

## РАДИОФИЗИКА ГЕОКОСМОСА

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra22.03.201>

УДК 551.594

PACS numbers: 92.60.Pw,  
93.30.Bz, 93.30.Ca

А. В. ПАЗНУХОВ<sup>1</sup>, Ю. М. ЯМПОЛЬСКИЙ<sup>1</sup>,  
А. П. НИКОЛАЕНКО<sup>2</sup>, А. В. КОЛОСКОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Радиоастрономический институт НАН Украины,  
ул. Мистецтв, 4, г. Харьков, 61002, Украина  
E-mail: paznukhov@rian.kharkov.ua

<sup>2</sup> Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,  
ул. Ак. Проскуры, 12, г. Харьков, 61085, Украина  
E-mail: sasha@ire.kharkov.ua

### СОПОСТАВЛЕНИЕ ВАРИАЦИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА НА АФРИКАНСКОМ КОНТИНЕНТЕ И ИНТЕНСИВНОСТИ ШУМАНОВСКОГО РЕЗОНАНСА ПО ДОЛГОВРЕМЕННЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ В АНТАРКТИКЕ

*Предмет и 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 и методология: Использовался метод корреляционного анализа временных рядов. По данным 13-летнего (с 2002 по 2015 гг.) мониторинга природных шумов СНЧ диапазона на Украинской антарктической станции “Академик Вернадский” восстановлены сезонные вариации интенсивности первого мода шумановского резонанса, определяемые активностью африканского грозового центра. Средние показатели температуры воздуха Африканского континента за этот же период 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 к сезону дождей в Африке. 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).*

*Заключение: 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, глобальный термометр, африканский центр мировой грозовой активности, антарктическая станция “Академик Вернадский”*

#### 1. Введение

В связи с глобальным потеплением 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 регистраций метеорологических станций. Основная трудность использования этих данных связана с их локальным характером, тогда как желательно иметь среднюю по планете температуру. В литературе обсуждалось применение для этой цели записей интенсивности глобального электромагнитного (шумановского) резонанса, возбуждаемого излучением грозовых разрядов.

© А. В. Пазнухов, Ю. М. Ямпольский, А. П. Николаенко,  
А. В. Колосков, 2017

В настоящей работе проведены совместные исследования температуры приземного слоя воздуха и уровня грозовой активности на Африканском континенте, определенного по данным 13-летнего мониторинга шумановского резонанса (ШР) на Украинской антарктической станции (УАС) “Академик Вернадский” в период с 2002 по 2015 гг. 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 10 Гц. В этом диапазоне обе границы резонатора имеют высокую проводимость, что обеспечивает добротность резонансных колебаний около 5. Основными источниками электромагнитного излучения, возбуждающего резонатор, являются случайные грозовые разряды, причем из-за низких потерь излучение самых удаленных молний достигает наблюдателя. ШР обнаруживается как последовательность максимумов в энергетическом спектре естественного радишума на частотах 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 образования активной грозовой ячейки требуется время, поэтому грозы наблюдаются как правило в послеполуденные часы по местному времени, запаздывание определяется процессами конвекции в атмосфере, испарения влаги, формирования облачных структур, их динамики и электризации. В конце прошлого века было высказано предположение о возможности использования интенсивности резонансных колебаний ШР в качестве “глобального термометра” [1–3]. Идея такого подхода очень проста: повышение температуры планеты должно приводить к увеличению атмосферной конвекции, интенсификации образования облаков, в том числе грозовых, возрастанию числа молний на планете, что должно вызывать рост интенсивности электромагнитных колебаний в глобальном резонаторе Земля–ионосфера. Очевидно, что грозовая активность и интенсивность резонансных колебаний должны возрастать вместе с тем-

пературой поверхности [4]. Благодаря тому, что слабые (несколько десятых градуса) изменения температуры подстилающей поверхности способны вызвать заметные вариации частоты молниевых разрядов [5], глобальный нагрев или охлаждение можно пытаться обнаружить с помощью ШР, что делает последний своеобразным термометром, измеряющим среднюю температуру планеты. В работах [6, 7] с помощью сингулярного спектрального анализа сравнивались сезонные и межгодовые вариации интенсивности ШР и температуры поверхности суши в различных широтных поясах Земли. Оказалось, что сезонные изменения интенсивности ШР коррелируют с температурой в поясе широт от 45° и выше. Напротив, межгодовые изменения электромагнитной интенсивности коррелируют с изменениями температуры суши в тропиках. Связь интенсивности ШР и температуры суши оказалась нелинейной, поэтому максимальный коэффициент взаимной корреляции наблюдался при сравнении температуры с логарифмом интенсивности. В работе [8] отмечалось подобие сезонных изменений грозовой активности и температуры в Южной Америке. Уровень грозовой активности восстанавливался по данным измерений СНЧ шумов на частоте первой моды ШР в Обсерватории Джорджа Вайза вблизи города Мицпе Рамон (Израиль).

Большинство молниевых разрядов на планете наблюдается над континентами. 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 также можно отслеживать с помощью шумановского резонанса [1, 3]. В работе [9] показана связь между среднесуточными значениями мощности ШР и содержанием пара в верхней тропосфере над Африкой. Вариации влажности примерно на сутки отстают от вариаций грозовой активности. После устранения этого сдвига коэффициент корреляции между величинами составил 0.91.

