

ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ І ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ

WAVE PROPAGATION AND REMOTE SENSING

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra30.01.003>
УДК 550.388.2+551.610.51

А.В. Соїна, Ю.М. Ямпольський

Радіоастрономічний інститут НАН України
вул. Мистецтв, 4, м. Харків, 61002, Україна
E-mail: aditu@rian.kharkov.ua

ПЛАНЕТАРНИЙ ВІДГУК АЕРОЗОЛІВ НА ВИВЕРЖЕННЯ ВУЛКАНА ТОНГА

Предмет і мета роботи. Метою роботи є аналіз змін концентрації атмосферних аерозолів не лише у близьких до виверження регіонах, до яких відноситься здебільшого Австралія, але й у полярних районах Землі.

Методи та методологія. Для дослідження динаміки концентрації аерозолів, зумовленої виверженням вулкана Тонга, використано дані всесвітньої мережі моніторингу аерозолів AERONET, діяльність якої ґрунтується на роботі автоматичних уніфікованих сонячних фотометрів Cimel CE318 (Франція). Проаналізовано трирічні масиви даних вимірювань аерозольної оптичної товщи (AOT) у спектральному каналі — 440 нм (в одному випадку — 443 нм), (надалі AOT440 або AOT443) у 2021—2023 рр. Використовувались дані моніторингу аерозолів двох полярних регіонів, тропіків та Австралії.

Результати. Викиди, що утворились від виверження вулкана, досягли східного берега Австралії 17 січня 2022 року, а ще через два дні дісталися західного берега. Було побудовано залежності зміни AOT від часу для двох станцій AERONET, що знаходяться на шляху викидів. Також було розраховано середню швидкість перенесення повітряних мас. Окрім цього в роботі показано зміну рівня концентрації аерозолів в атмосфері полярних і тропічного регіонів, що стала наслідком виверження вулкана Тонга. Додатково розраховано швидкості перенесення викидів у тропіках, навколо земної кулі.

Висновки. Визначено, що лише за дві доби викиди від вулкана Тонга дісталися східного берега Австралії, тоді значення AOT440 з 0.15 зросло до 2. Ще дві доби викиди вулкана рухались з повітряними масами до західного узбережжя материка — тут значення AOT443 збільшилось з 0.15 до 1. Далі до пункту AERONET Maïdo OPAR аерозолі прямували ще добу, а значення AOT440 збільшилось з 0.05 до 0.5. Дослідження зміни рівня аерозолів у повітрі полярних регіонів виконувались за допомогою аналізу даних деяких станцій моніторингу за 2021—2023 рр. Було виявлено, що в Антарктиці значення AOT440 збільшилося у 2023 р. в середньому у 2–3 рази, тоді як в Арктиці збільшення приблизно в півтора-два рази також спостерігається у 2023 р. Визначено, що зональне перенесення аерозолів відбувалося дуже швидко, в той час як меридіональне перенесення відбувалося повільно й досягло свого піку в полярних регіонах приблизно через рік.

Ключові слова: аерозолі, вулкан Тонга, AOT, Антарктика, Арктика, Австралія, AERONET.

Вступ

15 січня 2022 р. о 04:14:45 UTC почалося виверження вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай (надалі — вулкан Тонга), що знаходиться на острові (те-

риторія країни Тонга) у південній частині Тихого океану (координати: 20,545° пд. ш., 175,392° з. д.). Ця вулканічна подія стала найбільшою на Землі за останні 30 років. Під час виверження вулкан Тонга викинув велику масу попелу на стратосфер-

Цитування: Соїна А.В., Ямпольський Ю.М. Планетарний відгук аерозолів на виверження вулкана Тонга. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2025. Т. 30. № 1. С. 3—10. <https://doi.org/10.15407/rpra30.01.003>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2025



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>)

ISSN 1027-9636. *Радіофізика і радіоастрономія*. Т. 30, № 1, 2025

ні висоти вище 30 км. Така катастрофічна подія мала планетарний характер, спричинивши різноманітні геофізичні відгуки в різних регіонах земної кулі. Як приклад, хмару попелу було зафіксовано 18 січня 2022 р. також над Австралією [1] за 7000 км від місця виверження [2]. Викиди гігантської маси попелу, водяної пари, різноманітних газів і твердих часток різного розміру суттєво вплинули на стан атмосферних аерозолів. Вулканічні аерозолі з повітряними потоками розповсюдились по всій Землі. У продуктах вибуху містилися фрагменти з радіусом від метрів до мікрометрів. Масивні фрагменти (масою понад 1 г) випали на поверхню планети. Дрібнодисперсні частинки конвективним потоком піднялися вгору на висоти до 58 км. При загальній масі викиду 2.9 Гт маса дрібних частинок складала близько 1 Гт. У подальшому ці аерозолі брали участь у трьох процесах. По-перше, у повільному осіданні на поверхню Землі. По-друге, у турбулентному перемішуванні з навколишнім повітрям. По-третє, у перенесенні переважними вітрами навколо планети [3].

