

УДК: 528.88+551.502.6:(528.837:629.783):551.588.74](100)

© М.В. Ваколюк, провідний інженер відділу

ДУ «Науковий Центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України»

## **ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ CO<sub>2</sub> В АТМОСФЕРІ СУПУТНИКОМ GOSAT ТА ДОСЛІДНИМИ ВЕЖАМИ**

*У статті відображено аналіз результатів вимірів концентрацій CO<sub>2</sub> в атмосфері, отриманих за допомогою дослідних веж, розташованих в різних країнах світу, та вимірів, здійснених супутником GOSAT (Ibuki). Результати вимірів показують річне коливання рівня концентрації CO<sub>2</sub> в атмосфері та її зростання протягом дослідних періодів. Як приклад розглянуто виміри на територію розміщення станції Хеджхатсол (Угорицина). Отримана порівняльна оцінка вимірів парникового газу, здійснених на даній станції моніторингу за допомогою супутника GOSAT (Ibuki) та дослідної вежі для періоду з січня по вересень 2009 року.*

**Ключові слова:** концентрація CO<sub>2</sub> в атмосфері, GOSAT, FLUXNET, Hegyhatsal.

### **Вступ**

Величина концентрації CO<sub>2</sub> в атмосфері, як одного з чинників кліматичних змін на Землі, вимагає постійного і максимально точного контролю. Кліматичні прогнози, дослідження рослинного покриву, програми розвитку сільського господарства, адаптаційні заходи потребують включення до своїх моделей величини концентрації CO<sub>2</sub> в атмосфері. Парниковий газ CO<sub>2</sub>, як «серцевина» Кіотського протоколу, привертає багатьох науковців світу до його дослідження та вивчення. Відкритим є питання вимірів його концентрації в повітряних масах.

Одним із джерел інформації про вміст величини CO<sub>2</sub> в атмосферному повітрі в різних країнах Землі є наземні виміри, здійснені в межах проекту FLUXNET. Доповненням до наземних вимірів величини концентрації CO<sub>2</sub> в атмосферному повітрі, можуть виступати усереднені стовбцеві виміри молярних фракцій CO<sub>2</sub> (mole fractions), здійснені спектрометром SCIAMACHY космічного супутника Європейського космічного агентства ENVISAT та сенсором TANSO-FTS супутника GOSAT (Ibuki) Японського космічного агентства.

Враховуючи те, що сьогодні супутник GOSAT (Greenhouse Gases Observing SATellite) є єдиним космічним апаратом, що здійснює виміри стовбцевої концентрації CO<sub>2</sub>, а також те, що у 2017 році планується продовження його місії супутником GOSAT-2, доцільно вивчати та порівнювати його можливості та результати вимірів з іншими методами.

### **Виміри CO<sub>2</sub> в межах проекту FLUXNET**

Для здійснення вимірів концентрацій CO<sub>2</sub> в атмосфері та дослідження екосистем різних територій Землі був розпочатий проект FLUXNET, що являє собою глобальну мережу регіональних мереж мікрометеорологічних наземних станцій, які здійснюють виміри потоків атмосферних величин, використовуючи метод мікрохвильових пульсацій, для оцінки обміну потоків CO<sub>2</sub> між атмосферою та рослинним покривом [1, 2].

У проект FLUXNET входять підпроекти, які розподіляються за територією дослідження. Зокрема, виділяють проекти, що розташовані на території Африки – КарбоАфрика (CarboAfrica); Європи – КарбоЄвропа-кластер, КарбоЄвропа IP (CarboEurope-cluster, CarboEurope IP); Канади – Флакнет-Канада (Fluxnet-Canada); дослідження на території Північної Америки, Центральної Америки та Південної Америки об'єднує проект АмериФлак (AmeriFlux); дослідження на території Китаю, Кореї, Таїланду, Японії та інших країн Азії об'єднує проект АзіяФлак (AsiaFlux); дослідження системи земного вуглецю на території Сибіру – TCOSS (Terrestrial Carbon Observatio System Siberia); дослідження на території Австралії та Нової Зеландії об'єднує проект ОзФлак (OzFlux).

Вищезазначені проекти спрямовані на кількісний аналіз, оцінку та прогнозування циклу вуглецю та газів; вимір потоків вуглецю, водяної пари, енергії для різних типів наземних екосистем; збір, узагальнення та опублікування результатів досліджень; кількісну оцінку величин вуглецевих джерел/стоків та їх просторову і часову мінливість. Також результати вимірів використовуються для валідації результатів дистанційного зондування – чистої первинної продуктивності, випаровування та енергетичної абсорбції фітоценозами [2]. Цілі та завдання проектів на різних дослідних станціях відрізняються.

Серед рослинного покриву на території розміщення дослідних веж проекту FLUXNET є хвойні та листяні (листопадні та вічнозелені) ліси помірної зони, тропічні та бореальні ліси, сільськогосподарські культури, луки, чагарники, болота, тундри та території із цілорічним сніговим покривом [2]. Вежі (станції) розміщені на п'яти континентах із широтним розподілом діапазону від 82°пн.ш. до 30°пд.ш..

В кожному дослідному пункті встановлена спеціально обладнана вежа або щогла з комплектами апаратури для проведення вимірів метеорологічних параметрів та показників енерго- і масообміну. На деяких станціях проби повітря беруть за допомогою спеціально обладнаних літаків (наприклад на станції Хеджіхатсол, Угорщина).

Для реєстрації потоків CO<sub>2</sub> використовують метод мікрохвильових пульсацій (eddy covariance method). Даний метод базується на статистичному вимірюванні кореляції між флуктуаціями двох різних величин. Коваріація визначає ступінь, з яким обидві величини змінюються разом [3]. Завдяки вежам оцінюють вертикальний рух імпульсу, теплоти, води, потоків CO<sub>2</sub> в атмосфері.

