

УДК 550.388.2

**ДИАГНОСТИКА ГЛОБАЛЬНОЙ ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ  
МНОГОЛЕТНЕГО МОНИТОРИНГА СИГНАЛОВ ШУМАНОВСКОГО  
РЕЗОНАНСА НА УАС АКАДЕМИК ВЕРНАДСКИЙ**

**А.В. Колосков, Н.А. Бару, О.В. Буданов, В.Г. Безродный, Б.Ю. Гаврилюк,  
А.В. Пазнухов, Ю.М. Ямпольский**

*Радиоастрономический институт НАН Украины*

*ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина; e-mail: koloskov@rian.kharkov.ua*

Систематические наблюдения СНЧ (3–300 Гц) электромагнитных полей на Украинской антарктической станции (УАС) Академик Вернадский выполняются с 2002 г. Основной задачей мониторинга СНЧ диапазона является исследование природных резонаторов Земли, и в первую очередь шумановского резонатора (ШР). Эта информация является актуальной с точки зрения диагностики глобальных климатических изменений, поскольку интенсивность сигналов ШР содержит данные об уровне мировой грозовой активности, изменения которой связаны с потеплением на планете. Нами проводится спектральная и поляризационная обработка сигналов ШР. К настоящему времени имеются результаты за 10 лет наблюдений. Чтобы перейти от характеристик сигналов к активностям мировых грозовых центров, использована теоретическая модель, созданная на основе разработанной нами асимптотической теории полей шумановских резонансов в гиротропной полости Земля–ионосфера. Результаты обработки подтвердили наличие обсуждаемого в литературе сезонного дрейфа мировых грозовых центров относительно экватора на северо-запад летом и юго-восток зимой. Кроме того, нами были обнаружены долгосрочные тренды как интенсивности сигналов ШР, так и пиковых частот первого мода ШР, хорошо коррелированные с индексами солнечной активности. Дополнительно нами были обработаны имеющиеся в свободном доступе данные о количестве молний в экваториальной зоне, полученные космическим аппаратом Lightning Imaging Sensor (LIS) за тот же интервал времени. В этих данных значимые одиннадцатилетние тренды среднего количества молний отсутствуют. Таким образом, анализ наблюдательных данных указывает на необходимость совершенствования теоретической модели расчета активностей. В частности, необходимо включить в рассмотрение долгосрочные (за время солнечного цикла) изменения импеданса нижней ионосферы, а также учесть сезонный дрейф мировых грозовых центров относительно экватора. Учет в модели этих двух факторов позволит в будущем значительно улучшить точность воспроизведения характеристик мировой грозовой активности.

**Діагностика глобальної грозової активності на основі багаторічного моніторингу сигналів шуманівського резонансу на УАС Академік Вернадський.**

О.В. Колосков, М.О. Бару, О.В. Буданов, В.Г. Безродный, Б.Ю. Гаврилюк, О.В. Пазнухов, Ю.М. Ямпольский

**Реферат.** Систематичні спостереження ННЧ (3–300 Гц) електромагнітних полів на Українській антарктичній станції (УАС) проводяться з 2002 р. Основним завданням моніторингу ННЧ діапазону на УАС є дослідження природних резонаторів Землі, і в першу чергу шуманівського резонатора (ШР). Ця інформація є актуальною з точки зору діагностики глобальних кліматичних змін, оскільки інтенсивність сигналів ШР містить дані про рівень світової грозової активності, зміни якої пов'язані з потеплінням на планеті. Нами проводиться спектральна і поляризаційна обробка сигналів ШР. На нинішній час отримано дані за 10 років спостережень. Аби перейти від характеристик сигналів до активностей світових грозових центрів, використано теоретичну модель, створену на основі розробленої нами асимптотичної теорії полів шуманівських резонансів у гіротропній порожнині Земля–іоносфера. Результати обробки підтвердили наявність обговорюваного в літературі сезонного дрейфу світових грозових центрів щодо екватора на північний захід влітку і південний схід узимку. Крім того, нами було виявлено довгострокові

