

5. Методичні рекомендації з основ органічного землеробства для фермерів (досвід ПП Агроєкологія). Полтава, 2013. 62 с.
6. Рекомендации по органическому полеводству / под ред. Горловой Е.В. Донецк : Ассоциация органического земледелия и садоводства, 2007. 84 с.
7. Писаренко В. М., Антоненць А. С., Писаренко П. В. Система органічного землеробства агроєколога Семена Антонця. Полтава, 2017. 124 с.
8. Стецишин П. О., Пиндус В. В., Рекуненко В. В. Основи органічного виробництва. Вінниця : Нова книга, 2011. 552 с.
9. Антоненць С. С., Антоненць А. С., Писаренко В. М. Сидеральні культури. Полтава : Сімон, 2011. 51 с.
10. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) Москва : Агропромиздат, 1985. 351 с.
11. Методика державного сортовипробування сільськогосподарських культур. Вип. 2. Київ, 2001. 254 с.
12. Грицаєнко З. М., Грицаєнко А. О., Карпенко В. П. Методика біологічних та агрохімічних досліджень рослин і ґрунтів. Київ : ЗАТ Мічлава, 2003. 320с.
13. Каленська С.М., Єрмакова Л. М., Паламарчук В. Д. та ін. Системи сучасних інтенсивних технологій у рослинництві. Вінниця : Рогальська І.О., 2015. 448 с.
14. Паламарчук В.Д., Поліщук В.С., Мазур А, Паламарчук О.Д. Новітні агро-технології в рослинництві : підручник. Вінниця : 2017. 602 с.

УДК 551.5:633/635:631.95

DOI <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2021.120.16>

РЕАКЦІЯ РОСЛИН НА РІСТ КОНЦЕНТРАЦІЇ CO₂ В АТМОСФЕРІ

Неміс І.Т. – д.с.-г.н., старший науковий співробітник

Онуфран Л.І. – к.с.-г.н., старший науковий співробітник

відділу рослинництва та неполивного землеробства,

Інститут зрошуваного землеробства Національної академії аграрних наук України

Неміс В.І. – к.с.-г.н., старший науковий співробітник

відділу біотехнології, овочевих культур та картоплі,

Інститут зрошуваного землеробства Національної академії аграрних наук України

У статті викладено результати огляду вітчизняних і зарубіжних наукових праць із питання реакції C₃ і C₄ рослин на ріст концентрації CO₂ в атмосфері. Наведено також результати дослідження інтенсивності асиміляції CO₂ рослинами пшениці озимої залежно від вологозабезпеченості, фону живлення та їхнього комплексного впливу на цей процес.

Зазначається, що існуючого нині вмісту CO₂ в атмосфері (300–380 ррт) недостатньо для реалізації потенціалу фотосинтезу й продуктивності C₃ і C₄ рослин. Ріст концентрації вуглекислоти в атмосфері до значення насиченості підвищує інтенсивність фотосинтезу рослин на 20–50%, покращує ріст надземної маси й кореневої системи, збільшує продуктивність рослин на 20–40% і більше. У C₃ рослин інтенсивність фотосинтезу та продуктивність досягають максимуму за концентрації CO₂ у повітрі 1000–1200 ррт, у C₄ рослин – за 400 ррт, а надмірний вміст CO₂ гальмує фотосинтез і ростові процеси.

У разі підвищення концентрації CO₂ у повітрі в рослин змінюються не тільки швидкість фотосинтезу, але й температурний та світловий оптимуми. При цьому температурний оптимум фотосинтезу зміщується в бік більш високих значень на 5–10 °С. Крім цього, з підвищенням вмісту CO₂ рослини ефективніше використовують воду, поживні речовини

та сонячну енергію ФАР. Ріст концентрації CO_2 в атмосфері нині не несе загрози для рослин, він є позитивним фактором впливу на врожайність агроценозів, оскільки за вказаних умов рослини набувають більшої стійкості до посухи й високих температур та ефективніше використовують воду, поживні речовини, сонячну енергію, що дає змогу одержувати високопродуктивні посіви в умовах потепління клімату. Пропонується враховувати «удобрювальний ефект CO_2 » у виробництві задля підвищення врожайності агроценозів.

