

## РАДІОФІЗИКА ГЕОКОСМОСУ

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra25.03.211>

УДК 551.594

О. В. ПАЗНУХОВ<sup>1</sup>, Ю. М. ЯМПОЛЬСЬКИЙ<sup>1</sup>, О. В. КОЛОСКОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Радіоастрономічний інститут НАН України,  
вул. Мистецтв, 4, м. Харків, 61002, Україна  
E-mail: paznukhov@rian.kharkov.ua

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

### ЗВ’ЯЗОК ТЕМПЕРАТУРИ ПОВІТРЯ З ГРОЗОВОЮ АКТИВНІСТЮ В ПІВДЕННІЙ АМЕРИЦІ ЗА ДАНИМИ ННЧ ВИМІРЮВАНЬ В АНТАРКТИДІ

*Предмет і мета роботи:* Аналіз річного ходу температури повітря над різними регіонами Південної Америки за даними багаторічних метеорологічних спостережень; розгляд фізико-географічних та кліматичних особливостей Амазонської низовини, що впливають на грозову активність у цьому регіоні; пошук зв’язку сезонних варіацій характеристик глобального резонатора Земля–іоносфера з температурою повітря в Південній Америці; зіставлення результатів, отриманих в Антарктиці, з температурою повітря над Південно-Американським континентом; перевірка ефективності моделі точкового джерела для пояснення розташування 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” були відновлені сезонні варіації інтенсивності першої моди шуманівського резонансу, що визначаються активністю американського грозового центру. Середні показники температури повітря Амазонської низовини за цей самий період були оцінені за даними глобальної мережі метеорологічних станцій.

*Результати:* Показано наявність сильного зв’язку між приповерхневою температурою повітря в екваторіальних і субекваторіальних районах Південної Америки й інтенсивністю сигналу шуманівського резонансу, сформованого американським грозовим центром. Підтверджено гіпотезу про те, що шуманівський резонатор може відігравати роль “глобального термометра”, а модель локалізованого ефективного джерела адекватно характеризує континентальні зміни температури.

*Висновок:* Розроблена методика може бути застосована у різних пунктах моніторингу шуманівського резонансу для дослідження усіх континентальних грозових центрів. Цей підхід буде корисним для розвитку концепції використання шуманівського резонатора як “глобального термометра”. Використання даних синхронних спостережень у декількох пунктах моніторингу можна вважати перспективним для оцінки короткострокових (дні – декілька днів) варіацій глобальної температури.

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

#### 1. Вступ

У зв’язку з процесом глобального потепління гостро постає необхідність моніторингу температурних трендів у планетарному масштабі. Однією з перспективних можливостей оцінки глобальних температурних режимів атмосфери над континентами є спостереження глобальної грозової активності (ГГА). Добре відомо, що формування купчасто-дощової хмарності прямо пов’язане з нагріванням суші, випаровуванням вологи та розвитком хмарного покриву. Більшість блискавкових

розрядів відбувається в низькоширотному поясі земної кулі над трьома континентами – в Південно-Східній Азії, Африці і Латинській Америці. Електромагнітне випромінювання ГГА формує широкомугловий природний електромагнітний фон на планеті. У низькочастотній частині спектра (від одиниць до десятків герц) на фоні монотонного спадання з частотою спектральної густини чітко проявляється багатомодова резонансна структура. Вона формується глобальним електромагнітним резонатором, утвореним сферични-

ми поверхнею Землі та нижньою межею іоносфери, – шуманівським резонатором (ШР). Дослідженню і моделюванню ШР присвячено велику кількість публікацій, відзначимо лише кілька монографій [1–3]. У цій роботі використовується важлива властивість ШР – можливість спостереження температури повітря в центрах ГГА за даними моніторингу інтенсивності резонансних мод. Вперше припущення про такий підхід було сформульовано в статті [4]. У подальшому ця гіпотеза була підтверджена експериментально, наприклад, у роботах [5–7] і дослідженні [8], виконаному авторами цієї статті.

Роботу присвячено знаходженню зв'язку температурного режиму на Південно-Американському континенті з грозовою активністю за даними наднизькочастотних (ННЧ) спостережень на Українській антарктичній станції “Академік Вернадський” (65°14' пд. ш., 64°15' з. д.). Безперервні систематичні вимірювання ННЧ полів тут виконуються з 2002 р. [9]. Оскільки підхід оцінювання характеристик резонатора був викладений досить докладно у нашій попередній роботі [8], в цій статті головну увагу приділено методиці визначення континентальних температур за даними метеорологічних спостережень.

