

УДК 551.594

СВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ ШУМАНОВСКОГО РЕЗОНАНСА С ТЕМПЕРАТУРОЙ НА АФРИКАНСКОМ КОНТИНЕНТЕ

А. В. Пазнухов¹, Ю. М. Ямпольский¹, А. П. Николаенко², А. В. Колосков¹

¹ Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины, ул. Искусств, 4, г. Харьков, 61002, Украина, paznukhov@rian.kharkov.ua

² Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова Национальной академии наук Украины, ул. Академика Проскуры, 12, г. Харьков, 61085, Украина

Реферат. Цель работы: поиск связи сезонных вариаций характеристик глобального резонатора Земля – ионосфера с температурой воздуха на большом временном интервале для африканского центра мировой грозовой активности. **Методы:** использовался метод корреляционного анализа временных рядов. По данным 13-летнего (с 2002 по 2015 гг.) мониторинга природных шумов СНЧ диапазона (сверхнизкочастотного диапазона) на Украинской антарктической станции «Академик Вернадский» были восстановлены сезонные вариации интенсивности первого мода шумановского резонанса, определяемые активностью африканского грозового центра. Средние показатели температуры воздуха африканского континента за этот же период были оценены по данным глобальной сети метеорологических станций. Территория максимальной грозовой активности в Африке аппроксимировалась простой геометрической фигурой. При оценке мощности резонансного максимума СНЧ излучения введена поправка на дальность до источника молниевых разрядов. В результате корреляционной обработки сезонных вариаций температуры воздуха и интенсивности первого мода шумановского резонанса установлена устойчивая связь между температурным режимом и грозовой активностью на африканском континенте. **Результаты:** обнаружено запаздывание годового максимума интенсивности резонансных колебаний на один месяц относительно максимума температуры воздуха, обусловленное задержкой формирования грозовой активности при переходе от сухого сезона в Африке к сезону дождей. Компенсация месячной задержки путем относительного сдвига исследуемых вариаций существенно повышает коэффициент взаимной корреляции от значения 0,58 (без компенсации) до 0,76 (с учетом запаздывания). **Выводы:** разработанная методика может быть применена для поиска связи между активностью других континентальных грозовых центров и региональными температурными режимами. Такой подход будет полезен для развития концепции использования шумановского резонатора в качестве «глобального термометра».

Ключевые слова: сверхнизкочастотные шумы, шумановский резонатор, африканский центр мировой грозовой активности, Украинская антарктическая станция «Академик Вернадский».

RELATIONSHIP BETWEEN THE SCHUMANN RESONANCE PARAMETERS AND THE TEMPERATURE ON THE AFRICAN CONTINENT

A. V. Paznukhov¹, Yu. M. Yampolski¹, A. P. Nickolaenko², A. V. Koloskov¹

¹Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, paznukhov@rian.kharkov.ua

²O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv

Abstract. Main objective of the study: correlation study of long-term seasonal variations of the intensity of the global electromagnetic (Schumann) resonance in the Earth-ionosphere cavity and the air temperature and in African center of the global thunderstorm activity. **Methods:** the correlation analysis of the time series was used. By using the 13-year data (from 2002 to 2015 years) of monitoring the natural ELF noise at the Ukrainian Antarctic Akademik Vernadsky station, the seasonal variations in the intensity of the first Schumann resonance mode were derived, driven by the lightning activity in the African thunderstorm center. The average air temperature of the African continent over the same period was estimated from the data collected by the global network of meteorological stations. The area of maximum thunderstorm activity in Africa was approximated by a simple geometric figure. The correction was made for the source distance (the lightning discharges) when estimating the power of the first resonant maximum in the ELF signal. A stable relationship between the air temperature and the thunderstorm activity at the African continent was established as a result of correlation processing of seasonal variations in the air temperature and the field intensity.

Results: the one month lag between the annual maximum resonance intensity was found relative the maximum of air temperature, relevant to the retard in the formation of thunderstorms during transition from the dry to the rainy seasons in Africa. The cross-correlation coefficient increases from 0.58 (without compensation) to the 0.76 value (delay compensated) when this delay is accounted for by the relevant shift of the temperature variations. **Conclusions:** the developed technique can be used for finding the connection between the lightning activity of other thunderstorm centers and the corresponding regional temperature regimes. Such an approach might be used in the developing concept of Schumann resonance records as a “global thermometer”.

Key words: extremely low frequency noises, Schumann resonance, African center of global thunderstorm activity, Ukrainian Antarctic Akademik Vernadsky station.

