

## ФІЗІОЛОГІЯ І БІОХІМІЯ РОСЛИН

УДК [633.11 : 631.813] (631.559)

### ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ФОТОСИНТЕТИЧНО АКТИВНОЇ РАДІАЦІЇ ПОСІВАМИ ОЗИМОЇ ПШЕНИЦІ

© 2019 р. Г. О. Прядкіна<sup>1</sup>, О. О. Стасик<sup>1</sup>,  
О. С. Капітанська<sup>2</sup>, О. Є. Ярмольська<sup>3</sup>,  
Н. В. Цукренко<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Інститут фізіології рослин і генетики  
Національної академії наук України  
(Київ, Україна)

<sup>2</sup>ТОВ «НВК Квадрат»  
(Харків, Україна)

<sup>3</sup>Одеський державний екологічний університет  
(Одеса, Україна)

Досліджували ефективність використання фотосинтетично активної радіації трьох сортів озимої пшениці за позакореневої обробки рослин комплексом з семи мікроелементів, хелатованих лимонною кислотою, та його сумішю з карбамідом. У репродуктивний період вегетації обидва типи обробок сприяли підвищенню листкового індексу посівів (на 18-46% порівняно з контрольними варіантами, залежно від сорту і фази розвитку), маси сухої речовини у надземної частини рослин (на 10-52%) та ефективності перетворення поглинутої радіації на біомасу (на 45-80%). Найвищою ефективністю використання радіації в репродуктивний період розвитку за всіх умов вирощування відрізнявся сорт Астарт. Показано, що ефективність використання радіації сильніше залежала від сортових особливостей, ніж від дії обробок. Виявлено позитивну кореляцію між урожаєм озимої пшениці та ефективністю використання радіації. Обговорюються механізми збільшення ефективності перетворення поглиненої радіації на біомасу, пов'язані з сортовими особливостями і спричинені обробкою рослин хелатними комплексами мікроелементів.

**Ключові слова:** *Triticum aestivum*, озима пшениця, ефективність використання радіації, комплекс мікроелементів, карбамід

Поглинання енергії сонячного світла та інтенсивність фотосинтезу є двома основними чинниками, які визначають формування біомаси рослин (Zhu et al., 2010; Reynolds et al., 2012). Вважають, що за оптимальних умов вирощування потенційна урожайність культурних рослин визначається часткою господарсько-цінної частини рослин до її загальної біомаси ( $K_{\text{госп}}$ ), надходженням сумарної сонячної радіації до поверхні посіву впродовж вегетації, кіль-

кістю поглинутої фотосинтетично активної радіації (ФАР) та ефективністю її перетворення на біомасу (Monteith, 1977; Nay, Porter, 2006).

Оцінка можливостей підвищення кожної з цих складових для пшениці показала, що перші три з них уже досягли свого максимуму. Частка господарсько-цінної частини біомаси у більшості сучасних сортів пшениці складає близько 50-60%. Подальше збільшення поглинання ФАР є малоімовірним, оскільки посіви сучасних сортів поглинають значну частину радіації, що надходить до їх верхньої межі. У репродуктивний період посіви поглинають до 90% сонячної енергії (Zhu et al., 2008; Reynolds

Адреса для кореспонденції: Прядкіна Галина Олексіївна, Інститут фізіології рослин і генетики НАН України, вул. Васильківська, 31/17, Київ, 03022, Україна;  
e-mail: galpryadk@gmail.com

et al., 2009; Стасик, Кірівій, 2011). Хоча в окремих роботах показано, що поглинання ФАР в репродуктивний період залежить від сортових особливостей. Зокрема, сорти пшениці різних років селекції з середземноморської зони Іспанії не мали істотних відмінностей за поглинанням ФАР до цвітіння, але після нього у двох найстаріших генотипів воно було істотно нижчими, ніж у інших сортів (Acrecher et al., 2009).