Приведенные данные подтверждают существование связи между температурой континента и интенсивностью ШР, определяемой грозовой активностью. Однако до настоящего времени сопоставлялись сравнительно короткие (до нескольких лет) серии наблюдений, что не позволяло уве-

ренно проследить долговременные тренды климатических изменений и их отражение в характеристиках ШП. Ниже будет проведено сопоставление результатов непрерывных 13-летних (с 2002 по 2015 гг.) наблюдений ШП на УАС “Академик Вернадский” и расчетов температуры Африканского континента по метеорологическим данным. При этом пришлось проанализировать температурные данные более 10000 метеорологических станций, расположенных по всему земному шару, для того же временного интервала.

## 2. Методика обработки метеорологических данных и СНЧ измерений

### 2.1. Метеорологические данные

В качестве исходного массива данных для оценок температуры в планетарном масштабе нами использован Интернет ресурс <<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/g sod>> (Federal Climate Complex Global Surface Summary of Day Data). Эти данные предоставляются Всемирной метеорологической организацией (WMO) и Национальным центром климатических данных США (NCDC), которые обеспечивают ежедневное обновление информации, получаемой со всех зарегистрированных на-

земных метеорологических станций, количество которых превышает 10000 на всем земном шаре. Архив данных ведется с 1929 г. по сегодняшний день. Станции распределены по земной поверхности неравномерно. Наибольшее их количество находится в Западной Европе и Северной Америке. Расположение станций приведено на карте мира (рис. 1). Среди метеорологических данных представлены 18 параметров, которые включают средние значения за каждые сутки температуры воздуха, атмосферного давления, приведенного к уровню моря, атмосферного давления на станции, точки росы, количества осадков, скорости ветра и некоторых других характеристик. Съем текущих показаний проводится раз в три часа.

Для оценки региональных значений среднесуточной температуры весь земной шар был разбит на ячейки с равными угловыми размерами –  $10^\circ$  по широте и долготе. Таким образом, по широте поверхность Земли была разбита на 18 ячеек, а по долготе – на 36. Площадь полученных ячеек уменьшается от экватора к полюсам, однако поскольку в настоящей работе рассматриваются территории, лежащие в низких широтах, этим различием можно пренебречь. Каждая из метеостанций ассоциируется с соответствующую

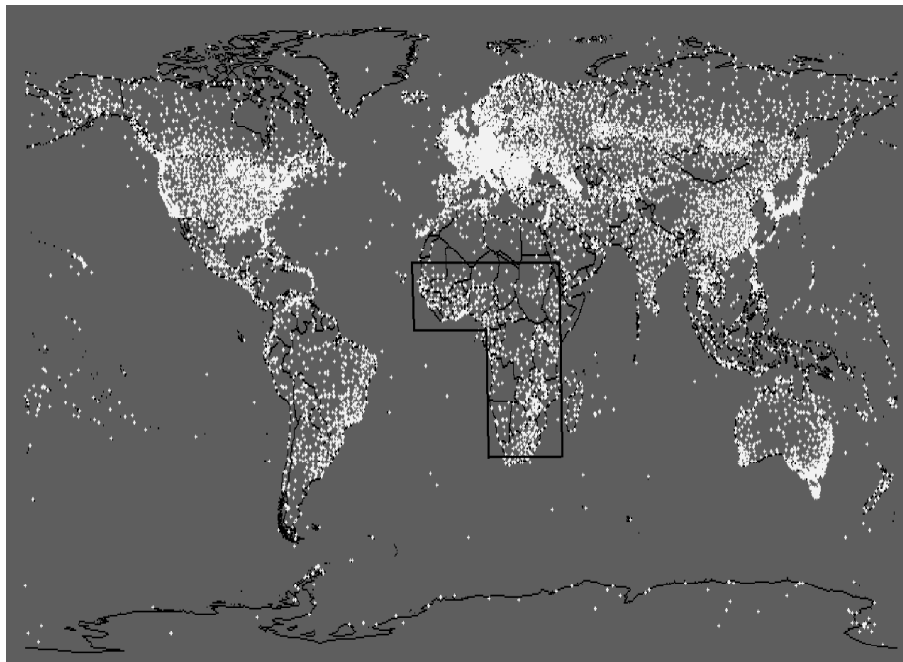


Рис. 1. Карта расположения метеорологических станций (белые точки) на земном шаре <<http://www.ncdc.noaa.gov>>. Серым контуром показана упрощенная конфигурация территории Африки, для которой оценивалась средняя температура

щей ячейкой. Среднесуточные значения температуры приземного слоя воздуха, полученные на всех станциях, входящих в данную ячейку, усреднялись и, таким образом, получалась средняя температура региональной ячейки. Дальнейший анализ проводился с использованием таких среднесуточных значений.

Сначала с помощью всех доступных метеоданных была рассчитана средняя планетарная температура. На рис. 2 представлен временной ход среднесуточной температуры (черная кривая) для всей планеты с 2002 по 2015 гг. и среднегодовые значения (серая кривая).

Для дальнейшего анализа были рассчитаны и использовались вариации температуры в тропическом поясе  $\pm 30^\circ$  от экватора, где сосредоточена мировая грозовая активность (рис. 3).

