



DOI:10.36023/ujrs.2020.24.166

УДК 528.8.04: 551.4

Експериментальні дослідження особливостей кругообігу вуглецю в системі “атмосфера–рослинність” на території водно-болотних угідь лісостепової зони України із залученням дистанційних спектро- та газометричних зйомок за сучасних кліматичних змін

В. І. Лялько¹, Г. М. Жолобак¹, С. С. Дугін^{* 1}, О. М. Сибірцева¹, С. І. Голубов¹, Є. М. Дорофей¹,
О. В. Поліщук²

¹ ДУ “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України”, вул. Олеся Гончара 55-Б, Київ, 01054, Україна

² Інститут ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України, вул. Терещенківська, 2 Київ, 01004, Україна

Оперування показниками достовірної регіональної концентрації вуглекислого газу в атмосфері є важливим фактором коректного комп’ютерного моделювання кліматичних змін відповідного масштабу. Метою роботи є експериментальне дослідження процесів вуглекислотного газообміну (фотосинтезу та дихання) водно-болотної рослинності лісостепової зони України за сучасних кліматичних змін задля визначення кількісних показників інтенсивності вилучення CO₂ з атмосфери цією рослинністю. Для цього залучено апаратуру ресетрації вмісту CO₂ в повітрі CO₂ Qubit Systems s151 (Канада) та спектродіаметр FieldSpec® 3FR (США). Ця система передбачає пропускання повітря з визначеною швидкістю через респіраційну камеру, в якій знаходиться досліджувана рослина, і зміну концентрації CO₂ в цій камері вимірюють за певний проміжок часу інфрачервоним газоаналізатором. Обробка одержаних даних виконується програмним забезпеченням. Результати, одержані впродовж весняно-літньої вегетації основних рослин водно-болотних угідь (осока побережна та очерет південний), свідчать, що зростання їх продуктивності (інтенсивності вилучення CO₂ з атмосфери) відбувається лише до досягнення температури довкілля до 18–22°C. Також можна стверджувати, що позитивним показником таких екосистем є значно більший термін їх фотосинтетичної активності у порівнянні з іншими екосистемами, у зв’язку з охолоджувальним ефектом ґрунтової вологи в місцях їх розповсюдження. Це слід враховувати при реалізації заходів по мінімізації впливу регіонального потепління, максимально сприяючи рекультивації та відродженню водно-болотних угідь.

Ключові слова: зміни клімату, наземна спектрометрична зйомка, індекси червоного краю, польові газометричні виміри потоків CO₂, водно-болотні угіддя, газообмін рослин, корелятивні зв’язки

© В. І. Лялько, Г. М. Жолобак, С. С. Дугін, О. М. Сибірцева, С. І. Голубов, Є. М. Дорофей, О. В. Поліщук. 2020

1. Вступ

Визначення концентрації діоксиду карбону в приземному шарі атмосфери нині є актуальною проблемою з огляду на сучасні зміни клімату, спричинені зростанням парникового ефекту, викликаного антропогенними причинами підвищення в повітрі вмісту парникових газів.

На державному рівні це підтверджується прийняттям у серпні 2019 р. законопроектів № 0874 та № 0875 про засади моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів, а на міжнародному — Конференції сторін Рамкової Конвенції ООН з питань клімату — COP25.

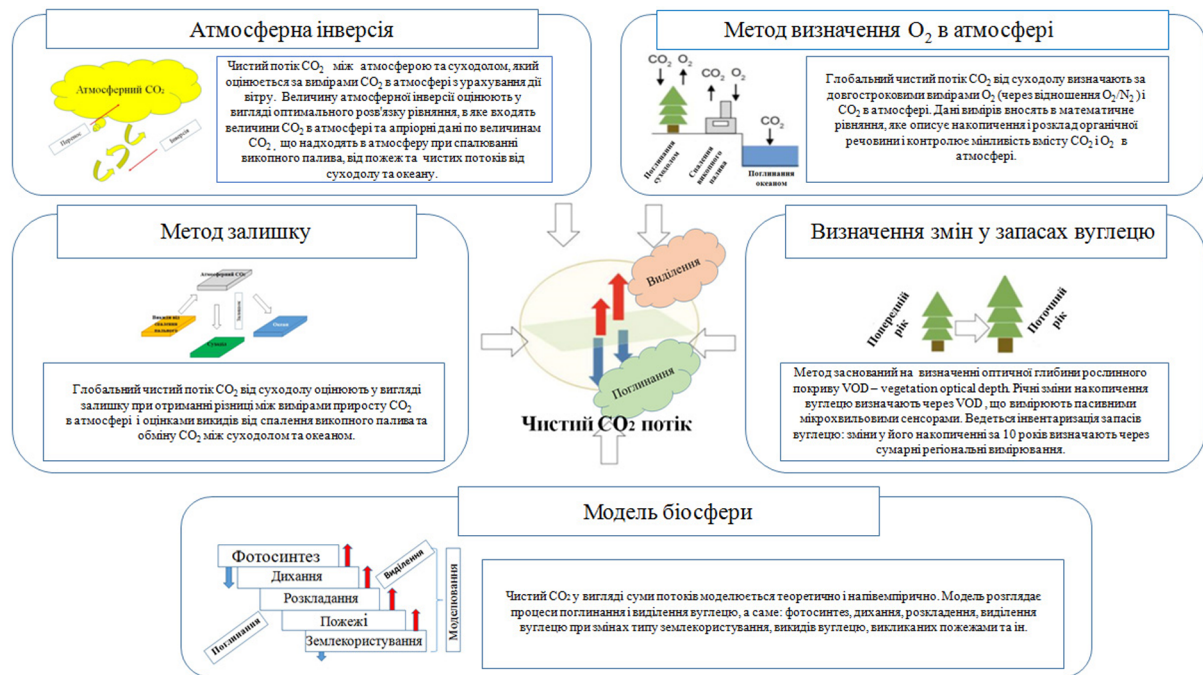
В одному з останніх оглядів, де аналізуються набори атмосферних інверсійних та біосферних моделей, скоригованих для послідовного визначення потоків CO₂ (Рис. 1), автори прийшли до висновку, що мінімізувати чисті потоки CO₂ в атмосфері можна завдяки збільшенню ефективності поглинання наявних парникових газів (Кондо та ін., 2019). В основному, це можна зробити, працюючи з наземними екосистемами, зокрема з водно-болотними угіддями.