Також вони спричинили дуже яскраві оптичні ефекти під час заходів і сходів Сонця. Глобальна наукова спільнота швидко відреагувала на подію. Зокрема, у роботі [4] автори досліджували регіональне перенесення та потенційний вплив атмосферних аерозолів, які було викинуто вулканом Тонга, на основі супутникових даних і наземних спостережень. Результати обробки супутникових даних показали, що середня аерозольна оптична товща (далі — АОТ), виміряна на довжині хвилі 550 нм, зросла до 0.25...0.34 (приблизно у два рази від середнього значення). Наземні спостереження також продемонстрували підвищення АОТ до 0.25...0.43, а максимальне середньодобове значення 0.46...0.71 було зафіксовано 17 січня 2022 р. У вулканічних аерозолях значною мірою переважали дрібнодисперсні частинки, які мали сильну світлорозсіювальну та гігроскопічну здатність. Вулканічний попіл залишався в стратосфері стабільним і здійснив одне коло навколо Землі за 15 днів. Дослідники зробили висновки, що це суттєво вплинуло на енергетичний баланс, водяну пару та концентрацію озону в стратосфері й потребує подальшого детального вивчення.

Також у статті [5] автори досліджували стовпчасті оптичні мікрофізичні та радіаційні власти-

вості шлейфу попелу, що утворився в результаті виверження вулкана Тонга. У роботі було використано синергічні спостереження супутникових і наземних сонячних фотометрів у поєднанні з прямою траєкторією моделювання та аналізом стратосферної дисперсії.

В іншому дослідженні [6] автори використовували супутникові та наземні спостереження, а також дані, отримані за допомогою моделювання. У цій роботі наведено результати дослідження щодо вивчення змін у хімічному складі стратосфери через рік після виверження вулкана та аналіз головних фізичних і хімічних процесів, які впливали на вміст стратосферного озону (O_3). Визначено, що діоксид сірки SO_2 , який було викинуто, переносився з тропіків до Антарктики внаслідок циркуляції Брюера–Добсона ще рік після виверження. У середніх і низьких широтах посилений сульфатний аерозоль збільшив концентрацію O_3 у середній стратосфері, але рівень озону знизився в нижній стратосфері. Зауважимо, що сульфатні аерозолі сприяли також зниженню концентрації стратосферного озону в південному полярному регіоні внаслідок посилення аномалій підйому в Антарктиці [6].

У роботі [7] було проаналізовано рух аерозолів, що утворилися після вибуху вулкана Тонга, та їхній дисперсний склад. Дослідники використовували дані супутників (TROPOMI, IASI, AYL, CALIOP) і наземної мережі моніторингу аерозолів AERONET. Було виявлено, що швидкість зростання концентрації сульфатних аерозолів в атмосфері більша, ніж було під час виверження вулкана Пінатубо, а дрібнодисперсні аерозолі (розміром близько 0.3...0.5 мкм) фіксувалися на 20 станціях AERONET, розташованих у південній півкулі до травня 2023 р. Оцінки швидкості меридіонального та зонального перенесення аерозолів від виверження вулкана Тонга наведено у роботі [8]. Визначено, що найбільша концентрація аерозолів спостерігалася наприкінці січня 2022 р., але зважені часточки було виявлено також і у вересні 2023 р. Згідно з аналізом супутникових даних ERA-5, перші три місяця спостерігалася зональне поширення аерозолів на захід зі швидкістю близько 25 м/с, а також меридіональне — зі швидкістю менше 0.5 м/с у північному напрямку.

Наші дослідження спрямовано на пошук змін концентрації атмосферних аерозолів не лише в

близьких до виверження регіонах (Австралії та південного тропічного поясу), а й у високих широтах Землі — в Антарктиці та Арктиці. Поширення аерозолів вулканічного походження в планетарному масштабі дозволяє простежити глобальні циркуляційні процеси в атмосфері, оцінити зональні та меридіональні дрейфи в стратосфері.

1. Дані та методи досліджень

Для визначення змін у концентрації аерозолів у полярних регіонах і тропіках проводилась обробка даних глобальної мережі моніторингу аерозолів AERONET [9–13], роботу якої засновано на використанні уніфікованих автоматичних, мультиспектральних сонячних фотометрів типу Cimel CE318, що виробляються у Франції. Їх призначено для вимірювання прямої та розсіяної сонячної радіації в діапазоні довжин хвиль у межах від 340 до 1640 нм. На сьогодні мережа AERONET нараховує більше 1100 зареєстрованих пунктів спостережень, з них більше 500 станцій, які діють постійно [9, 10].

У роботі використовувались трирічні масиви даних (з 2021 по 2023 рр.) АОТ, що вимірювалась у спектральному каналі 440 нм або 443 нм (далі АОТ440 або АОТ443). Цей спектральний діапазон було обрано тому, що АОТ440 є стандартом у багатьох наукових роботах завдяки своїй практичності, універсальності та значенню для кліматичних досліджень. Довжина хвилі 440 нм знаходиться у видимому спектрі. Вона є особливо чутливою до дрібних аерозольних частинок, до того ж аерозолі на цій довжині хвилі мають значний вплив на розсіяння та поглинання сонячної радіації, а сучасні спектро радіометри й фотометри мають хорошу чутливість саме в діапазоні видимого світла, зокрема на 440 нм, що робить це значення оптимальним для вимірювань і подальшого аналізу [14, 15]. База даних AERONET надає дані трьох рівнів: перший рівень (Level 1.0) містить дані всіх проведених вимірювань; другий (Level 1.5) — дані, які пройшли процедуру автоматичної фільтрації впливу хмарності; третій (Level 2.0) — дані після фільтрації впливу хмарності та корекції результатів з урахуванням калібрування фотометра [10]. Нами було використано дані рівня 1.5. Обрані пункти моніторингу наведено в таблиці разом із координатами. Для візуалізації результатів було усереднено дані по

