

СВЯЗЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА С ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТЬЮ В АФРИКЕ ПО ДАННЫМ СНЧ ИЗМЕРЕНИЙ В АНТАРКТИКЕ, АРКТИКЕ И УКРАИНЕ

Предмет и цель работы: Поиск связи сезонных вариаций характеристик глобального резонатора Земля – ионосфера с температурой воздуха в Африке. Сопоставление результатов СНЧ измерений в Арктике, Антарктике и в средних широтах Северного полушария с приповерхностной температурой Африканского континента. Проверка эффективности модели точечного источника для описания сезонного изменения положения областей с наибольшей грозовой активностью.

Методы и методология: Использовался метод корреляционного анализа временных рядов. По данным многолетнего мониторинга природных шумов сверхнизкочастотного диапазона на Украинской антарктической станции Академик Вернадский, в Низкочастотной обсерватории Радиоастрономического института НАН Украины в с. Мартовое (Украина), а также в обсерватории SOUSY (Шницберген) 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. При оценке интенсивности резонансного максимума сверхнизкочастотного излучения была введена поправка на дальность до источника молниевых разрядов.

Результаты: Показано наличие сильной связи между приповерхностной температурой воздуха экваториальных и субэкваториальных районов Африки и интенсивностью шумановского резонанса, вызванного африканским грозовым центром. Показано, что модель эффективного точечного источника адекватно описывает сезонное поведение африканского грозового центра.

Заключение: Разработанная методика может быть применена в различных приемных пунктах для исследования всех континентальных грозовых центров. Такой подход будет полезен для развития концепции использования шумановского резонатора в качестве “глобального термометра”. Синхронные наблюдения в нескольких приемных пунктах могут оказаться перспективными и для оценки более краткосрочных (в масштабе дней) вариаций глобальной температуры.

Ключевые слова: сверхнизкочастотные шумы, шумановский резонатор, глобальный термометр, африканский центр мировой грозовой активности

1. Введение

В связи с процессом глобального потепления остро стоит необходимость корректной оценки средней приповерхностной температуры воздуха на планете. Основным источником данных о приповерхностной температуре воздуха является международная сеть метеорологических станций, расположенная по всему миру. Однако ее использование имеет ряд недостатков. Во-первых, эта сеть крайне неравномерная. Плотность расположения метеостанций больше в густонаселенных и промышленно развитых регионах планеты. При этом

в полярных и высокогорных регионах, а также в других труднодоступных районах количество метеостанций значительно меньше. Кроме того, их совсем нет в Мировом океане, который занимает более 70 % площади поверхности Земли. В результате для вычисления глобальной температуры на основе данных сети метеорологических станций приходится делать ряд допущений и экстраполяций. Не следует также забывать, что плотность населения неуклонно растет во всех регионах планеты и в окрестностях метеостанций в том числе. Это приводит к появлению локальных “островов тепла” в крупных населенных пунктах, возле ожив-

ленных автомагистралей и поблизости от больших промышленных объектов. Все эти факторы вносят искажения в оценки пространственно-временного распределения температуры, затрудняя сравнение современных данных с измерениями, проведенными несколько десятилетий назад. Чтобы избежать подобных ошибок, проводят так называемую гомогенизацию временного ряда, однако это опять же ведет к увеличению количества различных допущений при вычислении глобальной температуры.

Другой перспективной возможностью оценить глобальные температурные режимы атмосферы над континентами является патруль глобальной грозовой активности (ГГА). Хорошо известно, что формирование кучево-дождевой облачности напрямую связано с нагревом суши, испарением влаги и образованием облачного покрова. Большинство молниевых разрядов происходит в низкоширотном поясе земного шара над тремя континентами – в Юго-Восточной Азии, Африке и Латинской Америке. Электромагнитное излучение ГГА формирует широкополосный природный электромагнитный фон на планете. В низкочастотной его части, от единиц до десятков герц, равномерное спектральное распределение фона с монотонным частотным спаданием интенсивности преобразуется в ярко выраженную резонансную структуру. Она формируется глобальным электромагнитным резонатором, образованным сферическими поверхностями Земли и нижней ионосферы (шумановский резонатор – ШР). Исследованию и моделированию ШР посвящено много работ, отметим лишь несколько монографий [1–3]. В настоящей работе мы используем важное свойство характеристик резонатора, впервые упомянутое в статье [4], в которой была высказана гипотеза о связи интенсивности поля ШР с температурным режимом центров ГГА. В последующем эта гипотеза была подтверждена в ряде публикаций [5–7], включая нашу статью [8].

Настоящая работа посвящена развитию концепции использования ШР в качестве “глобального термометра”. Ее отличительной особенностью является непрерывность, долговременность (несколько лет) и многопозиционность (Антарктида, Арктика, Украина) измерений резонансных полей ШР и оценок их связи с годовым ходом температуры в одном из центров ГГА – в Африке.

2. Методика приема и обработки данных

В статье анализируются данные синхронных СНЧ наблюдений в трех пространственно разнесенных пунктах: в Низкочастотной обсерватории Радиоастрономического института НАН Украины (НЧО, Украина), на Украинской антарктической станции Академик Вернадский (УАС) и в обсерватории SOUSY (SOUnding System – Система зондирования структуры и динамики атмосферы), расположенной на острове Свалбард (Шпицберген, Норвегия). Кратко рассмотрим методики приема и обработки сверхнизкочастотных (СНЧ) шумов в каждом из трех пунктов.