тренди як інтенсивності сигналів ШР, так і пікових частот першого моду ШР, добре корельовані з індексами сонячної активності. Додатково нами було оброблено наявні у вільному доступі дані про кількість блискавок в екваторіальній зоні, отримані космічним апаратом Lightning Imaging Sensor (LIS) за той же інтервал часу. У цих даних значущі одинадцятилітні тренди середньої кількості блискавок відсутні. Таким чином, аналіз даних вказує на необхідність вдосконалення теоретичної моделі розрахунку активностей. Зокрема, необхідно включити в розгляд довгострокові (за час сонячного циклу) зміни імпедансу нижньої іоносфери, а також врахувати сезонний дрейф світових грозових центрів щодо екватора. Врахування в моделі цих двох факторів дозволить у майбутньому значно покращити точність відтворення характеристик світової грозової активності.

#### **Diagnostic of the global lightning activity based on the data of long-term monitoring of the Schumann resonance signals at UAS Akademian Vernadsky.**

A.V. Koloskov, N.A. Baru, O.V. Budanov, V.G. Bezrodny, B.Yu. Gavrylyuk, A.V. Paznukhov, Yu.M. Yampolski  
**Abstract.** Regular observations of ELF (3-300 Hz) electromagnetic fields at the Ukrainian Antarctic Station (UAS) were carried out since 2002. The main objective of ELF waveband monitoring observations is studying of natural resonators of the Earth and primarily Schumann resonator (SR). This information may be helpful for diagnosis of global climate changes, because the intensity of the SR signals contains information about a global lightning activity and changes therein, associated with the global warming effect. We make spectral and polarization processing of SR signals. For the moment we have processed and analyzed data for ten years period. To estimate the activities of world thunderstorm centers by processing the SR signals we use the theoretical model based on our asymptotic theory of Schumann resonance fields in the gyrotronic Earth-ionosphere cavity. The results of data processing confirmed that world thunderstorm centers drifts across the equator to the northwest in summer and to the southeast in the winter as it is mentioned in the literature. Also, we have discovered long-term trends in both the intensity of SR signals and peak-frequencies of first SR maximum. This long-term variation is in phase with changes of solar activity indexes. Additionally we have processed publicly available data sets contained information about the number of lightning in the equatorial zone, observed by Lightning Imaging Sensor (LIS) spacecraft for the same period of time. This data demonstrate no noticeable eleven-year trend of the number of lightning in the equatorial zone. Thus, the analysis of the observational data shows that it is necessary to improved theoretical model which we use to calculate activities of the world thunderstorm centers. In particular, it is necessary to take into consideration long-term (with solar activity cycle timescale) changes of the impedance of lower ionosphere, as well as to take into account seasonal drift of world thunderstorm centers across the equator. In the future we hope to improve significantly the accuracy of reconstruction of the world thunderstorm activity accounting these two factors in theoretical model.

**Key words:** Schumann Resonance, Solar cycle, ionosphere, magnetosphere, thunderstorm.

### **1. Вступление**

Как известно, основным источником ШР является мировая грозовая активность. Сигналы вертикальных молниеносных разрядов возбуждают резонатор, образованный поверхностью Земли и нижней границей ионосферы (Блиох и др., 1977). Параметры сигналов ШР свидетельствуют об интенсивности гроз, их пространственно-временном распределении на земном шаре и характеризуют состояние атмосферы и ионосферы. На Земле существуют три экваториальных грозовых центра в Центральной Африке, юго-восточной Азии и в Латинской Америке. В среднем их активность достигает максимума на 4-5 часов позже местного полдня. Кроме этих главных областей молниеносных разрядов, на планете действуют много локальных менее мощных центров, распределённых в тропических и средних широтах. В отличие от экваториальных, эти источники, кроме суточной зависимости, имеют еще и сезонную вариацию. Поскольку ШР имеет глобальный характер, резонансные сигналы несут информацию о грозах, распределённых по поверхности всего земного шара. Как это было показано Эрлом Уильямсом в работе (Williams, 1992), измерения интенсивности сигнала ШР можно использовать для мониторинга мировой грозовой активности и связанных с ней долгосрочных температурных трендов в экваториальной области. Действительно, процесс образования грозового облака напрямую зависит от интенсивности испарения, которая в свою очередь определяется температурой

