



КОЛОСКОВ
Олександр Валерійович — доктор фізико-математичних наук, завідувач науково-дослідної лабораторії електромагнітного оточення Землі Радіоастрономічного інституту НАН України

СВІТОВА ГРОЗОВА АКТИВНІСТЬ — ПОГЛЯД З АНТАРКТИДИ, АРКТИКИ Й УКРАЇНИ

Стенограма доповіді на засіданні Президії НАН України 23 червня 2021 року

У доповіді відзначено унікальність багаторічних наднизькочастотних електромагнітних спостережень з моніторингу світової грозової активності, які проводять в Антарктиді та Арктиці вчені Радіоастрономічного інституту НАН України. Наведено найважливіші результати щодо фізичного моделювання світової грозової активності, виявлення нових закономірностей у поведінці іоносфери, відстежування штучного електромагнітного випромінювання енергомереж промислово розвинених регіонів Північної півкулі.

Вельмишановний Анатолію Глібовичу!
Шановні члени Президії та присутні!

Дозвольте мені представити вашій увазі наукову доповідь «Світова грозова активність — погляд з Антарктиди, Арктики й України».

Блискавки — це грізне і водночас заворожливо прекрасне явище природи. З давніх-давен їх вважають символом надлюдської сили та величі. Недаремно головним у пантеоні богів-олімпійців є повелитель блискавок Зевс. Чому ж, незважаючи на таку давню історію спостережень за блискавками, інтерес людства до грозової активності не лише не вщухає, а й, навпаки, набуває ще більшої актуальності? На це питання є кілька відповідей.

По-перше, глобальна грозова активність є основним природним джерелом електромагнітного оточення Землі. Нагадаємо, що напруженість так званого поля «ясної погоди» становить біля поверхні Землі приблизно 100 В/м, а спектр випромінювання блискавки простягається від нульової до гамма-частот. Однак основна енергія блискавки сконцентрована в низькочастотній смузі так званого шуманівського резонансу з максимумами на частотах 8; 14; 20 Гц. Той факт, що альфа-, бета- і тета-ритми мозку людини відповідають цьому діапазону частот, швидше за все не є випадковістю, адже очевидно, що життя на Землі формува-

лося, зокрема, і під дією грозової активності, але розуміння механізмів такого впливу ще й досі перебуває на початковій стадії.

По-друге, грозова активність — це невід’ємна складова погоди і планетарного клімату. Формування грозових хмар безпосередньо пов’язане з процесом випаровування вологи, який, у свою чергу, залежить від нагрівання земної поверхні. Отже, світова грозова активність дозволяє контролювати глобальні кліматичні зміни.

По-третє, блискавки становлять руйнівну загрозу. Вони виводять з ладу системи енергетики, зв’язку, керування аерорухом, комп’ютерні мережі тощо. Щороку від блискавок гине близько 25 тис. людей. Блискавки відповідальні за 7% пожеж та 65% випадків виходу з ладу електричних та електронних пристроїв. Тільки в США втрати економіки, спричинені блискавками, перевищують 1 млрд доларів на рік.

Основними джерелами глобальної грозової активності є три тропічні центри, розташовані в Південно-Східній Азії, Африці та Америці (рис. 1). Згідно з даними наземних та супутникових спостережень, приблизно 85% усіх розрядів блискавок відбувається в цих районах.

На жаль, традиційний моніторинг з поверхні Землі у видимому діапазоні спектра не дає змоги відстежити більшість блискавок. Застосування космічних технологій також кардинально не поліпшує ситуацію через обмеженість поля зору супутника, високу швидкість його руху та наявність хмарного покриву. Однак сучасні радіофізичні методи дистанційної діагностики дозволяють реєструвати випромінювання більшості блискавок у радіодіапазоні та відстежувати їх на великій відстані.