Реєстрація високочастотних коваріацій між вертикальною складовою швидкості вітру та концентрацією вуглекислого газу, що переноситься у граничному атмосферному шарі завдяки турбулентності, дозволяє оцінити вуглецевий баланс наземної екосистеми, прийнятий

за домінуючий. Метод вихрової коваріації використовують для оцінювання атмосферних потоків CO<sub>2</sub>, що переносяться в атмосферному граничному шарі у вертикальному напрямку [3].

### **Результати вимірів**

Результати вимірів на дослідних станціях наведені в базах даних FLUXNET, де міститься характеристика близько 545 веж, з яких на 411 повністю або частково проводяться дослідження [4]. База даних включає результати вимірів за всіма діючими та завершеними проектами. Дані надаються безкоштовно членам регіональних мереж з усього світу та зацікавленим особам для здійснення наукових досліджень.

По дослідних станціях на офіційних сайтах країн-учасниць проекту FLUXNET наводиться наступна інформація: назва, код та країна розміщення станції; географічні координати станції; статус активності; період та результати вимірів; тип клімату; ландшафтні характеристики; висота вежі; домінуючий видовий склад рослинного покриву та його класифікація; вік насаджень; загальна інформація та історія досліджень на станції; тип вегетації; закріплена організація-дослідник; перелік опублікованих праць за результатами вимірів на даній вежі та інші характеристики.

Щоб побачити результати виміру величин концентрації парникового газу CO<sub>2</sub> над територіями з різним рослинним покривом та кліматичними умовами, розглянемо результати виміру на станціях в різних географічно-кліматичних зонах.

На основі даних [5–9] автором складено таблицю 1, в якій наведена характеристика станцій виміру хімічних елементів, а на рис. 1 на основі даних [5] наведені результати наземних вимірів на наступних станціях: а – Алерт (Канада); б – Каспровий Верх (Польща); в – Паллас (Фінляндія); г, г – Біясток (Польща) на висоті 5 та 300 м відповідно; д, е, є, ж – Хеджіхатсол (Угорщина) на висоті 10, 48, 82 та 115 м відповідно. Методи вимірів на станціях відображені в табл. 1 та на рис. 2.

Як видно з рис. 1, незалежно від території розміщення станції, методу взяття проб та типу рослинного покриву, концентрація CO<sub>2</sub> в атмосферному повітрі зростає.

Так, на станції Алерт (рис. 1, а), яка знаходиться на території Канади з переважанням арктичного клімату та цілорічним сніговим покривом, за 6 років здійснення вимірів середня концентрація CO<sub>2</sub> в атмосферному повітрі зросла з 362 до 371 ppm. Хоча рослинність відсутня повністю, спостерігається подібність характеру річної циклічності коливання величини CO<sub>2</sub> в атмосферному повітрі із вегетаційним сезоном. Результати вимірів по канадській станції є показовим прикладом результату транскордонного масопереносу речовин атмосферними потоками.

Виміри приземної концентрації CO<sub>2</sub> на станції Каспровий Верх (Польща) (рис. 1, б), яка знаходиться в західних Татрах, на висоті 1987 м над рівнем моря, вказують на їх ріст протягом часового ряду 1997–2010 рр. Коливання концентрації CO<sub>2</sub> в приземному шарі протягом 2007–2010 років сягало меж 390–402 ppm.

Таблиця 1 – Характеристика станцій

Назва станції, країна знаходження	Алерт (Alert), Канада	Каспровий Верх (Kasprowy Wierch), Польща	Паллас (Pallas), Фінляндія	Білясток (Bialystok), Польща	Хеджіхатсол (Hegyhatsal 1, Hegyhatsal 2), Угорщина
Дослідна установа	Керівний комітет проекту Карбо Європа-IP	Гірничо-металургійна академія ім. Станіслава Сташица в м. Кракові (Польща)	Метеорологічний інститут Фінляндії	Інститут біогеохімії Макса Планка (Німеччина)	Університет Етвоша Лорана (Угорщина)
Координати: (Lat, Long)	82.5000, 63.5167	49.2333, 19.9333	67.9667, 24.1167	53.2294, 23.0128	46.9559, 16.6520, 46.9558, 16.6556
ГТОРО30 <sup>1</sup> висота; висота здійснення вимірів, (взяття проб), м	210; 0	1987; 0	560; 5	180; 5, 30, 90, 180, 300	248; 117 та 243; 10, 48, 82, 115
Виміри, що здійснювалися чи здійснюються	безперервні виміри CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO, <sup>222</sup> Rn на станціях приземного рівня; відбір проб CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO, N <sub>2</sub> O, SF <sub>6</sub> , <sup>13</sup> CO <sub>2</sub> , CO <sup>18</sup> O за допомогою колб	безперервні виміри CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , SF <sub>6</sub> на станціях приземного рівня	безперервні виміри CO <sub>2</sub> , <sup>222</sup> Rn на станціях приземного рівня	безперервні виміри CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO, N <sub>2</sub> O, SF <sub>6</sub> , O <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> на висотних вежах; відбір проб CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO, N <sub>2</sub> O, SF <sub>6</sub> , <sup>13</sup> CO <sub>2</sub> , CO <sup>18</sup> O за допомогою колб	безперервні виміри CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO, N <sub>2</sub> O, SF <sub>6</sub> на висотних вежах; безперервні виміри CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO, N <sub>2</sub> O, SF <sub>6</sub> , <sup>13</sup> CO <sub>2</sub> , CO <sup>18</sup> O на станціях приземного рівня; виміри вертикальних профілів CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO, N <sub>2</sub> O, SF <sub>6</sub> , <sup>13</sup> CO <sub>2</sub> , CO <sup>18</sup> O за допомогою літака
Кьопен-Гейгер класифікація клімату (KГСС) <sup>2</sup>	ЕТ- північна тундра	Сfb-теплий та помірний клімат без посушливого сезону з вологим теплим літом	Dfc- холодний клімат, без посушливих сезонів з холодним літом	Сfb-теплий та помірний клімат без посушливого сезону з вологим теплим літом	Сfb-теплий та помірний клімат без посушливого сезону з вологим теплим літом
Тип рослинного покриву	рослинність відсутня, зона цілорічного снігового покриву	висока гірська місцевість, трав'яний покрив	гірська місцевість, трав'яний покрив, подекуди хвойний ліс	невелика ділянка трав'яного покриву оточена хвойним лісом	сільськогосподарські угіддя з щорічною зміною сільськогосподарських та кормових культур, на заході оточена лісовими ділянками