Проте однією з реальних можливостей підвищення урожайності залишається збільшення ефективності використання поглиненої радіації на створення рослинної біомаси (Zhu et al., 2010; Reynolds et al., 2012; Slattery, Ort, 2015).

Особливо актуальним є збільшення ефективності використання радіації для пшениці – важливої продовольчої культури світу. Її середньосвітова урожайність в останнє десятиріччя варіює від 3 до 3,2 т/га (<https://www.statista.com/statistics/237705/global-wheat-production>). У той же час за умов достатнього водозабезпечення та надходження протягом вегетаційного періоду до поверхні посівів близько 1600 МДж/м<sup>2</sup>, ефективності використання фотосинтетично активної радіації на рівні 1,4 г/МДж та  $K_{\text{госп}}$  близько 50% потенційна урожайність пшениці буде сягати 13 т/га (Sinclair, 2013).

Традиційно для підвищення поглинання світлової енергії збільшують дози азотних добрив, що сприяє зростанню площі асиміляційної поверхні посіву. Але необхідність зменшення екологічного навантаження на довкілля, спонукає до пошуку інших підходів для зростання площі асиміляційної поверхні. До таких, зокрема, належать позакореневі підживлення рослин як макро-, так й мікроелементами. Ефективним для збільшення вмісту хлорофілу в листках вважають позакореневе підживлення карбамідом, що має в своєму складі амідну форму азоту, яка швидко проникає через листову поверхню рослин. Показано також збільшення площі асиміляційної поверхні різних культур під впливом обробок рослин солями магнію, заліза та комплексами мікроелементів (Rawashdeh, Sala, 2014; Amirani, Kasraei, 2015; Jung et al., 2017).

Мета роботи – оцінка ефективності використання фотосинтетично активної радіації посівами сучасних сортів озимої пшениці за різних умов мінерального живлення.

## МЕТОДИКА

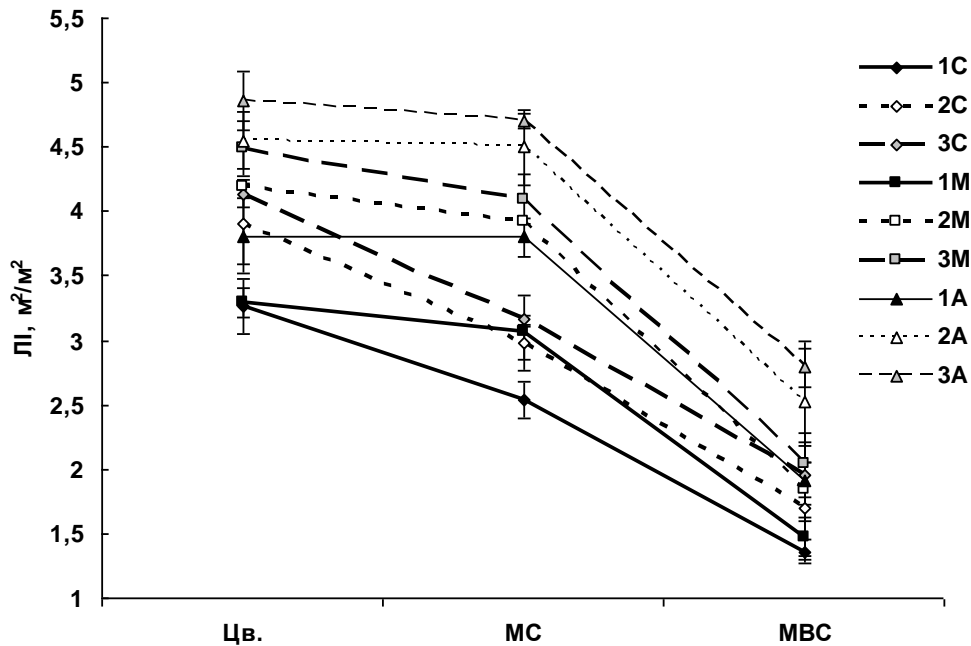
Вивчення дії обробки рослин пшениці комплексом карбоксилатів мікроелементів та його сумісного з карбамідом застосування на ефективність використання ФАР та зернову продуктивність посівів проведено у польовому досліді на ділянках конкурсного сортопробування озимої пшениці у дослідному господарстві Інституту фізіології рослин і генетики НАН України (ІФРГ) (сmt. Глеваха, Київська обл.). Грунти – світло-сірі, опідзолені легкосуглинкові. Норма висіву рослин складала 5,5-6 млн. зерен на гектар. Агротехніка – загальноприйнята для посівів озимої пшениці в лісостеповій агрокліматичній зоні.