кожному з трьох років по кожній станції та побудовано залежності АОТ від часу. Статистична обробка виконувалась із застосуванням програми Grapher 8 (<http://www.goldensoftware.com/products/grapher>). Слід зазначити, що станції AERONET, розташовані в Антарктиці й Арктиці, внаслідок особливостей умов освітлення та специфіки роботи сонячного фотометра ефективно працюють фрагментарно, тільки 2–3 місяці на рік. Це враховувалось у роботі.

2. Результати обробки даних

2.1. Зміни рівня аерозолів в Австралії

Першою впливу виверження вулкана Тонга зазнала Австралія. Враховуючи те, що викид відбувся на висоті стратосфери — близько 30 км, шлейф, який утворився внаслідок виверження, було підхоплено струменевими течіями та транспортовано в бік материка (рис. 1), що можна простежити по інтерактивній мапі [11].

Для первинного аналізу було обрано дві станції моніторингу, які опинились на шляху руху повітряних мас з аерозолями вулканічного походження, а саме: Lucinda, (східне узбережжя Австралії), яка має координати: 18.520° пд. ш., 146.386° сх. д., і станція Learmonth (західний берег материка) з координатами: 22.241° пд. ш., 14.897° сх. д. Відстань між вулканом Тонга та східною станцією дорівнює 3212 км, а між двома станціями — 3498 км.

До східного берега шлейф, що утворився від виверження Тонга, дістався 17 січня 2022 р. (рис. 2, суцільна крива). Показник АОТ443 збільшився з 0.15 майже до 2. А вже до західного берега Австралії (станція Learmonth, 6710 км від вулкана Тонга) разом із повітряними масами аерозолі потрапили 19 січня 2022 р. (рис. 2, пунктирна лінія). Показник АОТ440 збільшився з 0.15 до 1. Слід зауважити, що в першому випадку «стрибок» значень у даних був практично моментальним, тоді як у другому — рівень аерозолів збільшувався поступово з другої половини 18 січня 2022 р. На графіках добре видно різницю підвищення рівня АОТ на двох станціях як за часом, так і кількісно. Це можна пояснити тим, що частину аерозолів було вимито з атмосфери опадами, вони розсіялися завдяки повітряним потокам і дифузії, найбільш важкі часточки осіли на поверхню Землі під дією гравітації.

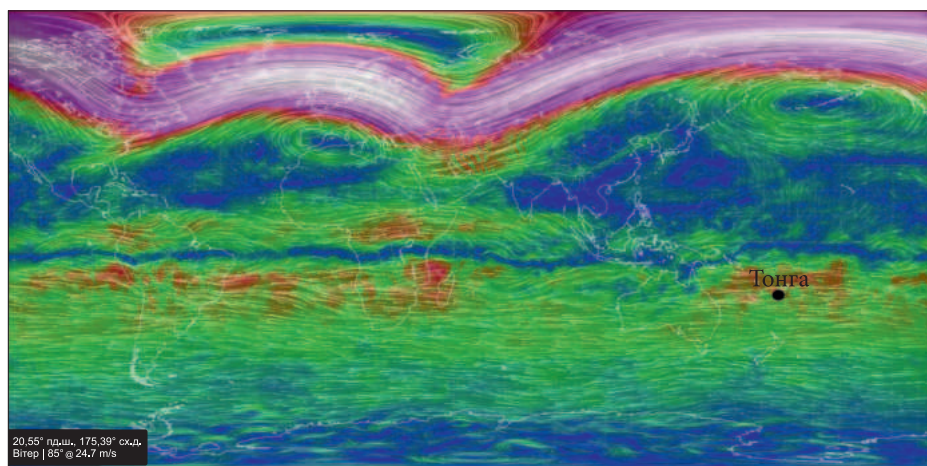


Рис. 1. Повітряні течії 15 січня 2022 р., висоти від 30 км (тиск 10 гПа), чорне коло — місце виверження вулкана. Кольорами позначено швидкості вітру: синій — 0...10 м/с, зелений — 11...20 м/с, жовтий — 21...30 м/с, червоний — 31...40 м/с, бузковий — 41...60 м/с, рожевий — 61...85 м/с, білий — 86...100 м/с [16]

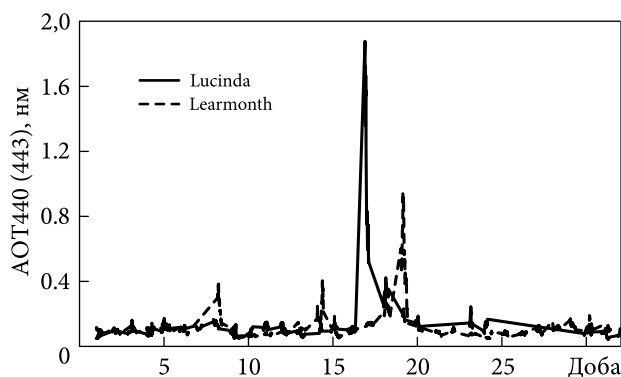


Рис. 2. Часовий хід АОТ440 (443) за даними станції AERONET з 1 по 31 січня 2022 р.