Временные изменения температуры на рис. 2 и рис. 3 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 Северном полушарии площадь суши значительно больше, чем в Южном, и простирается она в более высокие широты. Поэтому в Северном полушарии амплитуда годового хода температуры заметно выше, и при вычислении глобальной температуры минимум соответствует зиме в Северном полушарии (бореальной

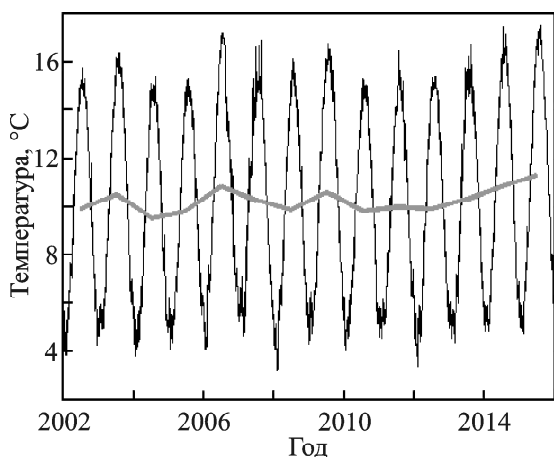


Рис. 2. Вариации среднесуточных значений планетарной температуры приповерхностного слоя воздуха с 2002 по 2015 гг. (черная кривая) и ее среднегодовые значения (серая кривая)

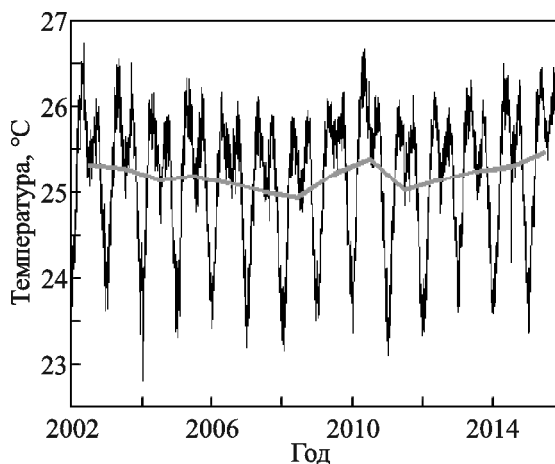


Рис. 3. Вариации среднесуточных значений температуры приповерхностного слоя атмосферы Земли с 2002 по 2015 гг. в широтном поясе  $\pm 30^\circ$  (черная кривая) и ее среднегодовые значения (серая кривая)

зиме), а максимум – бореальному лету. Если же рассматривать только тропический пояс, ограниченный  $30^\circ$  широты, как на рис. 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.

## 2.2. СНЧ измерения

Мониторинг ШР и запись СНЧ шумов проводятся начиная с 2002 г. на УАС “Академик Вернадский”, расположенной вблизи Антарктического полуострова на острове Галиндез ( $65^\circ 14' 44''$  ю. ш.,  $64^\circ 15' 20''$  з. д.) [10].

Следует заметить, что Антарктида является идеальным местом для наблюдения ШР, поскольку здесь, во-первых, отсутствуют местные грозы, а во-вторых, минимален уровень техногенных помех. Измерения проводятся с помощью нескольких индукционных двухкомпонентных магнитометров производства Львовского центра Института космических исследований НАН Украины и ГКА Украины. Частотная полоса измерений составляет 300 Гц. Анализ ШР проводится

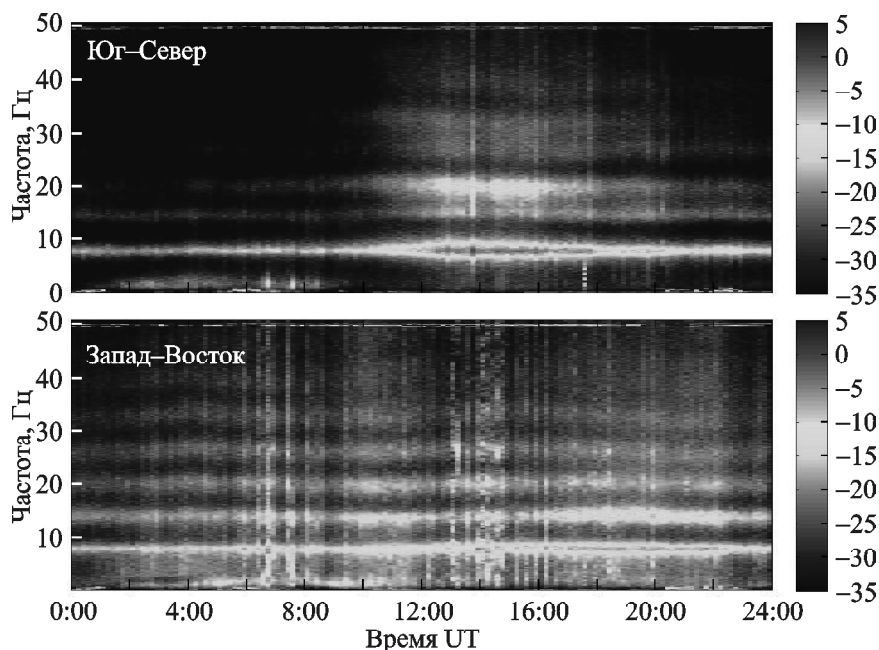
в диапазоне 0.3 ÷ 60 Гц. Суточная реализация в двух ортогональных каналах горизонтальных магнитных антенн разбивалась на десятиминутные интервалы, для каждого из которых рассчитывались усредненные энергетические, а затем и взаимные спектры. Массивы усредненных спектров с разрешением 0.12 Гц визуализировались в виде спектрограмм, на которых в течение суток устойчиво наблюдалось до 6 исследуемых шумановских максимумов. Массивы спектров с разрешением 1 Гц дополнительно сглаживались с использованием усредняющего окна продолжительностью 1 ч. [11]. Для сопоставления с температурными данными оценивалась интенсивность шумов в двух частотных интервалах: в “широкой” полосе 5 ÷ 25 Гц, которая содержит три резонансных моды (с примерными частотами 8, 14 и 21 Гц), и в “узкополосном” прямоугольном фильтре 7.5 ÷ 8.5 Гц в окрестности первого максимума ШР. На рис. 4 представлена типичная суточная спектрограмма естественных СНЧ шумов, зарегистрированная на УАС “Академик Вернадский”.