<sup>1</sup> ГТОРО30 (Global 30-Arc-Second digital elevation model) являє собою цифрову модель рельєфу для всього світу з горизонтальним кроком сітки 30 кутових секунд (приблизно 1 км), розроблену Геологічною Службою США.

<sup>2</sup> КГСС – класифікація клімату за В. Кьопліном та Р. Гейгером [10].

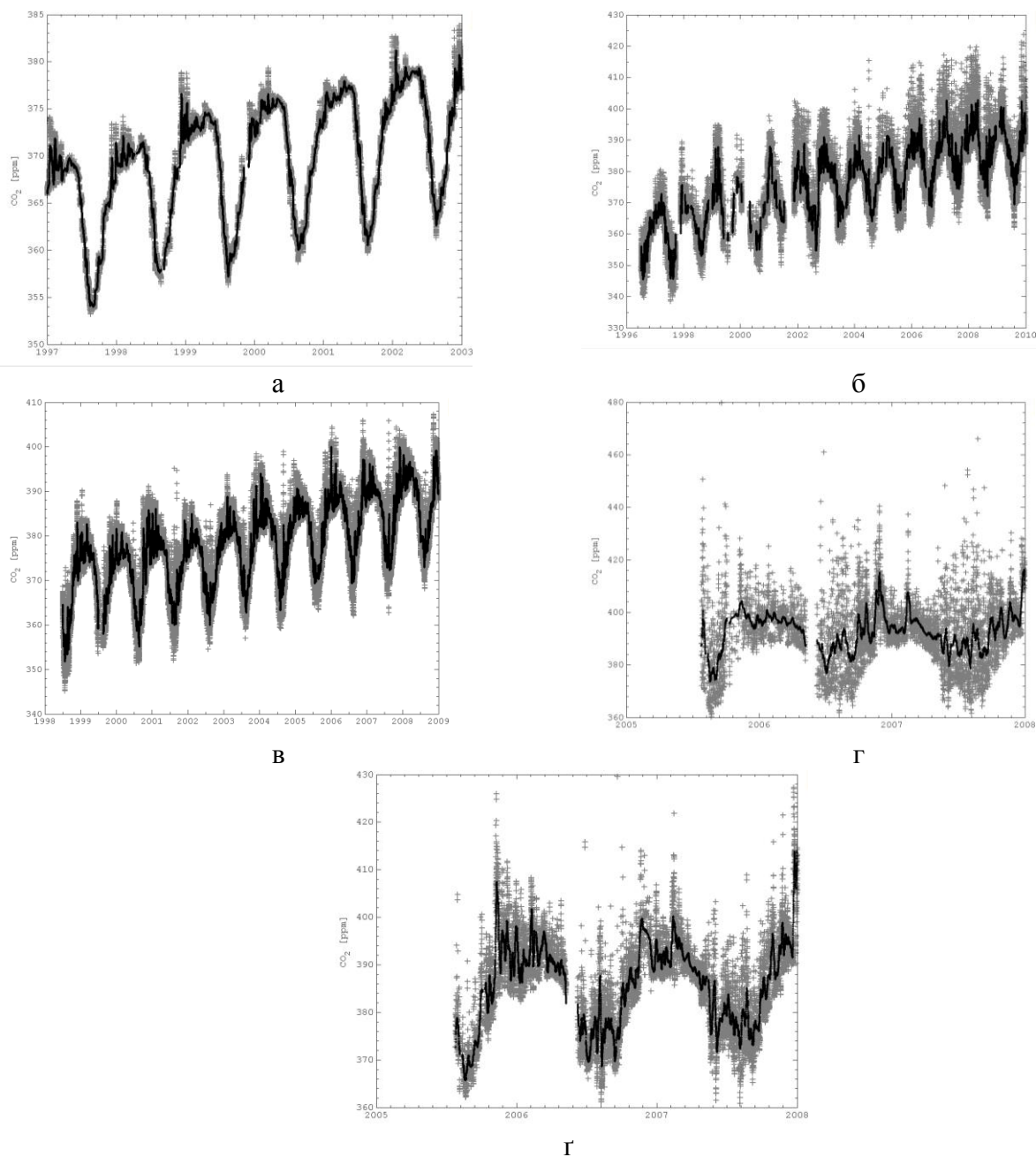


Рис. 1 – Результати вимірів на станціях: а – Алерт (Канада), 0 м; б – Каспровий Верх (Польща), 0 м; в – Паллас (Фінляндія), 5 м; г, Г – Біясток (Польща), 5 та 300 м відповідно [5]

На станції Біясток (Польща) виміри здійснюються на висоті 5, 30, 90, 180 та 300 м. На рис. 1 (г, Г) показано результати вимірів лише на висотах 5 м та 300 м над рівнем земної поверхні. Часовий ряд, який представлений на рис. 1 (г, Г), охоплює відносно короткий період – 25 липня 2005 р. – кінець 2008 року, та показує відмінність в концентрації на різних висотах.