Особливо ефективно можна вимірювати сигнали від блискавок у наднизькочастотному (ННЧ) діапазоні (3–300 Гц). Це пов’язано з тим, що, по-перше, цей діапазон відповідає максимальній інтенсивності випромінювання блискавок, а по-друге, ННЧ-хвилі, які випромінює грозовий розряд, мають дуже низьке загасання (близько 1 дБ на 1000 км), а отже, здатні багато разів огинати земну кулю. Тому в порожнині між поверхнею Землі і нижньою

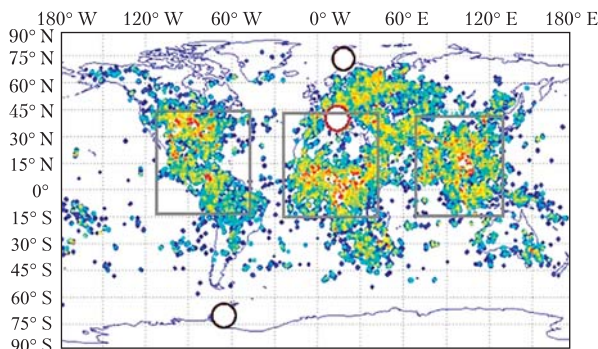


Рис. 1. Три центри глобальної грозової активності та ННЧ-обсерваторії Радіоастрономічного інституту НАН України

границею іоносфери постійно існує глобальний електромагнітний резонанс, який називають шуманівським на честь його першовідкривача — німецького фізика Вінфріда Шумана.

Шуманівський резонанс акумулює сигнали від усіх світових блискавок, і якщо спостерігати його навіть з одного пункту, можна контролювати грозову активність на всій планеті.

Теоретичні передбачення В. Шумана, які він зробив у 1952 р., в 1960 р. експериментально підтвердили американські вчені М. Балсер і Ч. Вагнер. У той самий період в Україні дослідження шуманівських резонансів в Інституті радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України розпочав професор П.В. Блюх. У 90-х роках минулого століття науковий інтерес до грозової активності і шуманівських резонансів істотно зріс завдяки ідеї професора Массачусетського технологічного інституту Е. Вільямса, який запропонував використовувати цей резонатор як планетарний термометр (рис. 2).

Найкращі місця для спостережень глобальних ННЧ-резонансів — це полярні райони: Антарктида та Арктика. Вони оптимально розташовані відносно світових грозових центрів. Тут немає локальних блискавичних розрядів та джерел техногенного випромінювання, які стають основними завадами в цьому частотному діапазоні.

Саме тому в 2002 р. за підтримки Національного антарктичного наукового центру

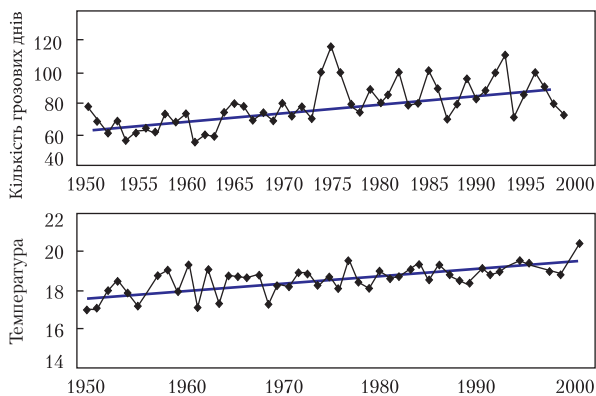


Рис. 2. Довгострокові зміни кількості грозових днів і температури в Сан-Паулу, Бразилія (адаптовано з Williams E.R. Franklin Lecture: Lightning and Climate. 2012. MTI, AGU Fall Meeting)

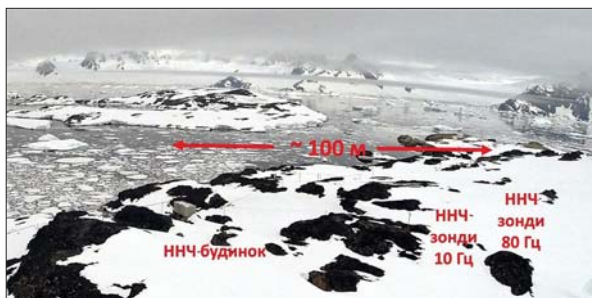


Рис. 3. Пункт ННЧ-реєстрації в Антарктиці на українській станції «Академік Вернадський»

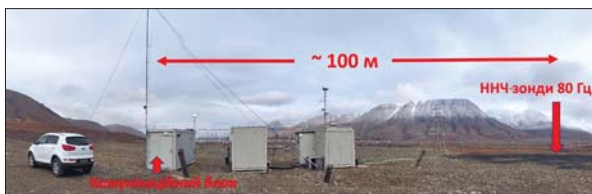


Рис. 4. Пункт ННЧ-реєстрації в Арктиці — о. Свальбард, архіпелаг Шпіцберген, Норвегія

МОН України ми започаткували моніторинг ННЧ-сигналів в Антарктиді на українській антарктичній станції «Академік Вернадський» (рис. 3). З 2013 р. аналогічні спостереження здійснюються в Арктиці на архіпелазі Шпіцберген (рис. 4). В Україні вимірювання проводяться в осінньо-зимовий період, коли немає локальної грозової активності.

