



<https://doi.org/10.36023/ujrs.2021.8.4.204>

УДК 528.8.04

Результати порівняльного використання інформації ОСО-2 для виявлення залежності між змінами концентрації CO₂ в атмосфері та температурою повітря в районі Аргентинських островів та України

І. Г. Артеменко*

ДУ “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України”, вул. Олеся Гончара, 55-Б, Київ, 01054, Україна

У роботі отримані результати порівняльного аналізу даних про зміни концентрації CO₂ в атмосфері над полярними територіями, прилеглими до антарктичної станції “Академік Вернадський” (розмір досліджуваної території 1.5°×1.5°, чи приблизно 166 км на 75 км), на основі вимірів супутника Orbiting Carbon Observatory (ОСО-2) та температурою повітря за наземними метеорологічними спостереженнями на станції “Академік Вернадський” за 2014–2020 роки. На отриманому графіку можна побачити, що температура повітря і концентрація CO₂ в атмосфері над досліджуваною територією мають тенденцію до повільного зростання. Крім того, аналіз указаних вище результатів показав, що можна визначити інтегральні тенденції впливу вмісту парникових газів в атмосфері на температуру повітря. Виконано порівняльний аналіз даних про зміни концентрації CO₂ за даними ОСО-2 між регіонами, де є прямий антропогенний вплив (територія України) та регіоном, де антропогенний вплив є мінімізованим (території, прилегли до антарктичної станції “Академік Вернадський”) за 2014–2020 роки. Було виявлено, що концентрації CO₂, над територіями, де є прямий антропогенний вплив, зростають значно швидшими темпами, ніж над тими територіями, де такий вплив мінімізований. При цьому ми бачимо, що концентрації CO₂ мають тенденцію до зростання в обох випадках. Грунтуючись на отриманих результатах, було визначено, що проведення комплексного, одночасного та узгодженого із супутниковими спостереженнями вимірювання різного роду рядів змінних, дасть змогу оптимізувати інформацію про зміни кліматичних параметрів (температура повітря) в полярних зонах.

Ключові слова: супутникові дані, кліматичні зміни, температура повітря, концентрація CO₂, полярні зони, антропогенний вплив.

© І. Г. Артеменко. 2021

Актуальність дослідження

У зв'язку з доволі швидкою зміною кліматичних показників перед науковою спільнотою постає завдання адекватно оцінити вплив чинників, що провокують кліматичні зміни (IPCC, 2021). Іншим завданням є оцінення ризиків, пов'язаних зі зміною клімату, та розрахунок основних стратегій стабілізації для сталого розвитку людства. Необхідно відмітити, що зміни кліматичних показників (наприклад, кількість опадів і температура повітря) відбуваються з різною інтенсивністю в різних регіонах Землі (IPCC, 2021), залежно від цілої групи факторів антропогенного та природного походження, які не завжди корелюються та прямо не пов'язані між собою. Крім того, необхідно сказати, що на цей час методи порівняння локальних вимірювань та загальних трендів є обмеженими, що зумовлено різністю природних процесів та потребує залучення додаткових методів регуляризації; у разі таких порівнянь можна з певним ступенем достовірності стверджувати лише про відповідність базовим трендам або про наявність істотних аномалій локальних розподілів відносно розподілів мезо- або мікрокліматичних показників на фіксованих просторових і часових масштабах. Тому для вирішення вищезазначених завдань необхідним є

контроль змін різних метеорологічних параметрів, які впливають на кліматичні показники, а також їх самих у різних регіонах та на глобальному рівні за допомогою наземних та супутникових вимірювань. Особливо важливим такий контроль є в місцях, де антропогенний вплив на зміни кліматичних показників є меншим, ніж в інших регіонах, бо це дає змогу оцінити саме природний вплив на зміни кліматичних показників. Одним з таких регіонів є Антарктида, яка, з одного боку, є незаселеним континентом, а з другого, є захищеною від прямого антропогенного впливу низкою міжнародних договорів (The Antarctic Treaty, 1959; South Pacific Nuclear Free Zone Treaty, 1968), до яких приєдналася й Україна (Договір про Антарктику, 1992; Протокол про охорону навколишнього середовища за Договором про Антарктику, 2005).

Усі гідрометеорологічні показники, що отримуються в умовах Антарктиди, є надважливими для оптимізації прогнозу майбутнього стану клімату шляхом їхнього застосування в єдиному інструменті отримання кількісних оцінок майбутніх змін, а саме – моделях. Тому верифікація та калібрування моделей вуглецевого балансу, зокрема, емісій та поглинання парникових газів, як на глобальному, так і на локальному рівнях, передусім у таких регіонах, як полярні, що, з одного боку, є найбільш уразливими до кліматичних впливів, є важливим

* E-mail: igor.artemenko@ukr.net

завданням. З другого боку, ці регіони є найважчими для моделювання (через складність орографії тощо), тому така робота дасть змогу оптимізувати та уніфікувати існуючі моделі для подальшого вдосконалення глобальних моделей клімату.

У контексті вищесказаного, необхідно зазначити, що технічні можливості з оцінювання концентрацій парникових газів (зокрема CO₂) супутниковими методами з'явилися у 2002 році, коли були задіяні супутники Envisat-1 та Aqua, на яких розміщуються сенсори SCIAMACHY та AIRS, відповідно, що визначають вміст парникових газів в атмосфері. У працях таких іноземних науковців, як M. Buchwitz, M. Reuter, Oliver Schneising, Edward T. Olsen, Thomas S. Pagano, H. Takagi, I. Morino (наприклад, у таких роботах, як: Buchwitz M. et al., 2004; Buchwitz M. et al., 2005; Edward T. Olsen, 2009; Schneising O. et al., 2009), розроблено алгоритми визначення концентрацій за даними сенсорів, проведена верифікація на окремих ділянках, оцінена загальна достовірність визначення концентрації для деяких типів підстильної поверхні, отримані глобальні розподіли концентрацій парникових газів, визначені напрями роботи з розрахунків концентрації на регіональному масштабі. Однак, можливість більш детального визначення саме вмісту концентрації CO₂ в атмосфері, з'явилася із запуском супутника OCO-2. В цьому контексті, в роботі були використані дані, отримані на основі методики, розробленої для супутникової місії OCO-2, за якою оцінюється

концентрація CO₂, які, в свою чергу, були географічно прив'язані до досліджуваних в роботі територій.