Об'єктом дослідження були три сорти м'якої озимої пшениці (*Triticum aestivum* L.) селекції ІФРГ НАН України та Миронівського Інституту пшениці ім. В.М. Ремесла НААН України: Смуглянка, Астарта та Малинівка. Сівбу проводили 26 вересня 2015 р. Рослини всіх варіантів вирощували на фоновому живленні (N<sub>145</sub>P<sub>90</sub>K<sub>90</sub>). Добрива вносили частинами протягом вегетації. Площа облікової ділянки – 20 м<sup>2</sup>, кількість повторень – три.

Для визначення морфометричних показників і формування середньої проби (20 пагонів) відбирали підряд головні і бічні пагони. Щільність рослин у посівах кожного генотипу визначали на чотирьох півметрових рядках та перераховували на кількість пагонів на 1 м<sup>2</sup>. Фенологічні спостереження за фазами розвитку рослин проводили за Ф.М. Куперман (Куперман, 1977). Фіксацію окремих органів рослин для визначення в них сухої речовини проводили у сушильній шафі за температури 105°C впродовж 3-х годин і потім досушували до сталої маси.

У дослідних варіантах рослини обприскували комплексом карбоксилатів мікроелементів Аватар-1 (у дозі 250 мл/га) та його сумішшю з карбамідом (250 мл/га та карбамід в дозі 10 кг діючої речовини на гектар). Контролем слугували рослини на фоновому живленні. Позакореневу обробку рослин мікроелементним комплексом Аватар-1, отриманим нанотехнологічними методами (ООО «Аватар», Україна), здійснювали за допомогою ручного обприскувача у фазах колосіння та молочної стиглості. Обприскування проводили після 18-ї години, коли температура повітря не перевищувала 15-18°C. Комплекс мікроелементів, хелатованих лимонною кислотою, має в своєму складі сім найбільш важливих для рослинного метаболізму мікроелементів (Косінов, Каплуненко,

## ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ФОТОСИНТЕТИЧНО АКТИВНОЇ РАДІАЦІЇ



**Рис. 1.** Вплив обробок рослин трьох сортів озимої пшениці комплексом карбоксилатів мікроелементів та його суміші з карбамідом на динаміку листового індексу посівів протягом періоду цвітіння - молочно-воскова стиглість.

**Примітки.** Сорти: С – Смуглянка, М – Малинівка, А – Астарта; варіанти: 1 – контроль, 2 – рослини, оброблені мікроелементним комплексом Аватар-1, 3 – рослини, оброблені сумішшю мікроелементного комплексу з карбамідом; фази: Цв. – цвітіння, МС – молочно стиглість, МВС – молочно-воскова стиглість.

2009). Концентрація (за вмістом діючої речовини) магнію в мікроелементному комплексі становила 0,05%, заліза і міді – 0,02%, цинку – 0,003%, марганцю – 0,005%, молібдену – 0,005% і кобальту – 0,001%. Рослини контрольних варіантів обприскували тією ж кількістю води, яку використовували для розведення комплексу мікроелементів та його суміші з карбамідом.