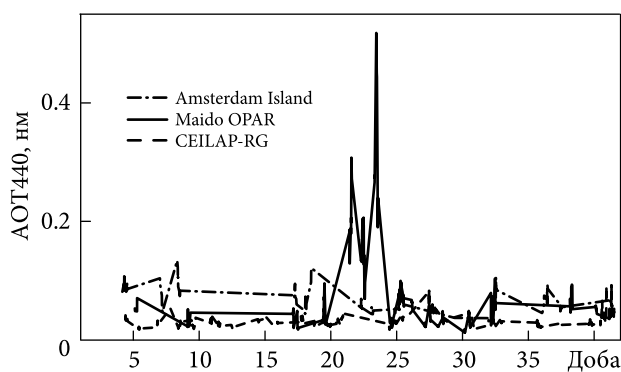


Рис. 3. Залежність АОТ440 по трьох станціях моніторингу AERONET тропічного поясу від дня року (з 4 січня по 10 лютого 2022 р.).

Таким чином, від вулкана до першої станції аерозолі переносилися зі швидкістю близько 18...20 м/с, а від східного берега Австралії до за-

хідного берега — зі швидкістю близько 16...18 м/с. Тож середня швидкість перенесення складає приблизно 18 м/с.

2.2. Аналіз динаміки АОТ440 у тропічному регіоні південної півкулі Землі

У роботі [6] дослідники стверджують, що викиди від виверження вулкана Тонга обійшли Землю за 15 діб. Враховуючи середню швидкість перенесення повітряних мас у 18 м/с, для того, щоб обійти земну кулю, аерозоліам знадобилось би 23 доби, але швидкість зональних вітрів на висотах від 30 км на 23° пн. ш. часто збільшувалась і до 40 м/с (рис. 1), тому часу знадобилось менше — 10...15 діб, що й було виявлено в публікаціях [3, 8].

З метою відслідковування шляху вулканічних аерозолів за широтою було проведено аналіз зміни концентрації аерозолів за даними 3 станцій AERONET: Amsterdam Island, CEILAP-RG, Mado OPAR, які розташовано на шляху перенесення повітряних мас від вулкана Тонга. Напрямки вітрів було простежено на сайті [16], станції обиралися з тих, які також знаходяться безпосередньо на шляху транспортування викидів вулкана. Для первинного аналізу зміни концентрації аерозолів після виверження було побудовано залежність АОТ440 від дня року з 4 січня по 10 лютого 2022 р. (рис. 3). Згідно з аналізом лише в пункті Mado OPAR спостерігається різке підвищення рівня АОТ440 з 20 січня (тобто через 5 днів

після виверження) по 25 січня 2022 р. Показник АОТ440 збільшився з 0.05 до 0.5. Інші 2 пункти знаходяться в Південній Америці значно далі від островів Тонга й суттєвого впливу не зазнали. Скоріше за все аерозолі на шляху до них розсіялися, вимилися опадами та опустилися під дією гравітації.

Щоб оцінити зміни концентрації аерозолів в атмосфері тропіків за довгий час, було проведено порівняння середньорічних значень АОТ440 за три роки: 2021, 2022 та 2023 (рис. 4). Зауважимо, що на двох станціях із трьох найбільші значення спостерігаються у 2022 році. У пункті моніторингу AERONET CEILAP-RG значення АОТ440 за три роки майже не змінилося. Максимум вмісту аерозолів в атмосфері над станцією Maïdo OPAR зафіксовано 22–23 січня 2022 р., тобто через 7–8 днів після виверження. Таким чином, середня швидкість перенесення повітряних мас дорівнює близько 19...20 м/с. Треба зазначити, що частина аерозолів, яка досягла цієї точки раніше, рухалась зі швидкістю до 30...40 м/с.

2.3. Зміна показників АОТ440 в Антарктиці та Арктиці

Виверження вулкана Тонга спричинило збільшення аерозолів зокрема й у полярних областях, цінність яких у тому, що вони можуть виступати індикаторами глобальних забруднень як природного, так і антропогенного характеру. У [17] було визначено, що в Антарктиці за період до виверження вулкана Тонга фіксується поступове збільшення аерозольного навантаження по всьому регіону. Щоб оцінити лише вплив від виверження для порівняння в роботі нами використовувались тільки дані АОТ440, отримані за рік до виверження, у рік виверження та через рік після події. До Антарктики та Арктики аерозолі дісталися завдяки загальній циркуляції атмосфери та циркуляції Брюера-Добсона [18], яка здебільшого й відповідає за меридіональне перенесення повітряних мас із тропіків у інші регіони. Інформація щодо полярних станцій моніторингу, дані яких використовувались для аналізу, наведено в таблиці. Для порівняння та аналізу по кожній станції було розраховано середньоарифметичне значення для 2021, 2022 та 2023 років. За результатами обробки було побудовано річні залежності АОТ440 (рис. 5). Як видно з графіків (рис. 5, а),

