компонент магнитного поля, получаемые с двух пар зондов: Lem112A (рабочие частоты 0,3–300 Гц) и Lem112A3 (0,01–10 Гц). Неидентичность коэффициентов преобразования для каждой пары сенсоров не превосходит 1%. Зонды

сориентированы вдоль географического меридиана и параллели, вынесены на расстояние порядка 100 м от ОНЧ павильона УАС и закреплены на бетонных фундаментах. Обработка данных осуществляется оператором непосредственно на станции. Отметим, что с мая 2011 г. используется модернизированный SAM Unit, который снабжен собственным АЦП и обеспечивает аппаратную оцифровку и синхронизацию данных.

Приемно-измерительный комплекс НЧО (Пазнухов и др., 2010) разработан в РИ НАНУ и предназначен для непрерывной регистрации горизонтальных магнитных и вертикальной электрической компонент электромагнитного поля. Датчики магнитного поля размещены на расстоянии 2,5 км от лабораторного павильона, что позволило существенно снизить уровень электромагнитных помех. Передача цифровых данных от датчиков осуществляется по радиоканалу в диапазоне УКВ. Индукционные магнитные датчики помимо основной измерительной обмотки содержат калибровочные катушки, которые используются для настройки и калибровки приемной аппаратуры. Для устранения вибрационных помех сенсоры закопаны в землю на глубину 1,5 м. Датчики сориентированы в географической системе координат. Коэффициент преобразования в рабочем диапазоне частот 3–40 Гц составляет величину 70 мВ/нТл/Гц. Синхронизация времени по шкале UTC осуществляется по данным GPS. Запись, обработка и визуализация данных осуществляются в автоматическом режиме. При этом спектрограммы сигналов и суточный ход частот 1-го максимума ШП транслируются в сеть Интернет и отображаются на web странице обсерватории <http://ri.kharkov.ua/geospace/data.html>.

Рассмотрим методику поляризационной обработки данных (Колосков и др., 2005). Суточная реализация сигналов горизонтальных магнитных компонент разбивается на 144 десятиминутных интервала, для каждого из которых вычисляются усредненные энергетические S_{xx} , S_{yy} , и взаимные S_{xy} спектры,

$$S_{ik}(f) = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N \tilde{H}_i^{(p)}(f) \tilde{H}_k^{(p)*}(f), \quad (1)$$

где $i, k = x, y$ (x соответствует каналу "север-юг", y – "восток-запад"). Комплексные "мгновенные" спектры $\tilde{H}_{i,k}^{(p)}(f)$ горизонтальных составляющих магнитного поля определяются во временных интервалах $(p-1)T \leq t \leq pT$; $p = 1, 2, \dots, N$ по соотношению

$$\tilde{H}_{i,k}^{(p)}(f) = \frac{1}{T} \int_{(p-1)T}^{pT} dt H_{i,k}(t) e^{-i2\pi ft}. \quad (2)$$

Периодом T задается частотная дискретизация спектров $\Delta f = 1/T$. Расчеты спектров проводятся в двух вариантах: первый ($\Delta f = 1$ Гц) для дальнейшего вычисления поляризационных параметров, второй ($\Delta f = 0.1$ Гц) для визуализации данных в виде суточных спектрограмм и вычисления вариаций частот максимумов ШП и ИАР. Для расчета поляризационных параметров ННЧ излучения используются промежуточные величины – параметры Стокса:

$$I(f) \equiv S_{xx}(f) + S_{yy}(f), \quad Q(f) \equiv S_{xx}(f) - S_{yy}(f), \quad (3)$$

$$U(f) \equiv 2 \operatorname{Re} S_{xy}(f), \quad V(f) \equiv 2 \operatorname{Im} S_{xy}(f).$$

Далее, воспользовавшись известными формулами (Борн и др., 1970), получаем поляризационные параметры поля:

$$r = \frac{V}{\sqrt{Q^2 + U^2} + \sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}, \quad \left. \begin{matrix} \sin(2\Psi) \\ \cos(2\Psi) \end{matrix} \right\} = \frac{1}{\sqrt{Q^2 + U^2}} \left\{ \begin{matrix} U \\ Q \end{matrix} \right., \quad (4)$$

$$I_p = \sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}, \quad P = I_p / I.$$