## 2. Методика оцінювання середньої температури повітря

Відтворення континентальних і регіональних температурних режимів повітря виконувалися за даними понад 10 тис. метеорологічних станцій, розподілених всією земною кулею. Ця інформація знаходиться у вільному доступі на веб-сайті <<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/g sod>>.

Для оцінювання середньої регіональної температури повітря вся поверхня земної кулі розбивалась на просторові осередки з розмірами 10° за широтою та 10° за довготою. На першому етапі формувався багаторічний архів середньодобових значень температур за даними вимірів на метеорологічних станціях, які належать обраному осередку. З багаторічного набору даних створювалися окремі річні директорії. Для подальшої обробки використовувалися два тривимірних масиви: один – для запису температури повітря, інший – для підрахунку кількості метеостанцій у кожному осередку. Розмір обох масивів ста-

новив 18·36·366 елементів (число осередків за широтою, довготою та кількістю днів у році відповідно). З масивів даних, отриманих у невисокосні роки, видалявся останній ряд елементів. В результаті відповідних процедур усереднення добових значень температури за всіма станціями, що належать даному осередку, оцінювалася середньодобова температура у заданому регіоні.

## 3. Співставлення температури повітря з потужністю ННЧ сигналу від американського грозового центру

Раніше при аналізі грозової активності в африканському грозовому центрі [10] було використано ННЧ дані, зареєстровані в трьох просторово рознесених приймальних пунктах: на антарктичній станції “Академік Вернадський”, в Низькочастотній обсерваторії РІ НАН України (НЧО), розташованій в селищі Мартове (Харківська область, Україна), і в обсерваторії SOUSY (SOUnding SYstem – Система зондування атмосфери), розташованій на о. Свалбард, Норвегія. А в цій роботі для аналізу грозової активності в американському грозовому центрі використовувалися тільки дані, отримані у приймальному пункті на станції “Академік Вернадський”. Такий вибір був пов'язаний з тим, що цей пункт розташований значно ближче до американського грозового центру, аніж НЧО та SOUSY, що дозволяє більш надійно ідентифікувати активність саме цього центру ГГА.

Для оцінки потужності ННЧ випромінювання американського грозового центру було обрано канал “схід–захід” приймального ННЧ магнітометра та інтервал часу спостережень з 19:00 до 23:00 UT, на який припадає кульмінація американського джерела ГГА. Максимум діаграми спрямованості цієї магнітної антени формується уздовж меридіану в напрямку на Південну Америку. Розглядався масив даних безперервних спостережень на станції “Академік Вернадський” з 2003 до 2014 рр. Добовий масив даних розбивався на десятихвилинні інтервали, для кожного з яких розраховувалися усереднені енергетичні спектри. Поточні спектрограми ННЧ шумів в діапазоні 0.3 ÷ 60 Гц з роздільною здатністю 1 Гц додатково згладжувалися з використанням часового усереднення. Для подальшого співставлен-

ня з температурними даними оцінювалася інтенсивність шумів у частотній смузі від 7.5 до 8.5 Гц поблизу резонансної частоти першого шуманівського резонансу [10]. Спочатку розраховувалися середні значення для кожного місяця за 12-річний період безперервних спостережень, потім обчислювався середньорічний хід інтенсивності ННЧ сигналу.

На рис. 1 зображено карту розподілу середньорічної щільності блискавкових розрядів, отриману за даними оптичних супутникових спостережень. Колірна градація відповідає кількості розрядів на один квадратний кілометр поверхні. Видно, що американський грозовий центр дуже відрізняється за формою від африканського. Африканський осередок є порівняно компактним, у той час як американський сильно розтягнутий за широтою від Парагваю до півдня континентальної частини Сполучених Штатів Америки. Значна широтна розосередженість грозової активності ускладнює вибір оптимальної території для обчислення середнього річного ходу температури повітря для подальшого співставлення з ННЧ даними. Однак нами була використана модель [10], яка базується на уявленні світових грозових центрів у вигляді ефективних точкових джерел з урахуванням ефекту їх сезонного дрейфу.

Карта розташування цих точкових джерел показана на рис. 2. Сині точки показують усереднене розташування джерела в період грудень–лютий, зелені – у період березень–травень, червоні – у період червень–серпень, а жовті – у період вересень–листопад. Кожну точку отримано усередненням за три місяці просторово-часового розподілу грозових розрядів на всій поверхні земної кулі.