Ключові слова: клімат, вуглекислий газ, рослини, фотосинтез, урожайність.

Netis I.T., Onufran L.I., Netis V.I. The reaction of plants to the growth of CO_2 concentration in the atmosphere

The article presents the results of a review of domestic and foreign scientific papers on the response of C_3 and C_4 of plants to an increase in the concentration of CO_2 in the atmosphere. The results of the study of the intensity of CO_2 assimilation by plants of winter wheat depending on the moisture supply and nutrition background and their complex influence on this process are also presented.

It is noted that the current content of CO_2 in the atmosphere (300–380 ppm) is not enough to realize the potential of photosynthesis and productivity of C_3 and C_4 of plants. Increasing the concentration of carbon dioxide in the atmosphere, to saturating, increases the intensity of photosynthesis of plants by 20–50%, improves the growth of the aboveground mass and root system and increases plant productivity by 20–40% or more. In C_3 of plants, the intensity of photosynthesis and productivity reach a maximum at concentrations of CO_2 in the air of 1000–1200 ppm, in C_4 of plants – at 400 ppm, and excessive CO_2 content inhibits photosynthesis and growth processes. With increasing CO_2 concentration in the air in plants change not only the rate of photosynthesis, but also temperature and light optimums. At the same time, the temperature optimum of photosynthesis is shifted towards higher values by 5–10 °C. In addition, as the CO_2 content of plants increases, they use water, nutrients and solar energy more efficiently. The increase in the concentration of CO_2 in the atmosphere at this stage does not pose a threat to plants, but is a positive factor influencing the yield of agroecosystems, because under these conditions plants become more resistant to drought, high temperatures and more efficiently use water, nutrients, solar energy, which allows for the formation of highly productive crops in global warming. It is proposed to take into account the 'fertilizing effect of CO_2 ' in production to increase the yield of agroecosystems.

Key words: climate, carbon dioxide, plants, photosynthesis, yield.

Постановка проблеми. На нашій планеті відбувається глобальне потепління клімату, що загрожує людству дуже негативними наслідками. Вважається, що однією з головних причин цього явища є збільшення в атмосфері вуглекислого газу (CO_2), який сприяє нагріванню атмосфери за типом «парникового ефекту». Науковці та світова громадськість вважають це однією з ключових проблем сьогодення і спрямовують значні зусилля задля зменшення викидів відпрацьованих газів в атмосферу. Проте концентрація CO_2 в атмосфері й температура повітря продовжують зростати. Тому зусилля науковців направлені на вивчення впливу росту концентрації CO_2 на зміни клімату та зменшення негативних наслідків, тоді як вплив його на рослинний і тваринний світ залишається без належної уваги.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо, що CO_2 разом із світлом і водою бере участь у процесі фотосинтезу рослин, під час якого синтезуються асимілянти, що витрачаються на ріст рослин і формування врожаю. Проте в Україні вплив зростання концентрації CO_2 в атмосфері на рослини та їхню продуктивність практично не досліджені, наукова інформація з цього питання вкрай обмежена. Невідомо також, чи є негативна реакція рослин на ріст концентрації CO_2 в повітрі та в чому вона проявляється. Особливий інтерес викликає вплив зростання вмісту вуглекислого газу на врожайність сільськогосподарських культур з погляду на продовольчу безпеку в майбутньому. Тому вивчення цього питання є досить актуальним.