Грозовая активность на планете формируется тремя мировыми центрами, и ее максимальный уровень наблюдается в 8, 15 и 21 ч UT (мирового времени) [12, 13]. Для наблюдателя, расположен-

ного на станции “Академик Вернадский” африканский центр представляется наиболее компактным. Азиатский и американский центры занимают значительно больший интервал долгот и широт. Поэтому для сопоставления с метеорологическими данными о температуре был выбран временной интервал от 13 до 17 ч UT, в котором грозовая активность Африки достигает максимума (см. рис. 4). Поскольку географический азимут прихода (отсчитываемый от направления на север по часовой стрелке) принимаемых на УАС “Академик Вернадский” радиоволн из Африки близок к 90°, для обработки использовались записи магнитной антенны Юг–Север, максимумы диаграммы направленности которой ориентированы перпендикулярно меридиану на восток и запад.

### 3. Сопоставление температурных данных с параметрами ШР

Для сопоставления записей интенсивности ШР были выбраны четыре различных по форме участка территории, для которых вычислялась средняя температура. При выборе подходящей конфигурации региона, по которому проводилось усреднение температуры за месяц, учитывалось,



**Рис. 4.** Суточная спектрограмма ШР, зарегистрированная на УАС “Академик Вернадский” 5 марта 2012 г. для двух ортогональных горизонтальных магнитных антенн: верхняя панель – компонента Юг–Север, нижняя панель – компонента Запад–Восток

что всего на Африканском континенте расположены 234 метеорологические станции и их расположение должно соответствовать данным космических оптических наблюдений пространственного распределения вспышек молний на континенте, записанным спутником TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), которые были представлены на сайте <<http://thunder.nsstc.nasa.gov/data/query/distributions.html>>.

Вначале использовалась прямоугольная область, расположенная между  $20^\circ$  ю. ш. и  $30^\circ$  с. ш.,  $10^\circ$  и  $40^\circ$  в. д. Затем, проанализировав спутниковые измерения сезонного дрейфа грозных разрядов по широте, мы оптимизировали конфигурацию области для оценки континентальной температуры. Территория максимальной грозовой активности охватывалась двумя прямоугольными областями. Первый прямоугольник располагался между  $10^\circ$  и  $20^\circ$  с. ш. в интервале долгот от  $20^\circ$  з. д. до  $40^\circ$  в. д. (6 ячеек глобальной карты). Второй прямоугольник размещался между  $30^\circ$  ю. ш. и  $10^\circ$  с. ш., а по долготе – между  $10^\circ$  и  $40^\circ$  в. д. (12 ячеек).

Третий вариант также включал два прямоугольника. Первый из них находился по широте между экватором и  $20^\circ$  с. ш., а по долготе – между  $20^\circ$  з. д. и  $40^\circ$  в. д. (12 ячеек). Второй располагался по широте между экватором и  $30^\circ$  ю. ш., а по долготе – между  $10^\circ$  и  $40^\circ$  в. д. (9 ячеек). Критерием выбора оптимальной конфигурации был максимальный коэффициент корреляции среднегодовых зависимостей температуры и интенсивности первой моды ШР. Оценки проводились по всему 13-летнему интервалу измерений. Наивысший коэффициент взаимной корреляции наблюдался в третьем случае, и именно эта область изображена на рис. 1. Соответствующие графики средних за все время наблюдений сезонных вариаций представлены на рис. 5. Здесь по оси абсцисс отложены месяцы. Сплошная линия, построенная относительно левой ординаты, изображает средние сезонные изменения мощности ШР. Она была получена усреднением сезонного хода мощности, зарегистрированного за 13 лет наблюдений. Температурной зависимости (пунктирная кривая), соответствует правая ордината, среднеквадратичные отклонения отмечены вертикальными отрезками. Доверительные интервалы среднемесячных значений мощности ШР (сплошная кри-

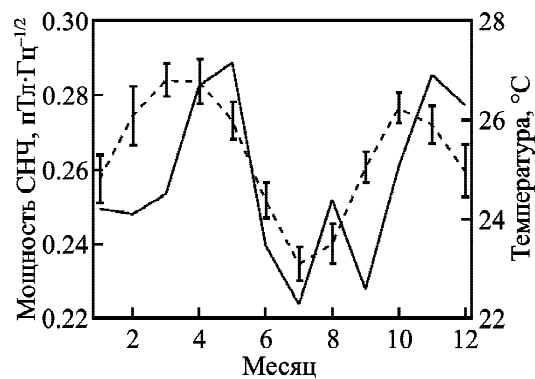


Рис. 5. Средний годовой ход мощности первого шумановского максимума (сплошная кривая) и температуры воздуха в Африке (пунктирная кривая)

вая) на рисунке не показаны, их значения не превышают 20 %.

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 максимум, более низкий и узкий, 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, конечно, зависит от выбора области, из которой берутся данные метеонаблюдений, однако характер вариаций с двумя максимумами при этом сохраняется, поскольку они связаны с наступлением дважды в год сезона дождей и сухого сезона в центральной Африке. Африканский климат принципиально отличается от привычного нам климата средних широт наличием двух, а не четырех времен года.

Изменения интенсивности ШР 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 источников поля 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.