ЗВ'ЯЗОК ПАРАМЕТРІВ ШУМАНІВСЬКОГО РЕЗОНАНСУ З ТЕМПЕРАТУРОЮ НА АФРИКАНСЬКОМУ КОНТИНЕНТІ

О. В. Пазнухов¹, Ю. М. Ямпольський¹, О. П. Ніколаєнко², О. В. Колосков¹

¹Радіоастрономічний інститут НАН України, м. Харків, paznukhov@rian.kharkov.ua

²Інститут радіофізики та електроніки імені О. Я. Усикова НАН України, м. Харків

Реферат. Мета роботи: пошук зв'язку сезонних варіацій характеристик глобального резонатора Земля – іоносфера з температурою повітря на великому часовому інтервалі для африканського центру світової грозової активності. **Методи:** використовувався метод кореляційного аналізу часових рядів. За даними 13-річного (з 2002 по 2015 рр.) моніторингу природних шумів ННЧ діапазону (наднизькочастотного діапазону) на Українській антарктичній станції «Академік Вернадський» були відновлені сезонні варіації інтенсивності першої моди шуманівського резонансу, що визначаються активністю африканського грозового центру. Середні показники температури повітря африканського континенту за той же період були оцінені за даними глобальної мережі метеорологічних станцій. Територія максимальної грозової активності в Африці апроксимувалася простою геометричною фігурою. При оцінці потужності резонансного максимуму ННЧ випромінювання введено поправку на дальність до джерела блискавичних розрядів. В результаті кореляційної обробки сезонних варіацій температури повітря та інтенсивності першої моди шуманівського резонансу встановлено стійкий зв'язок між температурним режимом та грозовою активністю на африканському континенті. **Результати:** виявлено запізнювання річного максимуму інтенсивності резонансних коливань на один місяць щодо максимуму температури повітря, обумовлене затримкою формування грозової активності при переході від сухого сезону в Африці до сезону дощів. Компенсація місячної затримки шляхом відносного зсуву досліджуваних варіацій істотно підвищує коефіцієнт взаємної кореляції від значення 0,58 (без компенсації) до 0,76 (з урахуванням запізнювання). **Висновки:** розроблена методика може бути застосована для пошуку зв'язку між активністю інших континентальних грозових центрів з регіональними температурними режимами. Такий підхід буде корисний для розвитку концепції використання шуманівського резонатора в якості «глобального термометра».

Ключові слова: наднизькочастотні шуми, шуманівський резонатор, африканський центр світової грозової активності, Українська антарктична станція «Академік Вернадський».

1. Введение

В связи с процессом глобального потепления остро стоит проблема объективной и достоверной оценки изменений средней температуры планеты. Для этой цели используются, прежде всего, космические наблюдения с помощью различных радиометров инфракрасного диапазона, а также данные метеорологических станций. Основная трудность использования подобных данных связана с их локальным характером, тогда как желательнее иметь среднюю по планете температуру. В литературе обсуждалось применение для этой цели записей интенсивности глобального электромагнитного (шумановского) резонанса (ШР), возбуждаемого излучением грозовых разрядов.

Глобальный электромагнитный резонанс наблюдается в сферической полости, ограниченной поверхностью Земли и нижней ионосферой. Поскольку собственные частоты колебаний были предсказаны В.О. Шуманом, резонанс часто называют «шумановским». Явление резонанса наступает тогда, когда длина радиоволны оказывается равной окружности земного шара 40 тыс. км. Это происходит на частотах около 8 Гц. В этом диапазоне обе границы резонатора имеют высокую проводимость, что обеспечивает добротность резонансных колебаний около 5. Основными источниками электромагнитного излучения, возбуждающего резонатор, являются грозовые разряды, причем из-за низких потерь даже излучение самых удаленных молний достигает наблюдателя. Шумановский резонанс обнаруживается как последовательность максимумов в энергетическом спектре естественного радишума на частотах примерно 8, 14, 20 Гц и т.д.

Наибольшая грозовая активность наблюдается в трех мировых континентальных центрах, расположенных в юго-восточной Азии, Африке и Центральной Америке. Для формирования активной грозовой ячейки требуется время, поэтому грозы наблюдаются, как правило, в послеполуденные часы по местному времени. Запаздывание определяется процессами конвекции, испарения влаги, образования облачных структур, их динамики и электризации.

В работах (Sekiguchi et al., 2006), (Hobara et al., 2011) с помощью сингулярного спектрального анализа сравнивались сезонные и межгодовые вариации интенсивности шумановского резонанса и температуры поверхности суши в различных широтных поясах Земли. Оказалось, что сезонные изменения интенсивности

шумановского резонанса коррелируют с температурой в поясе широт от $\pm 45^\circ$ и выше. Напротив, межгодовые изменения электромагнитной интенсивности коррелируют с изменениями температуры суши в тропиках. Связь интенсивности шумановского резонанса и температуры суши оказалась нелинейной, поэтому максимальный коэффициент взаимной корреляции наблюдался при сравнении температуры с логарифмом интенсивности.

В работе (Price et al., 2006) отмечалось подобие сезонных изменений грозовой активности, оцениваемой через интенсивность шумановского резонанса на частоте 8 Гц, измеряемую ежедневно в 18 часов мирового времени на обсерватории Мицпе Рамон (Израиль) в горизонтальном магнитном поле, и температуры поверхности суши, усредненной по Южноамериканскому континенту в то же самое время. Эти данные представлены на рис. 1. По оси абсцисс отложено время в днях. Черная кривая, построенная относительно левой ординаты, приводит изменения грозовой активности в Южной Америке, которая считалась пропорциональной интенсивности шумановского резонанса на частоте 8 Гц в горизонтальной компоненте магнитного поля. Серая кривая, построенная относительно правой ординаты, иллюстрирует изменения средней температуры суши Южноамериканского континента в 18:00 ч. мирового времени (МВ).