На рис. 1 (д, е, є, ж) показано результати вимірів на станції Хеджіхатсол (Угорщина) на висотах 10, 48, 82 та 115 м відповідно. Станція розміщена серед сільськогосподарських угідь. На всіх висотах спостерігається ріст концентрації діоксиду вуглецю в повітрі.

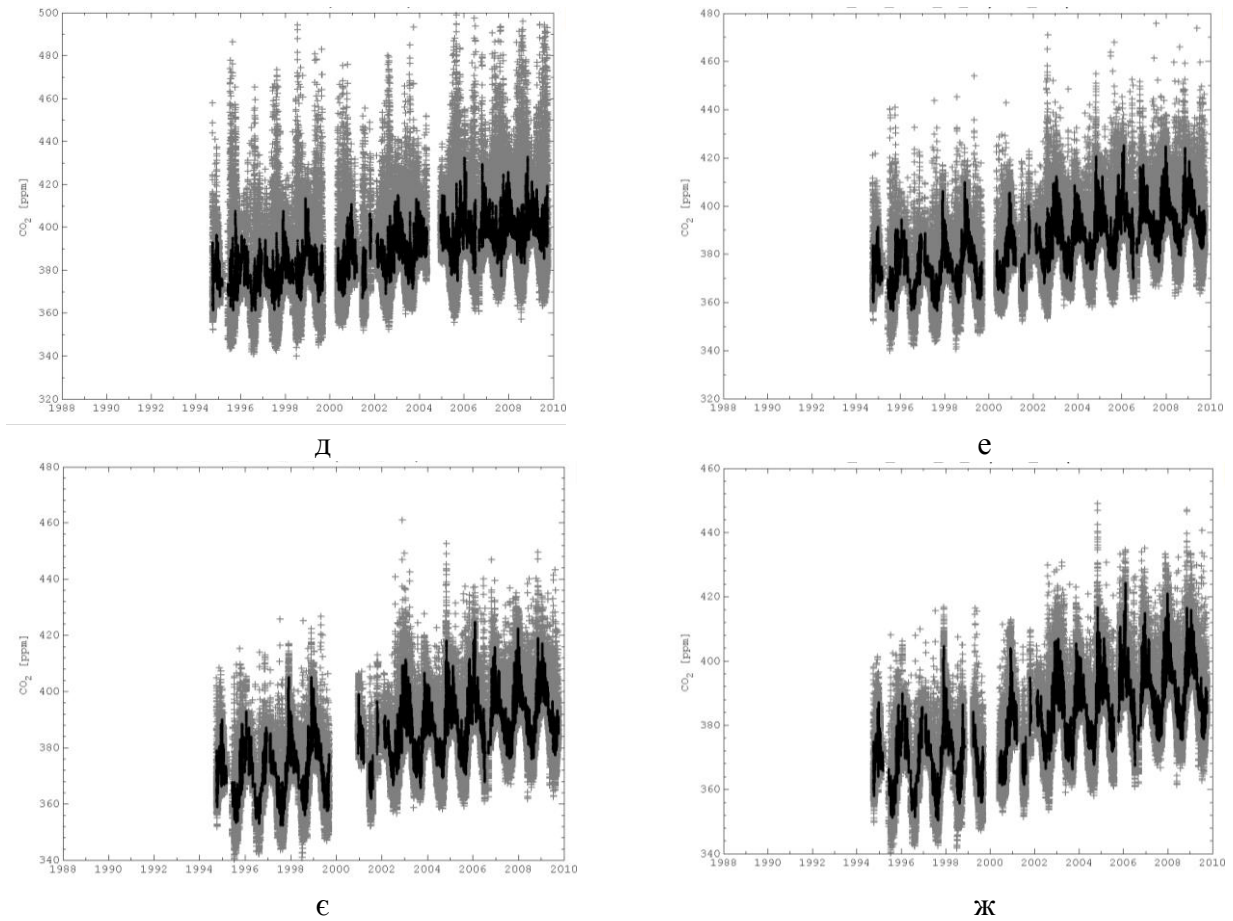


Рис. 1( д, е, є, ж) – Хеджіхатсол (Угорщина), 10, 48, 82 та 115 м відповідно [5]