Величини сум денної сумарної сонячної радіації розраховували за даними п'яти строкових спостережень Центральної геофізичної обсерваторії ім. Б. Срезневського (Руководство ..., 1973). Сумарну радіацію за певний період вегетації розраховували як добуток денних сум за цей період. Коефіцієнт перерахунку сумарної радіації на фотосинтетично активну в червні та липні на широті Києва дорівнює 0,52 (Клімат України, 2010).

Ефективність використання радіації (ЕВР) визначали як різницю між сухою надземною біомасою з одиниці площі посіву в окремих фазах розвитку, віднесена до сумарної величини ФАР за цей же проміжок часу (Monteith, 1977; Plenet et al. 2000). Листковий індекс (ЛІ), що характеризує загальну площу асиміляційної поверхні посівів, розраховували

за А.А. Ничипоровичем як добуток площі зелених листків пагонів та їх кількості на одиниці площі ґрунту (Ничипорович, 1963).

Статистичну обробку даних проводили за допомогою програм Microsoft Excel за оцінкою істотності відмінностей вибірових середніх за *t*-критерієм Стьюдента, кореляційний аналіз – за Б.А. Доспеховим, істотність тісноти кореляцій оцінювали за критерієм Фішера (Доспехов, 1973).

## РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Ефективність використання радіації посівами культурних рослин визначається кількістю поглинутого світла та масою утвореної ними сухої речовини. У свою чергу кількість сонячної радіації, поглинутої рослинами, значною мірою визначається площею їх асиміляційної поверхні, яку характеризують за величиною ЛІ посівів.

Позакореневе підживлення рослин досліджених сортів як мікроелементним комплексом Аватар-1, так й його сумішшю з карбамідом сприяло зростанню ЛІ порівняно з контролем (рис. 1). У фазі цвітіння він підвищувався на 20-27% у варіантах з обробкою мікроелементним комплексом та на 27-36% за сумісної з ка-

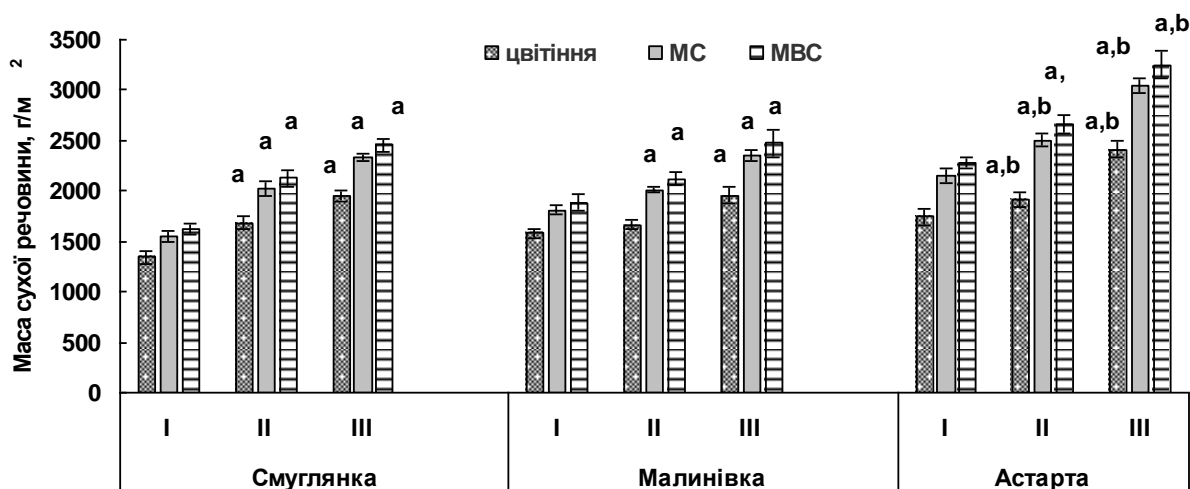


Рис. 2. Вплив обробок рослин трьох сортів озимої пшениці комплексом карбоксилатів мікроелементів та його суміші з карбамідом на накопичення сухої речовини в репродуктивний період розвитку.