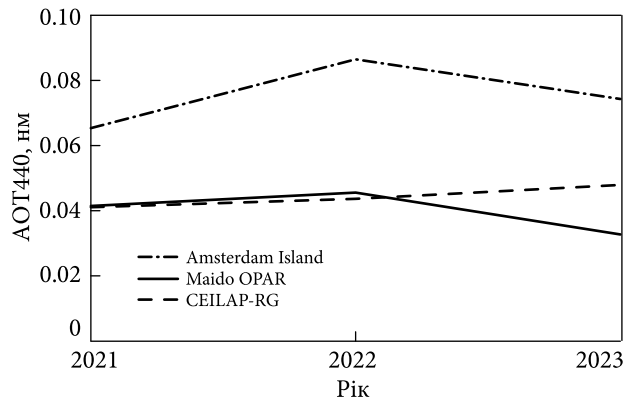


Рис. 4. Середньорічні значення АОТ440 по станціях моніторингу AERONET за 2021–2023 рр.

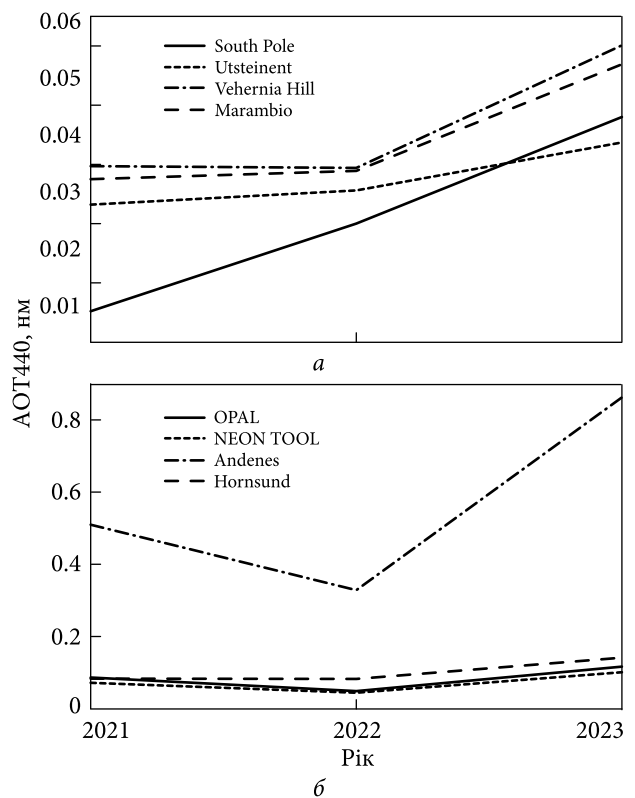


Рис. 5. Середні значення АОТ440 по станціях моніторингу AERONET за 2021–2023 рр.: Антарктики (а), Арктики (б)

в Антарктиці максимальні значення АОТ440 в усіх випадках спостерігаються саме у 2023 році. На південному полюсі (станція South Pole) середні значення найбільше у 2023 році (приблизно у 2 рази вище за 2021 рік та в 1.5 рази вище за значення 2022 року). За даними станції Utsteinent середні значення у 2023 році більші, ніж у 2021 та 2022 роках. На станції Vehernia Hill середні значення у 2023 році майже у 2 рази більші, ніж у

2021 та 2022 роках. За даними станції Marambio, яку розташовано північніше за інші, також середнє значення АОТ440 найбільше у 2023 році.

В Арктиці (рис. 5, б) підвищення рівня аерозолів також спостерігається у 2023 році. За даними станції Hornsund у 2023 році показник АОТ440 зріс до 1.4, тоді як у 2021 та 2022 роках його значення складало близько 0.08. Більше ніж у два рази у 2023 році показник АОТ збільшився також за даними станції NEON_TOOL (від 0.04 до 0.1). Показник АОТ440 за даними пункту моніторингу Andenes у 2023 році зріс до 1.4 з 0.08 за минулі два роки. Менше за все збільшилась концентрація аерозолів над станцією OPAL — з 0.4 до приблизно 0.6.

2.4. Загальний аналіз швидкості перенесення забруднень від виверження

Зональне перенесення аерозолів характеризується великою швидкістю, тоді як меридіональне поширення займало багато часу. Це пояснюється тим, що зональне перенесення викидів від виверження Тонга відбувалося завдяки дії струменевих стратосферних течій, які в південній півкулі мають велику швидкість. У низьких широтах формується внутрішньотропічна зона конвергенції, яку на кліматологічних картах позначено безперервною лінією, що охоплює всю земну кулю. Вона проходить у січні більше над південною півкулею, ніж над північною, особливо далеко відхиляючись на південь разом із відгалуженнями екваторіальної улоговини над нагрітими материками південної півкулі. А меридіональне транспортування аерозолів зайняло в часі близько року та відбувалося завдяки циркуляції Брюера–Добсона, що сприяє перенесенню повітря з тропіків у середні й високі широти. Крім того, у збільшенні аерозолів в інших широтах велику роль відігравало утворення вторинних аерозолів через окислення діоксину сірки. Отримані в роботі результати не суперечать висновкам інших дослідників щодо особливостей розповсюдження аерозолів по земній кулі після виверження вулкана Тонга [3, 5, 6, 8].