Спостереження ННЧ-сигналів здійснюються за допомогою оригінальних надчутливих магнітометричних комплексів, які виробляє Львівський центр Інституту космічних досліджень НАН України та ДКА України. Ідентичність цих приладів, їх великий динамічний діапазон та GPS-синхронізація з абсолютним часом дозволяють проводити когерентну обробку даних з усіх трьох пунктів.

Основні завдання наших досліджень можна сформулювати так:

- 1) вивчення впливу 11-річної циклічності Сонця на світову грозову активність і нижню іоносферу;
- 2) відтворення добової та сезонної закономірностей поведінки трьох планетарних центрів грозової активності;
- 3) оцінка континентальних температурних трендів за даними спостережень шуманівських резонансів;
- 4) підрахунок та картографування надпотужних грозових розрядів;
- 5) моніторинг закиду техногенного ННЧ-випромінювання (так званого електромагнітного смогу) з промислових регіонів.

Масив даних, накопичений за практично 20 років безперервних спостережень в Антарктиді, є на сьогодні унікальним у світі. Ми маємо значну кількість посилань на ці результати і працюємо у широкій кооперації з науковцями із США, Норвегії, Японії, Угорщини, Індії, Польщі та Ізраїлю.

Коротко розповім про найцікавіші оригінальні результати.

Розглянемо 11-річний сонячний цикл і його вплив на глобальну грозову активність та нижню іоносферу за даними 20-річних безперервних спостережень в Антарктиці. Передусім сонячний цикл характеризується значною змінюваністю іонізуючого рентгенівського та ультрафіолетового випромінювання, що приводить до модуляції електронної щільності в іоносфері і, як наслідок, змінює властивості шуманівського резонансу — пікові частоти й інтенсивності резонансних мод. Подібність залежностей сонячного випромінювання і параметрів резонансів (рис. 5) не викликає сумні-

вів і дає змогу оцінювати інтенсивність сонячної іонізуючої радіації. Образно кажучи, шуманівський резонатор відіграє роль гігантського природного спектрометра.

Безперервний, багаторічний, якісний моніторинг шуманівського резонансу дозволив відповісти ще на одне принципове питання: чи залежить грозова активність, як кліматичний індикатор, від сонячного циклу?

Спостереження ННЧ-шумів у мінімумах резонансних полів, рівень яких формується виключно за рахунок блискавичних розрядів, свідчать, що такої залежності немає. Отже, можна стверджувати, що грозова активність *напрямую не залежить* від сонячної, а погода і клімат напряму не контролюються сонячним циклом.

Водночас ми бачимо (рис. 6), що параметри резонансних полів мають чітко виражену річну періодичність. Як це може бути, якщо глобальна грозова активність не залежить від сонячного іонізуючого випромінювання? Виявляється, що річні варіації пов'язані з нахилом осі обертання Землі до площини екліптики, що приводить до сезонних дрейфів світових грозових центрів між тропіками. Бореальною зимою грози відбуваються здебільшого в південній півкулі, а влітку вони зміщуються на північ. Переважна більшість блискавок трапляється над сушею, а її площа у північній півкулі більша. Тому кількість та сукупна інтенсивність гроз влітку збільшується.

Зазначимо, що наші оцінки сезонних змін інтенсивності світових гроз, отримані з антарктичних шуманівських записів, становлять 44% і дуже добре збігаються з варіаціями числа блискавок, оцінених за даними супутникових спостережень, – 44,3%.