З рисунку видно, що геометричні центри південноамериканського джерела зосереджено поблизу гірського масиву Анди. Однак робити висновок про варіації температури в усьому регіоні, спираючись на метеостанції в Андах, не зовсім коректно. Анди – це регіон, в якому присутня висотна поясність. Тут мало метеорологічних станцій, до того ж через край пересічену місцевість вони знаходяться на різних висотах над рівнем моря, що ускладнює статистично однорідне усереднення даних. До того ж в Андах грозова активність є нижчою, ніж на Амазонській низовині, що розта-

шована у передгір'ях. В Амазонії є ще одна необхідна умова грозоутворення – підвищена вологість повітря.

Розглянемо світову карту розподілу випаровування (див. рис. 3). Видно, що максимум випаровування в Південній Америці спостерігається в районі Амазонської низовини. Це не дивно, оскільки це заплашний, дуже болотистий та спекотний регіон. Амазонка – найповноводніша річка на планеті, яка має безліч великих, розгалужених приток. Заболоченості сприяє також рівнинний рельєф. В результаті на поверхні майже завжди присутня вода у вигляді заливних озер, численних річкових проток, мілководних калюж, грязьових ділянок. Мангрові ліси та вологі джунглі щільно покривають цей регіон. Іншим важливим фактором є активна конвекція, що призводить до утворення потужних грозових хмар.

У зв'язку з наведеними вище аргументами для оцінок та аналізу температурного режиму в регіоні були вибрані не Анди, поблизу яких розташований модельний геометричний центр американського грозового джерела (рис. 2), а Амазонська низовина. Температура повітря обчислювалася для території, обмеженої  $10^\circ$  південної широти й екватором між  $50^\circ$  і  $70^\circ$  західної довготи (суцільна крива на рис. 4). У цьому осередку оцінювання знаходяться 14 метеорологічних станцій. За даними цих станцій було розраховано річний хід температури і для декількох інших територій (рис. 4).

На рис. 5 показано порівняння середньорічних залежностей температури повітря над Амазонською низовиною (штрихована крива) та потужності ННЧ сигналу американського грозового центру, оціненої за даними ННЧ моніторингу на станції “Академік Вернадський” (суцільна крива).

Залежності якісно та кількісно подібні одна до одної, коефіцієнт їх взаємної кореляції становить 0.92. Порівняння потужності ННЧ сигналу з температурним ходом для інших осередків демонструє суттєві розбіжності, значення коефіцієнтів взаємної кореляції варіюються від  $-0.61$  до  $0.34$ . Таким чином, можна вважати, що еквівалентне джерело грозової активності Південно-Американського центру ГГА розташовується у широтному поясі поблизу екватора, шириною близько  $10^\circ$ .

Варто відзначити, що наразі не існує точної математичної моделі, яка б описувала взаємо-

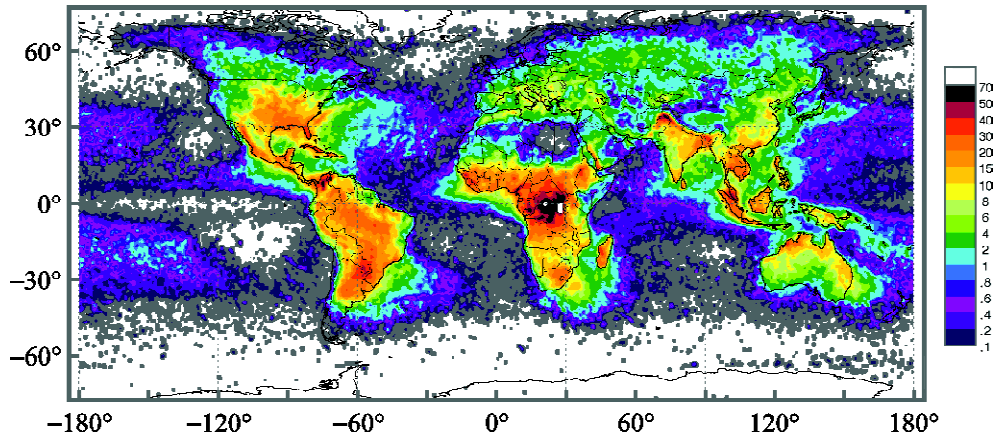


Рис. 1. Середньорічна щільність блискавкових розрядів на квадратний кілометр. Рисунок взято з веб-сайту NASA <[https://www.nasa.gov/images/content/161144main\\_HRFC\\_AnnualFlashRate.jpg](https://www.nasa.gov/images/content/161144main_HRFC_AnnualFlashRate.jpg)>