Мета роботи

Концентрація CO₂ в атмосфері, вплив якої визначено, як один з основних факторів, що провокують кліматичні зміни, зростає згідно з даними наземних і супутникових вимірювань. Тому метою роботи є визначити загальні тренди зміни концентрацій CO₂ і температури повітря в контексті наявних глобальних тенденцій, з погляду можливості оцінювання впливів на полярні зони, де антропогенний вплив є мінімізованим. Це, в свою чергу, дасть змогу розробити додаткові методи аналізу та контролю розподілу атмосферних концентрацій CO₂ над полярними територіями, прилеглими до антарктичної станції “Академік Вернадський” (Україна), за допомогою супутникової інформації.

Матеріали і методика дослідження

У роботі були використані дані супутника OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory-2), запущеного NASA у 2014 р., характеристики та можливості якого з оцінювання концентрації CO₂ в атмосфері значно перевищують всі попередні місії цього призначення (Рис. 1).

Ibuki GOSAT	Aqua	OCO-2	Envisat	Космічний апарат	
Японія	США (NASA)	США (NASA)	ЄвроСоюз	Країна	Запуск
JAXA, MOE (Japan), NIES (Japan)	NASA, TRW Inc., Goddard Space Flight Center, BAE Systems-Lockheed-Martin, Jet Propulsion Laboratory	NASA	ESA	Компанія	
23.01.09 р.	04.05.02 р.	02.07.2014 р.	01.03.02 р.	Дата	
666	705.3	701.1	799.8	Висота, км	Параметри орбіти
98.05°	98.2°	98.20°	98.55°	Нахил	
98.2	98.8	98.82	100.59	Період, мин.	
29.3	32	16	35	Повтор траси, доба	
~ 3	~ 3	<100	~ 3	Частота зйомки, доба	
Сонячно-синхронна, квазіперіодична	Сонячно-синхронна, біполярна, висхідна	Сонячно-синхронна, біполярна	Сонячно-синхронна, біполярна	Тип орбіти	Спектрометр
250	177	131	215	Маса, кг	
120×110×70	116.5×158.7×95.3	(160 × 40 × 0.6)	Оптич. 109×65×101 Електрон. 82×90×28 Охолод. 51×91×62	Габарити, см	
310	220	125	140	Потужність, що потребується, Вт	
10.5	2.3 для Вид./БИК; 13.5 для ИК	2.9	15	Поле зору, км	
4 кан. 0.758 - 0.775, 1.56 - 1.72, 1.92 - 2.08, 5.56 - 14.3; (0.2 см ⁻¹)	2382 (4 Вид./БИК; 2378 ИК) 0.4 - 15.4 (0.4 - 1.1 Вид./БИК; 3.74 - 15.4 ИК)	3 кан. 2060, 1610, 765	UV-SWIR: 240-314, 309-3405, 394-620, 604-805, 785-1050, 1000-1750, 1940-2040, 2265-2360	Спектральний канал, нм (спектральна розрізненість, нм)	
790	1690	10.3	480	Ширина полоси огляду, км	
Глобальное	Глобальное	Глобальное	Глобальное	Перекриття площ зйомок трьох КА	
Є	Немає (місія офіційно завершена 09.05.2012)	Є	Є	Наявність результатів сучасних зйомок в інтернеті	
http://geomon.ipsi.jussieu.fr/meetings/0706_IWGM/GMS/Hamazaki.pdf	http://www.nasa.gov/mision_pages/aqua/ http://airs.jpl.nasa.gov/	https://oco.jpl.nasa.gov/	http://www.iup.physik.uni-bremen.de http://envisat.esa.int	Інформаційні сайти	

Рис. 1. Технічні характеристики супутникових місій, які призначені для визначення концентрації CO₂ в атмосфері (місію Envisat завершено) (Lyalko V. I., 2012)

Водночас, підходи до використання супутникової інформації для визначення концентрацій парникових газів для визначення кліматичних параметрів (зокрема температури повітря), описані в (Парниковий ефект, 2015; Kostyuchenko at all, 2016; Kostyuchenko at all, 2020).

Сам метод визначення складу атмосфери та алгоритм перерахунку радіаційних характеристик у показники концентрації CO₂ за даними, отриманими супутником OCO-2, має назву ACOS (Atmospheric CO₂ Observations from Space) та описаний у роботах (O'Dell at all, 2012; Crisp at all, 2010; Crisp at all, 2012). Цей метод розроблявся NASA (National Aeronautics and Space Administration) для супутника OCO, але після його невдалого запуску використовувався в роботах з перерахунку радіаційних характеристик у показники концентрації CO₂ за даними, отриманими супутником GOSAT (Greenhouse Gases Observing Satellite) (O'Dell at all, 2012).

Зокрема, в методі ACOS визначено, що параметри прямої моделі, що підлягають оптимізації, становлять вектор стану x . Всі канали з трьох смуг агрегуються у вектор спостережень y . Математичне моделювання спостережень y з вектора стану x набирає вигляду (O'Dell at all, 2012):

$$y = F(x, b) + \varepsilon, \quad (1)$$

де F – пряма модель пошуку, b – множина фіксованих вхідних параметрів (наприклад, коефіцієнтів газопоглинання, кутів огляду тощо), ε – містить шум інструменту і оцінки похибок моделі.