Усереднений сезонний хід активностей грозових центрів можна порівняти з варіаціями приповерхневих температур континентальних областей, над якими дрейфують грози. Для розрахунку температур ми за спеціальною методикою обробили дані мережі Всесвітньої метеорологічної організації, що налічує понад 10 тис. метеостанцій. Оцінки проводилися для Африки та Південної Америки, для яких грози переміщуються над суходолом. Ми вперше на

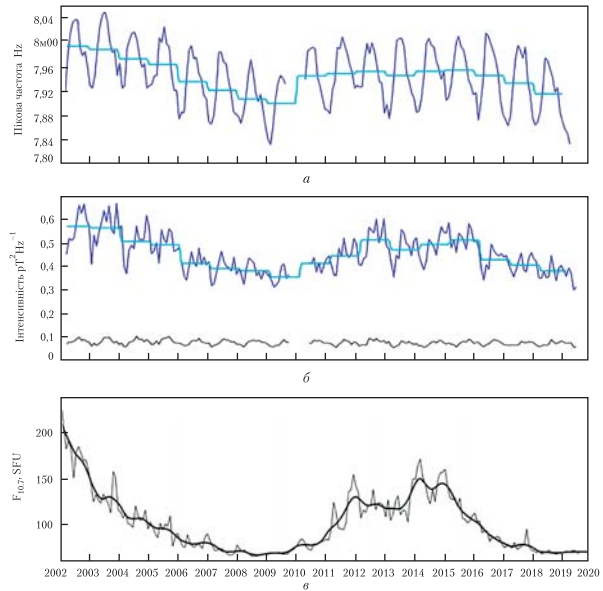


Рис. 5. Подібність зміни властивостей шуманівського резонансу в часі: пікові частоти (а) й інтенсивності резонансних мод (нижня крива — інтенсивність у мінімумах резонансних полів) (б); та 11-річного циклу сонячної активності (індекс $F_{10.7}$) (в)

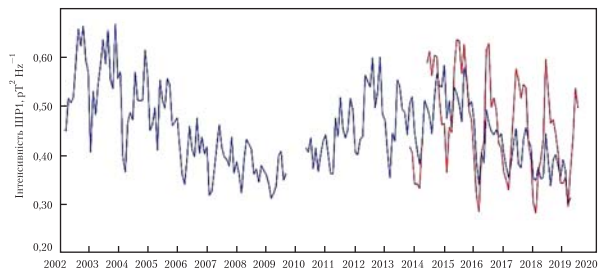


Рис. 6. Річна періодичність інтенсивності резонансних полів: синя лінія — дані в Антарктиці; червона — в Арктиці

великому масиві даних систематичних спостережень отримали високий рівень кореляційного зв'язку річних залежностей температури і грозової активності (рис. 7).

Отже, можна вважати, що гіпотезу про глобальний «шуманівський термометр», яку було запропоновано наприкінці минулого століття, реально підтверджено. Таку методику можна застосовувати і для встановлення планетарних температурних трендів.

Частіше ніж раз на хвилину на висотах у кілька десятків кілометрів виникають надпотужні

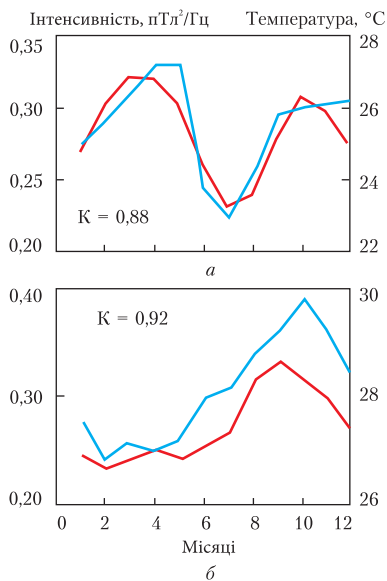


Рис. 7. Зіставлення глобальної грозової активності (синя лінія) та континентальних температур (червона лінія): *a* – для Африки; *б* – для Південної Америки



Рис. 8. Схема двопозиційної локації надпотужних блискавок

блискавки — так звані спрайти, джети та ельфи. Ці унікальні явища вперше було зафіксовано з борту космічних апаратів, а згодом вдалося побачити і з поверхні Землі. Проте координати і час їх виникнення непередбачувані, а тому організувати їх глобальний моніторинг в оптичному діапазоні не можливо. Втім, оскільки інтенсивність поодинокі екстраблискавки перевищує сукупну енергію всіх інших розрядів, що відбуваються в цю мить на планеті, їх можна виокремити в ННЧ-записах. Це так звані сплески добротності — Q-bursts, і кожен з них сам по собі збуджує шуманівський резонанс.