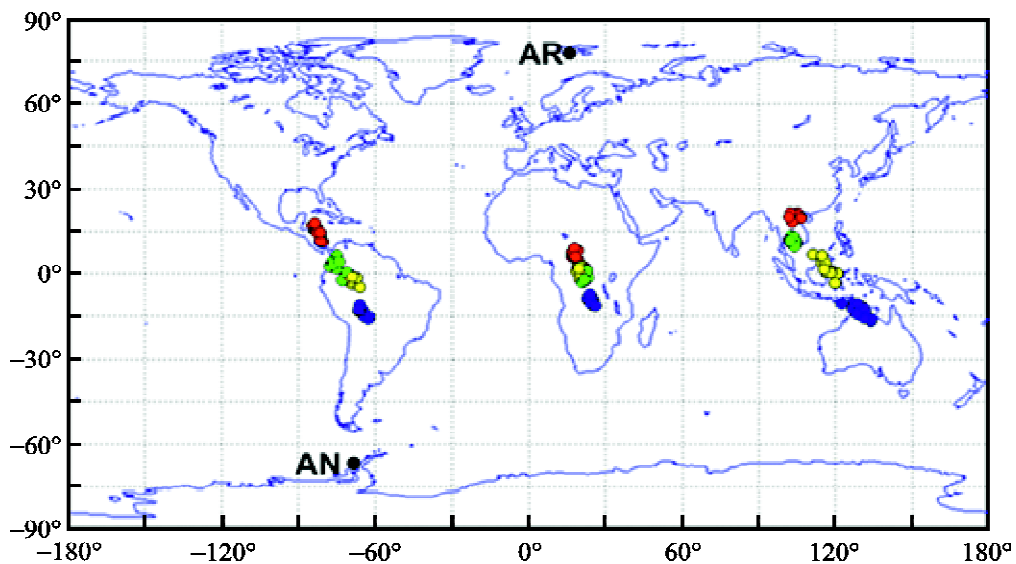


Рис. 2. Зображення світових грозових центрів у вигляді ефективних точкових джерел: сині точки – у період грудень–лютий, зелені – у період березень–травень, червоні – у період червень–серпень, жовті – у період вересень–листопад. Рисунок взято з роботи [11]

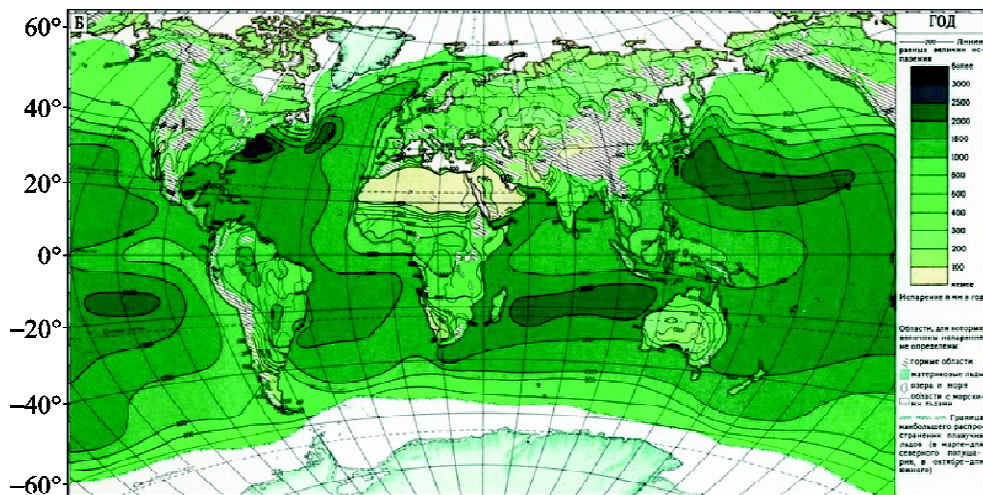


Рис. 3. Глобальна карта випаровування з поверхні. Рисунок взято з веб-сайту StudFiles <[https://studfile.net/html/2706/263/html\\_uWT\\_06hfaU.5Yne/img-p34SQm.jpg](https://studfile.net/html/2706/263/html_uWT_06hfaU.5Yne/img-p34SQm.jpg)>