Для визначення вмісту вуглецевого газу використовується усереднена по глибині спостереження молярна фракція діоксиду вуглецю, перерахована для сухого повітря (C_{dryair}), та одночасно виміряна фракція кисню. Визначення вмісту кисню значно простіше, позаяк його молярні частки добре відомі і виміряні з достатньою точністю. Таким чином, середня по глибині спостереження концентрація діоксиду вуглецю X_{CO_2}

розраховується зокрема так (Crisp at all, 2010; Crisp at all, 2012; O'Dell at all, 2018):

$$X_{CO_2} = \frac{C_{CO_2}}{C_{dryair}}, \quad (2)$$

де C_{dryair} визначається як:

$$C_{dryair} = \frac{P}{g_0 \cdot m_{dryair}} - \frac{C_{H_2O} \cdot m_{H_2O}}{m_{dryair}}, \quad (3)$$

де P – поверхневий тиск, g_0 – прискорення вільного падіння, C_{H_2O} – загальний стовпчик водяної пари, m_{dryair} – середня молекулярна маса сухого повітря, m_{H_2O} – молекулярна маса водяної пари.

Таким чином, проводиться перерахунок інтенсивності випромінювання в межах смуги поглинання окремого газу у значення тропосферної концентрації цього газу. Відокремлення тропосфери проводиться за врахуванням інших, зокрема температурних показників та врахуванням атмосферного тиску за аналізом аерозолів. Більш детальну методику перерахунку та відповідний алгоритм описано в (Crisp at all, 2010; Crisp at all, 2012; O'Dell at all, 2018). Також отримана інформація проходить валідацію на основі даних, отриманих TCCON (Total Carbon Column Observing Network) (O'Dell at all, 2012).

Кінцевим результатом застосування описаної вище методики є глобальні карти розподілу атмосферних концентрацій CO₂ (за день, місяць, рік). У роботі використовувалася інформація про щомісячні розподіли концентрації CO₂, географічно прив'язані до досліджуваних територій.

Дані про зміни температури повітря на станції “Академік Вернадський” містяться на офіційному веб-сайті Державної установи Національний антарктичний науковий центр МОН України (НАНЦ, 2021).

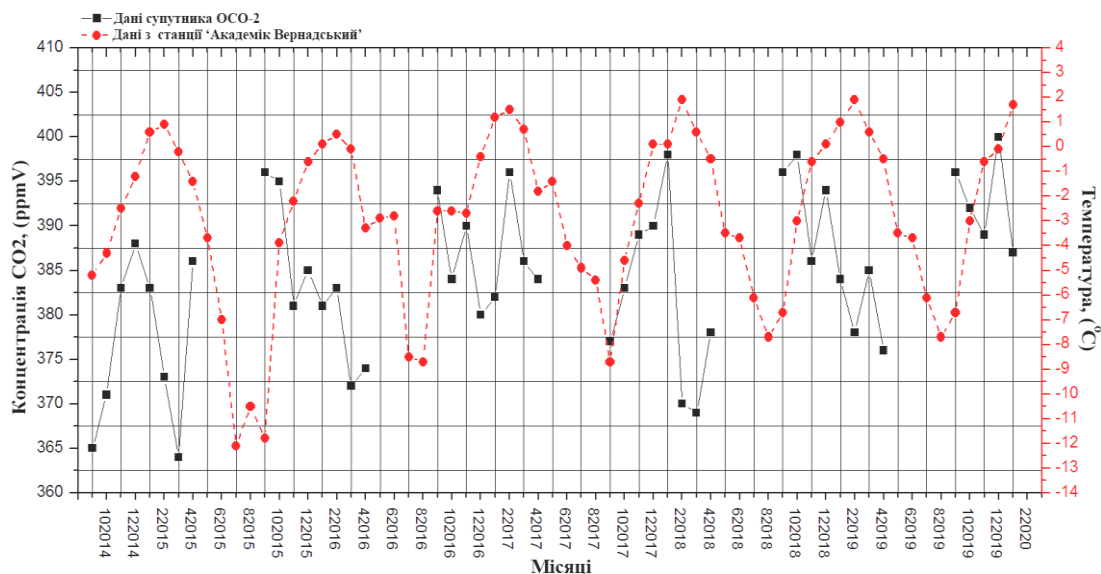


Рис. 2. Порівняння середньомісячної зміни концентрації CO₂ в атмосфері над полярними територіями, прилеглими до антарктичної станції “Академік Вернадський” на основі вимірювань Orbiting Carbon Observatory (OCO-2) та температури повітря, отриману на станції “Академік Вернадський”

Результати та обговорення

За допомогою даних, отриманих супутником OCO-2, було розраховано динаміку зміни концентрації CO₂ в атмосфері та порівняно із зміною температури в приповерхневому шарі повітря, отриманою на станції “Академік Вернадський” (НАНЦ, 2021) (Рис. 2).

Як бачимо з графіка, температура повітря та концентрація CO₂ над досліджуваною територією повільно зростають. З одного боку, ми знаємо про стрімке зростання температури повітря для всього Антарктичного півострова (зокрема, і для виділеної території дослідження) з 1950 до 2000 років (Turner, J. at all, 2005), із другого, про стабілізацію та навіть зменшення температури повітря над досліджуваною територією на початку 2000-х років (Turner, J. at all, 2019), тоді, як в деяких інших місцях півострова температура зростала (Turner, J. at all, 2019). Тому необхідно відзначити важливість повільного зростання температури повітря в досліджуваному регіоні (за обраний для дослідження проміжок часу 10.2014–01.2020), яке ми бачимо на графіку. Можливо, це початок нової тенденції до зростання температури повітря для досліджуваної території, що, в свою чергу, зумовить негативні наслідки, пов’язані з цим (наприклад пришвидшення танення льодовиків, зміни структури та сезонності опадів,

зміни у біорізноманітті в даній екосистемі тощо). Також на графіку ми бачимо, що зростання концентрації CO₂ в атмосфері у виділеному для дослідження регіоні дещо повільніше, ніж над деякими іншими регіонами Антарктики, де поріг у 400 ppm концентрації CO₂ було подолано у 2016 році за даними National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, 2016). Таким чином можна сказати про нерівномірність змін кліматичних параметрів (температура повітря) та концентрацій CO₂ зроблених Міжурядовою групою експертів з питань змін клімату, про неоднакову інтенсивність кліматичних змін в різних регіонах Землі (IPCC, 2021). Це, в свою чергу, на думку автора, вимагатиме детального дослідження взаємозв’язків між змінами різних метеорологічних та кліматичних параметрів для кожної з територій, які відрізняються за інтенсивністю впливу на них змін кліматичних показників та їх наслідками, тобто зменшення масштабу досліджуваних територій.