На жаль, в Україні відсутні метеорологічні башти з відповідним обладнанням, які за допомогою методу мікрохвильової пульсації перманентно вимірюють концентрацію парникових газів в атмосфері, як, наприклад, у США (<https://ameriflux.lbl.gov/>) чи в Європі (<http://www.europe-fluxdata.eu>). Для цього в Україні використовують тільки камерні підходи, наприклад, описані у статтях Л. В. Фланеган (Flanagan, 2002), О. О. Халаїм та І. Г. Вишенської (Халаїм, Вишенська, 2012). Співробітники Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України вже досліджували внесок агроценозів у поглинання діоксиду вуглецю (Парниковий ефект..., 2015; Аналіз..., 2016). У 2019 році об’єктом наших інтересів стали водно-болотні угіддя на території земельної площі, де знаходяться очисні споруди Бортницької станції аерації (БСА) на лівому березі Дніпра в межах Дарницького району Києва (тест-ділянка № 1) та в Бориспільському районі Київської області (тест-ділянка № 2).

2. Мета роботи

Метою роботи є експериментальне дослідження процесів вуглекислотного газообміну (фотосинтезу та дихання) вод-

* E-mail: Dstas2389333d@i.ua

Рис. 1. Методи оцінки чистого потоку CO_2 (за Кондо та ін., 2019)

но-болотної рослинності лісостепової зони України за сучасних кліматичних змін задля визначення кількісних показників інтенсивності вилучення CO_2 з атмосфери цією рослинністю та вивчення часової динаміки вегетаційних індексів (ВІ) основних рослин водно-болотних угідь впродовж весняно-літньої вегетації залежно від екологічного стану ділянок зростання.

3. Характеристика тест-ділянок та матеріали і методи досліджень

Нижче подаємо коротку характеристику тест-ділянок досліджених водно-болотних угідь, які відрізнялись між собою передусім рівнем забруднення важкими металами.

Як зазначається в звіті з оцінки впливу на довкілля реконструкції споруд очистки стічних каналізаційних вод і будови технологічної лінії по обробці та утилізації осадів Бортницької станції аерації, ПАТ АТ “Київводоканал”. 2019 р. (Звіт з оцінки..., 2019), в геоморфологічному відношенні досліджувані ділянки розташовані в межах лівобережної заплавної тераси Дніпра, піднятої шляхом підсипки та наміву ґрунтів до абсолютних відміток поверхні землі 97.0–98.5 м.

З денної поверхні алювіальні відклади прикриті товщею насипних та намитих ґрунтів. Насипний ґрунт складений пісками та супісками сірими, бурувато-сірими, неоднорідними, з вмістом рослинних залишків. В товщі алювіальних пісків залягають супіски та суглинки з вмістом органічних речовин. Алювіальні відклади залягають на породах буцького горизонту еоценового відділу палеогенової системи, які представлені пісками, супісками та суглинками зеленувато-сірими.

Підземні води зафіксовані на глибинах 2.7–4.1 м, в межах абсолютних відміток 92.96–93.65 м. Поповнення їх відбувається внаслідок інфільтрації атмосферних опадів, буцького водоносного горизонту та втрат водонесучих комунікацій.

В межах земельної ділянки заплавної луки Дніпра, де зна-

ходяться об'єкти БСА, компоненти природно-заповідного фонду та курортні зони відсутні.

Магістральний канал БСА (колишній струмок Якушівка згідно з інформацією відділу контролю за благоустроєм та охороною навколишнього природного середовища Дарницької районної в м. Києві державної адміністрації (<https://darn.kyivcity.gov.ua/files/2015/2/12/Vodniobectu.pdf>), має дві складові: одна частина площею $S = 5.9$ га знаходиться в межах Києва, а інша — площею $S = 1.7$ га в Бориспільському районі Київської області.

Перша тест-ділянка (№ 1) розташована перед першим шлюзом магістрального каналу БСА. Оскільки вона віддалена лише на 3 км від первинних та вторинних радіальних відстійників та аеротенків Ново-Бортницької станції аерації, які належать до промзони “Осокорки” БСА, то ця ділянка розглядалась як забруднена, що в процесі виконання роботи підтвердилось результатами хімічного аналізу ґрунту та води (Таблиці 1 та 2). Для цього аналізу в кінці травня відбирались проби, які були передані в центральну лабораторію ДП “Українська геологічна компанія” для визначення їх хімічного складу згідно з СОУ 73.1-41-08.00.01:2004 Геологічне вивчення надр. Кількісний хімічний аналіз гірських порід. Класифікація методик за точністю вимірювання та СОУ 73.1-41-08.00.42:2007 Геологічне вивчення надр. Кількісний хімічний аналіз гірських порід. Організація підготовки проб, виконання аналізів і контролю якості.

На цих ділянках також досліджувався їх рослинний покрив, зокрема осока побережна (*Carex riparia* Curt.) та очерет південний (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. Ex Steud.).

Друга тест-ділянка (№ 2) розташована між четвертим та п'ятим шлюзами магістрального каналу БСА на віддалі близько 20 км від системи аерації “Бортничі”. Оскільки густі зарості очерету, який зростає вздовж магістрального каналу, виконують роль біофільтра, що очищає воду від забруднення, то ця тест-ділянка розглядалась як чиста, що в процесі виконання роботи також підтвердилось результатами хімічних аналізів ґрунту та води (див. Таблиці 1 та 2). Для порівняння у цій таблиці наведено гранично допустимі кон-

Таблиця 1.