атмосферы и поверхности. Таким образом, существует возможность использования ШР в роли гигантского термометра, которая приобретает большую актуальность в связи с проблемой глобального изменения климата техногенного происхождения. К настоящему времени на УАС Академик Вернадский накоплен уже десятилетний массив непрерывных наблюдений, что дает возможность исследовать долгопериодические тренды в поведении параметров ШР и активности мировых гроз. Анализу таких долгосрочных изменений на протяжении цикла солнечной активности и посвящена данная работа.

## 2. Обработки экспериментальных данных и их анализ

### 2.1. Методика обработки данных

Непрерывные наблюдения сигналов ШР выполняются на Украинской антарктической станции с 2002 г., когда по инициативе специалистов РИ НАНУ там был установлен индукционный магнитометр для измерения ортогональных горизонтальных компонент магнитного поля Lemi-112 (Сорока, 2003а, б). Прибор разработан во Львовском центре института космических исследований НАНУ НККАУ. Регистрируемые сигналы подвергаются спектральной и поляризационной обработке в соответствии с алгоритмом, суть которого подробно изложена в работе (Колосков и др., 2005). На первом этапе рассчитываются усредненные за каждые 10 минут энергетические и взаимные спектры компонент магнитного поля. Далее для частоты первых трёх максимумов ШР вычисляются параметры Стокса и с их помощью – поляризационные характеристики сигналов: коэффициент эллиптичности, позиционный угол эллипса поляризации, интенсивность поляризованной компоненты и степени поляризации. В данной работе мы будем рассматривать только первую моду ШР, соответствующую фундаментальной частоте 8 Гц. Измерения первых лет наблюдений показали, что характеристики сигналов имеют чётко выраженный сезонный и суточный ходы, которые стабильно повторяются из года в год (Колосков и др., 2005). Целью данного исследования является проведение анализа параметров ШР, а также интенсивностей мировых гроз за длительный интервал времени, соответствующий одиннадцатилетнему циклу солнечной активности. Для выполнения этой задачи нами выполнялся расчет активностей грозовых центров по методике, разработанной одним из авторов и изложенной им в работах (Безродный, 2004; Bezrodny et al., 2007). В соответствии с предложенной физической моделью грозовая активность сосредоточена в трёх точечных центрах, которые находятся на экваторе. Поверхность Земли считается идеально проводящей, а ионосфера – гиротропной, с высокой проводимостью нижней границы. В рамках развитой автором асимптотической теории полей шумановских резонансов восстанавливаются активности африканского ( $A_1$ ) центра и суммарная активность азиатского и американского центров ( $A_2+A_3$ ), для расчета которых можно выписать следующие формулы:

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

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

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

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

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

$$A_-(t) = \frac{1}{2} \{I_p(f^{(1)}, t) \cos^2 \Phi - Q(f^{(1)}, t)(1 + \sin^2 \Phi)\} \cdot \sin^2 \Phi \cos 2(\lambda - \hat{\lambda}_1^{(1)}), \quad (3)$$

$$\hat{\lambda}_1^{(1)} = \lambda_1 + \frac{V(f^{(1)}, t)}{2A_+^{(1)} \sin \Phi} - \text{смещённая вследствие гиротропии долгота африканского центра.}$$

$\Phi$  и  $\lambda$  – географические координаты приемного пункта.

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

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

$I_p$ ,  $Q$ , и  $V$  – поляризованная часть интенсивности и параметры Стокса.