У роботі також були зіставлені дані зміни концентрації CO₂ над Україною та полярних територій, прилеглих до антарктичної станції “Академік Вернадський”, за допомогою супутникової інформації (Рис. 3).

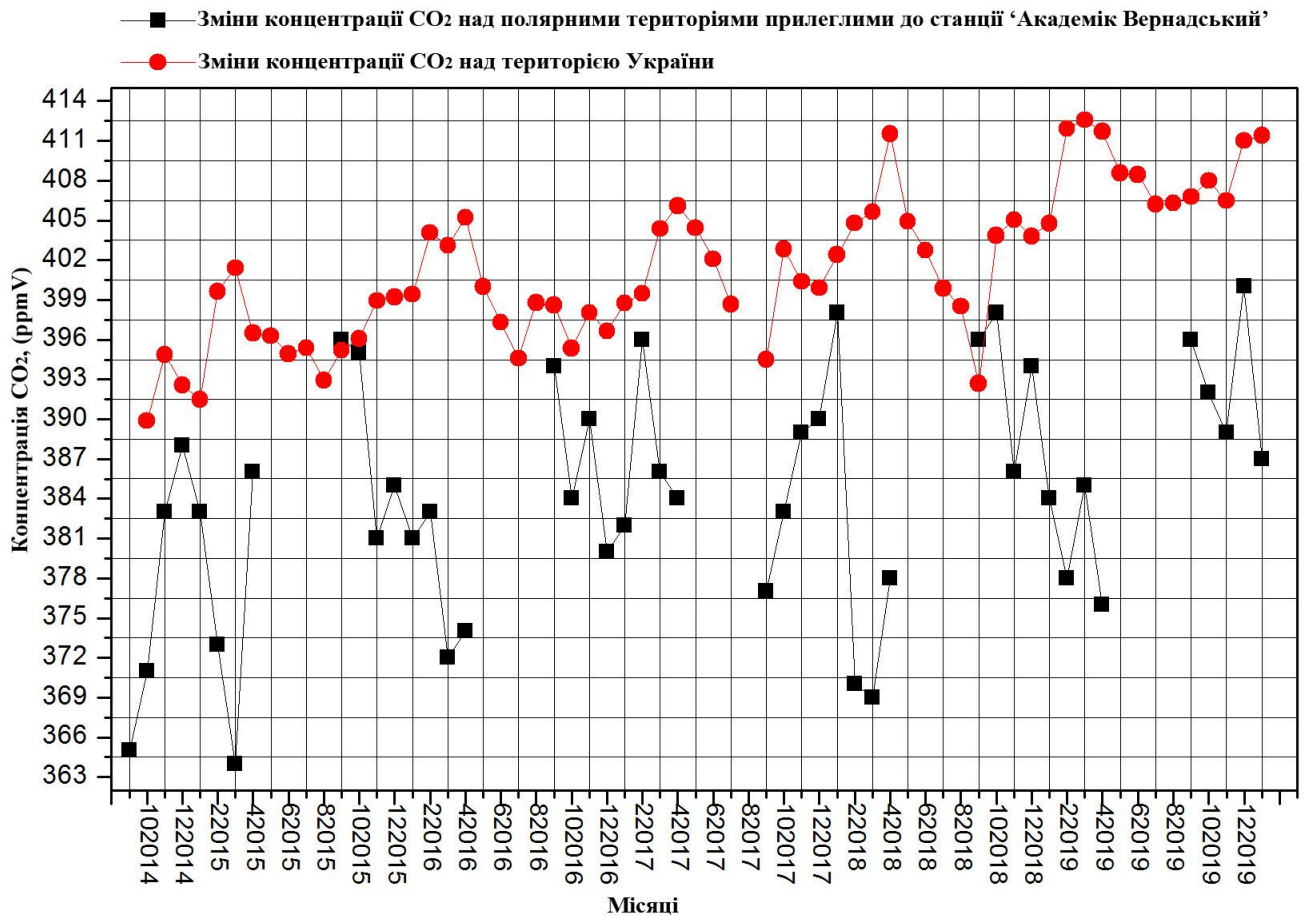


Рис. 3. Порівняння змін концентрації CO₂ над територією, що має прямий антропогенний вплив (Україна), та територією, де антропогенний вплив є мінімізованим (території, прилегли до антарктичної станції “Академік Вернадський”)

Як бачимо з графіка (Рис. 3), концентрації CO₂ над територіями, які мають прямий антропогенний вплив, зростають значно швидшими темпами, ніж над тими територіями, де антропогенний вплив є мінімізованим. Однак, при цьому ми бачимо, що CO₂ стабільно зростає і над територіями, де антропогенний вплив є мінімізованим. Більш того, необхідно відзначити, що згідно із сучасними уявленнями (IPCC, 2021), у Південній частині нашої півкулі йдуть процеси поглинання CO₂ океаном. Це, в свою чергу, є прямим підтвердженням того, що в результаті антропогенного впливу були запущені незворотні процеси, які безпосередньо впливають на кожну територію Землі. З іншого боку, подальші дослідження в цьому напрямі дадуть змогу розділяти антропогенний і природний впливи на процеси, що призводять до підвищення парникового ефекту з більшою ефективністю для оптимізації ризиків, пов'язаних із зміною кліматичних параметрів, з кінцевою метою – розробка оптимальних стратегій подальшого сталого розвитку людства.