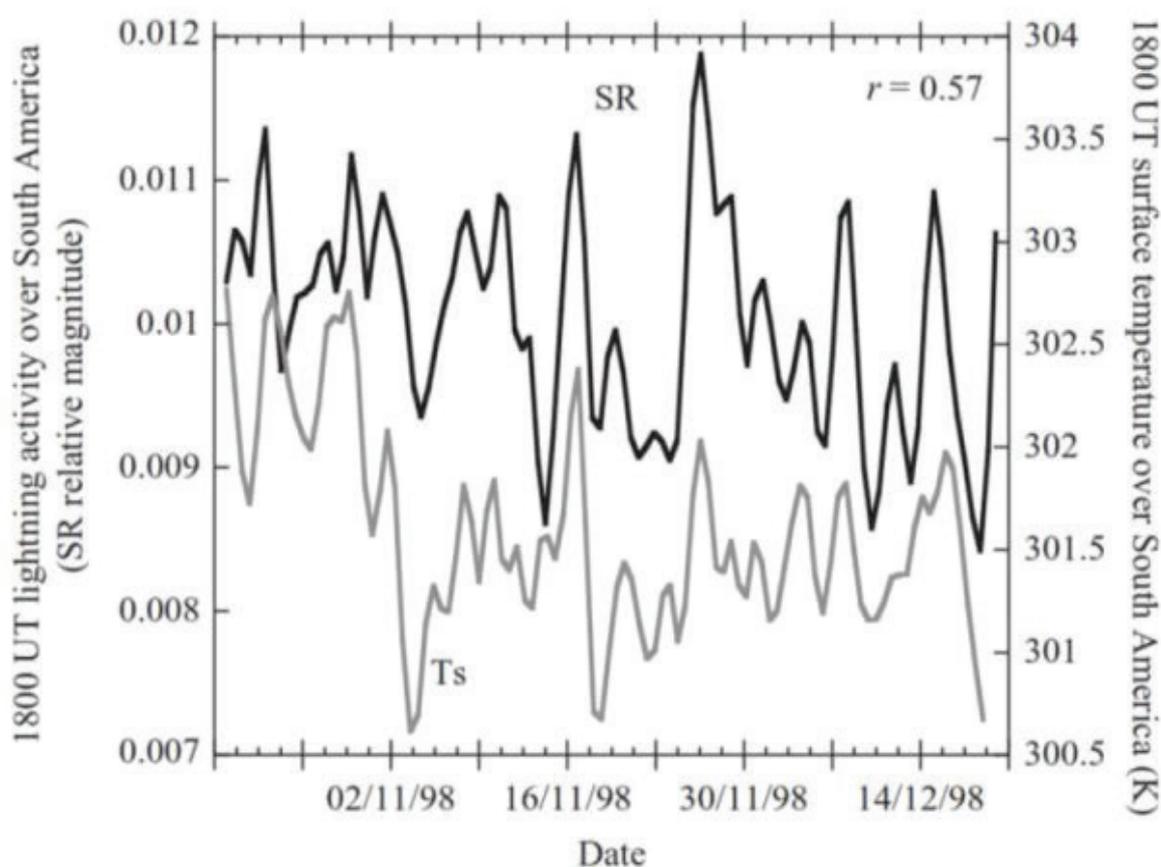


Рис. 1. Временные вариации (Price et al., 2006): черная кривая – интенсивность шумановского резонанса, полученная в Израиле по ежедневным измерениям горизонтального магнитного поля в 18:00 ч. МВ на частоте 8 Гц; серая кривая – температура поверхности, усредненная по Южной Америке в 18:00 ч. МВ.

Fig. 1. Time variations (Price et al., 2006): black curve - the intensity of the Schumann resonance obtained in Israel by the daily measurement of the horizontal magnetic field at 18:00 UT at 8 Hz; the gray curve is the surface temperature averaged over South America at 18:00 UT.

Большинство молний на планете наблюдаются в мощных конвективных ячейках над континентами. Кроме того, грозовые облака переносят большое количество водяного пара в верхнюю тропосферу, где он оказывает существенное влияние на климат Земли, поскольку является основным парниковым газом. Изменения влажности в верхней тропосфере можно также отслеживать с помощью шумановского резонанса (Price et al., 1990), (Price, 2000). На рис. 2, взятом из работы (Price, 2016), показана связь между среднесуточными значениями мощности ШР и содержанием пара в верхней тропосфере над Африкой. Зависимость содержания пара сдвинута на один день вперед, поскольку примерно на сутки отстает от максимума грозовой активности. Коэффициент корреляции между приведенными кривыми составляет 0,91.

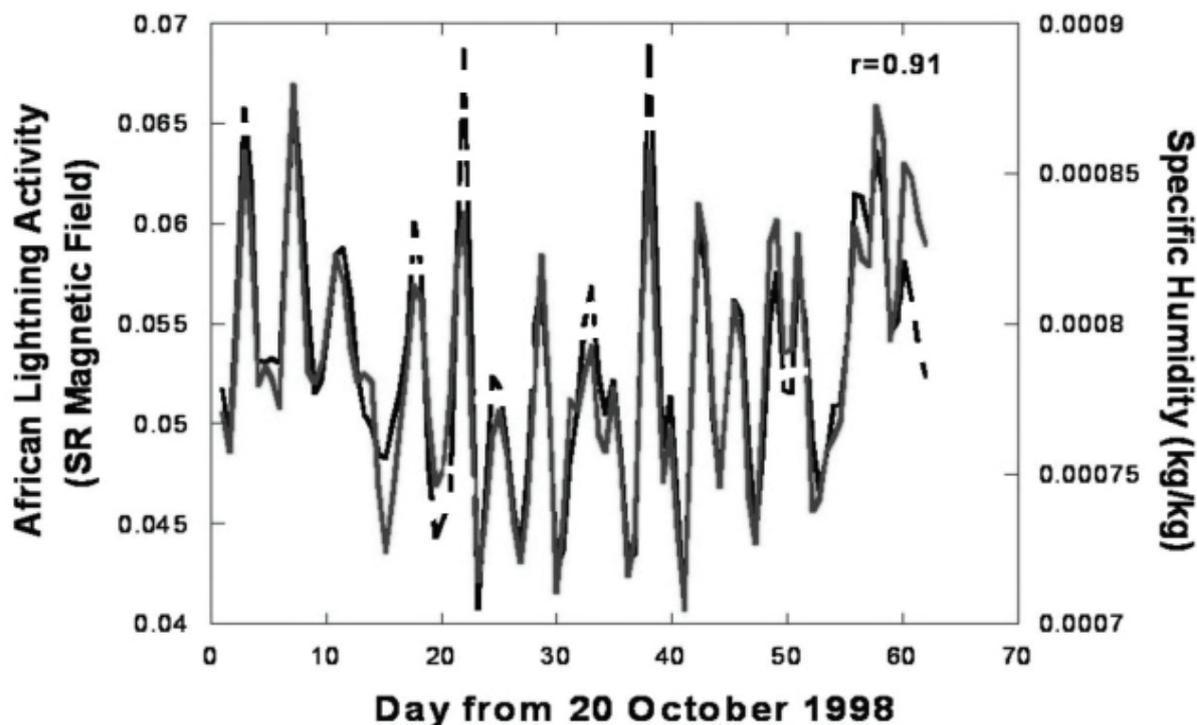


Рис. 2. Среднесуточные значения мощности ШР (пунктирная чёрная кривая) и содержание пара в верхней тропосфере над Африкой (сплошная серая кривая) (Price, 2016).