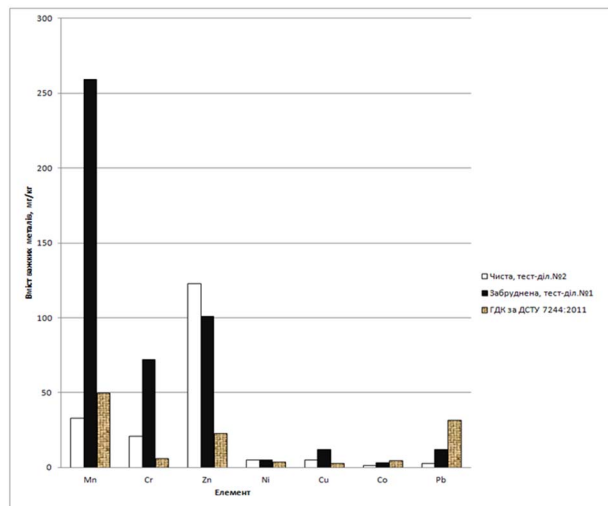
Результати хімічного аналізу ґрунту на вміст важких металів в ґрунтах тест-ділянок Бортницької станції аерації (мг/кг повітряно-сухого ґрунту)

Елемент	Тест-ділянка № 2, чиста	Тест-ділянка № 1, забруднена	ГДК мг/кг згідно ДСТУ 7244:2011
Mn	33.0	259.0	50.0
Cr	21.0	72.0	6.0
Zn	123.0	10.01	23.0
Ni	4.9	4.9	4.0
Cu	4.9	12.2	3.0
Co	1.2	3.0	5.0
Pb	2.9	12.0	32.0

центрації (ГДК) цих металів у ґрунті згідно з даними довідника “Земельні ресурси України, 1998” (Земельні ресурси, 1988) та нині діючого ДСТУ 7244:2011 “Якість ґрунту”.

Як видно з наведених у Таблиці 1 даних, вміст кобальту і свинцю в ґрунтах обох тест-ділянок не перевищує ГДК. Концентрація інших важких металів в ґрунтах перевищує ГДК як на забрудненій, так і на чистій ділянці, за винятком марганцю, вміст якого на чистій тест-ділянці на третину менший від ГДК, а на забрудненій більш ніж у п'ять разів вищий.

Наведені в Таблиці 1 концентрації важких металів у ґрунтах показано також у вигляді діаграми на Рис. 2. Тут наочно видно, що вміст більшості важких металів у ґрунті забрудненої ділянки набагато більший, ніж у ґрунті чистої ділянки, за винятком цинку, стосовно якого спостерігається зворотне

**Рис 2.** Вміст рухомих форм важких металів у ґрунтах тест-ділянок Бортницької станції аерації

співвідношення, та нікелю, за вмістом якого обидві ділянки не відрізняються.

Дані Таблиці 2 свідчать, що практично за всіма компонентами якість води в межах забрудненої тест-ділянки гірша, ніж в межах чистої тест-ділянки, зокрема концентрація токсичних іонів амонію у воді із забрудненої ділянки у 16 разів вища, ніж у чистій воді, а концентрація фосфатів у брудній воді у 49 разів вища, ніж у чистій.

Таблиця 2.

Результати хімічного аналізу води (макрокомпоненти)

Компоненти. $мг/дм^3$		Тест-ділянка № 2, чиста	Тест-ділянка №1, забруднена	Нормативи згідно ДСТУ 7225:2014
Ca		80.16	76.15	130.0 (25–75)
Mg		17.02	18.24	80.0 (10–50)
Na		11.7	83.4 **	200.0 (2–20)
K		2.97	18.79	20.0 (2–20)
NH ₄		0.18 *	2.89 *	0
NO ₃		1.81	18.82 *	5.0
NO ₂		0.059 *	11.01 *	0.02
Cl		18.7	98.6	150.0
SO ₄		14.81	79.83	150.0
HCO ₃		305.0	286.7	
SiO ₂		14.06	16.9	
PO ₄		0.12	5.91	8.0
окиснюваність		7.36	10.88	
сухий залишок		364.0	620.0	200.0–500/0
рН. од. рН		8.2	7.9	
Жорсткість води. $мг$ -екв	Загальна	5.4	5.3	7.0
	Карбонатна	5.0	4.7	
	Не карбонатна	0.4	0.6	

* компоненти, які перевищують показники нормативів ДСТУ 7525:2014

** компоненти, концентрація яких виходить за межі діапазону оптимального їх вмісту, але не перевищує максимально допустимого значення згідно з ДСТУ 7525:2014

У порівнянні з нормативами за хімічними показниками якості, що впливають на органолептичні властивості питної води нецентралізованого водопостачання згідно ДСТУ 7525:2014, у воді чистої ділянки виявлено незначну кількість іонів амонію, в той час як згідно з нормативами він повинен бути відсутній. В цій же воді вміст нітритів перевищує нормативи у 2.95 рази. Згідно з ДСТУ 7525:2014 до токсикологічних показників нешкідливості хімічного складу питної води крім іонів амонію та нітритів належать ще й нітрати. Ці компоненти у воді в межах забрудненої ділянки перевищують допустимі нормативи за нітратами у 3.8 рази, за нітридами — у 551 разів, а іонів амонію тут було визначено в концентрації 2.89 мг/дм^3 , хоча нормативи прописують їх повну відсутність. У забрудненій воді також в 1.24 рази більше сухого залишку та у 4.2 рази більше іонів натрію у порівнянні з діапазоном оптимального їх вмісту згідно з нормативами ДСТУ 7525:2014. Хоча слід зазначити, що максимально допустимого значення концентрації іонів натрію у воді не досягнуто ані з чистої, ані з забрудненої тест-ділянок. Інші проаналізовані макрокомпоненти води досліджуваних тест-ділянок не перевищують нормативів ДСТУ 7525:2014.

На Рис. 3 проілюстровано вищесказане стосовно тих макрокомпонентів води, концентрація яких вимірюється в мг/дм^3 .