2.1. Система регистрации СНЧ полей в НЧО

Важнейшим требованием к качеству СНЧ измерений является отсутствие в пункте приема локальных помех. Помехи, наблюдаемые в этом диапазоне, можно разделить на узкополосные – в основном наводки от электросети на основных гармониках 50 и 60 Гц, и импульсные – широкополосные сигналы, занимающие весь диапазон ШР. Сетевая наводка довольно стабильна по частоте и превосходит по уровню сигналы ШР, поэтому ее влияние на качество записей можно снижать, повышая динамический диапазон приемных устройств либо с помощью аналоговой фильтрации сигналов. К широкополосным помехам в низкочастотной части диапазона относятся ветровые и вибрационные помехи, а также ближние грозовые разряды. Еще одним существенным источником активных помех являются нестационарные процессы (включения, выключения, искрения в электрической сети и т. п.), возникающие при производстве и потреблении электроэнергии. Уровень техногенного шума высок в населенных пунктах и вблизи промышленных объектов. Вибрационные помехи можно уменьшать, применяя специальные конструкции крепления приемных антенн, а также используя корреляционную обработку сигналов, поступающих с датчиков различных конструкций [9]. Борьба с техногенными помехами сводится к удалению приемного устройства от их источников.

Для мониторинга СНЧ полей в НЧО был выбран пункт на расстоянии 2.5 км от самой обсерватории, расположенный на противоположном, от населенного пункта с. Мартово, берегу Печенежс-

кого водохранилища ($49^{\circ}56'$ с. ш., $36^{\circ}56'$ в. д.). Измерения проводятся в частотной полосе от 1 до 300 Гц [10].

2.2. Система регистрации СНЧ полей на УАС и в обсерватории SOUSY. Первичная обработка данных

Второй наблюдательный пункт расположен на УАС, на острове Галиндез, вблизи Антарктического полуострова ($65^{\circ}14'$ ю. ш., $64^{\circ}15'$ з. д.). Систематические измерения СНЧ полей здесь проводятся с 2002 г. [11]. Следует заметить, что Антарктида является идеальным местом для наблюдения шумановского резонанса, поскольку здесь, во-первых, отсутствуют местные грозы, а во-вторых, минимален уровень локальных 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 шумановских резонансов проводится в диапазоне $0.3 \div 60$ Гц.

Третий наблюдательный пункт (обсерватория SOUSY) находится в Норвегии, на острове Свалбард ($78^{\circ}10'$ с. ш., $16^{\circ}00'$ в. д.). Измерительная аппаратура там такая же, как и на УАС, а наблюдения проводятся с 2013 г. Этот пункт также имеет выгодное местоположение, поскольку находится в Северном полушарии, в еще более высоких широтах, чем УАС, вдали от крупных городов и от грозových центров.

Методика предварительной обработки СНЧ данных, одинаковая во всех пунктах наблюдений, состояла в следующем. Суточная запись, полученная в двух взаимоперпендикулярных 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. Массивы спектров с разрешением 1 Гц дополнительно сглаживались с использованием усредняющего временного окна шириной 1 ч [12]. Для дальнейшего сопоставления с температурными данными оценивалась интенсивность шумов в диапазоне частот от 7.5 до 8.5 Гц, в окрестностях первого максимума шумановского резонанса.

В процедуру предварительной обработки входило также вычисление средних значений поляризационных параметров. На первом этапе усреднялись квадратичные по полю величины – энергетические, взаимные спектры и параметры Стокса. На втором этапе рассчитывались средние поляризационные характеристики резонансных полей [11]. При вычислении средних значений исключались фрагменты регистраций с мощными помехами. Учитывая большой объем данных, полученный за многие годы наблюдений, необходимо было разработать алгоритм, обеспечивающий автоматическую выбраковку сильно зашумленных записей. Для примера на рис. 1 показаны 144 десятиминутных спектра, полученные 29 июля 2008 г. в НЧО. Все спектры можно условно разделить на две группы. Первая группа (1) имеет выраженный резонансный характер. Вторая (2) отличается монотонно спадающим характером с повышенной спектральной плотностью во всей полосе анализа. Такое поведение спектров соответствует наличие типичной широкополосной помехи от близкого грозового фронта.

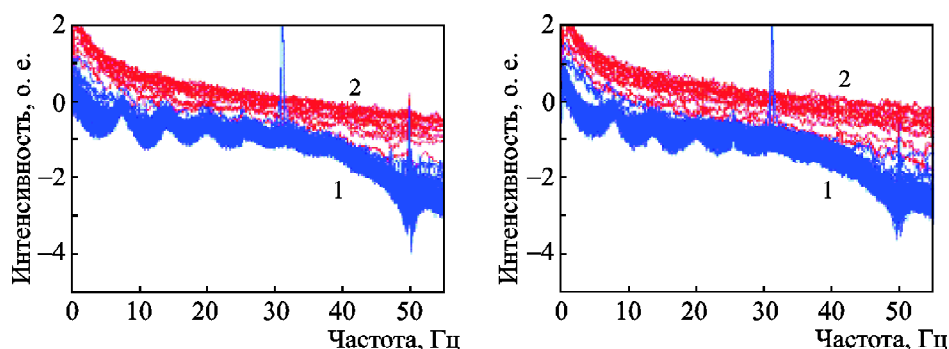


Рис. 1. Десятиминутные спектры, зарегистрированные 29 июля 2008 г. в НЧО магнитной антенной “север – юг” (слева), “запад – восток” (справа)

Самым простым, но достаточно эффективным является способ отбраковки записей по критерию превышения порогового уровня спектральной плотности. Все спектры, для которых значения интенсивности в выбранной частотной полосе превышают заданный порог, считаются “испорченными” и исключаются из последующих расчетов. Уровень порога был подобран экспериментальным путем. На рис. 2 показаны усредненные суточные спектрограммы сигналов, зарегистрированных в НЧО в июле 2008 г. (без отбраковки – слева, и после процедуры отбраковки – справа). Разница в качестве спектров, особенно в области первого мода шумановского резонанса, очень наглядна. Рассмотренный алгоритм применялся для предварительной обработки во всех пунктах наблюдения.