Fig. 2. Average daily values of the SR power (dashed black curve) and vapor content in the upper troposphere over Africa (solid gray curve) (Price, 2016).

2. Результаты и обсуждения

Нами были проведены совместные исследования температуры приземного слоя воздуха и уровня грозовой активности африканского континента, определенного по данным 13-летнего мониторинга шумановского резонанса (ШР) на Украинской антарктической станции «Академик Вернадский» в период с 2002 по 2015 гг.

Сначала с помощью всех доступных метеоданных была рассчитана средняя планетарная температура. На рис. 3 представлен временной ход среднесуточной температуры (синяя кривая) для всей планеты с 2002 по 2015 гг. и её среднегодовые значения (зеленая кривая).

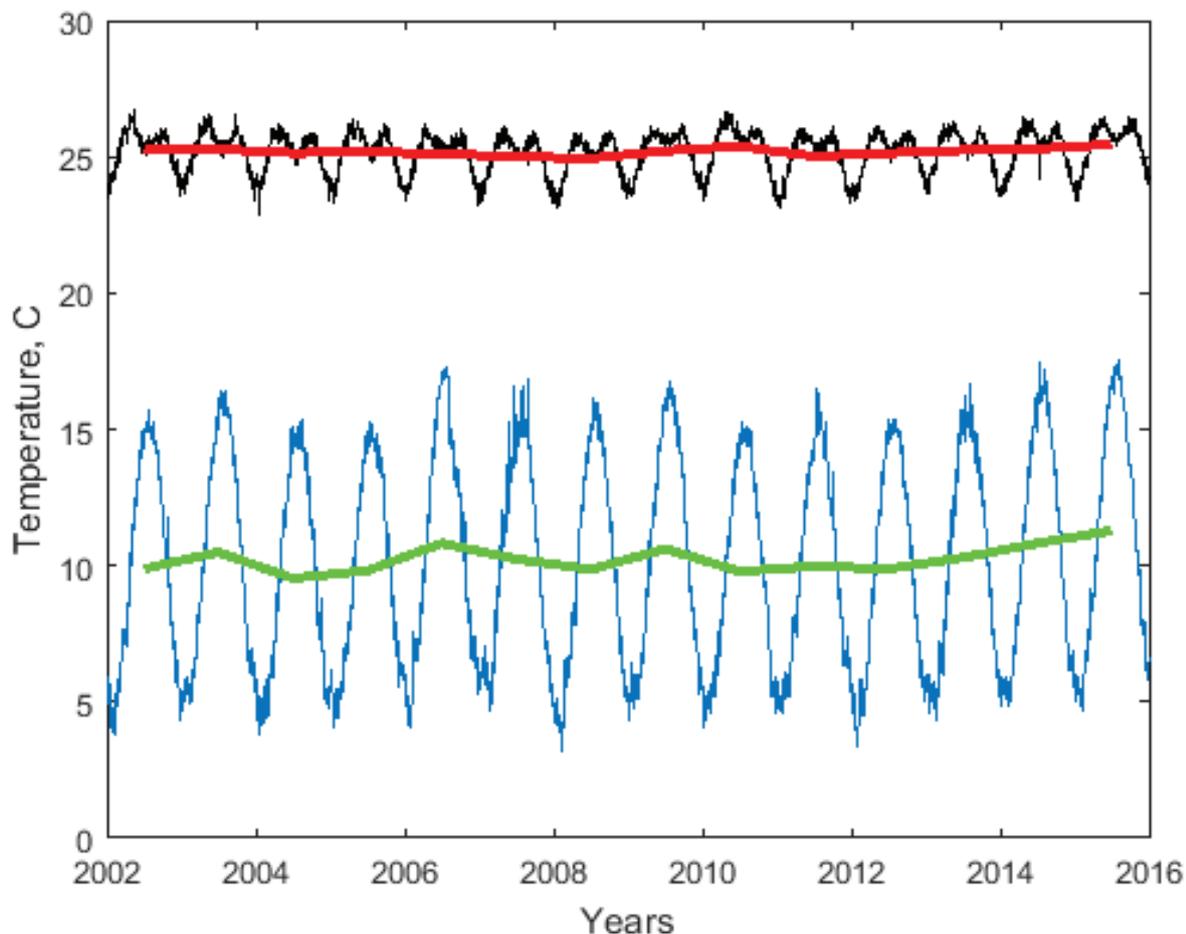


Рис. 3. Вариации среднесуточной планетарной температуры приповерхностного слоя воздуха с 2002 по 2015 годы для всей планеты (синяя кривая) и для широтного пояса $\pm 30^\circ$ (чёрная кривая), а также их среднегодовые значения (зеленая и красная кривые, соответственно).

Fig. 3. Variations of the daily average planetary temperature of the near-surface air layer from 2002 till 2015 for the entire planet (blue curve) and for the latitude belt $\pm 30^\circ$ (black curve), as well as their mean annual values (green and red curves, respectively).