## 2.2. Анализ времён кульминации мировых грозовых центров

Как было показано в работе (Колосков и др., 2005), мировые грозовые центры значительно лучше выделяются на графиках активности, чем на кривых интенсивности. Этот факт иллюстрирует рис. 1.а, на котором показано поведение активностей за период наблюдений с 2002 по 2012 г. (Рис. 1-3 см. на цв. вклейке между 174 и 175 стр.) На рисунке хорошо видны периодические изменения величин активности и времён кульминации для всех мировых центров. Верхняя панель отображает активность африканского центра, которая, как видно из графика, достигает единственного максимума вблизи 15-16 часов UT. На нижней панели приведена суммарная активность американского и азиатского источников, каждый из которых имеет свое характерное время кульминации. Максимум вблизи 20-22 UT соответствует американскому грозовому центру. Время кульминации азиатского центра меняется в достаточно широких пределах от 12-13 UT летом до 8-9 UT зимой. На рис. 1.б приведены кривые изменения времен кульминаций источников, рассчитанные по этим данным.

Видно, что времена кульминации изменяются с периодичностью в год для каждого из центров. Характер этих изменений остается постоянным для всего десятилетнего срока наблюдений на УАС. В литературе (Блиох и др., 1977; Nickolaenko et al., 2002) наиболее вероятной причиной изменения времен кульминации мировых грозовых центров принято считать их сезонный дрейф. Летом грозы смещаются по направлению к Северному полюсу, а зимой к Южному. Вблизи экватора грозовые центры располагаются весной и осенью. Поскольку грозы возникают преимущественно над сушей (Блиох и др., 1977; Nickolaenko et al., 2002), а континенты вытянуты с юго-востока на северо-запад, то дрейф грозовых источников, кроме широтной, имеет также и долготную составляющую. Зимой грозы располагаются восточнее, а летом западнее. Поскольку известно, что максимум грозовой активности приходится приблизительно на 17:00 часов местного времени (Блиох и др., 1977; Nickolaenko et al., 2002), то сезонное движение центров по долготе означает изменение времени кульминации. Мы оценили этот эффект количественно, используя данные спутника Lightning Imaging Sensor (LIS) ([http://ghrc.nsstc.nasa.gov/uso/ds\\_docs/lis/lis\\_dataset.html#2.1](http://ghrc.nsstc.nasa.gov/uso/ds_docs/lis/lis_dataset.html#2.1)), который начиная с 1997 г. осуществляет мониторинг молниевых разрядов в широтном поясе  $\pm 35^\circ$  от экватора. Благодаря использованию чувствительного оптического сенсора диапазона 777 нм и процессорной системы реального времени LIS отслеживает координаты и интенсивность до 90 % молний даже в условиях фоновой солнечной "засветки". В сети Internet по гиперссылке (<http://thunder.msfc.nasa.gov/data/query/distributions.html>) можно получить пространственные распределения количества молний, усреднённые по годам и сезонам. Эти данные были использованы нами для оценки положений мировых грозовых центров для всех сезонов с 2002 по 2011 год. Предполагалось, что положение каждого из трёх мировых грозовых центров соответствует "центру плотности", рассчитанному для усреднённого за сезон пространственного распределения молниевых разрядов. Данные вычислений приведены на рис. 2.а.

Из рисунка видно, что для одинаковых сезонов разных лет центры формируют компактные группы, то есть траектории дрейфа из года в год практически не меняются. Далее времена кульминации, рассчитанные по спутниковым данным о долготном дрейфе центров, были сопоставлены с наблюдениями на УАС (рис. 1.б). Результаты приведены на рис. 2.б. Видно, что хода времен кульминации, оцененные различными методами для африканского и