Постановка завдання. Мета дослідження – складання огляду наукових праць та сучасних знань із питання реакції C_3 і C_4 рослин на ріст концентрації CO_2 в атмосфері та дослідження інтенсивності асиміляції CO_2 рослинами пшениці

озимої залежно від вологозабезпеченості, фону живлення та їхнього комплексного впливу.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження проведено на пшениці озимій в умовах зрошення і без нього та на двох фонах живлення – без добрив і на фоні $N_{120}P_{30}$. Інтенсивність асиміляції CO_2 рослинами пшениці визначали за методикою Бабушкіна, використовуючи прищепки на листки. Пошук та аналітичну обробку наукових праць проведено з питання впливу концентрації CO_2 на рослини та їхню продуктивність.

Вивчаючи вказану проблему, більшість науковців дійшли висновку, що такої концентрації CO_2 в атмосфері, яка існує нині (300–380 ppm, або 0,03–0,038%), недостатньо для реалізації потенціалу фотосинтезу C_3 і C_4 рослин [1, с. 293; 2]. Культурним рослинам з їхньою високою продуктивністю CO_2 завжди не вистачає, а влітку, в жаркий та безвітряний день у посівах створюється гострий дефіцит вуглекислого газу, що сильно гальмує або призупиняє фотосинтез рослин [3, с. 283].

Численні наукові публікації свідчать, що з ростом концентрації CO_2 в повітрі підвищується інтенсивність фотосинтезу рослин, прискорюється їхній ріст і збільшується продуктивність, а надмірний вміст CO_2 гальмує фотосинтез та ростові процеси [1, с. 292; 2; 4].

Концентрація вуглекислоти, що насичує фотосинтез, у різних рослин різна – від 600 до 4000 ppm [1, с. 292]. При цьому в C_3 рослин (пшениця, ячмінь, рис) максимум інтенсивності фотосинтезу настає за концентрації CO_2 1000–1200 ppm (0,1–0,12%), а в C_4 рослин – (кукурудза, сорго, просо) – швидкість фотосинтезу слабко зростає вже за концентрації CO_2 400 ppm, тому за існуючого вмісту CO_2 в повітрі їхній фотосинтез майже досягає оптимуму [2; 4].

В експериментах із різними рослинами встановлено, що за підвищення концентрації CO_2 в повітрі до 550–600 ppm у всіх культур зростає інтенсивність фотосинтезу: у сої – на 23% [5], у цукрового буряку – в два рази [3, с. 284], у соняшнику – на 50% [6, с. 645], у кукурудзи – на 15% [4]. Така реакція рослин обумовлена природою біохімічного процесу фотосинтезу, тому науково цілком аргументована.

У свою чергу, висока інтенсивність фотосинтезу збільшує ріст біомаси й кореневої системи рослин та їхню продуктивність [7; 8; 9]. Експериментально встановлено, що збагачення повітря вуглекислим газом на 300 ppm призводить до росту врожайності C_3 рослин у середньому на 49%, у C_4 рослин – на 20% (у тому числі ячменю – на 66%, пшениці – 43, кукурудзи – 22, сої – 46, гороху – 31, ріпаку – 62, картоплі – 35, томату – 20, рису – 37%) [7]. У дерев прирости біомаси ще більші – до 50–80% [4]. Отже, найбільше реагують на збагачення вуглекислотою C_3 рослини.

У дослідях із пшеницею озимою встановлено, що підвищення концентрації CO_2 в повітрі з 372 до 600 ppm збільшує врожайність її зерна на 26% за рахунок збільшення надземної біомаси та кількості зерен у колосі. Урожайність зростала з підвищенням концентрації CO_2 до 600 ppm, а збільшення її до 750 ppm майже не сприяло подальшому росту врожаю [9]. За іншими даними, найвищу врожайність (+37%) пшениця забезпечувала за концентрації CO_2 890 ppm [10].

Виявлено також, що сорти пшениці по-різному реагують на CO_2 . За підвищення його концентрації врожайність сортів зростає на 24–53%, що пояснюється різною інтенсивністю асиміляції CO_2 цих сортів [11]. Отже, важливо мати сорти з високою асиміляцією вуглекислого газу.