2.3. Методика обработки температурных данных

В качестве исходного массива данных для оценок температуры в планетарном масштабе мы использовали интернет-ресурс <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/gsod> (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 информа-

ции, получаемой со всех зарегистрированных наземных метеорологических станций, количество которых превышает 10000 по всему земному шару. Станции расположены на земной поверхности неравномерно. Наибольшее их количество находится в Западной Европе и Северной Америке. Расположение станций приведено на карте мира (рис. 3). Архив данных ведется с 1929 г. по сегодняшний день. Станции передают сведения о 18 метеорологических параметрах: средних значениях температуры воздуха за каждые сутки, атмосферном давлении, приведенном к уровню моря, атмосферном давлении на станции, точках росы, количестве осадков, скорости ветра и других характеристиках. Съем текущих показаний проводится раз в три часа.

Для оценки региональных значений среднесуточной температуры воздуха весь земной шар был разбит на ячейки с равными угловыми размерами – 10° 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 определенной ячейкой. Среднесуточные значения температуры приземного слоя воздуха, полученные на всех

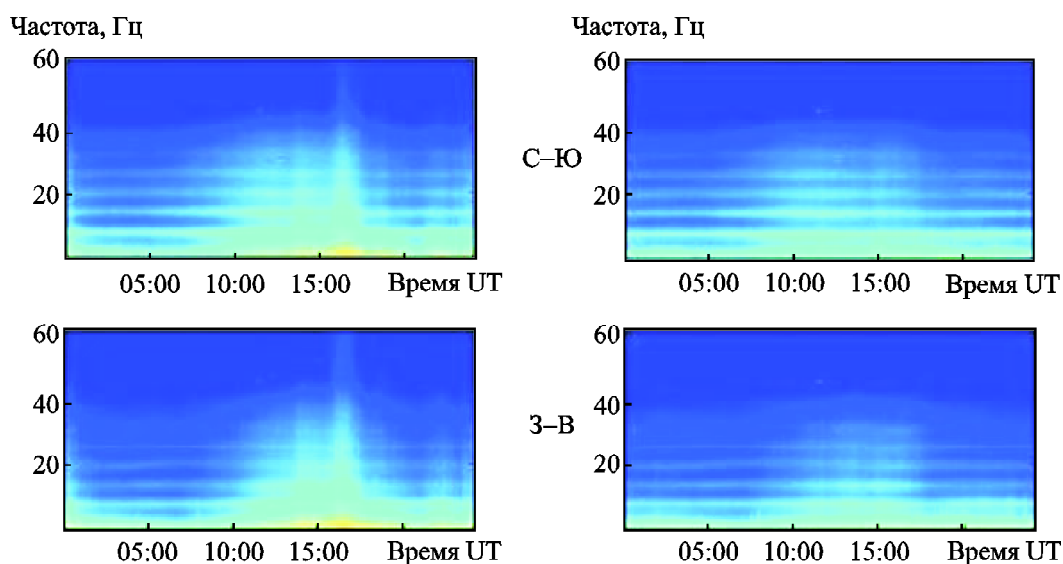


Рис. 2. Усредненные суточные спектрограммы СНЧ шумов, зарегистрированных в НЧО в июле 2008 г. магнитной антенной “север – юг” (верхние панели) и “запад – восток” (нижние панели) без выбраковки помех (слева) и с исключением помех (справа)

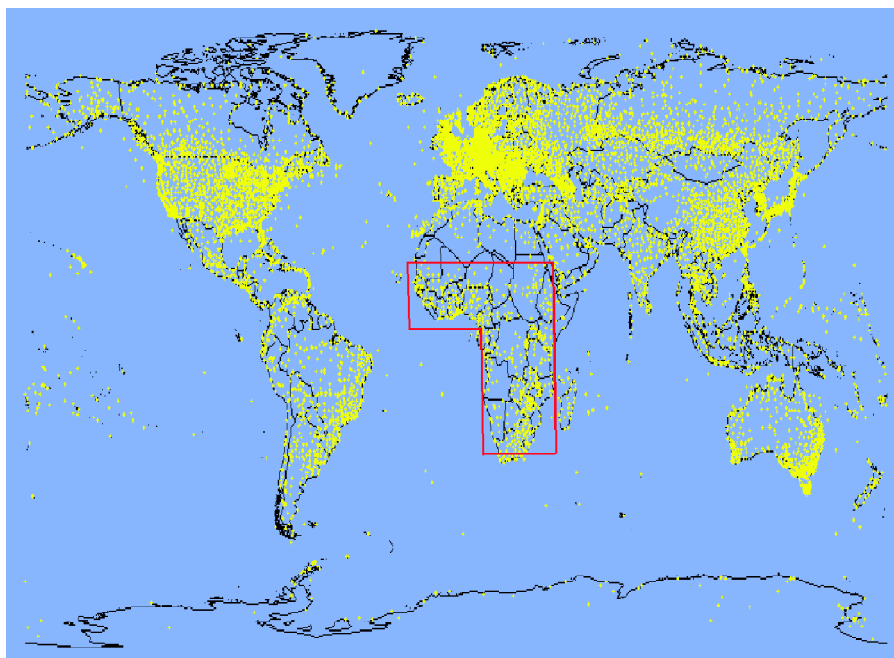


Рис. 3. Карта расположения метеорологических станций (белые точки) на земном шаре <<http://www.ncdc.noaa.gov>>. Серым контуром показана упрощенная конфигурация территории Африки, для которой оценивалась средняя температура воздуха [8]