Здесь r – коэффициент эллиптичности (значение 0 соответствует линейной поляризации, 1 – круговой), Ψ – позиционный угол эллипса поляризации (ориентация большой полуоси эллипса, что отсчитывается от направления на север по часовой стрелке), I_p – интенсивность поляризованной компоненты излучения, P – степень поляризации. Отслеживая изменения поляризационных параметров в течение суток, можно делать выводы о динамике активности источников возбуждения ШР. Для изучения более общих закономерностей поведения мировых грозových центров используются суточные вариации, усредненные за 1 месяц. Этого времени достаточно для выявления общих черт в вариациях параметров, и в то же время 12 точек в год позволяют проследить сезонные изменения. При вычислении средних значений целесообразно не учитывать участки данных с мощными помехами. Простейшим, но весьма эффективным является способ отбраковки по критерию спектральной плотности сигналов в полосе анализа. При таком подходе все спектры, мощность которых в выбранной частотной полосе превышает заданный порог, считаются испорченными и исключаются из расчетов. Данный алгоритм был применен для обработки всего массива данных, полученных как на НЧО, так и на УАС, и позволил эффективно очистить первичные данные от помех. Следует отметить, что алгоритм имеет большой потенциал для совершенствования. Спектральная плотность ННЧ фона по естественным причинам изменяется в течение суток, поэтому порог определения непригодных спектров можно выбирать изменяющимся со временем. Также могут применяться дополнительные критерии качества отдельных спектров, что может улучшить алгоритм отбраковки помех.

3. Обсуждение результатов

3.1. Спектральные особенности поведения ШР в Антарктиде и Украине.

Несмотря на то, что природные электромагнитные поля в резонаторе Земля-ионосфера возбуждаются единым источником – глобальной грозовой активностью, в пространственно разнесенных пунктах (УАС, НЧО) сигналы могут существенно отличаться друг от друга. Это связано прежде всего со взаимным расположением наблюдателя и источников возбуждения – мировых грозových центров. Так, например, максимумы интенсивности в канале "север-юг" на НЧО наблюдаются около восьми и двадцати часов по мировому времени (Рис.1–4 см. на цв. вклейке между 140 и 141 стр.).

Эти максимумы соответствуют поочередным возрастаниям активностей азиатского и американского грозových центров. Результат же действия африканского центра отображается на спектрограмме с канала "восток-запад" (максимум в районе 15 часов). В данных, полученных на УАС, картина противоположная: канал "север-юг" принимает преимущественно сигнал из африканского центра, а "восток-запад" – от азиатского и американского. Это объясняется пространственным распределением поля в резонаторе, которое формируется глобальной структурой стоячих волн. Кроме того, местоположение приемного пункта определяет также характер и интенсивность местных помех. Так, в Антарктике на значительном удалении от промышленно развитых регионов Земного шара техногенные помехи сводятся к наводкам электросети 50 Гц (и гармоник) от местного дизель-генератора. Эта спектральная линия находится вне пределов диапазона, в котором расположены основные моды ШР, и не может испортить результаты измерений. Основным преимуществом расположения приемного пункта на УАС является полное отсутствие локальных гроз.

Для приемного пункта, расположенного в Украине, число искусственных и естественных помех существенно выше. Во-первых, это местные грозы, происходящие в радиусе нескольких сотен километров, интенсивность которых максимальна летом. Вследствие этого качество данных летом существенно хуже, чем в зимний период. Кроме того, на НЧО наблюдаются и техногенные помехи. Это широкополосный "техногенный шум", помеха от электросети 50 Гц, почти постоянно наблюдающаяся узкая спектральная

составляющая на частоте 26 Гц, связанная с особенностями работы линий электропередач, и другие узкополосные промышленные излучения. Для оценки влияния помех на качество данных рассмотрим отношение спектральной плотности сигналов на частоте первого мода ШР (8 Гц) к сумме плотностей в минимумах перед первой (4 Гц) и между первой и второй модами (11 Гц). То есть выполним усреднение всех десятиминутных спектров в течение каждого месяца и вычислим отношение

$$\frac{(S_{xx} + S_{yy})_{f=8\text{Hz}}}{(S_{xx} + S_{yy})_{f=4\text{Hz}} + (S_{xx} + S_{yy})_{f=11\text{Hz}}} \quad (5)$$