Для дальнейшего анализа были рассчитаны и использовались вариации температуры в тропическом поясе $\pm 30^\circ$ от экватора, где сосредоточена мировая грозовая активность.

Временные изменения температуры, показанные на рисунке 3 синей и черной кривыми, заметно отличаются. В первом случае временные вариации имеют один четко выраженный сезонный минимум (бореальная зима) и один сезонный максимум (бореальное лето). Во втором случае сезонный максимум «раздваивается». Это отличие обусловлено несимметричным расположением суши относительно экватора. Как известно, в Северной полушарии площадь суши значительно больше, чем в Южном, и простирается она в более высокие широты. Поэтому в Северной полушарии амплитуда годового хода температуры заметно выше, и при вычислении глобальной температуры минимум соответствует зиме в Северной полушарии (бореальная зима), а максимум – лету. Если же рассматривать только тропический пояс, ограниченный 30 градусами широты, как на черной кривой рисунка 3, то асимметрия относительно экватора уменьшается. Это приводит к тому, что при расчете средней температуры в этом диапазоне широт локальный минимум наблюдается не только во время зимы в северном полушарии, но и во время зимы в южном полушарии. Благодаря тому, что больший вклад в поведение глобальной температуры вносит северное полушарие, первый минимум более глубокий. Второй минимум накладывается на летний сезон в северном полушарии, что приводит к «раздвоению» максимума температуры.

На Украинской антарктической станции «Академик Вернадский» мониторинг шумановского резонанса и записи СНЧ шумов (сверхнизкочастотных шумов) проводятся с 2002 года (Литвиненко и др., 2005). Следует заметить, что Антарктида является идеальным местом для наблюдения Шумановских резонансов, поскольку здесь, во-первых, отсутствуют местные грозы, а, во-вторых, минимален уровень техногенных помех. На рис. 4 представлен типичный пример регистрации естественных СНЧ шумов на УАС «Академик Вернадский».

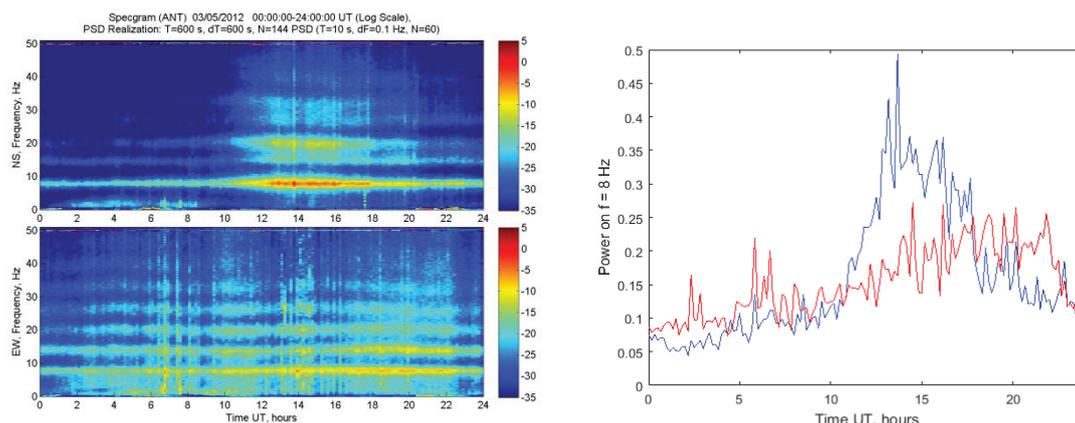


Рис. 4. Слева суточная спектрограмма Шумановских резонансов, зарегистрированная на УАС 5 марта 2012 года для двух ортогональных горизонтальных магнитных антенн: верхняя панель – компонента Юг-Север, нижняя панель – компонента Запад-Восток. Справа ход мощности на частоте 8 Гц для тех же суток для компонент Юг-Север (синяя кривая) Запад-Восток (красная кривая).

Fig. 4. Left: day spectrogram of the Schumann resonances registered on the UAS on March 5, 2012 for two orthogonal horizontal magnetic antennas: the upper panel is a South-North component, the lower panel is a West-East component. Right: the variations of power at a frequency of 8 Hz for the same day for the components South-North (blue curve) West-East (red curve).

Для наблюдателя, находящегося на Украинской антарктической станции «Академик Вернадский» африканский центр представляется наиболее компактным. Азиатский и американский центры занимают значительно больший интервал долгот и широт. Поскольку географический азимут прихода (отсчитываемый от направления на север по часовой стрелке) радиоволн из Африки, принимаемых на УАС, близок к 90°, для обработки использовались записи магнитной антенны Юг-Север, максимумы диаграммы направленности которой ориентированы перпендикулярно меридиану на восток и запад.

Чтобы определить интервал времени, который соответствует максимуму грозовой активности в Африке, весь массив данных был усреднен в частотном диапазоне от 7,5 до 8,5 Гц, и оценен средний суточный ход мощности СНЧ сигнала для канала Юг-Север (рис. 5).