Слід відмітити, що більший приріст врожаю пшениці озимої від збагачення CO_2 формується на посівах із нижчою вологістю ґрунту. Під час поливів урожайність

її зерна від росту CO_2 збільшувалася на 10%, а без поливів – на 44% [12]. Ці дані підтверджуються багатьма іншими дослідженнями [11; 13; 14,]. Всі вони відмічають, що збільшення концентрації CO_2 в атмосфері пом'якшує вплив літньої посухи на врожайність агроценозів. Проте є свідчення, що за підвищеного вмісту CO_2 погіршується якість зерна пшениці – зменшується вміст білку та незамінних амінокислот, що знижує його поживну цінність [15].

У дослідах із соняшником підвищення концентрації CO_2 в повітрі з 370 до 550 ppm сприяло збільшенню врожайності насіння на 35–46%, при цьому зростав вміст олії у насінні [16]. Полив цукрового буряку водою, газованою вуглекислою, порівняно з поливами звичайною водою сприяв зростанню врожаю коренів на 46% [17, с. 85].

Уже давно відома висока ефективність «підживлення» вуглекислою овочевих культур в теплицях. Установлено, що за збільшення в теплиці концентрації CO_2 покращується ріст і розвиток рослин, формування плодів, унаслідок чого збільшується урожайність на 30% і більше [18]. Цей спосіб набув значного поширення і на практиці підтверджує позитивний вплив росту концентрації CO_2 в повітрі на продуктивність рослин.

Наведені вище дані свідчать, що ріст концентрації CO_2 в атмосфері на цьому етапі не несе загрози для рослин, а є позитивним фактором впливу на них, оскільки збільшує інтенсивність фотосинтезу та врожайність агроценозів на 20–40% і більше, без додаткових витрат на мінеральне живлення, зрошення і захист рослин. Негативна реакція рослин настає лише за вмісту CO_2 , вище насичуючої фотосинтез. А до цього ріст CO_2 в атмосфері супроводжується ростом урожайності рослин. Отже, чітко проявляється «удобрювальний ефект CO_2 », який слід враховувати у виробництві.

У літературі є свідчення, що за підвищення вмісту CO_2 в повітрі в рослин змінюються не тільки швидкість фотосинтезу, але й температурний та світловий оптимуми як адаптивна реакція на зміну умов навколишнього середовища [2; 3]. Так, підвищення концентрації CO_2 в повітрі до насичуючої позначки зміщує температурний оптимум фотосинтезу в бік більш високих значень на 5–10 °C та здійснює ефективний фотосинтез за високої інтенсивності світла [3]. Це означає, що в умовах підвищеної концентрації CO_2 фотосинтез може мати високий рівень навіть за температури 30–35°.

Дуже важливим є й те, що з підвищенням вмісту CO_2 знижується інтенсивність транспірації, рослини ефективніше використовують воду майже на 30% [13; 14; 19], поживні речовини [4], сонячну енергію (ФАР) [5; 12]. Підвищений рівень CO_2 більше стимулює приріст підземної маси рослин, ніж надземної [20]. Збільшується також ріст бульбочок на коренях бобових культур та їхня азотфіксація, що покращує азотне живлення наступних культур. На рослинах сої формується більша кількість стручків (на 54,8–122,4%) [7; 21].

Ці дані також підтверджують, що збільшення концентрації CO_2 в повітрі є позитивним для рослин, оскільки за вказаних умов вони набувають більшої стійкості до посухи і високих температур, ефективніше витрачають воду, поживні речовини та сонячну енергію, що має велике значення для формування високої врожайності агроценозів в умовах глобального потепління та зростаючої аридизації території.