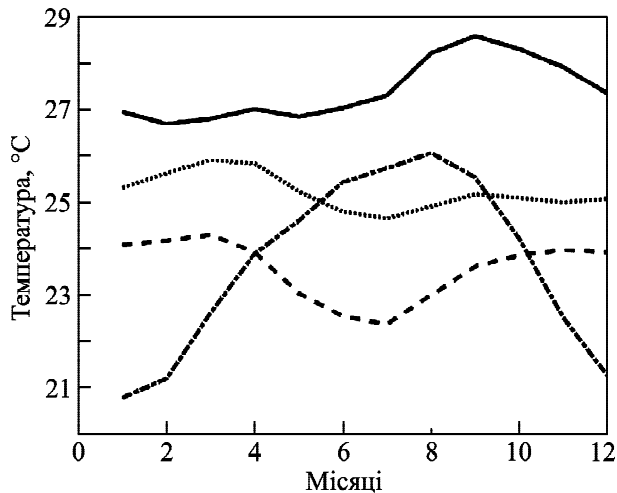


Рис. 4. Середній річний хід температури повітря для різних осередків Південно-Американського континенту: суцільна крива – для території, обмеженої 10° пд. ш. й екватором, а також 50° і 70° з. д.; штрихована крива – між 20° пд. ш. та 10° пн. ш., а також 80° та 60° з. д.; пунктирна крива – між 20° пд. ш., 20° пн. ш., 90° та 60° з. д.; штрих-пунктирна крива – між 20° пд. ш., 40° пн. ш., 100° і 50° з. д.

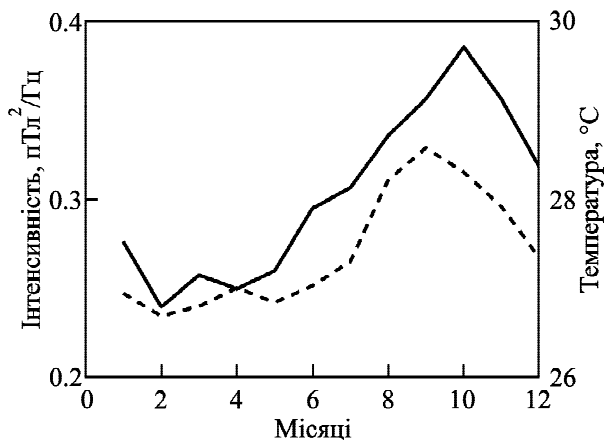


Рис. 5. Середній річний хід температури повітря (штрихована крива) та потужності ННЧ сигналу (суцільна крива)

зв'язок між потужністю ННЧ сигналу та температурою повітря, однак фізичне пояснення полягає в наступному. Підвищення температури повітря біля поверхні планети повинне призводити до збільшення атмосферної конвекції, інтенсифікації утворення хмар, у тому числі грозових, зростання числа блискавок на планеті і, як наслідок, до посилення інтенсивності електромагнітних коливань в глобальному резонаторі Земля–іоносфера. Очевидно, що грозова активність та інтенсивність резонансних коливань мають зростати з температурою поверхні. Завдяки тому, що

слабкі (кілька десятих градуса) зміни температури підстильної поверхні здатні викликати помітні варіації кількості блискавкових розрядів, глобальний нагрів або охолодження можна виявити за допомогою шуманівського резонансу, що робить ШР своєрідним планетарним термометром.

#### 4. Висновки

У статті за великим масивом багаторічних даних метеорологічних спостережень проаналізовано річний хід температури повітря над різними регіонами Південної Америки. Розглянуто фізико-географічні та кліматичні особливості Амазонської низовини, що впливають на грозову активність в цьому регіоні.

Обрано оптимальну конфігурацію території, яка описує еквівалентний американський грозовий центр.

Показано наявність сильного кореляційного зв'язку між сезонною поведінкою температури повітря в Південній Америці (на Амазонській низовині) та потужністю ННЧ випромінювання, що приймається на антарктичній станції “Академік Вернадський” в періоди кульмінації американського центру ГГА. Цей результат є ще одним підтвердженням справедливості гіпотези про те, що ШР може відігравати роль “глобального термометра”, а модель локалізованого еквівалентного джерела ГГА адекватно характеризує континентальні кліматичні зміни.

Автори вважають своїм приємним обов'язком подякувати Національному антарктичному науковому центру МОН України за підтримку багаторічних спостережень на Українській антарктичній станції “Академік Вернадський”. Ми вдячні також О. В. Буданову та Б. Ю. Гаврилюку, які забезпечили безперебійне функціонування вимірювального ННЧ комплексу протягом 14 зимівель в Антарктиді.