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. The European Space Agency, 2024. URL: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-5P
2. Jinpeng Lu, Sijia Lou, Xin Huang, Lian Xue, Ke Ding, Tengyu Liu, Yue Ma, Wuke Wang, Aijun Ding. Stratospheric Aerosol and Ozone Responses to the Hunga Tonga-Hunga Haʻapai volcanic Eruption. *Geophys. Res. Lett.* 2023. Vol. 50, Iss. 4. e2022GL102315. DOI: 10.1029/2022GL102315

Висновки

1. Аерозольні викиди від вулкана Тонга дісталися східного берега Австралії за дві доби, Значення АОТ440 з 0.15 збільшилося до 2 відразу, як шлейф досяг пункту моніторингу Lucinda. Ще дві доби, до 19 січня 2022 р., викиди рухались до західного узбережжя материка (пункт моніторингу Learmonth). Значення АОТ440 збільшилося з 0.15 до 1, показник зростав поступово. Далі, до пункту AERONET Amsterdam Island аерозолі прямували ще три доби, а значення АОТ440 збільшилося з 0.05 до 0.5, також спостерігається поступове зростання параметра.

2. У високих широтах аерозольний відгук на виверження вулкана Тонга відбувався більш повільно з суттєвою затримкою. Так в Антарктиці значення АОТ440 збільшилося у середньому з 0.2...0.3 до 0.5...0.6 лише у 2023 році, і в Арктиці цей показник також зріс у півтора — два рази саме 2023 року. Отже швидкість зонального транспорту аерозольних атмосферних викидів у планетарному масштабі суттєво перевищує швидкість їхнього меридіонального поширення.

Підтримка та подяки. Автори вдячні співробітникам відділу радіофізики геокосмосу Радіоастрономічного інституту НАН України за обговорення результатів роботи та корисні поради. Автори також вдячні за можливість використання даних міжнародної мережі AERONET керівнику проекту Бренту Холбену та керівнику мережі AERONET/PHOTONS Філіпу Голубу. Особлива подяка керівникам 13 станцій AERONET, які забезпечують роботу сонячних фотометрів, отримані дані використано в роботі.

Дослідження проведено в рамках планових відомчих НДР «Ятаган-4» (державний реєстраційний номер 0121U108635) і «Шпіцберген-2024» (державний реєстраційний номер 0124U002479), а також частково фінансово підтримано завдяки участі співавторів у виконанні конкурсної НДР ДУ НАНЦ МОН України «Геліомакс-2024-1» (державний реєстраційний номер 0124U003937).

3. Чорногор Л.Ф. Фізичні ефекти у системі Земля—атмосфера—іоносфера—магнітосфера, викликані потужним вибухом вулкана Тонга 15 січня 2022 р. *Космічна наука і технологія*. 2023. Т. 29, № 2(141). С. 54—77. DOI: 10.15407/knit2023.02.054
4. Zhengpeng Li, Jianrong Bi, Zhiyuan Hu, Junyang Ma, Bowen Li. Regional transportation and influence of atmospheric aerosols triggered by Tonga volcanic eruption. *Environ. Pollut.* 2023. Vol. 325. 121429. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121429
5. Zhu Y., Bardeen C., Tilmes S., Mills M.J., Wang X., Harvey L., Taha G., Kinnison D.E., Yu P., Rosenlof K.H., Avery M.A., Kloss C., Li C., Glanville A.S., Millan L., Deshler T., Portmann R.W., Krotkov N.A., Toon O.B. Hunga-Tonga eruption: stratospheric aerosol evolution in a water-rich plume. *AGU Fall Meeting 2022* [preprint]. DOI: 10.21203/rs.3.rs-1647643/v1
6. Ke G., Huizheng Ch., Lin T., Yaqiang W., Chong Sh., Wenrui Y., Yuanxin L., Lei L., Yu Zh., Lei Zh., Zhaoliang Z., Junt-ing Zh., Zhili W., Xiaoye Zh. Columnar optical, microphysical and radiative properties of the 2022 Hunga Tonga volcanic ash plumes. *Sci. Bull.* 2022. Vol. 67, Iss. 19. P. 2013—2021. DOI: 10.1016/j.scib.2022.08.018
7. Boichu M., Grandin R., Blarel L., Torres B., Derimian Y., Goloub P., Chiapello I., Dubovik O., Mathurin T., Pascal N., Patou M., Riedi J. Growth and global persistence of stratospheric sulfate aerosols from the 2022 Hunga Tonga–Hunga Haʻapai volcanic eruption. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2023. Vol. 128. e2023JD039010. DOI: 10.1029/2023JD039010
8. Prata F. Transport of the Hunga Tonga volcanic aerosols inferred from Himawari-8 limb measurements. *EGU sphere* [preprint]. 2023. DOI: 10.5194/egusphere-2023-2551
9. Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakajima T., Lave-nu F., Jankowiak I., Smirnov A. AERONET — A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Character-ization. *Remote Sens. Environ.* 1998. Vol. 66, Iss. 1. P. 1—16. DOI: 10.1016/S0034-4257(98)00031-5
10. AERONET (Aerosol RObotic NETwork). 2024. URL: <https://aeronet.gsfc.nasa.gov>
11. Dubovik O., King M. D. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements. *J. Geophys. Res.* 2000. Vol. 105. P. 20673—20696. DOI: 10.1029/2000JD900282
12. Dubovik O., Lapyonok T., Kaufman Y.J., Chin M., Ginoux P., Kahn R.A., Sinyuk A. Retrieving Global Aerosol Sources from Satellites Using Inverse Modeling. *Atm. Chem. Phys.* 2008. Vol. 8. P. 209—250. DOI: 10.5194/acp-8-209-2008.
13. Milinevsky G., Danylevsky V., Bovchaliuk V., Bovchaliuk A., Goloub Ph., Dubovik O., Kabashnikov V., Chaikovsky A., Miatselskaya N., Mishchenko M., Sosonkin M. Aerosol seasonal variations over urban–industrial regions in Ukraine ac-cording to AERONET and POLDER measurements. *Atmos. Meas. Tech.* 2014. Vol. 7, P. 1459—1474. DOI: 10.5194/amt-7-1459-2014
14. Brogniez C., Buchard V., Auriol F. Validation of UV-visible aerosol optical thickness retrieved from spectroradiometer measurements. *Atmos. Chem. Phys.* 2008. Vol. 8. P. 4655—4663. DOI: 10.5194/acp-8-4655-2008
15. Li J., Carlson B.E., Dubovik O., Lacis A.A. Recent trends in aerosol optical properties derived from AERONET measure-ments. *Atmos. Chem. Phys.*, 2014. Vol. 14. P. 12271—12289. DOI: 10.5194/acp-14-12271-2014
16. Earth Wind Map, 2024. URL: <https://earth.nullschool.net>
17. Chen L., Ding M., She Y., Zhang L., Zeng Z., Jia J., Zheng Y., Tian B., Zhu K., Wang X., Yao Z., Che H. Regional Aerosol Optical Depth over Antarctica. *Atmos. Res.* 2024. Vol. 308. 107534. DOI: 10.1016/j.atmosres.2024.107534
18. Vallis G.K. *Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics: Fundamentals and Large-Scale Circulation*. 2nd ed. Cambridge Uni-versity Press. 2017. 964 p. ISBN: 978-1107065500. DOI: 10.1017/9781107588417