В останні роки концентрація CO_2 в атмосфері зростає і є сприятливою для формування високих урожаїв сільськогосподарських культур. Як свідчать наведені вище дані, за таких умов урожайність агроценозів може підвищитися на 20–30% й зростатиме до насичуючої фотосинтез концентрації CO_2 . Паралельно з цим зростатиме й ефективність землекористування.

Проте важливо мати не тільки високий вміст CO_2 в повітрі, але й високу асиміляцію його рослинами. В посушливих умовах півдня України основним фактором, який впливає на асиміляцію CO_2 та продуктивність рослин, є забезпеченість їх водою. Встановлено, що посуха призводить до зниження асиміляції CO_2 пшениці озимої на 36–61 % [22, с. 373]. Після поливів пшениці засвоєння вуглекислоти рослинами збільшується в 1,5 рази порівняно з посівами без зрошення [23, с. 393].

Проведені нами дослідження на пшениці показали, що дефіцит вологи призводить до зменшення поглинання CO_2 , до значної депресії фотосинтезу рослин. Це обумовлено тим, що в умовах посухи прорихи листків звужуються, надходження CO_2 в листя зменшується, що й гальмує фотосинтез. У середньому за три роки досліджень рослини пшениці без зрошення засвоювали 17,8–20,6 мг $\text{CO}_2/\text{дм}^2$ год., тоді як під час зрошення асиміляція CO_2 збільшувалася до 23,7–31,8 мг $\text{CO}_2/\text{дм}^2$ год. (табл.1).

Таблиця 1

Асиміляція CO_2 рослинами пшениці озимої за різних умов вологозабезпеченості й живлення, мг $\text{CO}_2/\text{дм}^2$ год

Фаза розвитку	Без зрошення		Під час зрошення	
	Без добрив	$\text{N}_{120}\text{P}_{30}$	Без добрив	$\text{N}_{120}\text{P}_{30}$
Трубкування	22,7	26,1	24,7	27,5
Колосіння	24,4	24,7	26,0	34,3
Налив зерна	24,8	25,1	30,4	44,1
Молочна стиглість	12,5	15,4	27,2	28,6
Початок воскової ст.	4,8	11,6	10,3	24,4
Середнє за вегетацію	17,8	20,6	23,7	31,8

При цьому вплив зрошення на поглинання CO_2 значно зростає на фоні добрив, а вплив добрив зростає на фоні зрошення. Так, поливи без добрив збільшували поглинання CO_2 на 33,1 %, а в поєднанні з добривами – на 54,4 %, що підвищувало врожайність пшениці на 48,8 %. Поглинання CO_2 гальмується тоді, коли інший фактор – вода, живлення стає обмежувачим.

Статистичний аналіз даних показав, що між інтенсивністю асиміляції CO_2 та врожайністю пшениці озимої існує тісний кореляційний зв'язок. Чим вища асиміляція CO_2 , тим вищий формується врожай. Коефіцієнт кореляції між цими показниками становить 0,75–0,92. Отже, збільшення поглинання вуглекислоти рослинами є суттєвим фактором підвищення врожайності агроцензів.

Нині досить важко пояснити той факт, що за меншої кількості опадів та вищої температури повітря в останні 10 років валовий збір зерна в Україні не зменшився, а збільшився майже вдвічі – з 35–40 млн. тонн (у 1972–2010 рр.) до 60–74 млн. (у 2011–2020 рр.) за майже однакової площі посівів. Пояснюється це покращенням технології вирощування зернових культур, збільшенням площі посівів кукурудзи, новими сортами тощо. Але цього явно недостатньо для подвоєння збору зерна за гірших погодних умов. Враховуючи викладені вище наукові дані, безсумнівно, що однією з причин такого високого збору зерна в останні роки є зміна клімату і, передусім, підвищення концентрації CO_2 в атмосфері. Розміри цього впливу оцінити досить складно, але й ігнорувати не можна, оскільки наведені вище наукові дані чітко свідчать про існування «удобрювального ефекту CO_2 ».