Роботу виконано в рамках основної відомчої НДР “Ятаган-3” (№ 0116U000035) за часткової фінансової підтримки досліджень в рамках НДР “Теліомакс-2019” (№ 0119U103575) та НДР “Шпіцберген-2019” (№ 0119U101802).

#### 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 16<sup>th</sup> 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. 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 одновременным наблюдениям в Антарктике. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2017. Т. 22, № 3. С. 201–211. DOI: 10.15407/rpra22.03.201
9. *Электромагнитные проявления геофизических эффектов в Антарктиде*. Под ред. Л. Н. Литвиненко, Ю. М. Ямпольского. Харьков: РИ НАН Украины, НАНЦ МОН Украины, 2005. 342 с.
10. Пазнухов А. В., Ямпольский Ю. М., Колосков А. В., Холл К., Пазнухов В. Е., Буданов О. В. Связь температуры воздуха с грозовой активностью в Африке по данным СНЧ измерений в Антарктике, Арктике и Украине. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2019. Т. 24, № 3. С. 195–205. DOI: 10.15407/rpra24.3.195
11. Koloskov A. V., Nickolaenko A. P., Yampolsky Yu. M., Hall Chris, and Budanov O. V. Variations of global thunderstorm activity derived from the long-term Schumann resonance monitoring in the Antarctic and in the Arctic. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2020. Vol. 201, Is. 5. id. 105231. DOI: 10.1016/j.jastp.2020.105231
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 16<sup>th</sup> 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. LYTVYNNENKO, L. N. and YAMPOLSKI, Y. M., eds., 2005. *Electromagnetic manifestations of geophysical effects in Antarctica*. Kharkiv, Ukraine: IRA NASU, NASCU MESU. (in Russian).
10. PAZNUKHOV, A. V., YAMPOLSKI, Y. M., KOLOSKOV, A. V., HALL, C., PAZNUKHOV, V. E. and BUDANOV, O. V., 2019. Correlation between Air Temperature and Thunderstorm Activity in Africa according to the ELF Measurements in Antarctica, Arctica and Ukraine. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 24, no. 3, pp. 195–205. (in Russian). DOI: 10.15407/rpra24.3.195
11. KOLOSKOV, A. V., NICKOLAENKO, A. P., YAMPOLSKI, YU. M., HALL, C. and BUDANOV, O. V., 2020. Variations of global thunderstorm activity derived from the long-term Schumann resonance monitoring in the Antarctic and in the Arctic. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* vol. 201, is. 5, id. 105231. DOI: 10.1016/j.jastp.2020.105231

## 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.

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

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

<sup>2</sup> State Institution National Antarctic Scientific Center,  
Ministry of Education and Science of Ukraine,  
16, Taras Shevchenko Blvd., Kyiv, 01601, Ukraine

## CORRELATION BETWEEN AIR TEMPERATURE AND THUNDERSTORM ACTIVITY IN SOUTH AMERICA ACCORDING TO THE ELF MEASUREMENTS IN ANTARCTICA

*Purpose:* Analysis of the air temperature annual variations over different South American regions by long series of long-term meteorological observations, consideration of the physico-geographical and climatic features of the Amazonian lowlands, which

affect thunderstorm activity in this region, search for the connection between seasonal variations in the Earth-ionosphere global resonator characteristics and air temperature in America, comparison of the results obtained in Antarctica with the surface temperature of American continent, checking the point source model validity for explaining the positions of the thunderstorm activity largest areas.

*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 range at the Ukrainian Antarctic Akademik Vernadsky Station, the seasonal changes in the Schumann resonance first mode level determined by the activity of the American thunderstorm center were retrieved. The average air temperature in the Amazonian lowlands was estimated for the same period according to the global network of meteorological stations

*Findings:* The presence of a strong relationship between the surface air temperature of the equatorial and sub-equatorial regions of South America and the intensity of the Schumann reso-

nance signal generated by the American thunderstorm center is shown. The hypothesis is confirmed that the Schumann resonator can play the role of a “global thermometer” and the model of an effective point source adequately describes the continental temperature changes.

*Conclusions:* The developed technique is applicable for different points of Schumann resonance monitoring for studying all continental thunderstorm centers. This approach will be useful for developing the concept of using the Schumann resonator as a “global thermometer”. Using the data of simultaneous observations in several monitoring points can be considered promising for estimating short-term (days – several days) variations in global temperature.

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

*Стаття надійшла до редакції 11.05.2020*