Понятно, что с ростом уровня шума, вызванного местными помехами, это соотношение будет уменьшаться. Результаты расчетов для УАС и НЧО представлены на рис. 2. Хорошо заметно, что соотношение (5) для Украины в целом ниже, чем для Антарктики. Кроме того, в летние месяцы на УАС оно почти вдвое меньше, чем в зимние, что свидетельствует о существенном ухудшении качества данных летом из-за локальных гроз. Отметим, что используемые данные уже прошли процедуру отбраковки (то есть отрезки записей с мощными грозами исключены из усреднения). И все же снижение качества данных, полученных летом, очевидно. В то же время в антарктических записях четко выраженной сезонной зависимости величины (5) нет. Таким образом, можно предположить, что грозовая активность в восточноевропейском регионе добавляет к спектру своеобразную "шумовую подставку", которая плавно спадает с ростом частоты. Это и приводит к уменьшению соотношения (5), которое фактически характеризует качество наблюдения спектров ШР в разных точках Земного шара.

Поэтому при анализе данных мировой грозовой активности следует помнить, что погрешности зимой и летом могут заметно отличаться.

3.2. Восстановление характеристик глобальной грозовой активности

Главной целью исследований в УНЧ-СНЧ диапазоне является получение информации о геофизических явлениях, происходящих в окружающей среде, в частности о мировой грозовой активности. В работах (Колосков и др., 2005; Bezrodny et al., 2007) предложена методика решения обратной задачи – оценки уровней активности мировых грозовых центров на основе теории полей ШР в гиротропном резонаторе Земля - ионосфера. Модель базируется на следующих уравнениях:

$$A_1(t) = \frac{1}{2} [A_+(t) + A_-(t)], \quad (6)$$

$$[A_2(t) + A_3(t)] = \frac{1}{2} [A_+(t) - A_-(t)], \quad (7)$$

где $A_1(t)$ – активность африканского центра,

$A_2(t) + A_3(t)$ – суммарная активность азиатского и американского центров.

$$A_+(t) = \frac{1}{2 \sin^2 \Phi} \{I_p(f^{(1)}, t)(1 + \sin^2 \Phi) - Q(f^{(1)}, t) \cos^2 \Phi\} - \text{общемировая активность,}$$

$$A_-(t) = \frac{1}{2} \{I_p(f^{(1)}, t) \cos^2 \Phi - Q(f^{(1)}, t)(1 + \sin^2 \Phi)\} \cdot \sin^2 \Phi \cos 2(\lambda - \lambda_1^{(1)}), \quad (8)$$

$$\lambda_1^{(1)} = \lambda_1 + \frac{V(f^{(1)}, t)}{2A_+^{(1)} \sin \Phi} - \text{смещенная вследствие гиротропии долгота африканского центра.}$$

Φ и λ – географические координаты приемного пункта.

$\lambda_1 = 25^\circ$ – долгота африканского центра.

$f^{(1)} = 8 \text{ Гц}$ – частота первого мода ШР.

I_p , Q и V – поляризационные параметры, определенные выражениями (3) и (4).

Для восстановления активностей мировых грозových центров воспользуемся экспериментальными данными, полученными в течение 2008-2009 годов на НЧО и УАС. Результаты приведены на рис. 3. Красными линиями изображены помесечно усредненные суточные вариации общемировой активности. Синими – активность африканского центра. Зелеными – азиатского и американского. Проанализируем вначале данные УАС (левую половину рисунка). Кривые активности африканского центра имеют один максимум в районе пятнадцати UT, а суммарная активность азиатского и американского – два максимума. По этим данным прослеживаются некоторые особенности поведения активностей грозových центров. Кульминация активности африканского центра более выражена в период сентябрь–май. Активность является значимой с десяти до двадцати часов мирового времени, а максимум приходится на пятнадцать часов. В течение лета (июнь–август) максимум хотя и существует, но выражен заметно меньше, а активность распределена более равномерно в течение суток. Активность американского центра обычно достигает максимума около двадцати часов. Продолжительность возрастания в целом соответствует данным африканского центра. Подобно африканскому, американский максимум также слабее выражен летом. Максимум, соответствующий азиатскому центру, в отличие от других заметно изменяется во времени суток в течение года. От восьми часов UT в ноябре-декабре до почти двенадцати – в июле. Причем в 2008 г., с марта по сентябрь, а в 2009 году с февраля по сентябрь этот максимум является наименьшим из всех трех центров. Таким образом, общей тенденцией для мировых грозových центров можно считать то, что их кульминации слабее выражены летом и четче зимой.