американского центров, совпадают как по амплитуде, так и по фазе. Для азиатского центра кривые подобны по фазе, но по амплитуде вариация, полученная на УАС, примерно в два раза превышает данные спутника LIS. Причиной такой разницы в амплитуде является то, что спутник не учитывает молний, находящихся вне широтного пояса  $\pm 35^\circ$  относительно экватора. В то же время летом большое количество молний наблюдается на Евразийском континенте значительно севернее и не может быть зафиксировано LIS. Это наглядно демонстрируют распределения количества разрядов, полученные спутником Optical Transient Detector (OTD) (<http://thunder.msfc.nasa.gov/data/OTDsummaries/index.html>). Таким образом, СНЧ наблюдения на УАС дают более полную информацию о мировом распределении молний, чем данные спутника.

### 2.3. Анализ долгосрочных вариаций интенсивности и пиковых частот

Как было показано выше, сезонные вариации времен кульминации грозových центров оставались стабильными на протяжении всего периода наблюдений. Это свидетельствует о неизменности траектории сезонного дрейфа источников. В то же время, как видно из рис 1.а, сезонные хода активностей грозových центров на протяжении солнечного цикла изменялись. Нами был проведен анализ всех рассчитываемых параметров сигналов первого мода ШП с целью поиска их долгосрочных изменений. Такие вариации были обнаружены для сезонного хода пиковых частот (рис. 3.а) и полной интенсивности горизонтальной компоненты вариаций магнитного поля (рис 3.б). Как видно из рисунка, частоты для обеих поляризаций были максимальны в начале наблюдений (2002 г.), снижались до середины 2009 года, а затем вновь начали подниматься. Аналогичная зависимость имела место и для величины полной интенсивности сигнала на частоте первого максимума ШП. Сопоставление этих данных с индексами солнечной активности –  $I_{10.7}$  и числами Вольфа W (Витинский и др., 1986) (рис. 3.в) показывает, что характеристики ШП изменяются синхронно с солнечной активностью в течение 11-летнего цикла. Отметим, что аналогичное поведение пиковой частоты вертикальной электрической компоненты  $E_z$  для первого мода ШП в период с 2001 по 2009 год было отмечено в данных обсерватории AGO (вблизи г. Морда, Словения) авторами работы (Ondraskova et al., 2009). Синхронные с солнечным циклом долгосрочные вариации пиковых частот и добротностей мод ШП для предыдущего цикла солнечной активности (#22, 1990–2002), обнаруженные по данным наблюдений в Антарктике, Венгрии и Соединенных Штатах, описаны в работе (Satori et al., 2005). Информация о долгосрочных вариациях интенсивности в работах (Ondraskova et al., 2009; Satori et al., 2005) не приводится.

Обнаруженные долгосрочные вариации параметров ШП могут определяться двумя механизмами: изменением интенсивности мировых гроз, синхронной с солнечной активностью, и долгосрочной вариацией характеристик среды – нижней ионосферы. Авторы работ (Ondraskova et al., 2009; Satori et al., 2005) придерживаются первой гипотезы. Для проверки этого предположения нами были обработаны данные наблюдений спутника LIS и оценены средние за сезон вариации количества молниевых вспышек по земному шару (рис. 3.г). Как видно из рисунка, среднее за год количество вспышек с 2002 по 2011 г. практически не изменилось. Поскольку известно (Nickolaenko et al., 2002; Williams, 1992), что глобальная грозовая активность зависит от температуры Земли, нами также было проведено исследование вариаций приземной температуры в разных диапазонах широт. Использовались данные о среднесуточной температуре с более чем 10 000 метеостанций Всемирной метеорологической организации (ВМО), размещенных по всей планете. Данные доступны в сети Интернет по ссылке (<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/g sod>). При выполнении расчетов вся поверхность Земли была разбита на ячейки в 10 градусов по широте и долготе, для которых рассчитывалась среднесуточные температуры. Эти результаты использовались для вычисления температур, усредненных по всему земному шару (“глобальная температура”), а также температур в различных широтных поясах. Данные об изменении “глобальной температуры” за 2002–2011 год (рис. 3.д), и кривые вариации температур в экваториальном поясе  $\pm 30^\circ$ , где сосредоточено большинство мировых гроз, оказались подобными и не демонстрировали значимой 11-летней вариации. Таким образом, наши вычисления подтверждают

предположение об отсутствии значимой вариации мировой грозовой активности на масштабах одиннадцатилетнего солнечного цикла.