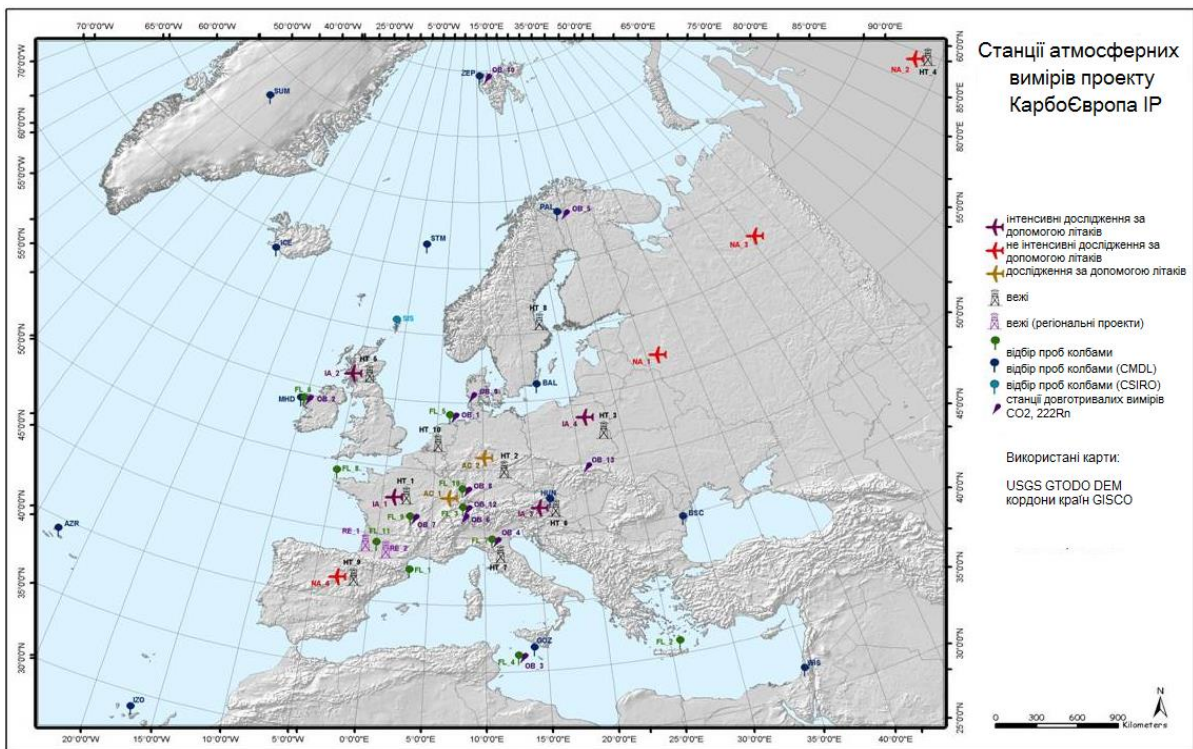


Рис. 2 – Мережа станцій проекту КарбоЄвропа ІР з характеристикою типів вимірів [11]

Більш детально розглянемо добове коливання парникового газу в атмосферному повітрі на станції Хеджіхатсол. Так, на основі бази даних [5] в таблиці 2 та на рис. 3 відображено результати вимірів, здійснених на станції Хеджіхатсол станом на 16 липня 2009 року з періодом виміру в 1 годину. Температура повітря 16 липня 2009 року становила на 02:00 годину ночі 18,5 °С, на 08:00 – 21,6 °С, на 14:00 – 29,6 °С та на 20,00 – 28,1 °С, без опадів [12].

**Таблиця 2 – Результати вимірів, здійснених на станції Хеджіхатсол на 16 липня 2009 року**

Година доби	Концентрація CO <sub>2</sub> (ppm) на висоті 10 м	Концентрація CO <sub>2</sub> (ppm) на висоті 48 м	Концентрація CO <sub>2</sub> (ppm) на висоті 82 м	Концентрація CO <sub>2</sub> (ppm) на висоті 115 м	Різниця концентрації CO <sub>2</sub> (ppm) на висоті 10 м та 115 м
00:00	412,590	399,263	395,023	394,246	18,344
01:00	420,355	409,035	400,130	396,340	24,015
02:00	444,024	407,901	398,127	394,613	49,411
03:00	431,430	407,661	398,554	393,421	38,009
04:00	436,991	410,454	399,575	394,253	42,738
05:00	444,455	429,852	414,468	401,338	43,117
06:00	429,400	427,756	414,006	403,277	26,123
07:00	405,651	407,051	407,170	404,096	1,555
08:00	387,447	389,460	389,857	390,400	-2,953
09:00	382,119	384,480	384,790	385,354	-3,235
10:00	381,083	383,186	383,783	384,079	-2,996
11:00	380,293	383,211	383,271	383,356	-3,063
12:00	378,607	381,421	381,633	382,274	-3,667
13:00	377,606	380,284	380,911	380,987	-3,381
14:00	378,330	381,649	381,489	381,731	-3,401
15:00	379,499	382,571	382,506	382,831	-3,332
16:00	381,157	383,783	383,950	383,844	-2,687
17:00	381,947	383,019	383,114	383,199	-1,252
18:00	384,634	383,387	383,063	383,081	1,553
19:00	399,969	385,310	384,201	384,039	15,93
20:00	407,863	386,007	385,353	385,069	22,794
21:00	440,164	388,357	386,899	386,180	53,984
22:00	457,517	391,283	386,500	385,279	72,238
23:00	442,517	391,056	385,033	383,901	58,616

Як видно з рис. 3, найбільші коливання концентрації CO<sub>2</sub> в атмосфері спостерігаються на висоті 10 м від земної поверхні, і чим вище від земної поверхні, тим краще концентрація врівноважується.

Різниця концентрації у висотах складає до 72 ppm для 22:00. Також видно вплив фітоценозів на величину парникового газу, яка в період фотосинтетичної діяльності рослинного покриву має мінімальні величини, а вночі – при призупиненні фотосинтезу – максимальні. Так, у світлу пору доби (з 8:00 до 18:00) концентрація знаходиться в межах 377–390 ppm, а в темну пору доби концентрація зростає до 457 ppm (на 22:00 на висоті 10 м). Ця закономірність простежується на всіх висотах здійснення вимірів (рис. 3).

Час доби, коли здійснювалися виміри, необхідно враховувати при роботі із супутниковими вимірами концентрації CO<sub>2</sub> в повітрі для вирішення різного роду завдань, зокрема для аналізу реакції рослинного покриву на зміну концентрації CO<sub>2</sub>.