станциях, попадающих в конкретную ячейку, усреднялись, и таким образом определялась средняя температура каждой региональной ячейки. Дальнейший анализ проводился с использованием этих среднесуточных значений. Для вычисления средней температуры в африканском грозовом центре рассматривалась территория, отмеченная на рис. 3 серым контуром на фоне Африканского континента. В эту область входит более 200 метеорологических станций.

3. Результаты измерений

Грозовая активность на планете формируется тремя мировыми грозовыми центрами, расположенными в низких широтах Юго-Восточной Азии, Африки и Латинской Америки. Максимумы их активности наблюдаются приблизительно в 08:00, 15:00 и 21:00 UT (мирового времени) [1, 13]. Африканский центр является наиболее компактным в сравнении с азиатским и американским, которые занимают значительно больший интервал долгот и широт. Поэтому для сопоставления характеристик ШПР с метеорологическими данными был выбран временной интервал с 13:00 до 17:00 UT, в котором грозовая активность Африки достигает максимума. Поскольку направле-

ние прихода регистрируемого на УАС СНЧ сигнала из Африки близко к 90° , для дальнейшей обработки использовались записи магнитной антенны “север – юг”, максимумы диаграммы направленности которой ориентированы перпендикулярно меридиану – на восток и запад. Для двух других приемных пунктов азимут прихода принимаемого от африканского грозового центра сигнала близок к 180° , поэтому использовались данные антенны “восток – запад”, максимумы диаграммы направленности которой ориентированы в меридиональном направлении.

Ранее авторами [4, 5] и нами [8] было показано, что, используя данные глобального ШПР, можно отслеживать изменения приземной температуры. В настоящей работе рассмотрена возможность одновременного использования данных нескольких приемных пунктов, расположенных на большом расстоянии друг от друга.

При определении эффективной интенсивности сигналов ШПР следует учитывать дальность до источников излучения и дисперсионные свойства резонатора. Для оценки фактической интенсивности источника по значению, измеренному в пункте наблюдения, воспользуемся моделью точечного источника в изотропном резонаторе.

Подробно такой подход рассмотрен в работах [2, 14]. Результаты расчетов показаны на рис. 4, а. По горизонтальной оси отложена частота сигнала, и, поскольку расчеты проводились для первого резонансного мода, область частот ограничена значением 12 Гц. По вертикальной оси отложена дистанция от источника до пункта наблюдения в диапазоне от 3 до 20 Мм. Интенсивность СНЧ поля отражена цветом. Область вблизи источника не показана, поскольку при такой методике расчета поле точечного источника в этой области стремится к бесконечности. Отметим, что аппроксимация точечным источником в реальности распределенного в пространстве источника оправдана, в особенности для высокоширотных пунктов наблюдения, удаленных от экваториальных центров ГГА на расстояния порядка 10 Мм. Адекватность такой упрощенной модели, как будет показано ниже, проверена и в нашем исследовании.

По представленному на рис. 4, а распределению была построена модельная калибровочная кривая относительной интенсивности источника

на пиковой частоте в зависимости от дальности $I(D)$, аппроксимированная полиномом четвертой степени [14], (рис. 4, б):

$$I(D) = c_0 - c_1 D + c_2 D^2 - c_3 D^3 + c_4 D^4,$$

где $c_0 = 115.548$, $c_1 = 30.458$, $c_2 = 7.19917$, $c_3 = 0.564899$, $c_4 = 0.0133658$. В дальнейшем эта кривая использовалась для определения эквивалентной активности грозových центров при построении феноменологической модели связи приповерхностного температурного режима с мировой грозовой активностью. Отметим, что при построении распределения модельного спектра интенсивности сигнала и калибровочной кривой было использовано одно из наиболее адекватных на сегодня представление для профилей проводимости ионосферы, опубликованное в работе [15].

Рассмотрим теперь алгоритм определения расстояния до источника при расчете фактической активности грозowego центра. Ранее для оценки расстояния до источника [8] мы использовали измеренные значения пиковых частот, вычислен-