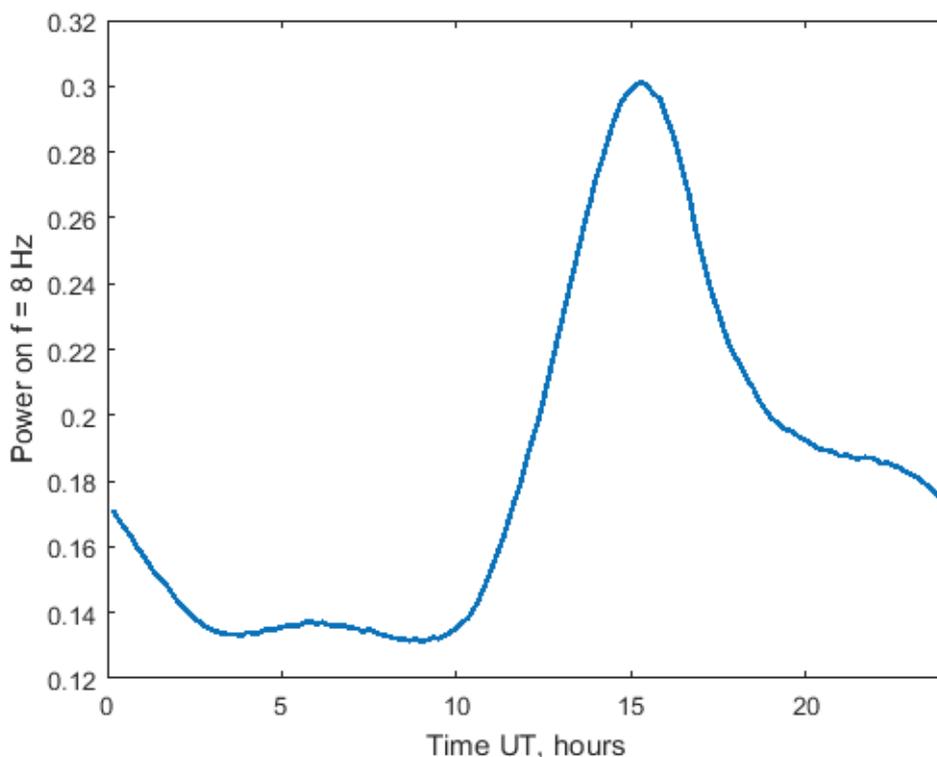


Рис. 5. Средний суточный ход мощности на частоте 8 Гц для компоненты Юг-Север, зарегистрированный на станции «Академик Вернадский».

Fig. 5. The average daily variations of power at a frequency of 8 Hz for the component South-North, registered on Vernadsky station.

Границами интервала, соответствующего максимуму грозовой активности в Африке были приняты моменты пересечения кривой на рисунке 5 уровня 0,7 от её максимума. В результате для дальнейшего анализа был выбран интервал времени от 12:30 до 18:10 UT.

На рис. 6 показан средний годовой ход мощности первого шумановского максимума (зеленая кривая) и температуры воздуха в Африке (красная кривая), оцененные за период с 2002 по 2015 годы.

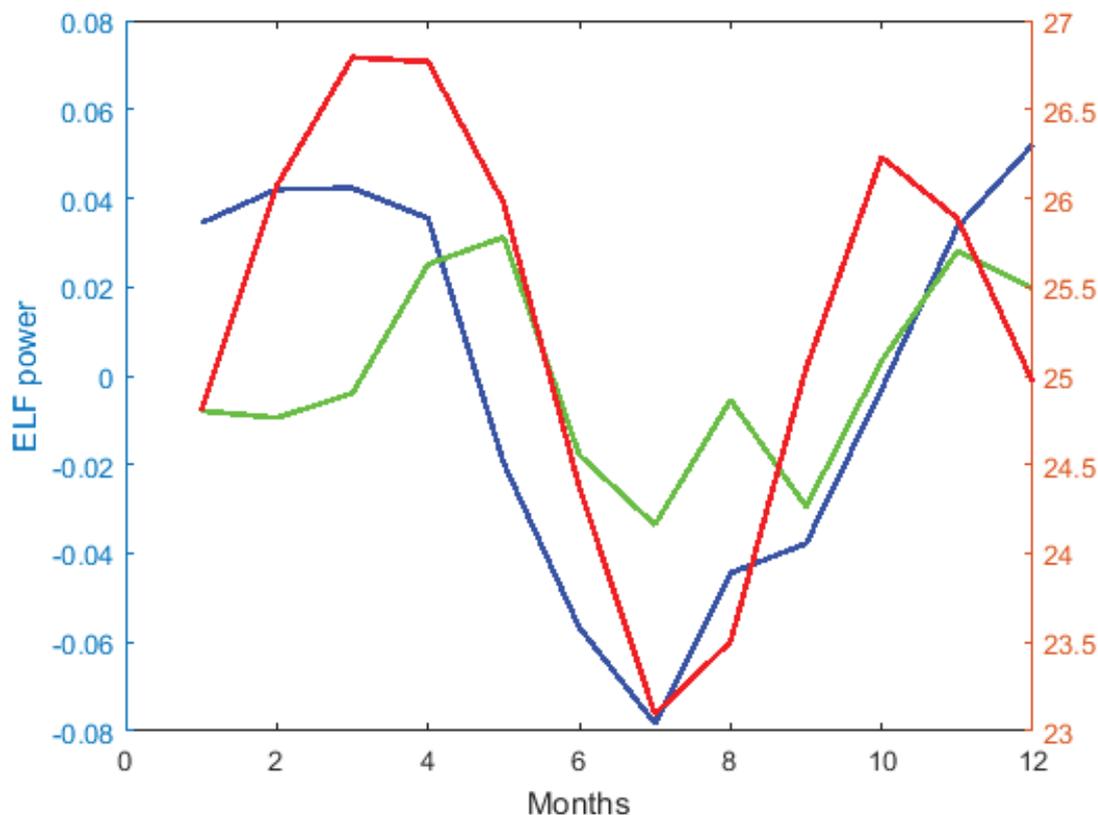


Рис. 6. Средний годовой ход мощности первого шумановского максимума до внесения поправки (зеленая кривая) и после (синяя кривая), а также температура воздуха в Африке (красная кривая).