У посівах польових культур збагачувати повітря вуглекислим газом задля підвищення врожайності агроценозів складно, але можливо. Відомо, що основним джерелом CO₂ є ґрунт та рослинні рештки. Надземний шар повітря постійно збагачується вуглекислим газом завдяки діяльності ґрунтових мікроорганізмів. Ґрунти, багаті на гумус, виділяють щодня значно більше CO₂, ніж мало гумусні, піщані тощо. Тому слід покращувати властивості ґрунтів шляхом внесення гною, подрібненої соломи, стебел кукурудзи, використання сидератів та No-till системи землеробства, яка покращує ґрунти. На величину виділення CO₂ з ґрунту значно впливає волога, мінеральне живлення, температура. Проте не менш важливо створювати умови для високої асиміляції CO₂ рослинами. Це досягається покращенням вологозабезпечення і живлення рослин (табл.1), а також використанням сортів із високою асиміляцією CO₂.

Враховуючи, що збільшення концентрації CO₂ в повітрі підвищує інтенсивність фотосинтезу рослин, останнє збільшить відбір CO₂ з атмосфери на потреби фотосинтезу, що стримуватиме подальший ріст концентрації CO₂ в атмосфері та потепління клімату.

Висновки і пропозиції. Аналіз наукової літератури свідчить, що ріст концентрації CO₂ в атмосфері на цьому етапі не несе загрози для рослин, а є позитивним фактором впливу на їхню продуктивність, оскільки підвищує інтенсивність фотосинтезу, покращує ріст надземної маси й кореневої системи та збільшує врожайність агроценозів на 20–40% і більше. Рослини набувають більшої стійкості до посухи і високих температур, ефективніше використовують воду, поживні речовини, сонячну енергію, що надає можливості для формування високопродуктивних посівів в умовах потепління клімату. Необхідно визнати існування позитивного впливу росту концентрації CO₂ в атмосфері на продуктивність рослин та ефективно використовувати його у виробництві. Тому в Україні потрібна державна програма наукових досліджень із цих питань.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Андреева Т.Ф. Физиология сельскохозяйственных растений. Том 1. Изд. Московского унив., 1967. 496 с.
2. Mirza Hasanuzzaman. Plant Ecophysiology and adaptation under climate change: mechanisms and perspectives I. *General Consequences and Plant Responses*. 2020. 859 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-15-2156-0>.
3. Оканенко А.С., Гуляев Б.И., Мануильский В.Д. Зависимость интенсивности фотосинтеза листьев сахарной свеклы от температуры и концентрации CO₂ при различных интенсивностях света. *Физиология и биохимия культурных растений*. Киев, 1972. Т. 4. Вып. 4. С. 280–285.
4. Idso C. D., Carter R. M., Singer S. F. Climate change reconsidered: interim report of the nongovernmental panel on climate change (NIPCC), Chicago, IL : The Heartland Institute. 2011. 415 p.
5. Dermody O., Long S. P., McConnaughay K.I. How do elevated CO₂ and O₃ affect the interception and utilization of radiation by a soybean canopy. *Glob. Change Biol.* 2008. No 14. P. 556–564.
6. Sims D.A., Cheng W., Luo Y., Seemann J.R. Photosynthetic acclimation to elevated CO₂ in a sunflower canopy. *Journal Experimental Botany*. 1999. Vol. 50. P. 645–653.
7. Idso C.D., Idso S.B. The many benefits of atmospheric CO₂ enrichment: how humanity and the rest of the biosphere will prosper from this amazing trace gas that so many have wrongfully characterized as a dangerous air pollutant. Pueblo West, Colorado : Vales Lake. 2011. 381 p.