Унікальність нашого антарктичного пункту полягає в тому, що завдяки майже повній відсутності завад тут можна відстежити практично всі надпотужні блискавки на Землі. Від початку спостережень в Антарктиді наша база даних налічує 65 млн таких подій. Аналіз добових і сезонних розподілів свідчить, що кількість розрядів змінюється синхронно з варіаціями інтегральної грозової активності. Належність більшості надпотужних розрядів до світових грозових центрів вдалося підтвердити їх двопозиційною геолокацією.

Для картографування надпотужних блискавок ми розробили оригінальну методику двопозиційної синхронної геолокації з Антарктиди та Арктики (рис. 8). Спочатку в кожному пункті за даними поляризаційно-спектральної обробки визначають пеленги на джерело випромінювання. На сфері виникають дві точки перетину пеленгів, які відповідають істинному та уявному джерелам. Координати істинного місцезнаходження встановлюють за різницею часових затримок екстрасплесків. Таким чином вдається відобразити просторово-часовий розподіл надпотужних блискавок на планеті. При цьому дані нашого «моментального» картографування добре збігаються з осередненими за великий час даними супутникових оптичних спостережень.

Незважаючи на відсутність промисловості в Антарктиді, електромагнітне оточення там, на жаль, усе ж забруднене випромінюванням з техногенно розвинених регіонів планети. Завдяки природним хвилеводам «паразитні» емісії енергосистем північної півкулі поширюються на глобальні відстані. Зокрема, в ННЧ-діапазоні це випромінювання електромереж Північноамериканського континенту на частоті 60 Гц. Інтенсивність емісії пропорційна виdobутку електроенергії в Америці як на тижневому інтервалі (так званий вікенд-ефект), так і на довгостроковому часовому масштабі. Безперервний моніторинг такого «електромагнітного смогу» в Антарктиді дозволяє не тільки дистанційно контролювати річні коливання виробництва електроенергії, а й відстежувати динаміку великих аварій американської енер-

гетичної системи. Довгострокова поведінка інтенсивності емісії на частоті 60 Гц відбувається синхронно з 11-річним сонячним циклом. Це відкриває перспективи для використання «електромагнітного смогу» для діагностики властивостей хвилеводного каналу Земля–іоносфера.

Отже, найвагомішими, на наш погляд, науковими результатами з цього напрямку є такі:

1) в Антарктиді і Арктиці запроваджено моніторинг світової грозової активності і створено унікальну базу даних;

2) встановлено і пояснено добові, сезонні та міжрічні зміни грозової активності й нижньої іоносфери;

3) надійно продемонстровано, що грозова активність не залежить від сонячного циклу;

4) підтверджено властивість шуманівського резонатора як «глобального термометра»;

5) створено двопозиційну систему картографування надпотужних блискавок;

6) продемонстровано можливість дистанційного контролю з Антарктики видобутку та споживання електромагнітної енергії у промислово розвинених регіонах планети.

Важливо що ННЧ-моніторинг «електромагнітного клімату» Землі включено до Державної цільової науково-технічної програми проведення досліджень в Антарктиці на 2011–2023 рр.

На завершення додам, що ННЧ-дані з Арктики та України в реальному часі вже доступні, зокрема й у візуалізованому вигляді, на веб-сервері Радіоастрономічного інституту. А що стосується даних з Антарктиди, то зараз триває тестування бета-версії їх інтернет-трансляції. Надалі ми сподіваємося реалізувати національний інтернет-сервіс з оперативної візуалізації параметрів світових гроз.

Дякую за увагу!

За матеріалами засідання підготувала О.О. Мележик

Oleksandr V. Koloskov

Institute of Radio Astronomy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8921-3851>

WORLD STORM ACTIVITY: A VIEW FROM ANTARCTICA, THE ARCTIC AND UKRAINE

Transcript of report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, June 23, 2021

The report notes the uniqueness of long-term ultra-low-frequency electromagnetic observations for monitoring global thunderstorm activity conducted in Antarctica and the Arctic by scientists from the Institute of Radio Astronomy of the NAS of Ukraine. The most important results concerning physical modeling of world thunderstorm activity, revealing of new patterns in the behavior of the ionosphere, tracking of artificial electromagnetic radiation of power networks of industrialized regions of the Northern Hemisphere are given.

Keywords: global storm activity, Schumann resonator, global thermometer, high-power lightning.