В то же время известно, что состояние среды распространения сигналов ШР – ионосферы Земли контролируется солнечным излучением. Несмотря на то, что общая энергия, поступающая от Солнца, на протяжении солнечного цикла меняется мало, поток рентгеновского излучения ( $\lambda = 0.1\text{--}0.8\text{ nm}$ ), ответственный за ионизацию D-области, на протяжении солнечного цикла изменяется на 2 порядка – от  $3.6 \times 10^{-8}\text{ Вт/м}^2$  во время солнечного минимума до  $5.1 \times 10^{-6}\text{ Вт/м}^2$  во время максимума (<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/index.html>; Popoff et al., 1964). Поэтому за время цикла существенно изменяется проводимость D-области, которая является “верхней стенкой” резонатора Земля–ионосфера. Это приводит к вариациям пиковых частот и коэффициента затухания сигналов шумановского резонанса. Во время солнечного максимума проводимость возрастает, что ведет к уменьшению затухания (увеличению амплитуды сигналов) и увеличению пиковых частот, что и соответствует данным наших наблюдений на УАС Академик Вернадский. Увеличение ионообразования в ионосфере во время солнечного максимума наглядно демонстрирует кривая поведения глобального электронного содержания в ионосфере (global electro contents, GEC) (Афраймович и др., 2008), рассчитанная нами для периода с 2002 по 2011 год (рис. 3.е) и которая изменяется синхронно с солнечными индексами и параметрами ШР.

### 3. Заключение

Выполненные оценки позволяют говорить, что наблюдаемые тренды параметров ШР в течение солнечного цикла происходят преимущественно за счет изменений в среде распространения сигналов, а не вследствие вариации интенсивности источников. Для теоретического осмысления изменений в ионосфере рассмотрим формулу, связывающую активность грозового центра (как она определена в (Колосков и др., 2005)), с токовым моментом молниевой вспышки (см. (Безродный, 2004)):

$$A_j(t) \equiv \frac{1}{2} \left[ \frac{(2n+1) \cdot c}{4\pi^2 a^3 f^{(n)} |z_1|} \right]^2 \langle \tilde{M}_j(t) \rangle^2. \quad (4)$$

Здесь:  $a$  – радиус Земли,  $c$  – скорость света,  $|z_1|$  – диагональный элемент импеданса верхней стенки резонатора. Нетрудно видеть, что характеристика  $A_j(t)$  имеет смысл спектральной интенсивности магнитной компоненты СНЧ шумов на частоте  $f^{(n)}$  в пункте наблюдения. Эта величина пропорциональна среднему квадрату токового момента в точке возбуждения. Распишем теперь формулу для расчета  $|z_1|$ :

$$z_1 = \frac{z_0}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \rho^2}} \quad (5)$$

где:  $z_0 = \sqrt{i\omega v_{eff} / \omega_0^2}$  – поверхностный импеданс изотропной ионосферы;

$\rho = \omega_r / v_{eff}$  – параметр гиротропии;

$\omega_r$  – радиальная составляющая гирочастоты электронов;

$v_{eff}$  – эффективная частота их столкновений;

$\omega_0$  – частота Ленгмюра на высоте верхней стенки резонатора.