Стаття надійшла 10.09.2024

REFERENCES

1. The European Space Agency, 2024 [online]. Available from: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-5P
2. Jinpeng, L., Sijia, L., Xin, H., Lian, X., Ke, D., Tengyu, L., Yue, M., Wuke, W., Aijun, D., 2023. Stratospheric Aerosol and Ozone Responses to the Hunga Tonga-Hunga Haʻapai volcanic Eruption. *Geophys. Res. Lett.*, **50**(4), e2022GL102315. DOI: 10.1029/2022GL102315
3. Chornogor, L.F., 2023. Physical effects in the Earth—atmosphere—ionosphere—magnetosphere system caused by the pow-erful explosion of the Tonga volcano on January 15, 2022. *Space Sci. Technol.*, **29**(2(141)), pp. 54—77. DOI: 10.15407/knit2023.02.054 (in Ukrainian)
4. Zhengpeng, L., Jianrong, B., Zhiyuan, H., Junyang, M., Bowen, L., 2023. Regional transportation and influence of atmo-spheric aerosols triggered by Tonga volcanic eruption. *Environ. Pollut.*, **325**, 121429. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121429
5. Zhu, Y., Bardeen, C., Tilmes, S., Mills, M.J., Wang, X., Harvey, L., Taha, G., Kinnison, D.E., Yu, P., Rosenlof, K.H., Avery, M.A., Kloss, C., Li, C., Glanville, A.S., Millan, L., Deshler, T., Portmann, R.W., Krotkov, N.A., Toon, O.B., 2022. Hunga-Ton-ga eruption: stratospheric aerosol evolution in a water-rich plume. *AGU Fall Meeting 2022*, [preprint]. DOI: 10.21203/rs.3.rs-1647643/v1
6. Ke, G., Huizheng, Ch., Lin, T., Yaqiang, W., Chong, Sh., Wenrui, Y., Yuanxin, L., Lei, L., Yu, Zh., Lei, Zh., Zhaoliang, Z., Junt-ing, Zh., Zhili, W., Xiaoye, Zh., 2022. Columnar optical, microphysical and radiative properties of the 2022 Hunga Tonga volcanic ash plumes. *Sci. Bull.*, **67**(19), pp. 2013—2021. DOI: 10.1016/j.scib.2022.08.018