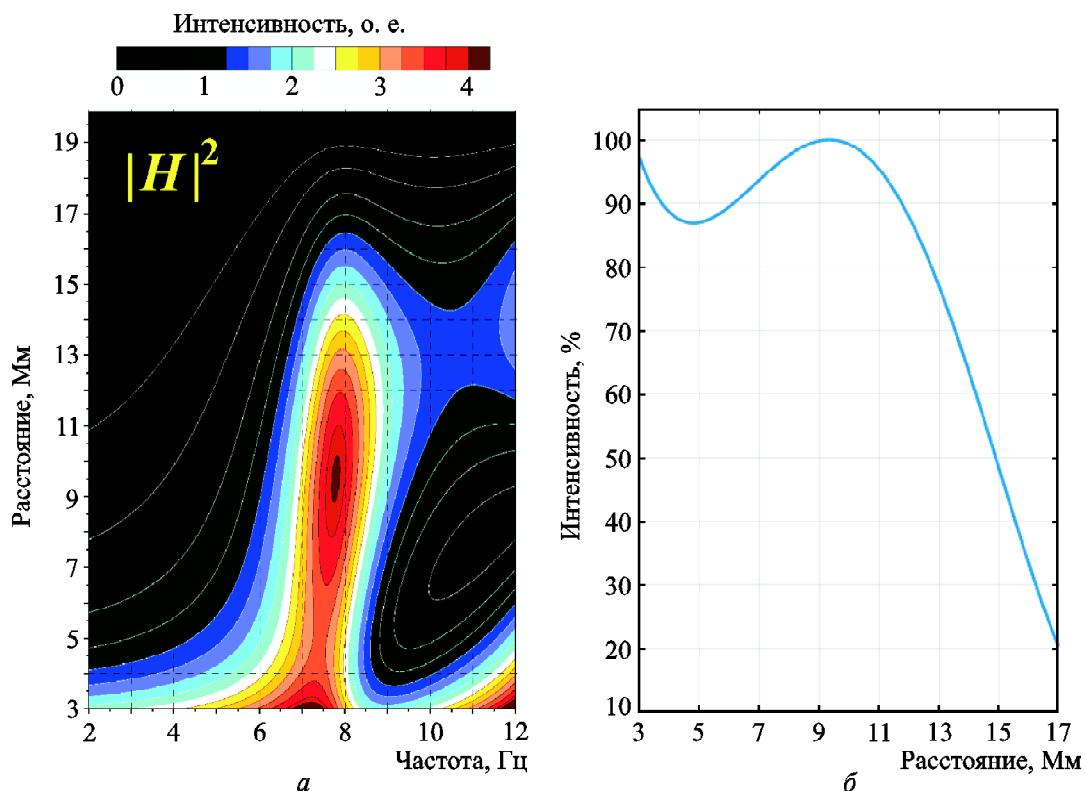


Рис. 4. Распределение модельного спектра интенсивности горизонтальной компоненты магнитного поля сигнала ШПР в зависимости от частоты и дистанции источник – наблюдатель (а); калибровочная кривая для расчета действительной интенсивности сигнала по значению, регистрируемому в приемном пункте, в зависимости от дистанции источник – наблюдатель (б)

ные по данным СНЧ наблюдений на УАС. Однако сопоставление рассчитанных таким образом расстояний со спутниковыми картами распределений молниевых разрядов, полученными аппаратом LIS (Lightning Imaging Sensor) [16], показывает наличие систематической ошибки.

Для распределенных в пространстве континентальных источников определялся эффективный точечный, средне взвешенный, центр масс:

$$\vec{r}_0 = \frac{\int_{S_0} \rho(\vec{r}) \vec{r} dS}{\int_{S_0} \rho(\vec{r}) dS},$$

где \vec{r}_0 – положение центра масс, \vec{r} – радиус-вектор на плоскости распределения, S_0 – границы области континентального центра (задавалась в виде прямоугольника). Таким образом были получены координаты центра масс для каждого сезона, которые считались координатами эффективного точечного грозового источника. Они применялись для определения расстояний от пунктов наблюдения до источников и поправочных коэффициентов, используемых при расчете интенсивности источников (табл. 1).

Затем путем интерполяции были определены поправочные коэффициенты, корректирующие наблюдаемые значения интенсивности, для каждого месяца года. Заметим, что поправочные коэффициенты для африканского источника (из-за близости расположения) наиболее существенно влияют на интенсивность сигнала в пункте наблюдения, расположенном в НЧО. Для УАС и

SOUSY они слабо влияют на конечный результат, хотя и приводят к некоторым уточнениям. Максимальные значения поправочных коэффициентов получены для азиатского источника при наблюдении на УАС. Поэтому они обязательно должны учитываться при анализе гроз в азиатском центре из Антарктики.

Для совместного анализа годовых вариаций температуры воздуха и изменений интенсивности сигналов ШР использовались их среднемесячные значения. В предыдущей работе [8] для сопоставления использовались данные только одного приемного пункта, расположенного на УАС (рис. 5). Данные усреднялись за период с 2002 по 2015 гг. Коэффициент корреляции между вариациями температуры и интенсивности СНЧ сигнала составлял 0.71.

В настоящей статье использовались данные еще двух приемных пунктов – SOUSY и НЧО. Кроме того, база данных УАС была дополнена результатами измерений с 2016 до 2018 гг. Данные SOUSY были получены в период с 2013 по 2018 гг., а данные НЧО – с 2009 по 2014 гг. Температурные данные, как и раньше, взяты за период с 2002 по 2015 гг.

Годовые зависимости интенсивностей шумановского резонанса на каждом из трех приемных пунктов были усреднены дополнительно со своими весовыми коэффициентами. Полученный результат приведен на рис. 6 (кривая 1). Кривая 2 на рис. 6 демонстрирует среднегодовой ход температуры. Оценивание среднеквадратичных отклонений интенсивности шумановских резонансов и температуры было выполнено в предыдущей

Таблица 1. Расстояние до источника и поправочный коэффициент для расчета интенсивности