Висновки і рекомендації

Результати цієї роботи засвідчили, що такі важливі кліматичні параметри, як температура повітря та концентрація CO₂ змінюються в регіонах, де вплив антропогенного фактора є несуттєвим, що відповідає (IPCC, 2021). Це, в свою чергу, прямо вказує на те, що проведення комплексного, одночасного та узгодженого із супутниковими спостереженнями вимірювання різного роду рядів змінних (концентрації парникових газів, температури повітря, вологості повітря тощо) дасть змогу надалі верифікувати існуючі моделі кліматичних змін (Bao at all, 2018; Van Wessem at all, 2018; Park at all, 2019), калібрувати та вдосконалити наявні, а також розробити нові моделі емісій та поглинання вуглецю, зокрема, метану, що особливо актуально в контексті впливів глобального потепління на полярні зони (Park at all, 2019; Goosse at all, 2015; Hall at all, 2018). Такий підхід дасть змогу оптимізувати контроль за зміною кліматичних параметрів, зокрема температури повітря, а також відкалібрувати розроблені українськими дослідниками за участю автора моделі емісій метану (Kozlova at all, 2019; Popov at all, 2019) та адаптувати їх до застосування в антарктичному регіоні.

А це, в свою чергу, дасть змогу отримати комплекс нових практичних методів оцінювання ризиків окремих типів надзвичайних ситуацій (метеорологічних, гідрологічних та пожеж в природних екосистемах), пов'язаних з ескалацією змін клімату та природних систем вже для території України на основі комплексного використання даних дистанційного зондування Землі про стан наземних систем та атмосфери, а також польових полігонних досліджень, які вже будуть містити в собі нові уявлення про вплив антропогенної та природної складових на кліматичні параметри, що будуть отримані на основі подальших досліджень у цьому напрямі в Антарктиді.

Література

- Договір про Антарктику. 1992. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_224?lang=uk#Text.
- Державна установа Національний антарктичний науковий центр МОН України (НАНЦ) : офіційний веб-сайт. 2021. URL: <http://meteodata.uac.gov.ua>.
- Парниковий ефект і зміни клімату в Україні: оцінки та наслідки / за ред. В. І. Лялька. Київ: Наукова думка, 2015. 283 с. ISBN 978-966-00-1526-5.
- Протокол про охорону навколишнього середовища до Договору про Антарктику. 2005. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_645#Text.
- Bao, T., Zhu, R., Li, X., Ye, W., Cheng, X. (2018). Effects of multiple environmental variables on tundra ecosystem respiration in maritime Antarctica. *Scientific reports*. 8 (1), 12336. Retrieved from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30120277/>.
- Buchwitz, M., de Beek, R., Burrows, J. P., Bovensmann, H., Warneke, T., Notholt, J. ... Schulz, A. (2005). Atmospheric methane and carbon dioxide from SCIAMACHY satellite data: Initial comparison with chemistry and transport models. *Atmos. Chem. Phys.* 5, 94–962. Retrieved from: <https://acp.copernicus.org/articles/5/941/2005/acp-5-941-2005.html>.
- Buchwitz, M., Burrows, J. (2004). Retrieval of CH₄, CO, and CO₂ total column amounts from SCIAMACHY near-infrared nadir spectra: Retrieval algorithm and first results, in: Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere VIII. *Proceedings of SPIE*. 5235, 375–388. Retrieved from: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/5235/1/Retrieval-of-CH4-CO-and-CO2-total-column-amounts-from/10.1117/12.514219.full>.
- Edward, T. Olsen. (2009). *AIRS Version 5 Release Tropospheric CO₂ Products*. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. Retrieved from: https://docserver.gesdisc.eosdis.nasa.gov/repository/Mission/AIRS/3.3_ScienceDataProductDocumentation/3.3.4_ProductGenerationAlgorithms/AIRS-V5-Tropospheric-CO2-Products.pdf/
- Goosse, H. (2015). *Climate System Dynamics and Modelling*. Cambridge: Cambridge University Press. doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9781316018682>
- Crisp, D., Bosch, H., Brown, L., Castano, R., Christi, M., Connor, B., ... Spurr, R. (2010). OCO (Orbiting Carbon Observatory)-2 Level 2 Full Physics Retrieval Algorithm Theoretical Basis, Tech. Rep. OCO D-65488, NASA Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA, version 1.0 Rev 4. Retrieved from: [https://disc.gsfc.nasa.gov/information/documents?title=OCO-2%20Documents,\(last%20access:January2012\)](https://disc.gsfc.nasa.gov/information/documents?title=OCO-2%20Documents,(last%20access:January2012)).
- Crisp, D., Fisher, B. M., O'Dell, C., Frankenberg, C., Basilio, R., Bosch, H. ... Yung, Y. L. (2012). The ACOS XCO₂ retrieval algorithm, Part 2: Global XCO₂ data characterization. *Atmos. Meas. Tech. Discuss.* 5, 1–60. Retrieved from: <https://amt.copernicus.org/articles/5/687/2012/amt-5-687-2012.pdf>.
- Hall, J. L., Newton, R. J., Witts, J. D., Francis, J. E., Hunter, S. J., Jamieson, R. A., & Haywood, A. M. (2018). High benthic methane flux in low sulfate oceans: Evidence from carbon isotopes in Late Cretaceous Antarctic bivalves. *Earth and Planetary Science Letters*. 497, 113–122. Retrieved from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012821X18303534?via%3Dihub>.
- IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., ... Zhou B. (eds.)].