Fig. 6. The average annual power variations of the first Schumann maximum before the correction (green curve) and after (blue curve), as well as the air temperature in Africa (red curve).

Из графика видно, что сезонные изменения температуры имеют два максимума. Первый из них, более широкий и высокий, лежит в окрестности весеннего равноденствия и приходится на период, когда для экваториального наблюдателя полуденное солнце находится в зените. Второй, более низкий и узкий максимум, совпадает с осенним равноденствием. Минимумы в сезонных изменениях температуры приходятся на зимнее и летнее солнцестояние, когда солнце смещается к южному или северному тропику. Летний минимум – более широкий и глубокий, чем зимний (здесь и далее под летом и зимой мы понимаем соответствующие сезоны в Северном полушарии). Форма сезонных изменений температуры связана с наступлением дважды в год сезона дождей и сухого сезона в центральной Африке.

Изменения интенсивности шумановского резонанса похожи на сезонные вариации температуры, но есть и отличия. Первое из них состоит в том, что сезонный ход интенсивности имеет дополнительный локальный максимум, приходящийся на август. Происхождение этого максимума не ясно, однако, как будет показано далее, учет годового дрейфа грозовых источников устраняет этот пик из сезонного хода. Второе отличие состоит в том, что рост резонансной интенсивности и ее максимумы заметно запаздывают относительно изменений температуры. В весенний (бореальный) период запаздывание достигает двух месяцев, а в осенний – одного. Важно отметить, что при этом минимумы обеих кривых практически совпадают.

Взаимное соответствие температурных и электромагнитных данных улучшается, если учесть и компенсировать для последних сезонные изменения расстояния от наблюдателя до грозовых источников. Поскольку амплитуда поля зависит от дистанции источник–приемник, часть регистрируемых изменений интенсивности колебаний обусловлена не вариациями грозовой активности (а, следовательно, температурой подстилающей поверхности), а сезонным изменением расстояния от наблюдателя до грозового центра.

В работе (Nickolaenko et al., 2014) была приведена расчетная зависимость первой пиковой частоты шумановского резонанса от расстояния между источником и приемником (рис. 7). Кривая 2 (отсчеты отмечены звездами) демонстрирует зависимость пиковой частоты от расстояния до источника и описывается формулой $f(D) = 6.71336 + 0.181732 D - 0.00869582 D^2 + 0.000147793 D^3$.

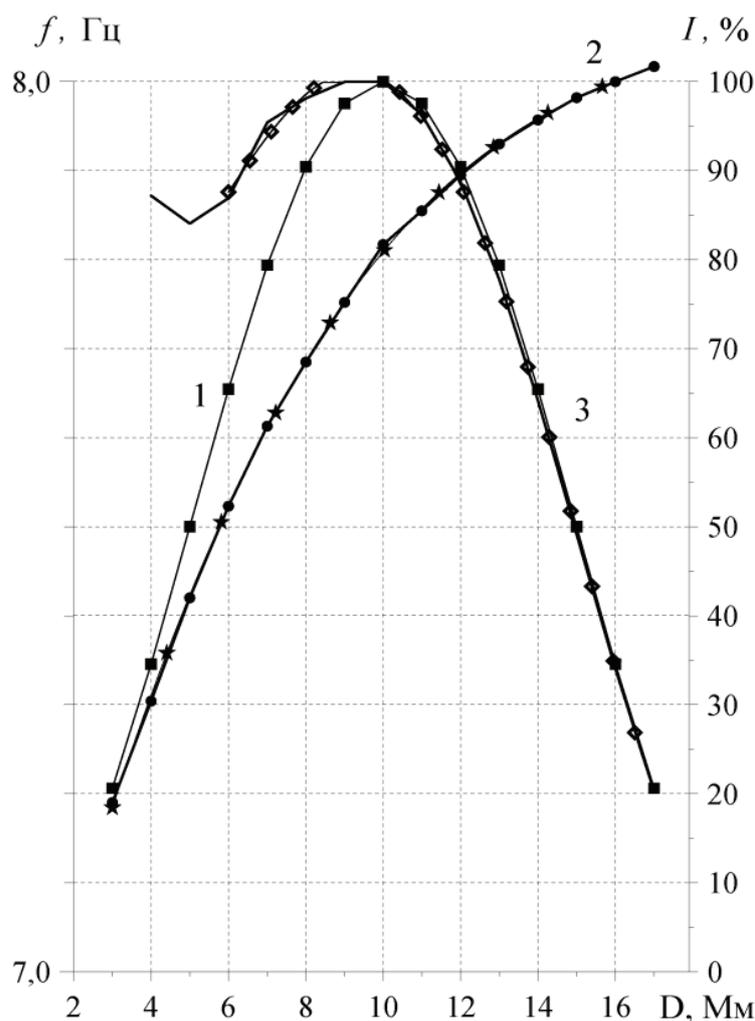


Рис. 7. Дистанционные зависимости частоты и интенсивности первой моды ШР: кривая 1 – зависимость $I_1(D) = \sin(\pi D/20) \cdot 100\%$; кривая 2 – пиковая частота; кривая 3 – интенсивность. Рисунок взят из (Nickolaenko et al., 2014).

Fig. 7. Distance dependences of the frequency and intensity of the first mode SR: curve 1 – dependence $I_1(D) = \sin(\pi D/20) \cdot 100\%$; curve 2 - peak frequency; curve 3 - intensity. The figure is taken from (Nickolaenko et al., 2014).

Такие модельные расчеты позволили оценить значения поправочных коэффициентов для корректировки месячных значений интенсивности ШР с учетом сезонных смещений источников африканского грозового центра, и, как следствие, изменение длины приемной дистанции. Дальность до источника определялась из годовой зависимости частоты первого максимума ШР. Затем из рис. 7 вычислялся поправочный коэффициент для каждого месяца, на который умножались среднемесячные значения мощности (зеленая кривая на рис. 6). Результат компенсации изменений расстояния источник – приемник показан синей кривой на рис. 6. В результате введения таких коррекций, зависимости температуры и интенсивности ШР стали более похожими.