На вибраних тест-ділянках 03 і 28 травня та 20 червня

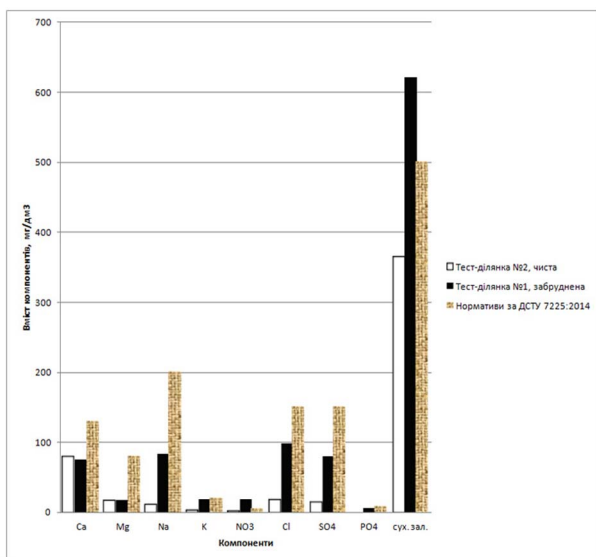


Рис. 3. Результати хімічного аналізу води в межах тест-ділянок Бортницької станції аерації для компонентів, що вимірюються в мг/дм^3

2019 р. системою реєстрації вмісту CO_2 Qubit Systems s151 було проведено вимірювання газообміну листків основних видів рослин водно-болотних угідь, а саме: осоки ранньої (*Carex praecox* Schreb.), осоки берегової (*Carex riparia* Curt.) та очерету південного (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. Ex Steud.).

Методика вимірювань та розрахунку потоків CO_2 описана в монографії “Парниковий ефект і зміни клімату в Україні: оцінки та наслідки” (Парниковий ефект..., 2015) та у статті О. В. Поліщука та О. О. Халаїм (Поліщук, Халаїм, 2016). Слід зазначити, що процес отримання значень поглинання CO_2 вищезазначеною системою досить тривалий (одне вимірювання займає приблизно 30 хв. і для кожного варіанту рослин виконувалося у трикратній повторності). З огляду

на це було вирішено впродовж весняно-літньої вегетації на тест-ділянках проводити спектрометрування рослин спектрометратором FieldSpec® 3FR, на підставі чого розраховувати вегетаційні індекси (ВІ), як це описано в статті С. С. Дугіна та ін. (Дугін та ін., 2019). Ці ВІ в подальшому планується зіставити з показниками газообміну рослин для віднайдення кореляційних зв'язків між ними і можливої заміни параметрів, отримуваних тривалим способом, на швидше й простіше отримувані значення ВІ.

4. Результати та їх аналіз

4.1. Часова динаміка ВІ основних видів рослин водно-болотних угідь на чистій та забрудненій тест-ділянках впродовж весняно-літньої вегетації

На основі отриманих значень трьох вегетаційних індексів, які розраховувались переважно за даними відбиття у зоні “червоного краю”: CI green (783, 560), CIrededge (783, 705) та NDVI1 (780, 740), для основних видів рослинних угруповань водно-болотних угідь досліджених тест-ділянок впродовж весняно-літньої вегетації були побудовані графіки їх динаміки (Рис. 4).

З наведеного рисунка видно, що найбільші відмінності між значеннями вказаних ВІ для осоки берегової з чистої та забрудненої ділянок спостерігались 28 травня 2019 р. Водночас для ВІ очерету південного, відмінності їх значень, в залежності від екологічного стану місця зростання були менші помітні. Наприкінці другої декади червня, в залежності від екологічного стану місця зростання відмінності для CI green осоки берегової зменшуються, а для очерету південного зростають. На цю ж дату 20 червня 2019 р. для CIrededge обох основних видів водно-болотних угідь різниця між ділянками зростання залишається суттєвою, а для NDVI1 є незначною.

Як бачимо з наведеного рисунка, найвищі значення ВІ спостерігались на кінець травня, тримались на цих високих значеннях майже місяць, несуттєво знижуючись на початку третьої декади червня. Тому використання даних Sentinel-2A для вивчення екологічного стану водно-болотних угідь доцільно здійснювати в травні-червні, коли спостерігається найбільший приріст вегетаційної маси досліджених видів рослин і фіксуються найсуттєвіші відмінності у відбитті їх рослинного покриву.

4.2. Дослідження газообміну рослин у зв'язку з поглинанням ними CO_2 в залежності від температурного режиму та екологічного стану ділянок

На підставі отриманих за допомогою приладу Qubit Systems s151 значень поглинання вуглекислого газу рослинами водно-болотних угідь було побудовано діаграми (Рис. 5), які свідчать, що на забруднених ділянках процеси дихання і фотосинтезу обох видів рослин уповільнюються, за винятком фотосинтезу осоки берегової, зафіксованого 28 травня 2019 р., коли середні значення поглинання вуглекислого газу рослинами на забрудненій ділянці вищі, ніж на чистій. Отримані дані будуть уточнюватися в наступних дослідженнях.

Водночас з дослідженням газообміну рослин нами проводилось вимірювання температури повітря та ґрунту на глибині 7 см цифровим термометром. На підставі отриманих даних було зіставлено середні значення температурних даних з показниками дихання рослин та їх фотосинтезу (Рис. 5), (Таблиця 3), (Рис 6, 7).