	УАС– Азия	УАС– Африка	УАС– Америка	НЧО– Азия	НЧО– Африка	НЧО– Америка	SOUSY– Азия	SOUSY– Африка	SOUSY– Америка
Расстояние до источника, Мм									
Зима	11.0	9.0	6.0	11.3	7.3	11.6	12.0	9.5	11.0
Весна	14.0	10.0	7.3	7.4	5.7	11.1	8.4	8.5	9.5
Лето	15.0	11.0	9.3	6.9	4.5	10.7	7.8	7.5	8.5
Осень	12.5	10.0	7.3	9.2	5.7	11.1	10.0	8.5	9.5
Поправочный коэффициент									
Зима	1.05	1.00	1.12	1.07	1.05	1.09	1.14	1.00	1.05
Весна	1.57	1.01	1.05	1.05	1.13	1.05	1.01	1.01	1.00
Лето	2.06	1.05	1.00	1.07	1.15	1.03	1.03	1.04	1.01
Осень	1.21	1.01	1.05	1.00	1.13	1.05	1.01	1.01	1.00

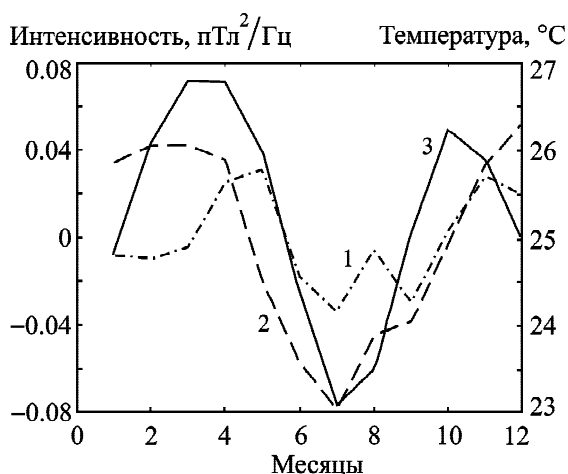


Рис. 5. Среднегодовой ход интенсивности первого мода шумановского резонанса на УАС до внесения поправки (кривая 1) и после (кривая 2) и среднегодовое распределение температуры воздуха в Африке (кривая 3). (Рисунок взят из работы [8])

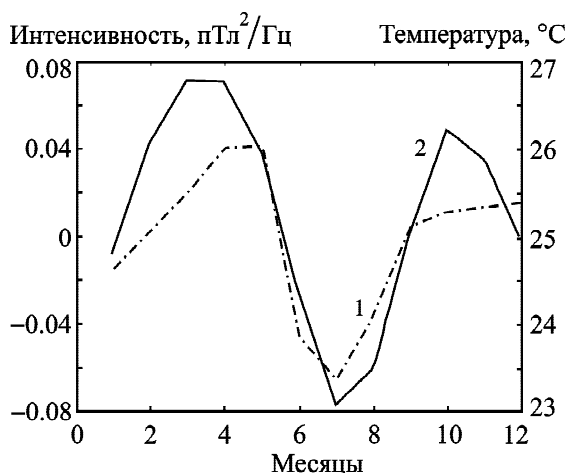


Рис. 6. Среднегодовой ход интенсивности первого мода шумановского резонанса, усредненный по трем приемным пунктам (кривая 1) и температура воздуха в Африке (кривая 2)

работе [8], соответствующие значения составили 20 % и 10 %. Коэффициент корреляции между двумя зависимостями в случае многопозиционных измерений существенно возрос по сравнению с коэффициентом корреляции в случае однопозиционного оценивания и достиг значения 0.88. Такой высокий уровень корреляции свидетельствует о справедливости гипотезы “ШР – глобальный термометр” и адекватности использования модели эффективного точечного источника, а также об эффективности многопозиционных СНЧ

измерений для контроля поведения приповерхностной температуры в регионах расположения мировых центров грозовой активности.

4. Выводы

Проведены долговременные синхронные трехпозиционные измерения характеристик ШР в Антарктиде, Арктике и Украине.

Показано наличие сильной связи между приповерхностной температурой воздуха и интенсивностью шумановского резонанса, вызванного Африканским грозовым центром (коэффициент взаимной корреляции равен 0.88).

Установлено, что модель эффективного точечного источника адекватно описывает сезонное поведение африканского грозового центра.

Полученные результаты открывают перспективы использования данных многопозиционного мониторинга сигналов ШР для контроля изменений глобальной температуры в регионах расположения мировых грозовых центров.

Использование данных синхронных наблюдений в нескольких приемных пунктах также можно считать перспективным для оценки более краткосрочных (суточных и сезонных) вариаций глобальной температуры.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить научных сотрудников РИ НАН Украины А. Г. Рохмана, А. С. Кашеева и Б. Ю. Гаврилюка за создание и многолетнее обслуживание приемных СНЧ пунктов в Украине, Антарктиде и Арктике. Мы благодарны также проф. А. П. Николаенко за консультации и полезные советы при использовании разработанной им теоретической модели расчета полей ШР.

Работа выполнена в рамках бюджетных НИР “Ятаган-3” (номер госрегистрации 0116U000035), “Зонд-5” (номер госрегистрации 0119U100354) и “Виддзеркалення” (номер госрегистрации 0118U100207), а также при частичной финансовой поддержке в рамках конкурсных проектов “Шпицберген-2018” (номер госрегистрации 0118U000562), “Плазмосфера” (номер госрегистрации 0117U003278) и “Гелиомакс-2018” (номер госрегистрации 0118U100280). Техническое обслуживание и эксплуатация СНЧ комплекса в НЧО Радиоастрономического института НАН Украины осуществляются за счет финансирования