Из-за близости кривых, изображенных на рис. 5, их взаимный коэффициент корреляции равен 0.58. Если же совместить максимумы, сместив температурную зависимость на один месяц вперед, то он возрастет до 0.71. Следует отметить, что при использовании других конфигураций области в центральной Африке, по которой проводилось усреднение температуры, температурные зависимости характеризуются меньшими значениями коэффициента корреляции, но качественно они не сильно отличаются от кривой, приведенной на рис. 5. Подобная устойчивость говорит о робастности используемого подхода в целом. Иными словами, интенсивность первой моды ШР в компоненте магнитного поля Юг–Север действительно связана посредством грозовой активности с температурой приземного слоя воздуха в центральной Африке.

Взаимное соответствие температурных и электромагнитных данных можно улучшить. Для этого необходимо компенсировать 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 перемещением гроз на более дальние или близкие расстояния.

Графики, изображенные на рис. 5, демонстрируют связь температуры приземного слоя воздуха в экваториальной Африке с интенсивностью резонансных колебаний, а значит, с уровнем грозовой активности. Это указывает на то, что температурный режим в Африке действительно влияет на грозы. При сравнении температуры с наблюдаемой интенсивностью резонансных колебаний желательнее как можно точнее перейти от электромагнитных данных к интенсивности гроз. Для этого необходимо учесть сезонный дрейф африканских гроз к северу и югу, который можно оценить, используя изменения первой пиковой частоты ШР, см. рис. 6.

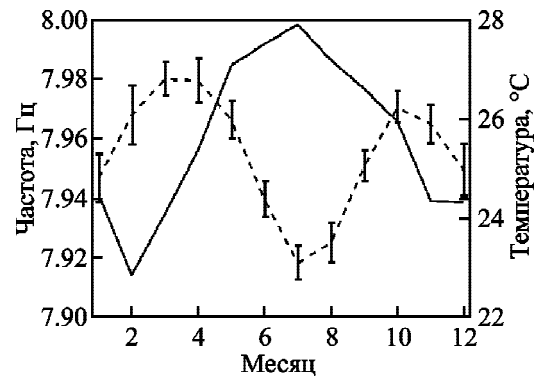


Рис. 6. Средний годовой ход частоты первого шумановского максимума (сплошная кривая) и температуры воздуха в Африке (пунктирная кривая)

Видно, что кривые сильно отличаются друг от друга: вариации температуры имеют два максимума в течение года, а частота достигает максимума один раз в год. Очевидно, что поведение температуры привязано к двум сезонам в экваториальной Африке: сезону дождей и сухому сезону. (Соответствующим образом ведет себя и грозовая активность.) Поведение частоты связано с изменением расстояния источник–приемник, которое для наблюдателя в Антарктике увеличивается во время бореального лета [14–16]. По данным спутниковых оптических наблюдений <<http://thunder.nsstc.nasa.gov/data/query/distributions.html>> зона максимальной грозовой активности в Африке заметно смещается вдоль меридиана в течение года. Наибольшее сезонное удаление грозовых источников от приемного пункта в Антарктике наблюдается в июле, на который и приходится максимум пиковой частоты первой моды ШР. Итак, чем больше расстояние до источника, тем выше измеряемая пиковая частота первого максимума ШР в горизонтальной магнитной компоненте поля. При этом чем больше расстояние источник–приемник, тем ниже регистрируемая интенсивность колебаний при фиксированной интенсивности источника. Очевидно, что в данные резонансных измерений необходимо внести поправку, компенсирующую изменение расстояния до источника.

В работе [14] приведена расчетная зависимость первой пиковой частоты ШР, наблюдаемого в горизонтальном магнитном поле, от расстояния источник–приемник (рис. 7). Вдоль горизонтальной оси отложена дистанция  $D$  от источника до наблюдателя в мегаметрах. Для первой моды

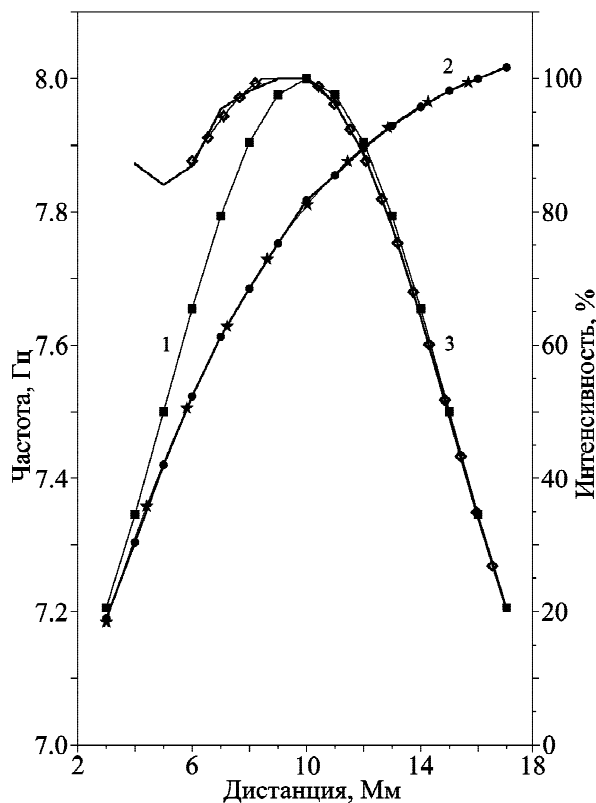


Рис. 7. Дистанционные зависимости частоты и интенсивности первой моды ШР: кривая 1 – зависимость  $I_1(D) = \sin(\pi D/20) \cdot 100$ , кривая 2 – пиковая частота, кривая 3 – интенсивность

ШР значения пиковой частоты показаны на левой оси ординат, а значения нормализованной интенсивности магнитного поля отложены в процентах на правой оси. Кривая 1 (отсчеты отмечены квадратами) описывает расчетную функцию  $I_1(D) = \sin(\pi D/20) \cdot 100$ , аппроксимирующую поведение интенсивности (кривая 3, отсчеты отмечены ромбами), которая в свою очередь описывается формулой  $I(D) = 115.548 - 30.4059D + 7.19917D^2 - 0.564899D^3 + 0.0133658D^4$ . Кривая 2 (отсчеты отмечены звездочками) демонстрирует зависимость пиковой частоты от расстояния до источника и описывается формулой  $f(D) = 6.71336 + 0.181732D - 0.00869582D^2 + 0.000147793D^3$ .