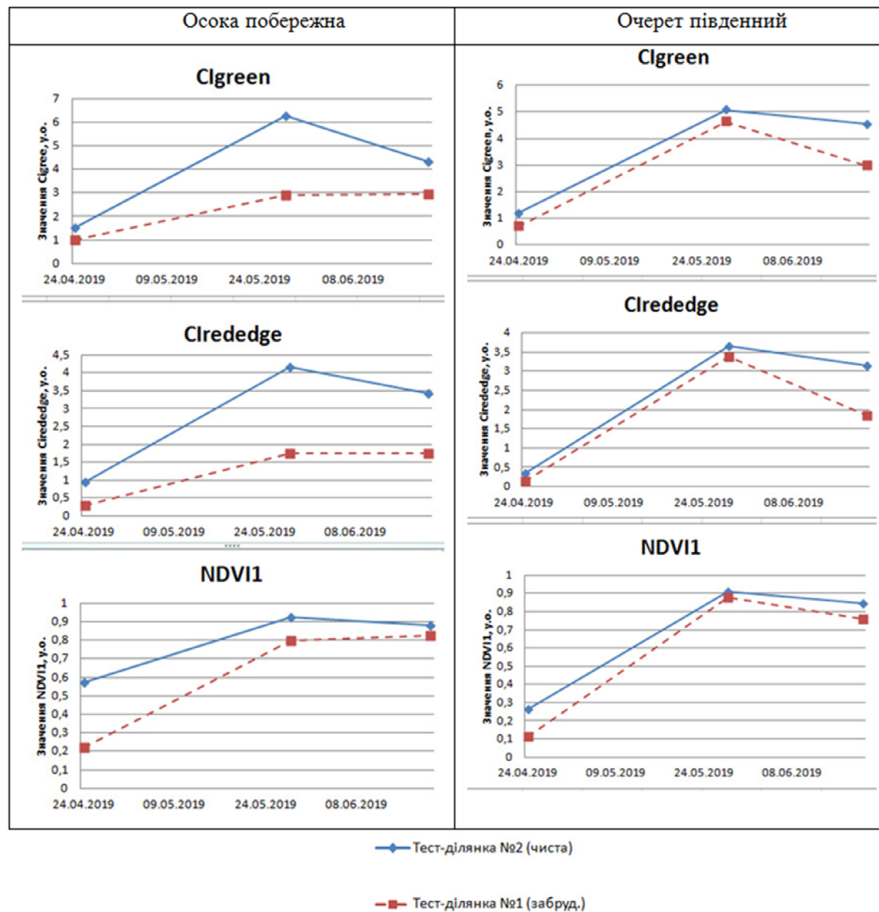


Рис. 4. Динаміка ВІ осоки бережної та очерету південного на тест-ділянках № 1 та № 2 впродовж весняно-літньої вегетації 2019 р. (суцільна лінія — тест-ділянка № 2, чиста, пунктирна лінія — тест-ділянка № 1, забруднена)

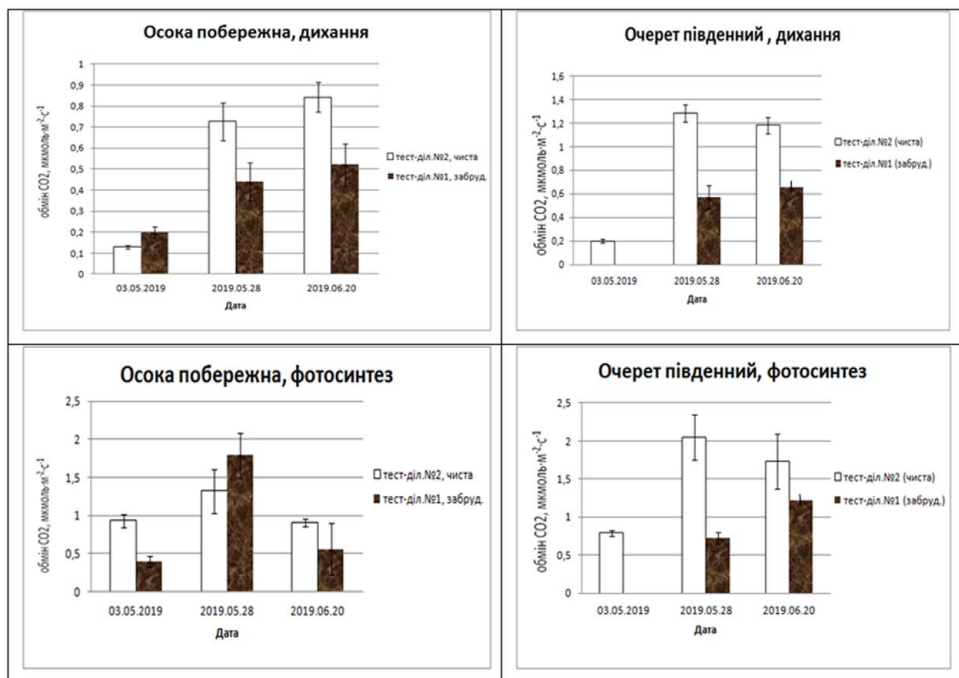


Рис. 5. Результати вимірювання інтенсивності фотосинтезу і дихання осоки бережної та очерету південного у травні–червні 2019 р. на тест-ділянках № 1 та № 2

Отримані залежності свідчать, що між температурою ґрунту та інтенсивністю дихання існує поліноміальна лінія тренду другого порядку з коефіцієнтом кореляції 0.63, а між температурою ґрунту та інтенсивністю фотосинтезу — така ж лінія з коефіцієнтом кореляції 0.48. Ці дані підтверджують факти, викладені в монографії “Парниковий ефект і зміни клімату в Україні: оцінки та наслідки” (Парниковий ефект..., 2015), про те, що для культур помірного поясу, до якого належить Україна, швидкість розвитку рослин зростає пропорційно підвищенню температури середовища, але в межах біологічного мінімуму (18–22°C). За подальшого зростання температури розвиток рослин не прискорюється, навпаки, він може уповільнитись або припинитися.

У нещодавній доповіді Міжурядової групи експертів зі зміни клімату (IPCC) стверджується, що для досягнення цілей Паризької кліматичної угоди необхідно розробити нові варіанти землекористування для посилення поглинання парникових газів наземними екосистемами, такими як ліси та луки. Зараз 30% всього CO₂, що викидається в атмосферу в результаті діяльності людини, поглинається саме цими екосистемами, але в майбутньому людям доведеться посилити їх ефективність для перероблювання вже наявних парникових газів.

Чистий баланс вуглекислого газу між атмосферою та землею називається “чистий потік CO₂”, який являє собою суму поглинання його при фотосинтезі (–) та викидах (+) в результаті дихання, розкладання органічних речовин в ґрунті, лісових пожеж. На цей баланс негативно впливають зміни в землекористуванні, такі як вирубка та перетворення лісів у сільськогосподарські угіддя.

“До цього часу вчені в різних областях наук про Землю пропонували безліч методів оцінки чистого потоку CO₂, включаючи біосферні моделі та атмосферні інверсії. Ці методи не дають послідовних результатів, поки ми не додамо CO₂, який виділяється в атмосферу річками та озерами, до біосферних моделей”, — говорить співавтор дослідження Масаюкі Кондо, доцент Центру дистанційного екологічного контролю з університету Тіба (Японія).