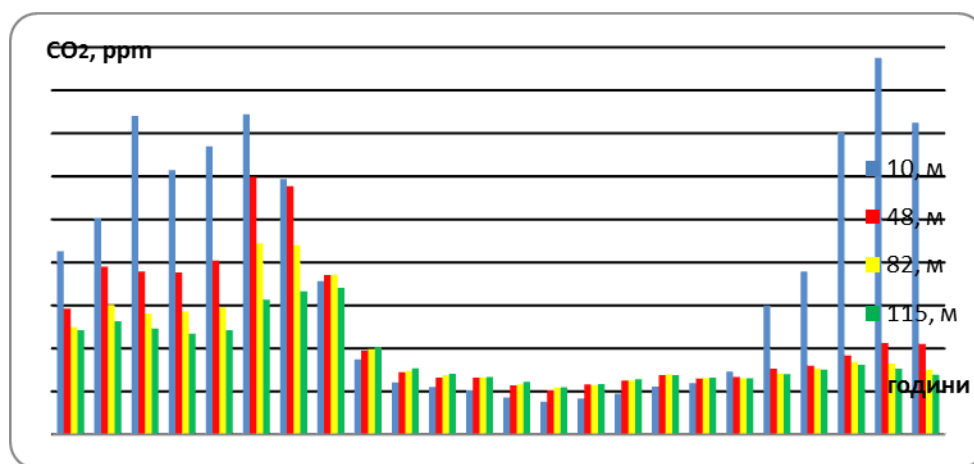


Рис. 3 – Величина концентрації CO<sub>2</sub> в атмосфері на станції Хеджіхатсол (Угорщина) на 16 липня 2009 року

Незважаючи на значне фінансування проектів, в межах яких здійснювалися виміри концентрації CO<sub>2</sub> в атмосферному повітрі, період здійснення вимірів в одну годину, якісне обладнання та сучасне забезпечення дослідних станцій, результати оцінки відсутності даних, що проведена автором даної публікації, на основі бази даних [5] для 8 станцій Європи за 2009 рік склала від 1,79 % для 9 місяців до 29,68 % (табл. 3). Фактично, на деяких станціях не здійснена третя частина вимірів. В даному випадку – результати вимірів, здійснені за допомогою супутникових технологій, будуть доповненням до існуючої бази вимірів.

Таблиця 3 – Величина відсутніх даних вимірів концентрації CO<sub>2</sub> в атмосфері для 2009 р.

Назва станції, країна розміщення	Висота над рівнем моря, м	Максимально можлива кількість вимірів протягом місяців (n) при повторюваності T=1 год	Фактична кількість здійснених вимірів	Відсоток відсутніх даних, %
Каспровий Верх, Польща (Kasprowy Wierch)	0	12, 8760	6495	25,86
Гіф-Сюр-Іветт, Франція (Gif-sur-Yvette)	7	12, 8760	6715	23,34
Пюї-де-Дом, Франція (Puy-de-Dôme)	10	12, 8760	6468	26,16
Хеджіхатсол, Угорщина (Hegyhatsal)	10	9, 6552	6422	1,98
Хеджіхатсол, Угорщина (Hegyhatsal)	48, 115, 180	9, 6552	6435	1,79
Мис Хead, Ірландія (Mace Head)	15	11, 8016	7614	5,01
Гейдельберг, Німеччина (Heidelberg)	30	12, 8760	8135	7,13
Ла Муела, Іспанія (La Muela)	41	6, 4344	4008	7,73
Ла Муела, Іспанія (La Muela)	57	6, 4344	3978	8,43
Ла Муела, Іспанія (La Muela)	79	6, 4344	3433	20,97
Трауною, Франція (Trainou)	50	11, 8016	5637	29,68
Трауною, Франція (Trainou)	100	11, 8016	5752	28,24
Трауною, Франція (Trainou)	180	11, 8016	5930	26,02



### **Порівняння вимірів, здійснених на наземних станціях та супутниковими методами**

Для порівняння результатів вимірів величини концентрації CO<sub>2</sub> в атмосфері методами дистанційного зондування Землі та шляхом вимірювання технічними засобами, встановленими на вежах, використаємо результати вимірів сенсором TANSO (Thermal and Near-infrared Sensor for Carbon Observation) японського супутника GOSAT (Greenhouse Gases Observing SATellite) та результати вимірів наземними методами. Результати вимірів супутника дозволяють визначити регіони, які є джерелами чи стоками CO<sub>2</sub>. Він також є перспективним з огляду на продовження місії вимірів парникових газів (CO<sub>2</sub> та CH<sub>4</sub>) супутника GOSAT супутником GOSAT-2, за одними даними у 2016 році, за іншими – у 2017 році [13, 14, 16].

Супутникові технології виміру концентрації CO<sub>2</sub> в атмосфері та виміри, здійснені за допомогою веж, є взаємодоповнюючими та підходять для вирішення низки еколого-кліматичних питань. Так, в [13] зазначено, що розвиток у сфері досліджень глобального циклу вуглецю, буде вести до більш надійних прогнозів кліматичних змін та до розвитку ефективної політики навколишнього середовища для пом'якшення глобального потепління в майбутньому.

На території України немає дослідних станцій проекту FLUXNET, але в Одеській області на станції Петродолинське на висоті 1,5 м з 2008 року ведуться виміри величини концентрації CO<sub>2</sub> в атмосферному повітрі Регіональним центром інтегрованого моніторингу і екологічних досліджень (м. Одеса). На жаль, результати вимірів на момент підготовки публікації не були опубліковані, а це унеможливило їх використання в даному порівнянні.

За відсутності результатів вимірів на дослідних вежах на територію України, для порівняння результатів виміру використаємо виміри на територію розміщення станції Хеджіхатсол. Станція Хеджіхатсол, як і Україна, лежить в помірному кліматичному поясі, що характеризується сухим теплим літом та холодною зимою. З 1994 року на станції Хеджіхатсол здійснюється вимірювання співвідношення профілів CO<sub>2</sub>, вимірювання потоків CO<sub>2</sub>, відбір проб зразків повітря для вимірів стабільних ізотопів С і О в CO<sub>2</sub> (<sup>13</sup>С і <sup>18</sup>О), виміри вмісту CO<sub>2</sub> газовим хроматографом. Детальна характеристика здійснення вимірів та опис станції на офіційній веб-сторінці станції [15].