8. Kang S., Zhang F., Hu X., Zhang J. Benefits of CO₂ enrichment on crop plants are modified by soil water, *Plant Soil*. 2002. Vol. 239. P. 59–77. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1014244413067>
9. Malin C. Broberg, Petra Högy, Zhaozhong Feng, Håkan Pleijel. Effects of elevated CO₂ on wheat yield: non-linear response and relation to site productivity. *Agronomy*. 2019. No 9(5). P. 243. DOI:10.3390/agronomy9050243.
10. Amthor, J.S. Effects of atmospheric CO₂ concentration on wheat yield: review of results from experiments using various approaches to control concentration. *Field crops research*. 2001. Vol. 73. P. 1–34. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-4290\(01\)00179-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-4290(01)00179-4).
11. Fitzgerald G.J., Tausz M., O’Leary G. Mollah M.R. Elevated atmospheric [CO₂] can dramatically increase wheat yields in semi-arid environments and buffer against heat waves. *Glob. Chang. Biol*. 2016. P. 2269–84. doi: 10.1111/gcb.13263.
12. Remy Manderscheid, Hans-Joachim Weigel. Drought stress effects on wheat are mitigated by atmospheric CO₂ enrichment. 2007. DOI: 10.1051 / agro: 2006035
13. Kimball B.A., Pinter P.J., Garcia R.L., Lamorte R.L., Wall G.W., Hunsaker D.J., Wechsung G., Wechsung F., T. Productivity and water use of wheat under free-air CO₂ enrichment. *Global Change Biol. J*. 1995. P. 429–442.
14. Chaudhuri U.N., Kirkham M.B., Kanemasu E.T. (1990) Carbon dioxide and water level effects on yield and water use of winter wheat. *Agronomy J*. 1990. Vol. 82. P. 637–641. DOI: 10.2134 / agronj1990.00021962008200030039x.
15. Högy P., Wieser H., Köhler P., Schwadorf K., Breuer J., Franzaring J., Muntifering R., Fangmeier A. Effects of elevated CO₂ on grain yield and quality of wheat: Results from a 3-year free-air CO₂ enrichment experiment. *Plant Biol*. 2009. No11. P. 60–69. DOI: 10.1111/j.1438-8677.2009.00230.x. DOI – PubMed.
16. Pal M., Chaturvedi A.K., Pandey S.K. Rising atmospheric CO₂ may affect oil quality and seed yield of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Acta Physiol. Plant*. 2014. Vol. 36. P. 2853–2861.
17. Константинов Н.М. Влияние углекислоты на рост и развитие растений. Москва : Сельхозгиз, 1950. 112 с.
18. Меенсалу Л.Г., Маэтал Х.И., Паэ А.А. Хийоп А.Х. Влияние оптимизации углекислотного режима воздуха на продуктивность тепличных культур. *Вестник с.-х. наук*. 1976. № 11. С. 55–61.
19. Fitzgerald G., Luo Q., et al. Response of wheat growth, grain yield and water use to elevated CO₂ under a free-air CO₂ enrichment (face) experiment and modeling in a semi-arid environment. *Glob. Chang. Biol*. 2015. Vol. 21. 2670–2686.
20. Ainsworth E. A., Long S. P. What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytologist*. 2005. Vol. 165. P. 351–372.
21. Madhu M., Jerry L. Hatfield. Elevated carbon dioxide and soil moisture on early growth response of soybean. *Agricultural Sciences*. 2015. Vol. 6. No. 2. DOI: 10.4236/as.2015.62027.
22. Моргун В.В., Стасик О.О., Кірізій Д.А., Прядкіна Г.О. Зв’язок реакції фотосинтетичних показників і зернової продуктивності на ґрунтову посуху в контрастних за стійкістю сортів озимої пшениці. *Физиология растений и генетика*. 2016. Т. 48. № 5. С. 371–381.
23. Гойса Н.И., Митрофанов Б.А., Оканенко А.С., Кутенко Г.И., Макаренко К.И. Исследование фотосинтеза озимой пшеницы в условиях различной влагообеспеченности. *Физиология и биохимия культурных растений*. 1971. Т. 3. Вып. 4. С. 392–397.