- Cambridge University Press. In Press. Retrieved from: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPC_C_AR6_WGI_Full_Report.pdf.
- Kostyuchenko, Yu. V., Movchan, D., Artemenko, I., Kopachevsky, I. (2016). *Stochastic Approach to Uncertainty Control in Multiphysics Systems: Modeling of Carbon Balance and Analysis of GHG Emissions Using Satellite Tools*. Mathematical Concepts and Applications in Mechanical Engineering and Mechatronics, ed. by Mangey Ram and J. Paulo Davim, IGI Global, USA, 350–378, doi: <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-1639-2.ch017>.
- Kostyuchenko, Yu. V., Yuschenko, M., Elistratova, L., Artemenko, I. (2020). Multi-Model Approach in the Risk Assessment Tasks with Satellite Data Utilization. *Recent Advances in Mathematics for Engineering*, ed. by Mangey Ram, Series: *Mathematical Engineering, Manufacturing, and Management Sciences*. doi: <https://doi.org/10.1201/9780429200304-3>.
- Kozlova, A., Elistratova, L., Kostyuchenko, Yu. V., Apostolov, A., Artemenko, I. (2019) Multiparametric Modeling of Carbon Cycle in Temperate Wetlands for Regional Climate Change Analysis Using Satellite Data. *Advances in Applied Mathematical Analysis and Applications, Mathematical and Engineering Sciences Series*. P. 51–94. ISBN: 9788770221108. Retrieved from: https://www.riverpublishers.com/book_details.php?book_id=750.
- Lyalko, V. I., Kostyuchenko, Yu. V., Movchan, D. M., Sakhatsky, A. I., Shportuk, Z. M., Sibirtseva, O. N. ... Artemenko, I. G. (2012). Estimation of anthropogenic and natural sources of greenhouse gases over Ukraine using remote sensing data. *Earth Systems Change over Eastern Europe*. 3, 93–128.
- NOAA, 2016. Retrieved from: <https://www.noaa.gov/south-pole-last-place-on-earth-to-pass-global-warming-milestone>.
- O'Dell, C. W., Connor, B., Bösch, H., O'Brien, D., Frankenberg, C., Castano, R. ... Wunch, D. (2012). The ACOS CO₂ retrieval algorithm – Part 1: Description and validation against synthetic observations. *Atmos. Meas. Tech.* 5, 99–121. doi: <https://doi.org/10.5194/amt-5-99-2012>.
- O'Dell, C. W., Eldering, A., Wennberg, P. O., Crisp, D., Gunson, M. R., Fisher, B. ... Velazco, V. A. (2018). Improved retrievals of carbon dioxide from Orbiting Carbon Observatory-2 with the version 8 ACOS algorithm, *Atmos. Meas. Tech.* 11, 6539–6576. Retrieved from: <https://doi.org/10.5194/amt-11-6539-2018>.
- Park, W., Latif, M. (2019). Ensemble global warming simulations with idealized Antarctic melt water input. *Climate Dynamics*. 52 (5–6), 3223–3239. Retrieved from: <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4319-8>.
- Popov, M., Stankevich, S., Kostyuchenko, Y., Kozlova, A. (2019). Analysis of Local Climate Variations Using Correlation between Satellite Measurements of Methane Emission and Temperature Trends within Physiographic Regions of Ukraine. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*. 4 (2), 276–288. Retrieved from: https://ijmems.in/assets/23-ijmems-18-277_vol.-4%2c-no.-2%2c-276%e2%80%93288%2c-2019.pdf
- Schneising, O., Buchwitz, M., Burrows, J. P., Bovensmann, H., Bergamaschi P., Peters, W. (2009). Three years of greenhouse gas column-averaged dry air mole fractions retrieved from satellite – Part 2: Methane. *Atmos. Chem. Phys.* 9, 443–465. Retrieved from: <https://acp.copernicus.org/articles/9/443/2009/>.
- South Pacific Nuclear Free Zone Treaty, 1968. Retrieved from: https://www.nonproliferation.org/wp-content/uploads/2013/12/nwzf_treaty_rarotonga_south_pacific.pdf.
- State Institution National Antarctic Scientific Center (NASC of Ukraine). Official website: <http://meteodata.uac.gov.ua>.
- The Antarctic Treaty, 1959. Retrieved from: <https://www.state.gov/antarctic-treaty/>.
- Turner, J., Colwell, S. R., Marshall, G. J., Lachlan-Cope, T. A., Carelton, A. M., Jones P. D. ... Iagovkina, S. (2005). Antarctic climate change during the last 50 years. *International Journal of Climatology*. 25, 279–294. Retrieved from: http://aari.aq/publication/climate_change/climate_change.pdf.
- Turner, J., Gareth J., Marshall, K., Clem, S., Colwell, T., Phillips, S., & Hua Lu. (2019). Antarctic temperature variability and change from station data. *International Journal of Climatology*. Retrieved from: <https://doi.org/10.1002/joc.6378>.
- Van Wessem, J. M., Jan van den Berg, W., Noël, B. P., Van Meijgaard, E., Amory, C., Birnbaum, G. & Ligtenberg, S. R. (2018). Modelling the climate and surface mass balance of polaricesheetsusing RACMO2: Part 2: Antarctica (1979–2016). *Cryosphere*. 12 (4), 1479–1498.

References

- Bao, T., Zhu, R., Li, X., Ye, W., Cheng, X. (2018). Effects of multiple environmental variables on tundra ecosystem respiration in maritime Antarctica. *Scientific reports*. 8 (1), 12336. Retrieved from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30120277/>.
- Buchwitz, M., de Beek, R., Burrows, J. P., Bovensmann, H., Warneke, T., Notholt, J. ... Schulz, A. (2005). Atmospheric methane and carbon dioxide from SCIAMACHY satellite data: Initial comparison with chemistry and transport models. *Atmos. Chem. Phys.* 5, 94–962. Retrieved from: <https://acp.copernicus.org/articles/5/941/2005/acp-5-941-2005.html>.
- Buchwitz, M., Burrows, J. (2004). Retrieval of CH₄, CO, and CO₂ total column amounts from SCIAMACHY near-infrared nadir spectra: Retrieval algorithm and first results, in: *Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere VIII. Proceedings of SPIE*. 5235, 375–388. Retrieved from: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/5235/1/Retrieval-of-CH4-CO-and-CO2-total-column-amounts-from/10.1117/12.514219.full>.
- Dohovir pro Antarktyku, 1992: Retrieved from: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_224?lang=uk#Text. (in Ukrainian).
- Edward, T. Olsen. (2009). *AIRS Version 5 Release Tropospheric CO₂ Products*. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. Retrieved from: https://docserver.gesdisc.eosdis.nasa.gov/repository/Mission/AIRS/3.3_ScienceDataProductDocumentation/3.3.4_ProductGenerationAlgorithms/AIRS-V5-Tropospheric-CO2-Products.pdf/
- Goosse, H. (2015). *Climate System Dynamics and Modelling*. Cambridge: Cambridge University Press. doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9781316018682>
- Crisp, D., Bosch, H., Brown, L., Castano, R., Christi, M., Connor, B., ... Spurr, R. (2010). OCO (Orbiting Carbon Observatory)-2 Level 2 Full Physics Retrieval Algorithm Theoretical Basis, Tech. Rep. OCO D-65488, NASA Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA, version 1.0 Rev 4. Retrieved from: <https://disc.gsfc.nasa.gov/information/documents?title=OCO-2%20Documents>, (last access: January 2012).
- Crisp, D., Fisher, B. M., O'Dell, C., Frankenberg, C., Basilio, R., Bosch, H. ... Yung, Y. L. (2012). The ACOS XCO₂ retrieval algorithm, Part 2: Global XCO₂ data characterization. *Atmos. Meas. Tech. Discuss.* 5, 1–60. Retrieved from: <https://amt.copernicus.org/articles/5/687/2012/amt-5-687-2012.pdf>.
- Hall, J. L., Newton, R. J., Witts, J. D., Francis, J. E., Hunter, S. J., Jamieson, R. A., & Haywood, A. M. (2018). High benthic