“Комплекса электромагнитной диагностики окружающего пространства” как объекта национального достояния Украины.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Блюх П. В., Николаенко А. П., Филиппов Ю. Ф. *Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля–ионосфера*. Киев: Наукова Думка, 1977. 199 с.
2. Nickolaenko A. P. and Hayakawa M. *Resonances in the Earth-ionosphere cavity*. Dordrecht: Kluwer Academic Publ., 2002.
3. 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.
4. 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
5. Price C. and Rind D. 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. 1990. P. 748.
6. 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
7. 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
8. Пазнухов А. В., Ямпольский Ю. М., Николаенко А. П., Колосков А. В. Сопоставление вариаций температуры воздуха на Африканском континенте и интенсивности шумановского резонанса по долговременным наблюдениям в Антарктике. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2017. Т. 22, № 3. С. 201–211. DOI: 10.15407/rpra22.03.201
9. Лазебный Б. В., Аристов Ю. В., Пазнухов В. Е., Рохман А. Г. Подавление локальных помех при наблюдениях шумановских резонансов. *Радиофизика и радиоастрономия*. 1998. Т. 3, № 1. С. 33–36.
10. Пазнухов В. Е., Буданов О. В., Рохман А. Г., Аристов Ю. В. Приемно-измерительный комплекс СНЧ диапазона с УКВ ретранслятором. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2010. Т. 15, № 1. С. 39–49.
11. *Электромагнитные проявления геофизических эффектов в Антарктиде*. Под ред. Л. Н. Литвиненко, Ю. М. Ямпольского. Харьков: РИ НАН Украины, НАНЦ МОН Украины, 2005. 342 с.
12. 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.
13. Bliokh P. V., Nickolaenko A. P., and Filippov Yu. F. *Schumann Resonances in the Earth-Ionosphere Cavity*. Oxford, UK: Peter Peregrinus, 1980. 175 p.

14. Nickolaenko A. P. and Hayakawa M. *Schumann Resonance for Tyros: Essentials of Global Electromagnetic Resonance in the Earth-Ionosphere Cavity*. Tokyo, Japan: Springer, 2014. 348 p. DOI: 10.1007/978-4-431-54358-9
15. Galuk Yu. P., Nickolaenko A. P., and Hayakawa M. Amplitude variations of ELF radio waves in the Earth–ionosphere cavity with the day–night non-uniformity. *J. Atmospheric Sol.-Terr. Phys.* 2018. Vol. 169. P. 23–36. DOI: 10.1016/j.jastp.2018.01.001
16. Christian H. J., Blakeslee R. J., and Goodman S. J. Lightning Imaging Sensor (LIS) for the Earth Observing System. *NASA Technical Memorandum 4350*. Huntsville, AL: MSFC, 1992.

REFERENCES

1. BLIOKH, P. V., NICKOLAENKO, A. P. and FILIPPOV, YU. F., 1977. *Global electromagnetic resonances in the Earth-ionosphere cavity*. Kiev, Ukraine: Naukova Dumka Publ. (in Russian).
2. NICKOLAENKO, A. P. and HAYAKAWA, M., 2002. *Resonances in the Earth-ionosphere cavity*. Dordrecht: Kluwer Academic Publ.
3. 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.
4. 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
5. PRICE, C. and RIND, D., 1990. The effect of global warming on lightning frequencies. In: *Proceedings of the AMS 16th Conference on Severe Storms and Atmospheric Electricity*. Alberta, AB, Canada: American Meteorological Society. p. 748.
6. 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
7. 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
8. PAZNUKHOV, A. V., YAMPOLSKI, Y. M., NICKOLAENKO, A. P. and KOLOSKOV, A. V., 2017. Comparison of Air Temperature Variations on the African Continent and the Schumann Resonance Intensity by Using Long-Term Antarctic Observations. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 22, no. 3, pp. 201–211. (in Russian). DOI: 10.15407/rpra22.03.201
9. LAZEBNY, B. V., ARISTOV, Y. V., PAZNUKHOV, V. E. and ROKHMAN, A. G., 1998. Suppression of Local Interferences while Observing Schumann Resonances. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 3, no. 1, pp. 33–36. (in Russian).
10. PAZNUKHOV, V. E., BUDANOV, O. V., ROKHMAN, A. G. and ARISTOV, Y. V., 2010. ELF Receiving Complex with VHF Retransmitter. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 15, no 1, pp. 39–49. (in Russian).
11. LYTVYENENKO, L. N. and YAMPOLSKI, Y. M., eds., 2005. *Electromagnetic manifestations of geophysical effects in Antarctica*. Kharkiv, Ukraine: IRA NASU, NASCU MESU. (in Russian).

12. KOLOSKOV, 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 Reconstruction of the World Thunderstorm Activity Characteristics. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 10, no 1, pp. 11–29. (in Russian).
13. BLOKH, P. V., NICKOLAENKO, A. P. and FILIPOV, YU. F., 1980. *Schumann resonances in the Earth-ionosphere cavity*. Oxford, UK: Peter Peregrinus.
14. NICKOLAENKO, A. P. and HAYAKAWA, M., 2014. *Schumann Resonance for Tyros: Essentials of Global Electromagnetic Resonance in the Earth-Ionosphere Cavity*. Tokyo, Japan: Springer. DOI: 10.1007/978-4-431-54358-9
15. GALUK, YU. P., NICKOLAENKO, A. P. and HAYAKAWA, M., 2018. Amplitude variations of ELF radio waves in the Earth-ionosphere cavity with the day-night non-uniformity. *J. Atmospheric Sol.-Terr. Phys.* vol. 169, pp. 23–36. DOI: 10.1016/j.jastp.2018.01.001
16. CHRISTIAN, H. J., BLAKESLEE, R. J. and GOODMAN, S. J., 1992. Lightning Imaging Sensor (LIS) for the Earth Observing System. *NASA Technical Memorandum 4350*. Huntsville, AL: MSFC.