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, изменения расстояния до приемного пункта. Даль-

ность до источника определялась из годовой зависимости частоты первого максимума ШР, представленной на рис. 6 (сплошная кривая). Затем из кривых, представленных на рис. 7, вычислялся поправочный коэффициент для каждого месяца, на который умножались среднемесячные значения мощности, приведенные на рис. 5. Результат компенсации изменений расстояния источник–приемник показан на рис. 8. Очевидно, что кривые стали более похожи друг на друга.

Из рис. 5 и рис. 8 отчетливо видно, что годовой ход температуры воздуха на один месяц опережает изменение мощности СНЧ сигнала. Если сместить температурные изменения на один месяц вперед, то коэффициент взаимной корреляции кривых, приведенных на рис. 8, возрастет до значения 0.76, что легко объяснить следующим образом.

В экваториальной Африке, как уже упоминалось, имеется не четыре, а два времени года: сухой сезон и дождливый сезон. Сезону тропических дождей, во время которых повышается грозовая активность, всегда предшествует максимальный прогрев суши и приземного слоя воздуха. С началом дождливого периода, когда появляются грозы, температура воздуха и поверхности земли падает. Поэтому максимум грозовой активности немного сдвинут относительно температурного максимума, что мы и наблюдаем в наших оценках интенсивности гроз.

Надо отметить, что аналогичный температурный режим наблюдается на полуострове Индостан благодаря двум муссонным периодам. Так, в январе температура достигает минимума, после

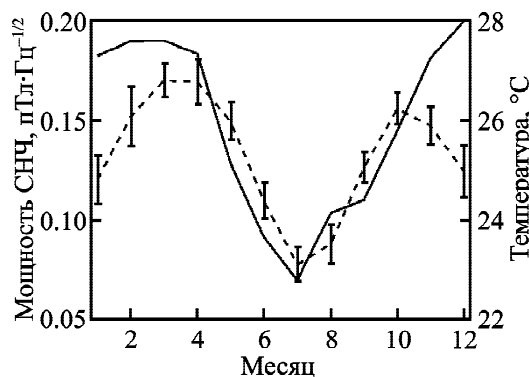


Рис. 8. Средний годовой ход мощности первого шумановского максимума с учетом поправки на расстояние до источника (сплошная кривая) и температуры воздуха в Африке (пунктирная кривая)



чего начинается интенсивный прогрев. Повышение температуры приводит к понижению атмосферного давления и формированию так называемого азиатского минимума. На полуострове начинаются сильные грозовые дожди, которые охлаждают перегретую поверхность. Температура воздуха при этом понижается, а грозовая активность растет. Подобная циркуляция характерна для всего континентального субэкваториального пояса, в частности для Африканского континента.

#### 4. Выводы

На основании массива данных 13-летнего мониторинга ШР в Антарктике исследована связь интенсивности резонансных колебаний и температурного режима Африканского континента. Получены следующие результаты.

1. С помощью длительных записей ШР на УАС “Академик Вернадский” оценены сезонные вариации уровня активности африканского грозового центра.

2. Предложена и использована методика определения глобальных и региональных средних температур приземного слоя воздуха, вычисленных путем разбиения поверхности земного шара на элементарные ячейки.

3. Выбрана оптимальная конфигурация территории, описывающей африканский грозовой центр.

4. Высокие коэффициенты взаимной корреляции свидетельствуют о связи между вариациями интенсивности ШР, зарегистрированными в Антарктике, и температурой приземного слоя воздуха в африканском грозовом центре.

5. Обнаруженное запаздывание сезонного хода интенсивности ШР относительно изменений температуры объясняется инерцией в развитии грозовой активности при переходе от сухого сезона к сезону дождей.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить сотрудников Отдела радиофизики геокосмоса Радиоастрономического института НАН Украины за обсуждения результатов и полезные замечания. Мы признательны также Национальному антарктическому научному центру МОН Украины за многолетнюю поддержку этих исследований на УАС “Академик Вернадский”, а также всем зимовщикам-геофизикам, обеспечивавшим бесперебойную работу СНЧ комплекса на станции.