- methane flux in low sulfate oceans: Evidence from carbon isotopes in Late Cretaceous Antarctic bivalves. *Earth and Planetary Science Letters*. 497, 113–122. Retrieved from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012821X18303534?via%3DIihub>.
- IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., ... Zhou B. (eds.)]. Cambridge University Press. In Press. Retrieved from: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf.
- Kostyuchenko, Yu. V., Movchan, D., Artemenko, I., Kopachevsky, I. (2016). *Stochastic Approach to Uncertainty Control in Multiphysics Systems: Modeling of Carbon Balance and Analysis of GHG Emissions Using Satellite Tools*. Mathematical Concepts and Applications in Mechanical Engineering and Mechatronics, ed. by Mangey Ram and J. Paulo Davim, IGI Global, USA, 350–378, doi: <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-1639-2.ch017>.
- Kostyuchenko, Yu. V., Yuschenko, M., Elistratova, L., Artemenko, I. (2020). Multi-Model Approach in the Risk Assessment Tasks with Satellite Data Utilization. *Recent Advances in Mathematics for Engineering*, ed. by Mangey Ram, Series: *Mathematical Engineering, Manufacturing, and Management Sciences*. doi: <https://doi.org/10.1201/9780429200304-3>.
- Kozlova, A., Elistratova, L., Kostyuchenko, Yu. V., Apostolov, A., Artemenko, I. (2019) Multiparametric Modeling of Carbon Cycle in Temperate Wetlands for Regional Climate Change Analysis Using Satellite Data. *Advances in Applied Mathematical Analysis and Applications, Mathematical and Engineering Sciences Series*. P. 51–94. ISBN: 9788770221108. Retrieved from: <https://www.riverpublishers>.
- Lyalko, V. I. (Ed.). (2015). *Greenhouse effect and climate changes in Ukraine*. Kyiv: Naukova dumka. ISBN 978-966-00-1526-5. (in Ukrainian).
- Lyalko, V. I., Kostyuchenko, Yu. V., Movchan, D. M., Sakhatsky, A. I., Shportuk, Z. M., Sibirtseva, O. N. ... Artemenko, I. G. (2012). Estimation of anthropogenic and natural sources of greenhouse gases over Ukraine using remote sensing data. *Earth Systems Change over Eastern Europe*. 3, 93–128.
- NOAA, 2016. Retrieved from: <https://www.noaa.gov/south-pole-last-place-on-earth-to-pass-global-warming-milestone>.
- O'Dell, C. W., Connor, B., Bösch, H., O'Brien, D., Frankenberg, C., Castano, R. ... Wunch, D. (2012). The ACOS CO₂ retrieval algorithm – Part 1: Description and validation against synthetic observations. *Atmos. Meas. Tech.* 5, 99–121. doi: <https://doi.org/10.5194/amt-5-99-2012>.
- O'Dell, C. W., Eldering, A., Wennberg, P. O., Crisp, D., Gunson, M. R., Fisher, B. ... Velasco, V. A. (2018). Improved retrievals of carbon dioxide from Orbiting Carbon Observatory-2 with the version 8 ACOS algorithm. *Atmos. Meas. Tech.* 11, 6539–6576. Retrieved from: <https://doi.org/10.5194/amt-11-6539-2018>.
- Park, W., Latif, M. (2019). Ensemble global warming simulations with idealized Antarctic melt water input. *Climate Dynamics*. 52 (5–6), 3223–3239. Retrieved from: <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4319-8>.
- Popov, M., Stankevich, S., Kostyuchenko, Y., Kozlova, A. (2019). Analysis of Local Climate Variations Using Correlation between Satellite Measurements of Methane Emission and Temperature Trends within Physiographic Regions of Ukraine. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*. 4 (2), 276–288. Retrieved from: https://ijmms.in/assets/23-ijmms-18-277_vol.-4%2c-no.-2%2c-276%e2%80%93288%2c-2019.pdf
- Протокол про окhoronu navkolyshnoho seredovyshcha do Dohovoru pro Antarktyku, 2005: Retrieved from: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_645#Text. (in Ukrainian).
- Schneising, O., Buchwitz, M., Burrows, J. P., Bovensmann, H., Bergamaschi P., Peters, W. (2009). Three years of greenhouse gas column-averaged dry air mole fractions retrieved from satellite – Part 2: Methane. *Atmos. Chem. Phys.* 9, 443–465. <https://acp.copernicus.org/articles/9/443/2009/>.
- South Pacific Nuclear Free Zone Treaty, 1968. Retrieved from: https://www.nonproliferation.org/wp-content/uploads/2013/12/nwftz_treaty_rarotonga_south_pacific.pdf.
- State Institution National Antarctic Scientific Center (NASC of Ukraine). Official website: <http://meteodata.uac.gov.ua>.
- The Antarctic Treaty, 1959. Retrieved from: <https://www.state.gov/antarctic-treaty/>.
- Turner, J., Colwell, S. R., Marshall, G. J., Lachlan-Cope, T. A., Carelton, A. M., Jones P. D. ... Iagovkina, S. (2005). Antarctic climate change during the last 50 years. *International Journal of Climatology*. 25, 279–294. Retrieved from: http://aari.aq/publication/climate_change/climate_change.pdf.
- Turner, J., Gareth J., Marshall, K., Clem, S., Colwell, T., Phillips, S., & Hua Lu. (2019). Antarctic temperature variability and change from station data. *International Journal of Climatology*. Retrieved from: <https://doi.org/10.1002/joc.6378>.
- Van Wessel, J. M., Jan van den Berg, W., Noël, B. P., Van Meijgaard, E., Amory, C., Birnbaum, G. & Ligtenberg, S. R. (2018). Modelling the climate and surface mass balance of polar ice sheets using RACMO2: Part 2: Antarctica (1979–2016). *Cryosphere*. 12 (4), 1479–1498.