На рис. 6 отчетливо видно, что годовой ход температуры воздуха на один месяц опережает изменение мощности СНЧ сигнала. После смещения температурных изменений на один месяц вперед коэффициент взаимной корреляции между синей и красной кривыми на рисунке 6 возрастет до величины 0,76.

Высокие коэффициенты взаимной корреляции свидетельствуют о связи между вариациями интенсивности шумановского резонанса, зарегистрированными в Антарктике, и температурой приземного слоя воздуха в Африканском грозовом центре.

3. Выводы

На основе 13-летнего массива данных регистраций шумановского резонанса на Украинской антарктической станции «Академик Вернадский» исследована связь интенсивности резонансных колебаний и температурного режима в Африке. Получены результаты, изложенные далее.

Оценены сезонные вариации уровня активности африканского грозового центра.

Выбрана оптимальная конфигурация территории, описывающей африканский грозовой центр.

Обнаружена связь между вариациями интенсивности шумановского резонанса, зарегистрированными в Антарктике, и температурой приземного слоя воздуха в Африканском грозовом центре.

Обнаружено запаздывание сезонного хода интенсивности шумановского резонанса относительно изменений температуры, которое объясняется инерцией в развитии грозовой активности при переходе от сухого сезона к сезону дождей.

4. Благодарности

Авторы благодарны коллективу ГУ НАНЦ МОН Украины за систематическую поддержку данных исследований, а также признательны зимовщикам – геофизикам, которые на протяжении многих лет проводили техническое обслуживание СНЧ измерительного комплекса на Украинской антарктической станции «Академик Вернадский».

5. Сведения о грантовой поддержке

Работа выполнена в соответствии с рабочими планами ведомственной НИР «Ятаган-3» (№ Госрегистрации 0116U000035) при частичной поддержке по конкурсной тематике в рамках НИР «Гелиомакс-2017» (№ Госрегистрации 0117U006837с) и «Шпицберген-2017» (№ Госрегистрации 0116U002874).

6. Литература

1. *Электромагнитные проявления геофизических эффектов в Антарктиде*. Под ред. Л. Н. Литвиненко, Ю. М. Ямпольского. Харьков: РИ НАН Украины, НАНЦ МОН Украины. 2005. 342 с.
2. Hobara, Y., Harada, T., Ohta K., Sekiguchi, M., Hayakawa, M. 2011. A study of global temperature and thunderstorm activity by using the data of Schumann resonance observed at Nakatsugawa, Japan. *J. Atmos. Electr.*, 31, 2, 111–119.
3. Nickolaenko, A. and Hayakawa, M. 2014. Schumann Resonance for Tyros. *Essentials of Global Electromagnetic Resonance in the Earth–Ionosphere Cavity*, Springer. 348.
4. Price, C. and Rind, D. 1990. The effect of global warming on lightning frequencies. *Proceedings of the AMS 16th Conference on Severe Storms and Atmospheric Electricity (Alberta, AB, Canada)*. *American Meteorological Society*, 748.
5. Price, C. 2000. Evidence for a link between global lightning activity and upper tropospheric water vapor. *Nature*, 406, 6793, 290–293.
6. Price, C. and Asfur, M. 2006. Can lightning observations be used as an indicator of upper-tropospheric water-vapor variability? *Bulletin of American Meteorological Society*, 87, 3, 291–298.
7. Price C. 2016. ELF electromagnetic waves from lightning: The Schumann resonances. *Atmosphere*, 7, 116.
8. Sekiguchi, M., Hayakawa M., Nickolaenko A. P., and Hobara Y. 2006. Evidence of a link between the intensity of Schumann resonance and global surface temperature. *Ann. Geophysical*, 24, Is. 7, 1809–1817.

7. References

1. Lytvynenko, L. N., Yampolski, Yu. M., eds., 2005. *Electromagnetic manifestations of geophysical effects in Antarctica*. Kharkiv: IRANAS of Ukraine, NASCU MES of Ukraine.
2. Hobara, Y., Harada, T., Ohta K., Sekiguchi, M., Hayakawa, M. 2011. A study of global temperature and thunderstorm activity by using the data of Schumann resonance observed at Nakatsugawa, Japan. *J. Atmos. Electr.*, 31, 2, 111–119.
3. Nickolaenko, A. and Hayakawa, M. 2014. Schumann Resonance for Tyros. *Essentials of Global Electromagnetic Resonance in the Earth–Ionosphere Cavity*. Springer. 348.
4. Price, C. and Rind, D. 1990. The effect of global warming on lightning frequencies. *Proceedings of the AMS 16th Conference on Severe Storms and Atmospheric Electricity (Alberta, AB, Canada)*. *American Meteorological Society*, 748.
5. Price, C. 2000. Evidence for a link between global lightning activity and upper tropospheric water vapor. *Nature*, 406, 6793, 290–293.
6. Price, C. and Asfur, M. 2006. Can lightning observations be used as an indicator of upper-tropospheric water-vapor variability? *Bulletin of American Meteorological Society*, 87, 3, 291–298.
7. Price C. 2016. ELF electromagnetic waves from lightning: The Schumann resonances. *Atmosphere*, 7, 116.
8. Sekiguchi, M., Hayakawa M., Nickolaenko A. P., and Hobara Y. 2006. Evidence of a link between the intensity of Schumann resonance and global surface temperature. *Ann. Geophysical*, 24, Is. 7, 1809–1817.