Исследования выполнены в рамках основной ведомственной бюджетной НИР “Ятаган-3” (№ 0116U000035), а также при частичной финансовой поддержке по НИР “Шпицберген” (№ 0116U002874), “Гелиомакс” (№ 0116U005694с) и “Лирус-2” (№ 0116U002870).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Price C. and Rind D. The effect of global warming on lightning frequencies // The AMS 16<sup>th</sup> Conference on Severe Storms and Atmospheric Electricity: Proc. conf. – Alberta, AB, Canada: American Meteorological Society. – 1990. – P. 748.
2. Williams E. R. The Shuman resonance: A global tropical thermometer // Science. – 1992. – Vol. 256, No. 5060. – P. 1184–1186. DOI: 10.1126/science.256.5060.1184
3. Price C. Evidence for a link between global lightning activity and upper tropospheric water vapor // Nature. – 2000. – Vol. 406. No. 6793. – P. 290–293. DOI: 10.1038/35018543
4. Николаенко А. П., Хайакава М., Секигучи М., Хобара Я. Сравнение интенсивности динамики глобального электромагнитного резонанса и температуры поверхности суши // Известия вузов. Радиофизика. – 2008. – Т. 51, № 12. – С. 1035–1050.
5. Jones P. D., Wigley T. M. L., and Wright P. B. Global temperature variations between 1861 and 1984 // Nature. – 1986. – Vol. 322, No. 6078. – P. 430–434. DOI: 10.1038/322430a0
6. Sekiguchi, M., Hayakawa M., Nickolaenko A. P., and Hobara Y. Evidence of a link between the intensity of Schumann resonance and global surface temperature // Ann. Geophys. – 2006. – Vol. 24, Is. 7. – P. 1809–1817. DOI: 10.5194/angeo-24-1809-2006
7. Hobara Y., Harada T., Ohta K., Sekiguchi M., and Hayakawa M. A study of global temperature and thunderstorm activity by using the data of Schumann resonance observed at Nakatsugawa, Japan // J. Atmos. Electr. – 2011. – Vol. 31, No. 2. – P. 111–119.
8. Price C. and Asfur M. Can lightning observations be used as an indicator of upper-tropospheric water-vapor variability? // Bull. Am. Meteorol. Soc. – 2006. – Vol. 87, No. 3. – P. 291–298. DOI: 10.1175/BAMS-87-3-291
9. Price C. ELF electromagnetic waves from lightning: The Schumann resonances // Atmosphere. – 2016. – Vol. 7, No. 9. – id. 116. DOI: 10.3390/atmos7090116
10. Электромагнитные проявления геофизических эффектов в Антарктиде / Под ред. Л. Н. Литвиненко, Ю. М. Ямпольского. – Харьков: РИ НАН Украины, НАНЦ МОН Украины, 2005. – 342 с.
11. Колосков А. В., Безродный В. Г., Буданов О. В., Пазнухов В. Е., Ямпольский Ю. М. Поляризационный мониторинг шумановских резонансов в Антарктике и восстановление характеристик мировой грозовой активности // Радиофизика и радиоастрономия. – 2005. – Т. 10, № 1. – С. 11–29.
12. Блюх П. В., Николаенко А. П., Филиппов Ю. Ф. Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земли–ионосфера. – Киев: Наукова Думка, 1977. – 199 с.

13. Bliokh P. V., Nickolaenko A. P., and Filippov Yu. F. Schumann Resonances in the Earth-Ionosphere Cavity. – Oxford, UK: Peter Peregrinus, 1980. – 175 pp.
14. Nickolaenko A. and Hayakawa M. Schumann Resonance for Tyros. Essentials of Global Electromagnetic Resonance in the Earth-Ionosphere Cavity. – Tokyo-Heidelberg-New York-Dordrecht-London: Springer, 2014. – 348 p.
15. Nickolaenko A. P., Shvets A., and Hayakawa M. Extremely Low Frequency (ELF) Radio Wave Propagation: A review // Int. J. Electron. Appl. Res. – 2016. – Vol. 3, Is. 2. – P. 1–91.
16. Nickolaenko, A. P., Shvets, A. V. and Hayakawa, M. Propagation at Extremely Low-Frequency Radio Waves. In: J. Webster, ed. Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering. – Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2016. – P. 1–20. DOI: 10.1002/047134608X.W1257.pub2

## REFERENCES

1. PRICE, C. and RIND, D., 1990. The effect of global warming on lightning frequencies. In: *Proceedings of the AMS 16<sup>th</sup> Conference on Severe Storms and Atmospheric Electricity*. Alberta, AB, Canada: American Meteorological Society, p. 748.
2. WILLIAMS, E. R., 1992. The Shuman resonance: A global tropical thermometer. *Science*. vol. 256, no. 5060, pp. 1184–1186. DOI: 10.1126/science.256.5060.1184
3. PRICE, C., 2000. Evidence for a link between global lightning activity and upper tropospheric water vapor. *Nature*. vol. 406, no. 6793, pp. 290–293. DOI: 10.1038/35018543
4. NICKOLAENKO, A. P., HAYAKAWA, M., SEKIGUCHI, M. and HOBARA, Y., 2008. Comparison of the variations in the intensity of global electromagnetic resonance and ground surface temperature. *Radiophys. Quantum Electron*. vol. 51, no. 12, pp. 931–945. DOI: 10.1007/s11141-009-9097-z
5. JONES, P. D., WIGLEY, T. M. L. and WRIGHT, P. B., 1986. Global temperature variations between 1861 and 1984. *Nature*. vol. 322, no. 6078, pp. 430–434. DOI: 10.1038/322430a0
6. 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. Geophys.* vol. 24, is 7, pp. 1809–1817. DOI: 10.5194/angeo-24-1809-2006
7. HOBARA, Y., HARADA, T., OHTA, K., SEKIGUCHI, M. and 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.* vol. 31, no. 2, pp. 111–119.
8. PRICE, C. and ASFUR, M., 2006. Can lightning observations be used as an indicator of upper-tropospheric water-vapor variability? *Bull. Am. Meteorol. Soc.* vol. 87, no. 3, pp. 291–298. DOI: 10.1175/BAMS-87-3-291
9. PRICE, C., 2016. ELF electromagnetic waves from lightning: the Schumann resonances. *Atmosphere*. vol. 7, no. 9, id. 116. DOI: 10.3390/atmos7090116
10. LYTVYENENKO, L. N. and YAMPOLSKI, YU. M., eds., 2005. *Electromagnetic manifestations of geophysical effects in Antarctica*. Kharkiv: IRA NAS of Ukraine, NASCU MES of Ukraine Publ. (in Russian).
11. KOLOSOKOV, A. V., BEZRODNY, V. G., BUDANOV, O. V., PAZNUKHOV, V. E. and YAMPOLSKI, Y. M., 2005. Polarization Monitoring of the Schumann Resonances in the Antarctic and Restoring of the Characteristics of the Global Thunderstorm Activity. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 10, no. 1, pp. 11–29 (in Russian).
12. BLIOKH, P. V., NICKOLAENKO A. P. and FILIPPOV, YU. F., 1977. *Global electromagnetic resonances in the Earth-ionosphere cavity*. Kiev: Naukova Dumka Publ. (in Russian).
13. BLIOKH, P. V., NICKOLAENKO A. P. and FILIPPOV, YU. F., 1980. *Schumann resonances in the Earth-ionosphere cavity*. Oxford, UK: Peter Peregrinus.
14. NICKOLAENKO, A. and HAYAKAWA, M., 2014. *Schumann Resonance for Tyros. Essentials of Global Electromagnetic Resonance in the Earth-Ionosphere Cavity*. Tokyo-Heidelberg-New York-Dordrecht-London: Springer.
15. NICKOLAENKO, A. P., SHVETS, A. V. and HAYAKAWA, M., 2016. Extremely Low Frequency (ELF) Radio Wave Propagation: A review. *Int. J. Electron. Appl. Res.* vol. 3, is. 2, pp. 1–91.
16. NICKOLAENKO, A. P., SHVETS, A. V. and HAYAKAWA, M., 2016. Propagation at Extremely Low-Frequency Radio Waves. In: J. WEBSTER, ed. *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc., pp. 1–20. DOI: 10.1002/047134608X.W1257.pub2