РЕЗУЛЬТАТ СРАВНИТЕЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ ОСО-2 ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ИЗМЕНЕНИЯМИ КОНЦЕНТРАЦИИ СО₂ В АТМОСФЕРЕ И ТЕМПЕРАТУРОЙ ВОЗДУХА В РАЙОНЕ АРГЕНТИНСКИХ ОСТРОВОВ И УКРАИНЕ

І. Г. Артеменко

Государственное учреждение “Научный центр аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины” 0154, ул. Олеса Гончара, 55-Б, Киев, Украина

В работе получены результаты сравнительного анализа данных об изменениях концентрации СО₂ в атмосфере над полярными территориями, прилегающими к антарктической станции «Академик Вернадский» (размер исследуемой территории 1.5°×1.5°, или примерно 166 км на 75 км), на основе измерений спутника Orbiting Carbon Observatory (OCO-2) и температуры воздуха, полученные на основе наземных метеорологических наблюдений на станции «Академик Вернадский» за 2014–2020 годы. На графике можно увидеть, что температура воздуха и концентрация СО₂ в атмосфере над изучаемой территорией имеют тенденцию к медленному росту. Кроме того, анализ вышеуказанных результатов показал, что таким образом можно определить интегральные тенденции влияния содержания парниковых газов в атмосфере на температуру воздуха. Проведен сравнительный анализ данных об изменениях концентрации СО₂ по данным OCO-2 между регионами, где есть прямое антропогенное влияние (территория Украины) и регионом, где антропогенное влияние минимизировано (территории, прилегающие к антарктической станции «Академик Вернадский») за 2014–2020 годы. Было обнаружено, что

концентрації CO₂ над територіями, где єть пряме антропогенне впливє, вєзрастають значительнє бєльшє бєстрєми темпами, чем над теми територіями, где така нагрукка минимизирована. При этом мы видим, что концентрации CO₂ имеют тенденцию роста в обоих случаях. Основываясь на полученных результатах, было определено, что проведение комплексного, одновременного и согласованного со спутниковыми наблюдениями измерения разного рода переменных, позволит оптимизировать информацию об изменениях климатических параметров (температура воздуха) в полярных зонах.
Ключевые слова: спутниковые данные, климатические изменения, температура воздуха, концентрации CO₂, полярные зоны, антропогенное воздействие.

THE RESULT OF THE COMPARATIVE USE OF OCO-2 INFORMATION TO FIND THE RELATIONSHIP BETWEEN CHANGES IN THE ATMOSPHERIC CONCENTRATION OF CO₂ AND AIR TEMPERATURE IN THE ARGENTINE ISLANDS AND UKRAINE

I. G. Artemenko

Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Science of the National Academy of Sciences of Ukraine, 55-B, Oles Gonchar str., Kyiv 01054, Ukraine

The results of comparative analysis of data of data of changes CO₂ concentrations in the atmosphere over the polar regions adjacent to the "Akademik Vernadsky" station (the size of the study area 1.5° × 1.5°, or approximately 166 km by 75 km) were obtained satellite Orbiting Carbon Observatory (OCO-2) and air temperature according to ground meteorological observations at the "Akademik Vernadsky" station for 2014-2020. From obtained graph, we can see that the air temperature and CO₂ concentration in the atmosphere over the study area tend to increase slowly. In addition, the analysis of the above results showed that in this way it is possible to determine the integrated trends in the impact of greenhouse gas content in the atmosphere on air temperature. A comparative analysis of data of data of changes CO₂ concentrations according to OCO-2 between regions where there is a direct anthropogenic impact (Ukraine) and the region where anthropogenic impact is minimized (areas adjacent to the "Akademik Vernadsky" station) for 2014-2020. It was found that CO₂ concentrations over areas with direct anthropogenic impact are growing much faster than over areas where there is no such impact at all. However, we see that CO₂ concentrations tend to increase in both cases. Based on the obtained results, it was determined that conducting a comprehensive, simultaneous and consistent with satellite observations measurements of various series of variables, will provide an opportunity to optimize information of changes in climatic parameters (air temperature) in the polar regions.

Key words: satellite data, climate change, air temperature, CO₂ concentrations, polar zones, anthropogenic impact.

Автор висловлює щирє подяку фахівцям Державної установи Національний антарктичний науковий центр МОН України за можливість використати в роботі дані про зміни температури повітря за наземними метеорологічними спостереженнями на станції «Академік Вернадський».

Автор выражает искреннюю благодарность специалистам Государственного учреждения Национальный антарктический научный центр Министерства образования и науки Украины за возможность использовать в работе данные об изменениях температуры воздуха по наземным метеорологическим наблюдениям на станции «Академик Вернадский».

The author expresses his sincere gratitude to the specialists of the State Institution National Antarctic Scientific Center of the Ministry of Education and Science of Ukraine for the opportunity to use in the work data on air temperature changes from ground-based meteorological observations at the "Akademik Vernadsky" station.

Рукопис статті отримано 01.12.2021