Данные, полученные на НЧО, также имеют свои характерные черты. В летний период (с мая по сентябрь) максимумы на кривых активностей выражены не очень четко. Так, африканская кривая довольно монотонно растет с пяти до пятнадцати часов мирового времени, после чего наблюдается четкий минимум вблизи 18 UT. Кривая, соответствующая активности других двух центров, имеет два максимума, но четко выраженными их считать нельзя. Это, как было отмечено в разделе 3.1, объясняется заметным вкладом в суммарную активность локальных гроз.

Далее приведем иллюстрацию изменений мировой грозовой активности в течение 2008-2009 годов по данным УАС (это среднесуточные значения за каждый месяц в относительных единицах). На рис. 4 показаны вариации общей мировой грозовой активности (красным), активности африканского центра (синим) и суммарной азиатского и американского центров (зеленым). Можно отметить почти постоянный уровень общемировой активности с небольшим понижением в начале 2009 года, характерный рост зимой и уменьшение летом суммарной активности азиатского и американского центров и монотонное снижение для африканского центра с мая по ноябрь 2009 г.

4. Заключение

В работе показано, что сезонные изменения мировой грозовой активности являются периодичными и с большой степенью точности повторяются каждый год. Поскольку летом на НЧО локальная грозовая активность существенно искажает результаты исследований, сравнивать данные с УАС целесообразно в зимний период. При этом минимизировать влияние локальных помех на качество ННЧ мониторинга можно за счет применения существующих и разработки новых алгоритмов отбраковки некачественных сигналов. Обобщая результаты данного исследования, следует отметить эффективность двухпозиционной схемы регистрации для изучения свойств глобальных электромагнитных резонансов Земли и диагностики характеристик геокосмоса. Чтобы еще сильнее повысить потенциал системы, в будущем предполагается включить дополнительный пункт наблюдения, создаваемый вблизи Иркутска нашими коллегами из института Солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН. Мониторинг УНЧ-СНЧ полей будет

осуществляться в обсерватории "Монды" (вблизи Иркутска) с помощью магнитометра LEMI-30, созданного в ЛЦ ИКИ, и программного обеспечения, разработанного в РИ НАНУ.

БЛАГОДАРНОСТИ. Авторы признательны В.Г. Безродному (РИ НАНУ) за полезные обсуждения и советы при написании работы. Мы считаем своим приятным долгом поблагодарить сотрудников НАНЦ за помощь при монтаже и обслуживании приемной установки в Антарктике, а также отметить вклад разработчиков аппаратного и программного обеспечения магнитометров Lemi112 и Lemi30 (ЛЦ ИКИ). Работа выполнена при частичной финансовой поддержке НАНЦ в рамках НТР "Гелеомакс" – 0111U007683, а также ведомственных конкурсных НИР НАН Украины "Ятаган-2" 0111U000063, "МАИС" 0111U004496 и "Шпицберген" 0111U003977.

Список литературы

В.Г. Безродный, О.В. Буданов, А.В. Колосков, Ю.М. Ямпольский. Электромагнитное окружение Земли в СНЧ диапазоне. Космическая наука и технология, 2003, т. 9, 5/6, 117–123.

М. Борн, Э. Вольф. Основы оптики. М: Наука, 1970, 855 с.

А.В. Колосков, О.В. Буданов, В.Г. Безродный, Ю.М. Ямпольский. Определение местоположения сверхмощных молниевых разрядов на основе поляризационных магнитных измерений в диапазоне шумановских резонансов. Радиофизика и радиоастрономия. 2004, т. 9, № 4, 391–403.

А.В. Колосков, В.Г. Безродный, О.В. Буданов, В.Е. Пазнухов, Ю.М. Ямпольский. Поляризационный мониторинг шумановских резонансов в Антарктике и восстановление характеристик мировой грозовой активности. Радиофизика и Радиоастрономия, 2005, 10, 1, с. 11–29.

А.В. Колосков, В.Г. Синицын, Н.Н. Герасимова, Ю.М. Ямпольский. Околосемные резонаторы СНЧ-волн как индикаторы космической погоды. Космічна наука і технологія, 2008, т. 14, №5, стор. 49–64.

В.Е. Пазнухов, О. В. Буданов, А. Г. Рохман, Ю. В. Аристов. Приемно-измерительный комплекс СНЧ диапазона с УКВ ретранслятором. Радиофизика и радиоастрономия, 2010, т. 15, №1, с. 31–41.

Bezrodny, V.G., Magnetic polarization of the Schumann resonances: An asymptotic theory, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, vol. 69, No. 9, pp. 995–1008, 2007.