Повністю погоджуючись з цими висновками авторів IPCC та враховуючи результати наших польових експериментальних досліджень, вважаємо доцільним для покращення обліку поглинання парникових газів залучити крім таких наземних екосистем, як ліси і луки, також і болотні екосистеми.

На водно-болотних угіддях слід реалізувати землекористування таким чином, щоб не допускати осушування їх зе-

Таблиця 3.

Зіставлення значень температур повітря та ґрунту з інтенсивністю дихання та фотосинтезу осоки побережної та очерету південного

Дата	середня tsoil, °C	середня температура повітря, °C	Інтенсивність дихання, мкмоль CO ₂ ·м ⁻² ·с ⁻¹	Інтенсивність фотосинтезу, мкмоль CO ₂ ·м ⁻² ·с ⁻¹
03.05.2019	13.9	17.9	0.130	0.93
28.05.2019	18.0	27.7	0.727	1.32
20.06.2019	18.5	34.8	0.841	0.90
03.05.2019	15.3	33.4	0.200	0.79
28.05.2019	17.0	24.6	1.284	2.05
20.06.2019	18.1	31.1	1.182	1.73
03.05.2019	10.3	20.8	0.199	0.40
28.05.2019	16.0	30.1	0.439	1.79
20.06.2019	17.6	37.7	0.521	0.56
28.05.2019	14.7	27.2	0.573	0.72
20.06.2019	19.0	32.9	0.653	1.23

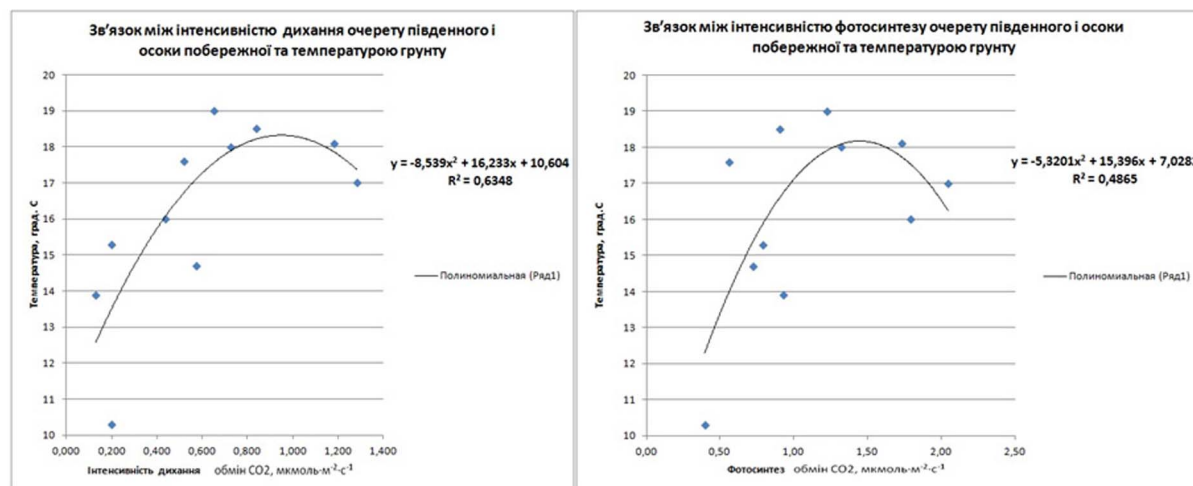


Рис. 6. Залежності між інтенсивністю фотосинтезу, диханням та температурою ґрунту

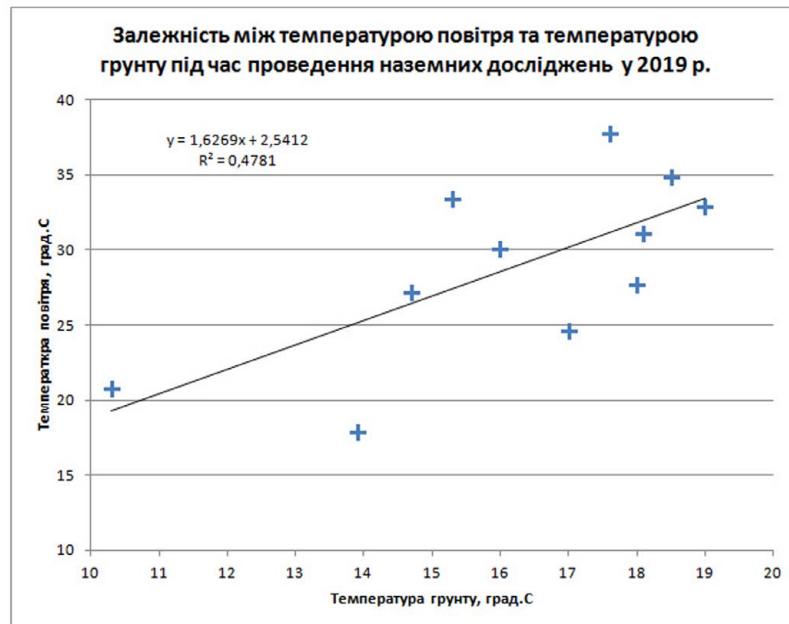


Рис. 7. Залежність між температурою повітря та температурою ґрунту під час проведення наземних досліджень у 2019 р.

мель і сприяти на цих землях розвитку болотної рослинності з максимальною інтенсивністю фотосинтетичних процесів і, отже, максимальною абсорбцією CO_2 з атмосфери.

Позитивним показником таких екосистем є, як свідчать результати наших досліджень, значно більший термін їх фотосинтетичної активності у порівнянні з іншими екосистемами, у зв'язку з охолоджуючим ефектом ґрунтової вологи в місцях їх розповсюдження, хоча інтенсивність поглинання CO_2 ($0.5\text{--}2.5 \text{ мкмоль/м}^2\cdot\text{с}$) для них є меншою, ніж для агроценозів та лісів лісостепової зони України ($2\text{--}8 \text{ мкмоль/м}^2\cdot\text{с}$) (Парниковий ефект..., 2015).