Виходячи з даних вимірів супутником GOSAT та враховуючи те, що з усіх вимірів лише від 2 до 5% даних для всієї території Землі є придатними для обрахунку концентрації CO<sub>2</sub> [16], від дня запуску супутника з 23 січня до вересня 2009 року, безпосередньо на територію розміщення станції Хеджіхатсол не припало жодних точкових вимірів, що відповідають продукту обробки даних FTS SWIR 2-го рівня. Але із застосуванням геостатистичного методу Крігінга, який використовується для оцінки значень пустих регіонів на базі рівня розподілення продукту FTS SWIR 2, було проведено місячну оцінку концентрації CO<sub>2</sub> для сітки 2,5 градусів та отримано продукт обробки даних FTS SWIR 3-го рівня, що відображає усереднене місячне глобальне покриття концентрації CO<sub>2</sub> в атмосфері [16], які й були використані для порівняння.

Отримані дані усереднених результатів вимірів CO<sub>2</sub> на вежі Хеджіхатсол (Угорщина) за січень–вересень 2009 року на різній висоті надали змогу порівняти їх з відповідними

місячними результатами математичних обрахунків вимірів вмісту вуглекислого газу в атмосфері за даними супутника GOSAT на територію розміщення станції (табл. 4).

Таблиця 4 – Усереднена щомісячна концентрація CO<sub>2</sub> (ppm) у повітрі на різних висотах для вежі Хеджіхатсол (Угорщина) за січень–вересень 2009 року

	Виміри здійснені на станції Хеджіхатсол на висоті 10 м	Виміри здійснені на станції Хеджіхатсол на висоті 48 м	Виміри здійснені на станції Хеджіхатсол на висоті 115 м	Виміри здійснені на станції Хеджіхатсол на висоті 180 м	Виміри здійснені за допомогою супутника GOSAT
Січень	407,97	406,793	405,16	405,756	
Лютий	405,08	403,626	402,438	402,83	
Березень	400,51	399,558	398,428	400,741	
Квітень	406,47	400,718	396,414	397,56	381,42
Травень	397,76	392,33	389,464	390,303	
Червень	397,78	392,176	388,56	389,726	379,82
Липень	399	389,528	384,229	385,761	378,98
Серпень	399,48	388,379	382,848	381,335	376,45
Вересень	404,51	391,109	386,14	387,42	374,12

Нижчі показники вмісту CO<sub>2</sub> виміряні дистанційно, зумовлені усередненим виміром у атмосферному стовбці, часом зйомки супутника, який здійснює зйомку лише між 12:00 та 14:00 годинами доби, різною частотою та кількістю отриманих вимірів за добу, тиждень та місяць дистанційним методом та вимірами на вежі, а також відмінностями порівнюваних вимірів на різних висотах та середніх у стовбці.

## Висновки

На всіх станціях виміру концентрації CO<sub>2</sub> в атмосферному повітрі, що були досліджені автором, спостерігається сезонність коливання концентрації, незважаючи на тип рослинного покриву чи його відсутність.

Наземні виміри, здійснені в рамках проекту FLUXNET, та результати супутникової зйомки на станцію Хеджіхатсол (Угорщина) вказують на нижчу концентрацію CO<sub>2</sub> в атмосферному повітрі в результаті вимірів, здійснених дистанційним способом. На основі результатів вимірів на дослідних вежах показано, що чим вище від земної поверхні здійснені виміри, тим краще концентрація врівноважується. Також показано, що величина концентрації CO<sub>2</sub> в залежності від години доби та висоти може різнитися до 72 ppm.

На території України наземні станції виміру концентрацій парникових газів представлені лише 1 станцією в одній природно-кліматичній зоні, що є недостатньо для дослідження ситуації на всій території країни. Крім того, аналіз вимірів на станціях проектів по вивченню потоків та концентрації CO<sub>2</sub> CarboEurope-IP вказує на значний відсоток відсутності даних (до 28%). Тому використання супутникових вимірів концентрації парникових газів в атмосфері частково є вирішенням, при повній відсутності наземних даних.

Можна стверджувати, що результати вимірів супутниковими методами та вимірами на станціях показують загальну ситуацію концентрації діоксиду вуглецю на даній місцевості.

База даних вимірів на станціях є значно інформативнішою, але для країн, які не мають на своїй території досліджень з тривалих вимірів концентрації CO<sub>2</sub> в атмосфері, результати вимірів супутниковими методами будуть незамінними при вирішенні низки екологічних задач. Але при їх проведенні необхідно зважати на характеристики супутникових вимірів – точний час виміру, сенсорні характеристики та результати оцінки достовірності. Супутникові, наземні та повітряні виміри концентрації CO<sub>2</sub> в атмосфері є взаємодоповнюючими за різних метеоумов та географічного розміщення території дослідження.