A. V. Paznukhov¹, Y. M. Yampolski¹, A. V. Koloskov^{1,2},
C. Hall³, V. E. Paznukhov¹, and O. V. Budanov¹

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

²State Institution “National Antarctic Scientific Center”,
Ministry of Education and Science of Ukraine,
16, Taras Shevchenko Blvd., Kyiv, 01601, Ukraine

³Tromsø Geophysical Observatory,
UiT – The Arctic University of Norway,
PO Box 6050 Langnes, N-9037, Tromsø, Norway

CORRELATION BETWEEN AIR TEMPERATURE AND THUNDERSTORM ACTIVITY IN AFRICA ACCORDING TO THE ELF MEASUREMENTS IN ANTARCTICA, ARCTICA AND UKRAINE

Purpose: Search for the connection of seasonal variations in characteristics of the Earth-ionosphere global resonator with air temperature in Africa. Comparison of results obtained in Arctica, Antarctica and in the midlatitudes of the Northern Hemisphere with the surface temperature of African continent. Checking the effectiveness of the point source model for describing the seasonal change in the position of regions with the greatest thunderstorm activity.

Design/methodology/approach: The method of correlation analysis of time series was used. According to the long-term monitoring of the natural noise of the extremely low frequency (ELF) range at the Ukrainian Antarctic Station (UAS), at the Low Frequency Observatory of the Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences of Ukraine in Martove village (Ukraine), as well as at the SOUSY observatory (Spitsbergen), seasonal changes in the level of the first mode of Shumann resonance was restored by the activity of the African thunderstorm center. The average air temperature in the African conti-

nent over the same period was estimated according to the global network of meteorological stations. When estimating the intensity of the resonance maximum of extremely low frequency radiation, a correction has been introduced for the distance to the source of lightning discharges.

Findings: The presence of a strong relationship between the surface air temperature of the equatorial and sub-equatorial regions of Africa and the intensity of the Schumann resonance generated by the African thunderstorm center is shown. It is shown that the model of an effective point source adequately describes the seasonal behavior of the African thunderstorm center.

Conclusions: The developed technique can be applied at various receiving points for studying all continental thunderstorm centers. Such an approach will be useful for developing the concept of using the Schumann resonator as a “global thermometer”. Simultaneous observations in several receiving points can become promising also for estimating shorter (several days) variations in global temperature.

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

O. B. Пазнухов¹, Ю. М. Ямпольський¹, О. В. Колосков^{1,2},
К. Холл³, В. Є. Пазнухов¹, О. В. Буданов¹

¹Радіоастрономічний інститут НАН України,
вул. Мистецтв, 4, м. Харків, 61002, Україна

²Державна установа “Національний антарктичний
науковий центр” МОН України,
б-р Тараса Шевченка, 16, м. Київ, 01601, Україна

³Геофізична обсерваторія Тромсе,
Університет Тромсе – Арктичний університет Норвегії,
а/с 6050 Лангнес, Н-9037, м. Тромсе, Норвегія

ЗВ’ЯЗОК ТЕМПЕРАТУРИ ПОВІТРЯ З ГРОЗОВОЮ АКТИВНІСТЮ В АФРИЦІ ЗА ДАНИМИ ННЧ ВИМІРЮВАНЬ В АНТАРКТИЦІ, АРКТИЦІ ТА УКРАЇНІ

Предмет і мета роботи: Пошук зв’язку сезонних варіацій характеристик глобального резонатора Земля – іоносфера з температурою повітря у Африці. Зіставлення результатів ННЧ вимірювань у Арктиці, Антарктиці та в середніх широтах Північної півкулі з приповерхневою температурою Африканського континенту. Перевірка ефективності моделі точкового джерела для опису сезонної зміни положення областей з найбільшою грозовою активністю.

Методи та методологія: Використовувався метод кореляційного аналізу часових рядів. За даними багаторічного моніторингу природних шумів наднизькочастотного діапазону на Українській антарктичній станції Академік Вернадський, в Низькочастотній обсерваторії Радіоастрономічного інституту НАН України в с. Мартове (Україна), а також в обсерваторії SOUSY (Шпіцберген), були відновлені сезонні варіації інтенсивності першого мода шуманівського резонансу, що визначаються активністю африканського грозового центру.

Середні показники температури повітря африканського континенту за цей самий період були оцінені за даними глобальної мережі метеорологічних станцій. При оцінці інтенсивності резонансного максимуму наднизькочастотного випромінювання введено поправку на дальність до джерела блискавкових розрядів.

Результати: Показано наявність сильного зв'язку між поверхневою температурою повітря в екваторіальних та субекваторіальних районах Африки і інтенсивністю сигналу шуманівського резонансу, викликаного африканським грозовим центром. Показано, що модель ефективного точкового джерела адекватно описує сезонну поведінку африканського грозового центру.

Висновок: Розроблена методика може бути застосована у різних приймальних пунктах для дослідження усіх континентальних грозових центрів. Такий підхід буде корисним для розвитку концепції використання шуманівського резонатора в якості "глобального термометра". Синхронні спостереження у декількох приймальних пунктах можуть стати перспективними і для оцінки більш короткострокових (у масштабі днів) варіацій глобальної температури.

Ключові слова: наднизькочастотні шуми, шуманівський резонатор, глобальний термометр, африканський центр світової грозової активності

Статья поступила в редакцию 13.05.2019