Отримані дані є першим вітчизняним дослідженням стосовно внеску водно-болотних угідь в процес поглинання надмірної кількості вуглекислого газу над територією України. Оскільки в результаті найдовших переговорів з питань клімату під егідою ООН, які завершилися у Мадриді компромісною угодою, країни повинні запропонувати власні заходи щодо боротьби зі зміною клімату до наступного саміту у Глазго в 2020 році, то наша країна може обґрунтовано висунути пропозицію стосовно відродження та збереження водно-болотних угідь як одну із складових у питанні боротьби з підвищеною концентрацією парникових газів у атмосфері.

5. Висновки

1. Відібрано дві різні за екологічною ситуацією тест-ділянки водно-болотних угідь на території, прилеглої до Бортницької станції аерації. Встановлено, що на забрудненій ділянці концентрація важких металів у ґрунті перевищує відповідний показник чистої ділянки для Mn — у 8 разів, для Cr — у 3 рази, для Cu та Co — у 2, 5 рази і для Pb — у 4 рази.
2. Зіставлено вегетаційні індекси (BI) для основних видів рослинних угруповань водно-болотних угідь досліджених тест-ділянок і виявлено, що впродовж весняно-літньої вегетації більші відмінності між значеннями BI в залежності від екологічного стану місця зростання були властиві осоці побережній, ніж очерету південному.
3. Проведено вимірювання інтенсивності газообміну листків основних видів рослин водно-болотних угідь на вибра-

них тест-ділянках приладом реєстрації вмісту CO_2 Qubit Systems s151 і зіставлено їх з температурою ґрунту та підтверджено виявлену раніше залежність стосовно зростання продуктивності фітоценозів лише до досягнення температури доквілля до $18\text{--}22^\circ\text{C}$. Подальше зростання температури призводить до пригнічення фотосинтезу і як наслідок — до зменшення продуктивності екосистем, і отже, до зменшення ними абсорбції CO_2 з атмосфери, що сприяє парниковому ефекту.

4. Водно-болотні угіддя складають близько 1% території України і вітчизняні дослідження їх внеску в поглинання вуглекислого газу проводяться вперше. Тому в подальшому планується більш поглиблене вивчення ролі цих екосистем у загальному балансі вуглекислого газу між атмосферою та рослинністю.

Література

- Аналіз корелятивних зв'язків вегетаційних індексів червоного краю з валовою первинною продуктивністю за даними газо- та спектрометричних вимірів для виробничих посівів озимої пшениці в Баришівському районі Київської області / Лялько В. І. та ін. *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2016. № 8. С. 4–12. URL: <http://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/68>.
- Дугін С. С., Сибірцева О. М., Голубов С. І., Дорофей Є. М. Верифікація результатів обробки спектральних даних супутника Sentinel-2A, наземного спектрорадіометра ASD FieldSpec® 3FR і системи реєстрації мінливості параметрів середовища DJI STS-VIS. *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2019. № 21. С. 29–39. URL: <https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/147/170>.
- Звіт з оцінки впливу на довкілля реконструкції споруд очистки стічних каналізаційних вод і будови технологічної лінії по обробці та утилізації осадів Бортницької станції аерації ПАТ АТ “Київводоканал” / Морозова О. Ю., Яцканич І. І. Київ, 2019. Реєстраційний № 201811222220. URL: <http://eia.menr.gov.ua/uploads/documents/2220/reports/5051d2f76796aa95ac07f96bf95f7c8c.pdf>.
- Земельні ресурси України / За ред. Медведєва В. В., Лактіонової Т. М. К.: Аграрна наука, 1998. 148 с.

- Парниковий ефект і зміни клімату в Україні: оцінки та наслідки / під. ред. В. І. Лялька. Київ: Наук. думка, 2015. 283 с.
- Поліщук О. В., Халаїм О. О. Вплив змін режиму опадів на сезонні потоки карбону у ксерофітних трав'яних екосистемах Південно-Східного Криму. *Наукові основи збереження біотичної різноманітності*. 2016. Т. 7(14), № 1. С. 53–64.
- Халаїм О. О., Вишенська І. Г. Особливості добової динаміки екосистемних потоків вуглецю степових угруповань південно-східного Криму. *Наукові записки НАУКМА. Біологія та екологія*. 2012. Т. 132. С. 48–54.
- Flanagan L. B., Wever L. A., Carlson P. J. Seasonal and interannual variation in carbon dioxide exchange and carbon balance in a northern temperate grassland. *Global Change Biology*. 2002. № 8. P. 599–615.
- Kondo M., Sitch P. S., Friedlingstein P., Poulter B., Chevallier F., Ciais P. et al. State of the science in reconciling top-down and bottom-up approaches for terrestrial CO₂ budget. *Global Change Biology*. 2019. URL: <https://doi.org/10.1111/gcb.14917>.
- References**
- Dugin, S. S., Sybirtseva, O. M., Golubov, S. I., Dorofey, Ye. M. (2019). Verification of multispectral data processing for the Sentinel-2A bands, field and FieldSpec® 3FR and UAV with DJI STS-VIS. *Ukrainskyj zhurnal dystancijnogho zonduvannja Zemli*. 21, 29–39. Retrieved from <https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/147/170>. (in Ukrainian).
- Flanagan, L. B., Wever, L. A., Carlson, P. J. (2002). Seasonal and interannual variation in carbon dioxide exchange and carbon balance in a northern temperate grassland. *Global Change Biology*. 8 (7), 599–615.
- Khalaim, O. O., Vyshenska, I. H. (2012). Characteristics of daily dynamics of ecosystem carbon cycling in grasslands in south-eastern Crimea. *Nauk. Zapysky NaUKMA. Biologia i Ekologia*. 132, 48–54. (in Ukrainian).
- Kondo, M., Sitch, P. S., Friedlingstein, P., Poulter, B., Chevallier, F., Ciais, P. et al. (2019). State of the science in reconciling top-down and bottom-up approaches for terrestrial CO₂ budget. *Global Change Biology*. 2019. URL: <https://doi.org/10.1111/gcb.14917>.
- Lyalko, V. I. (Ed.). (2016). Greenhouse effect and climate changes in Ukraine: assessments and consequences. Kyiv: Naukova Dumka. (in Ukrainian).
- Lyalko, V. I., Sakhatsky, O. I., Zholobak, H. M., Sybirtseva, O. M., Dugin, S. S., Khalaim, O. O. (2016). Analysis of the correlation between the red edge vegetation indices and the gross primary productivity of winter wheat crop according to gas and spectrometry measurements in Baryshivsky district of Kyiv region. *Ukrainskyj zhurnal dystancijnogho zonduvannja Zemli*. 8, 4–12. Retrieved from <http://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/68>. (in Ukrainian).
- Medvedev, V. V., Laktionova, T. M. (Eds.). (1998). Land resources of Ukraine. Kyiv: Ahrarna Nauka. (in Ukrainian).
- Polishchuk, O. V., Khalaim, O. O. (2016). Influence of altered precipitation on the seasonal carbon flows in dry grassland ecosystems in South-Eastern Crimea. *Nauk. osnovy zberezhenia biotychnoi riznomanitnosti*. 7 (14), 53–64. (in Ukrainian).
- Report on the assessment of impact of the reconstruction of sewage water treatment plants on the environment and construction of technological line for the treatment and utilization of the sediments from the Bortnychi Aeration Station, PAT AK Kyivvodokanal. (2019). Kyiv. Retrieved from <http://eia.menr.gov.ua/uploads/documents/2220/reports/5051d2f76796aa95ac07f96bf95f7c8c.pdf>. (in Ukrainian).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ КРУГООБОРОТА УГЛЕРОДА В СИСТЕМЕ “АТМОСФЕРА–РАСТИТЕЛЬНОСТЬ” НА ТЕРРИТОРИИ ВОДНО-БОЛОТНЫХ УГОДИЙ ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНЫ УКРАИНЫ С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ ДИСТАНЦИОННЫХ СПЕКТРО- И ГАЗОМЕТРИЧЕСКИХ СЪЕМОК В ПЕРИОД ГЛОБАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