A. V. Paznukhov<sup>1</sup>, Y. M. Yampolski<sup>1</sup>, A. P. Nickolaenko<sup>2</sup>, and A. V. Koloskov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Radio Astronomy,  
National Academy of Sciences of Ukraine,  
4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002, Ukraine

<sup>2</sup> O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics,  
National Academy of Sciences of Ukraine,  
12, Acad. Proskura St., Kharkiv, 61085, Ukraine

## COMPARISON OF AIR TEMPERATURE VARIATIONS ON THE AFRICAN CONTINENT AND THE SCHUMANN RESONANCE INTENSITY BY USING LONG-TERM ANTARCTIC OBSERVATIONS

*Purpose:* Correlation study of long-term seasonal variations of intensity of the global electromagnetic (Schumann) resonance in the Earth-ionosphere cavity and the air temperature for the African center of the global thunderstorm activity.

*Design/methodology/approach:* The correlation analysis of the time series was used. By using the 13-year data (since 2002 till 2015) of monitoring the natural ELF noise at the Ukrainian Antarctic Vernadsky station, the seasonal variations in 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 be-

tween 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.

*Findings:* A one month lag between the annual maximum resonance intensity was found with regard to the maximum of air temperature relevant to the delay 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 0.76 (delay compensated) when this delay is accounted for by the relevant shift of temperature variations.

*Conclusions:* The technique developed can be used in finding the connection between the lightning activity of other thunderstorm centers and the corresponding regional temperature conditions. Such an approach might be used in developing the concept of Schumann resonance records as a “global thermometer”.

*Key words:* extremely low frequency noises, Schumann resonance, global thermometer, African center of global thunderstorm activity, Antarctic Vernadsky station

О. В. Пазнухов<sup>1</sup>, Ю. М. Ямпольський<sup>1</sup>, О. П. Николаєнко<sup>2</sup>,  
О. В. Колосков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Радіоастрономічний інститут НАН України,  
вул. Мистецтв, 4, м. Харків, 61002, Україна

<sup>2</sup>Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова  
НАН України,  
вул. Ак. Проскури, 12, м. Харків, 61085, Україна

#### СПІВСТАВЛЕННЯ ВАРІАЦІЙ ТЕМПЕРАТУРИ ПОВІТРЯ НА АФРИКАНСЬКОМУ КОНТИНЕНТІ ТА ІНТЕНСИВНОСТІ ШУМАНІВСЬКОГО РЕЗОНАНСУ ЗА ДОВГОСТРОКОВИМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯМИ В АНТАРКТИЦІ

*Предмет і мета роботи:* Пошук зв'язку сезонних варіацій характеристик глобального резонатора Земля–іоносфера з температурою повітря на великому часовому інтервалі для африканського центра світової грозової активності.

*Методи та методологія:* Використовувався метод кореляційного аналізу часових рядів. За даними 13-річного (з 2002 до 2015 рр.) моніторингу природних шумів ННЧ діапазону на Українській антарктичній станції “Академік Вернадський” відновлено сезонні варіації інтенсивності першої моди шуманівського резонансу, що визначаються активністю африканського грозового центру. Середні показники температури повітря Африканського континенту за цей же період оцінено за даними глобальної мережі метеорологічних станцій. Територія максимальної грозової активності в Африці апроксимувалася простою геометричною фігурою. У оцінці потужності резонансного максимуму ННЧ випромінювання введено поправку на дальність до джерела блискавкових 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 з переходом від сухого сезону до сезону дощів у Африці. 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 у якості “глобального термометра”.

*Ключові слова:* наднизькочастотні шуми, шуманівський резонатор, глобальний термометр, африканський центр світової грозової активності, антарктична станція “Академік Вернадський”

Статья поступила в редакцию 26.05.2017