7. Boichu, M., Grandin, R., Blarel, L., Torres, B., Derimian, Y., Goloub, P., Chiapello, I., Dubovik, O., Mathurin, T., Pascal, N., Patou, M., Riedi, J., 2023. Growth and global persistence of stratospheric sulfate aerosols from the 2022 Hunga Tonga–Hunga Haʻapai volcanic eruption. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **128**, e2023JD039010. DOI: 10.1029/2023JD039010
8. Prata, F., 2023. Transport of the Hunga Tonga volcanic aerosols inferred from Himawari-8 limb measurements. *EGU sphere*, [preprint]. DOI: 10.5194/egusphere-2023-2551
9. Holben, B.N., Eck, T.F., Slutsker, I., Tanre, D., Buis, J.P., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J.A., Kaufman, Y.J., Nakajima, T., Lavenu, F., Jankowiak, I., Smirnov, A., 1998. AERONET — A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization. *Remote Sens. Environ.*, **66**(1), pp. 1–16. DOI: 10.1016/S0034-4257(98)00031-5
10. AERONET (Aerosol RObotic NETwork). 2024 [online]. Available from: <https://aeronet.gsfc.nasa.gov>
11. Dubovik, O., King, M.D., 2000. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements. *J. Geophys. Res.*, **105**, pp. 20673–20696. DOI: 10.1029/2000JD900282
12. Dubovik, O., Lapyonok, T., Kaufman, Y.J., Chin, M., Ginoux, P., Kahn, R.A., Sinyuk, A., 2008. Retrieving Global Aerosol Sources from Satellites Using Inverse Modeling. *Atm. Chem. Phys.*, **8**, pp. 209–250. DOI: 10.5194/acp-8-209-2008.
13. Milinevsky, G., Danylevsky, V., Bovchaliuk, V., Bovchaliuk, A., Goloub, Ph., Dubovik, O., Kabashnikov, V., Chaikovskiy, A., Miatselskaya, N., Mishchenko, M., Sosonkin, M., 2014. Aerosol seasonal variations over urban–industrial regions in Ukraine according to AERONET and POLDER measurements. *Atmos. Meas. Tech.*, **7**, pp. 1459–1474. DOI: 10.5194/amt-7-1459-2014
14. Brogniez, C., Buchard, V., Auriol, F., 2008. Validation of UV-visible aerosol optical thickness retrieved from spectroradiometer measurements. *Atmos. Chem. Phys.*, **8**, pp. 4655–4663. DOI: 10.5194/acp-8-4655-2008
15. Li, J., Carlson, B.E., Dubovik, O., Lacis, A.A. 2014. Recent trends in aerosol optical properties derived from AERONET measurements. *Atmos. Chem. Phys.*, **14**, pp. 12271–12289. DOI: 10.5194/acp-14-12271-2014
16. Earth Wind Map, 2024 [online]. Available from: <https://earth.nullschool.net>
17. Chen, L., Ding, M., She, Y., Zhang, L., Zeng, Z., Jia, J., Zheng, Y., Tian, B., Zhu, K., Wang, X., Che, H., 2024. Regional Aerosol Optical Depth over Antarctica. *Atmos. Res.*, 107534. DOI: 10.1016/j.atmosres.2024.107534
18. Vallis, G.K., 2017. *Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics: Fundamentals and Large-Scale Circulation*. 2nd ed. Cambridge University Press. ISBN: 978-1107065500. DOI: 10.1017/9781107588417

Received 10.09.2024

A.V. Soina, and Yu.M. Yampolsky

Institute of Radio Astronomy of the NAS of Ukraine
4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002, Ukraine

PLANETARY-SCALE RESPONSE OF AEROSOLS TO THE TONGA VOLCANO ERUPTION

Subject and Purpose. The work is aimed at analyzing changes in the concentration of atmospheric aerosols that were observed not only in the regions within a close vicinity of the eruption (particularly, in Australia), but in polar regions of the Earth as well.

Methods and Methodology. To study the dynamical variations of aerosol concentration that had resulted from the eruption of the Tonga volcano, we used data from the global aerosol monitoring network (AERONET) which relies on operation of the automatic, unified solar photometers Cimel CE318 of France. Three-year data sets (2021–2023) of aerosol optical thicknesses (AOT) were analyzed, measured about the spectral line of 440 nm (and, in one case, 443 nm). These data sets are hereinafter referred to as AOT440 or AOT443, respectively.

Results. The emissions from the volcanic eruption reached the east coast of Australia on January 17, 2022, arriving to the west coast two days later. We have presented here time dependences of AOT variations as recorded at two AERONET stations located on the emission track. The average air mass transfer rate has also been calculated. In addition, the paper shows variations in the level of aerosol concentration in the atmosphere of polar and tropical regions that occurred as a result of the Tonga volcano eruption. In addition, eruption transportation rates have been calculated for tropical regions around the globe.

Conclusions. As was found, emissions from the Tonga volcano took only two days to reach the east coast of Australia, causing the AOT440 there to increase from 0.15 to 2. Over the two days that followed, the volcano's emissions moved, together with air masses, toward the west coast of the continent where the AOT443 increased from 0.15 to 1. Further on, the aerosols moved toward the AERONET Maïdo OPAR point over yet another day, and the AOT440 increased from 0.05 to 0.5. The variations in the level of aerosols in the polar regions' air were also analyzed with the use of data of 2021 to 2023 observations at a few monitoring stations. It was found that the value of AOT440 for the Antarctic region increased in 2023 by a factor of 2 to 3 on the average. Meanwhile, the Arctic region reported a one and a half to two times increases in 2023. As has been established, the zonal transport of aerosols occurred at a very fast rate, while the meridional transport was slow, reaching its peak value for the polar regions over nearly a year.

Keywords: Aerosols, Volcano Tonga, AOT, Antarctica, Arctic, Australia, AERONET.