Для выполнения оценки характеристик источника нам необходимо знать величину токового момента. В то же время в эксперименте мы не можем получить токовый момент непосредственно, а рассчитываем величину активности, которая связана с токовым моментом, при помощи коэффициента  $((2n+1) \cdot c) / (4\pi^2 a^3 f^{(n)} |z_1|)$ . Анализ показывает, что большинство параметров, описывающих коэффициент  $(\omega_r, v_{eff}, \rho)$ , в течение солнечного

цикла изменяются мало. В то же время  $\omega_0$  в нижней ионосфере меняется достаточно заметно и может приводить к изменениям интенсивности сигнала ШР, которые были зарегистрированы экспериментально. Таким образом, для перехода от величин активностей к токовым моментам, то есть к характеристикам источников, необходимо оценить, как меняется  $\omega_0$  на высоте верхней стенки резонатора в течение 11-летнего солнечного цикла. Также отметим, что данные СНЧ измерений на УАС Академик Вернадский и результаты спутниковых наблюдений наглядно демонстрируют наличие сезонного дрейфа грозových центров и свидетельствуют о необходимости его учёта в физических моделях расчета активностей мировых гроз. Принятие во внимание этих двух факторов позволит улучшить точность воспроизведения характеристик мировой активности и, следовательно, оценок температурных изменений на планете.

**Авторы** считают своим приятным долгом поблагодарить сотрудников НАНЦ за помощь при установке и обслуживании приёмной установки в Антарктике, а также отметить вклад разработчиков аппаратного и программного обеспечения магнитометров Lemi112 и Lemi419ant (ЛЦ ИКИ). Работа выполнена при частичной финансовой поддержке НАНЦ в рамках НТР "Антей" 0113U004571, а также НИР "Ятаган-2" 0111U000063 и "Шпицберген-2013" 0113U002656.

### Литература

**Афраймович Э.Л., Астафьева Э.И., и др.** Глобальное электронное содержание в 23-м цикле солнечной активности. Геомагнетизм и аэрономия, 2008, том 48, № 2, с. 195–208.

**Безродный В.Г.** Асимптотическая теория полей шумановских резонансов в гиротропной полости Земля–ионосфера. Радиофизика и Радиоастрономия, 2004, 9, № 4, с. 375–390.

**Блюх П.В., Николаенко А.П., Филиппов Ю.Ф.** Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля–ионосфера. Киев: «Наукова Думка», 1977, 199 с.

**Витинский Ю.И., Копецкий М., Куклин Г.В.** Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. – М.: Наука, 1986, 259 с.

**Колосков А.В., Безродный В.Г., Буданов О.В., и др.** Поляризационный мониторинг шумановских резонансов в Антарктике и восстановление характеристик мировой грозовой активности. Радиофизика и Радиоастрономия, 2005, 10, № 1, с. 11–29.

**Сорока С.** Індукційний магнітометр LEMI-112A3 / Технічний опис та інструкція по експлуатації АШУ2.741.035ТО, 2003, 5 с.

**Сорока С.** Індукційний рамковий магнітометр LEMI-112A3P / Технічний опис та інструкція по експлуатації АШУ2.709.000 ТО, 2003, 5 с.

**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. Nickolaenko A.P., Hayakawa M. Resonances in the Earth-Ionosphere Cavity. Springer, Jul 31, 2002–392 pages.

**Ondraskova A., Sevcik S., Kostecky P.** A significant decrease of the fundamental Schumann resonance frequency during the solar cycle minimum of 2008-9 as observed at Modra Observatory. Contributions to Geophysics and Geodesy. Vol. 39/4, 2009, pp. 345–354.

**Popoff, I.G., Whitten, R.C., Edmonds, R.S.** The role of nonflare X-radiation in the D region. Journal of Geophysical Research V. 69, 1964. pp. 4081–4085.

**Satori G., Williams E., Mushtak V.** Response of the Earth–ionosphere cavity resonator to the 11-year solar cycle in X-radiation. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. V 67, No. 6, 2005, pp. 553–562.

**Williams E.** The Schumann Resonance: A Global Tropical Thermometer. Science 22 May 1992: Vol. 256 no. 5060 pp. 1184–1187, DOI: 10.1126/science.256.5060.1184.