В. І. Лялько, Г. М. Жолобак, С. С. Дугин, О. М. Сибирцева, С. І. Голубов, Е. Н. Дорофей, А. В. Полищук.
 ГУ “Научный центр аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины”. 01054, г. Киев, ул. О. Гончара, 55-б, Україна.
 Институт ботаники им. М. Г. Холодного Национальной академии наук Украины, ул. Терещенковская, 2, 01004, г. Киев, Украина
 Оперирование показателями достоверной региональной концентрации углекислого газа в атмосфере является важным фактором корректного компьютерного моделирования климатических изменений соответствующего масштаба. Цель работы заключалась в экспериментальном исследовании процессов углекислого газообмена (фотосинтеза и дыхания) водно-болотной растительности лесостепной зоны Украины при современных климатических изменениях с тем, чтобы определить количественные показатели интенсивности изъятия CO₂ из атмосферы такой растительностью. Для этого была привлечена аппаратура регистрации содержания CO₂ в воздухе — CO₂ Qubit Systems s151 (Канада) и спекторрадиометр FieldSpec® 3FR (США). В этой системе через респираторную камеру, в которой находится исследуемое растение, с определённой скоростью пропускается воздух, и изменение концентрации CO₂ в этой камере измеряют за определённый промежуток времени инфракрасным газоанализатором. Обработка полученных данных производится с помощью программного обеспечения. Результаты, полученные в течение весенне-летней вегетации основных растений водно-болотных угодий (осока береговая и тростник южный), свидетельствуют о том, что рост их продуктивности (интенсивность изъятия CO₂ из атмосферы) происходит лишь при достижении температуры окружающей среды до 18–22°C. Также можно утверждать, что положительным показателем таких экосистем является значительно больший термин их фотосинтетической активности по сравнению с другими экосистемами в связи с охлаждающим эффектом почвенной влаги в местах их распространения. Это следует учитывать при реализации мероприятий по минимизации влияния регионального потепления, максимально способствуя рекультивации и возрождению водно-болотных угодий.

Ключевые слова: изменения климата, наземная спектрометрическая съёмка, индексы красного края, полевые газометрические измерения потоков CO₂, водно-болотные угодья, газообмен растений, коррелятивные связи

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE CARBON CIRCLE FEATURES IN “ATMOSPHERE–VEGETATION” SYSTEM OVER THE WETLAND AREA WITHIN THE FOREST - STEEP ZONE IN UKRAINE USING REMOTE SPECTRO- AND GASOMETRY UNDER THE GLOBAL CLIMATE CHANGES

V. I. Lyalko, G. M. Zholobak, S. S. Dugin, O. M. Sybirtseva, S. I. Golubov, Ye. M. Dorofey, O. V. Polishchuk. Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine. 0105455-B O. Gonchar st., 01054, Kyiv, Ukraine.
 M. G. Kholodny Institute of Botany NAS of Ukraine, Tereshchenkivska st., 2, 01004, Kyiv, Ukraine
 Operation of the indicators for the reliable regional carbon dioxide content in atmosphere is the important factor for the computer simulation of climatic changes at the appropriate scale. A goal is the experimental study of the processes for carbon dioxide gas exchange (photosynthesis and respiration) of wetland vegetation for the forest-steppe zone in Ukraine under recent climatic changes in order to determine the quantitative indicators for the CO₂ removal rate from the atmosphere by this vegetation. For this the CO₂ Qubit Systems s151 (Canada) are used to measure CO₂ in air end spectroradiometer FieldSpec® 3FR (USA). This system has got the respiratory flow-through chamber, where the test plant is placed. The CO₂ concentration changes in this chamber are measured by IR gas analyzer for the certain timespan. The results obtained for the main wetland plants (Carex riparia and Phragmites australis) during the spring-summer vegetative period show that the growth of their productivity (CO₂ removal rate from atmosphere) takes place only under the environmental temperature of 18–22 °C. Also, it is certain that the positive indicator for these systems is their appreciably

longer photosynthetic activity period as compared with the different ecosystems due to the cooling effect of soil moisture in their habitat. It should be taking into account when the measures for minimization of regional warming effects are implemented with the maximally contributing to the reclamation and revivification of the wetlands.

Keywords: climate exchanges, ground based spectrometry, red edge indices, field CO₂ flux measurements, wetlands, plant gas exchange, correlation

Рукопис статті отримано 15.01.2020