### **Список використаної літератури**

1. FLUXNET: a global network. Integrating worldwide CO<sub>2</sub>, water and energy flux measurements. Електронний доступ: [www.fluxnet.ornl.gov](http://www.fluxnet.ornl.gov)
2. D. Baldocchi, E. Falge, Lianhong Gu, R. Olson, D. Hollinger, St. Running FLUXNET: A New Tool to Study the Temporal and Spatial Variability of Ecosystem-Scale Carbon Dioxide, Water Vapor, and Energy Flux Densities. // Bulletin of the American Meteorological Society – Vol. 82, No. 11, November 2001, PP. 2415–2434
3. Посудін Ю.І. Біофізика і методи аналізу навколишнього середовища: Підручник. – К.: 2011.– 331 с.
4. FLUXNET: a global network. Integrating worldwide CO<sub>2</sub>, water and energy flux measurements. Historical Site Status. Web Page from ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A. 2013. Електронний доступ: <http://fluxnet.ornl.gov/site-status>
5. Центр поширення даних. Наявність даних. CarboEurope-IP: «Atmosphere» component Data Release Center. Data availability. Електронний доступ: [http://ce-atmosphere.lsce.ipsl.fr/DATA\\_RELEASE/index.php?p=ava](http://ce-atmosphere.lsce.ipsl.fr/DATA_RELEASE/index.php?p=ava)
6. Центр поширення даних. База даних станцій Європи. CarboEurope-IP: “Atmosphere” component Data Release Center. CarboEurope station database. Електронний доступ: [http://ce-atmosphere.lsce.ipsl.fr/DATA\\_RELEASE/index.php?p=data](http://ce-atmosphere.lsce.ipsl.fr/DATA_RELEASE/index.php?p=data)
7. Публічна інформація про базу даних FLUXNET. Public FLUXNET Dataset Information. Web Page from ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A. 2013. Електронний доступ: <http://www.fluxdata.org/DataInfo/default.aspx>
8. Sixth framework programme priority. Global change and ecosystems. CarboEurope-IP, Assessment of the European Terrestrial Carbon Balance. Proposal Number 505572. Version of 13 November 2003 P.276. Електронний доступ: [ftp://ftp.bgc.mpg.de/pub/outgoing/athuille/CEIP-Contract/AnnexI\\_v%20031113\\_final.pdf](ftp://ftp.bgc.mpg.de/pub/outgoing/athuille/CEIP-Contract/AnnexI_v%20031113_final.pdf)
9. FLUXNET: a global network. Integrating worldwide CO<sub>2</sub>, water and energy flux measurements. Data Search. Web Page from ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A. 2013. Електронний доступ: [http://fluxnet.ornl.gov/search\\_site](http://fluxnet.ornl.gov/search_site)
10. Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center (ORNL DAAC). FLUXNET Maps & Graphics. Web Page from ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A. 2013. Електронний доступ: <http://fluxnet.ornl.gov/maps-graphics>
11. Detlef Schulze. CarboEurope Integrated Project. presentation; Електронний доступ: <http://www.carboeurope.org/> CarboEurope-IP

12. Интернет-сервіс "Статистика погоди". Електронний доступ: [http://rp5.ru/%D0%9F%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%B0\\_%D0%B2\\_%D0%9A%D1%91%D1%80%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%B4%D0%B5](http://rp5.ru/%D0%9F%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%B0_%D0%B2_%D0%9A%D1%91%D1%80%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%B4%D0%B5)

13. On the public release of carbon dioxide flux estimates based on the observational data by the Greenhouse gases Observing SATellite "IBUKI" (GOSAT) [http://www.gosat.nies.go.jp/eng/result/download/GOSAT\\_L4\\_Release\\_20121205\\_en.pdf](http://www.gosat.nies.go.jp/eng/result/download/GOSAT_L4_Release_20121205_en.pdf)

14. Ваколюк М.В. Виміри концентрації CO<sub>2</sub> супутником GOSAT на територію України. Збірник тез. 13 українська конференція з космічних досліджень. ДКАУ, НАНУБ ІКД, НЦВКЗ. 2–6 вересня 2013 р., м. Київ.: «Кафедра», 222 с.

15. Hungarian Tall Tower and Aircraft measurement at Hegyhatsal. Електронний доступ: [inimbus.elte.hu/hhs/](http://inimbus.elte.hu/hhs/)

16. Global Greenhouse Gas Observation by Satellite. Greenhouse gases Observing SATellite Project. Ibaraki, Japan: Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies. 6 Edition 4 Revision (July 2013), 12 p. Електронний доступ: [http://www.gosat.nies.go.jp/eng/GOSAT\\_pamphlet\\_en.pdf](http://www.gosat.nies.go.jp/eng/GOSAT_pamphlet_en.pdf)

*Стаття надійшла до редакції 28.01.14 українською мовою*

© М.В. Ваколюк

### **ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ CO<sub>2</sub> В АТМОСФЕРЕ СПУТНИКОМ GOSAT И ОПЫТНЫМИ БАШНЯМИ**

*В публикации отображено анализ результатов измерений концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере, полученных с помощью исследовательских башен, расположенных в разных странах мира, и измерений, осуществленных спутником GOSAT (Ibuki). Результаты измерений отображают годовое колебание уровня концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере и ее рост на протяжении исследовательских периодов. Как пример рассмотрено измерения на территорию размещения станции Хеджихатсол (Венгрия). Получена сравнительная оценка измерений парникового газа, осуществленных на данной станции мониторинга с помощью спутника GOSAT (Ibuki) и исследовательской башни для периода с января по сентябрь 2009 года.*

© M.V. Vakolyuk

### **MEASURING THE CONCENTRATION OF CO<sub>2</sub> IN THE ATMOSPHERE SATELLITES GOSAT AND RESEARCH TOWERS**

*The paper presents the analysis of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration measurements results obtained from the research towers located in the different countries of the world and GOSAT (Ibuki) satellite. The measurement results indicate the annual fluctuation in the level of CO<sub>2</sub> concentrations in the atmosphere and its increase during the research periods. As an example considered measurements for territory of Hegyhatsal station (Hungary). The comparative evaluation of the measurements made by greenhouse gas monitoring station and GOSAT (Ibuki) satellite for period of time from January to September 2009 was obtained.*