Примітки. I – контроль, II – рослини, оброблені мікроелементним комплексом Аватар-1, III – рослини, оброблені сумішшю мікроелементного комплексу з карбамідом; МС – молочна стиглість, МВС – молочновоскова стиглість; різниця істотна при  $P < 0,05$ : a – з відповідним контролем, b – з сортом Смуглянка.

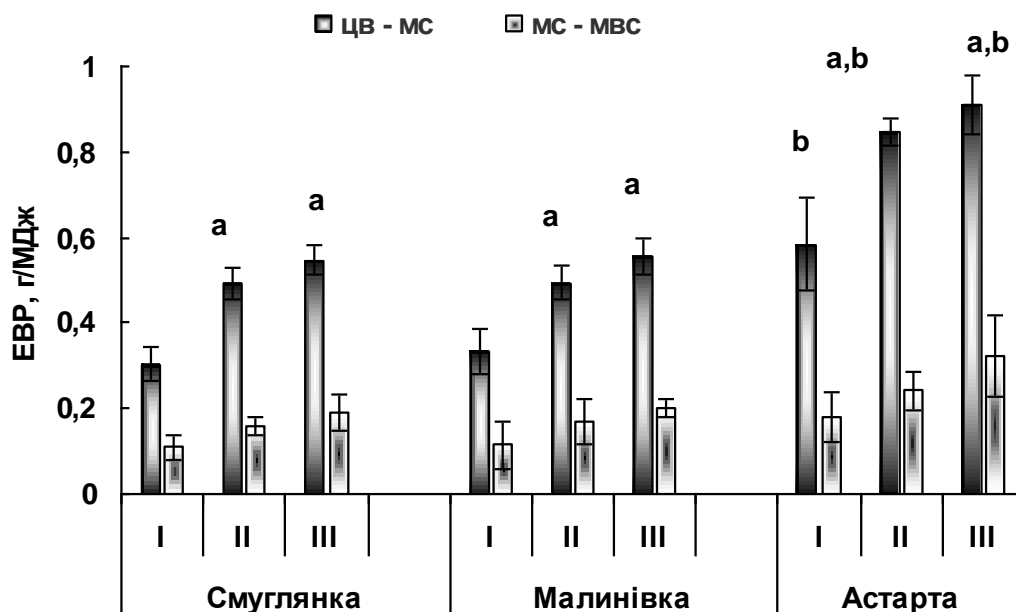


Рис. 3. Вплив обробки рослин мікроелементним комплексом Аватар-1 та його суміші з карбамідом на ефективність використання ФАР, г сухої речовини/Мдж, посівами озимої пшениці за періоди цвітіння – молочна стиглість (ЦВ - МС) та молочна – молочновоскова стиглість (МС - МВС).

Примітки. I – контроль, II – рослини, оброблені мікроелементним комплексом Аватар-1, III – рослини, оброблені сумішшю мікроелементного комплексу з карбамідом; різниця істотна при  $P < 0,05$ : a – з відповідним контролем, b – з сортом Смуглянка.

рбамідом обробки, у фазі молочної стиглості, відповідно, на 18-28 і на 24-34% та 24-32 і 39-46% у фазі молочно-воскової стиглості. Проте,

Лі посівів кожного з досліджених сортів обох варіантів з позакореневим підживленням між собою відрізнялися не суттєво. Отже, застосу-

## ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ФОТОСИНТЕТИЧНО АКТИВНОЇ РАДІАЦІЇ

**Таблиця 1. Вплив обробки рослин трьох сортів пшениці озимої мікроелементним комплексом Аватар-1 та його сумішшю з карбамідом на урожай, т/га (ДВС Глеваха, Київська обл., 2016 р.)**

| Сорт      | Варіант           |                      |                      |
|-----------|-------------------|----------------------|----------------------|
|           | Контроль          | Аватар-1             | Аватар-1 + карбамід  |
| Смуглянка | 7,21 <sup>b</sup> | 7,82 <sup>a, b</sup> | 7,66 <sup>a, b</sup> |
| Малинівка | 8,00 <sup>b</sup> | 8,55 <sup>a, b</sup> | 8,68 <sup>a, b</sup> |
| Астарта   | 8,42 <sup>b</sup> | 9,19 <sup>a, b</sup> | 9,29 <sup>a, b</sup> |

**Примітка.** Різниця істотна при  $P < 0,05$ : а – з відповідним контролем, b – між сортами.

вання позакореневого підживлення рослин збільшувало площу асиміляційної поверхні посівів. Вищими значеннями ЛП відрізнявся сорт Астарта, у двох інших сортів у відповідних варіантах він був близьким (рис. 1).

Підживлення рослин мікроелементним комплексом Аватар-1 та його сумішшю з карбамідом також позитивно вплинуло на накопичення біомаси рослин (рис. 2). Так, у фазі цвітіння у варіантах з обробкою Аватар-1 маса сухої речовини у надземній частини рослин зростала на 10-25%, відносно контролю, за сумісної з карбамідом дії – на 24-46%, у фазі молочної стиглості та молочно-воскової стиглості, відповідно, на 11-31 та на 29-52%. Більшими накопиченням сухої речовини і величиною ЛП, відрізнявся сорт Астарта (рис. 2).

На ефективність використання фотосинтетично активної радіації посівами впливали як сортові особливості, так і обробки рослин. Впродовж періоду цвітіння – молочна стиглість значення ЕВР досліджених сортів озимої пшениці в контрольних варіантах варіювали від 0,33 до 0,58 г/МДж, при обробці комплексом мікроелементів вона збільшувалась до 0,49-0,85 г/МДж та була майже у цих межах (від 0,55 до 0,91 г/МДж) при сумісному підживленні карбамідом та мікроелементами (рис. 3). У період молочна – молочно-воскова стиглість перетворення поглинутої радіації на рослинну біомасу зменшувалося порівняно з попереднім періодом у 2,8-3,5 раза: до 0,11-0,18 г/МДж у контрольному та 0,16-0,24 і 0,19-0,32 г/МДж у дослідних варіантах.

Найвищою ефективністю використання фотосинтетично активної радіації посівами протягом періоду цвітіння – молочна стиглість відрізнявся сорт Астарта в усіх варіантах досліду (рис. 3). У період молочна – молочно-воскова стиглість ЕВР цього сорту істотно перевищувала відповідні значення сортів Смуглянка та Малинівка лише за обробки рослин карбоксилатом мікроелементів.

Досліджувані сорти в усіх варіантах істотно відрізнялися за зерновою продуктивністю (табл. 1). Найвищу врожайність спостерігали у сорту Астарта, найменшу – у сорту Смуглянка. За умов позакореневого підживлення рослин урожай збільшувався на 6-10%. При цьому достовірної різниці за впливом на урожайність між цими двома типами обробок не спостерігали.

Позитивний зв'язок між урожаєм озимої пшениці та ефективністю використання радіації протягом періоду цвітіння – молочна стиглість та молочна – молочно-воскова стиглість засвідчує, що збільшення перетворення поглинутої радіації на рослинну біомасу сприяло збільшенню зернової продуктивності озимої пшениці (рис. 4).

Коефіцієнти кореляції цієї залежності в обидва досліджених періоди вегетації були близькими ( $0,85 \pm 0,20$  та  $0,82 \pm 0,22$ ) та істотними на 1% рівні значущості (табл. 2). Пряму позитивну кореляцію ефективності перетворення сонячної радіації на біомасу з урожайністю пшениці показано і за інших умов вирощування (Chen et al., 2003; Li et al., 2008; Lollato, Edwards, 2015).

Отже, збільшення використання сонячної радіації посівами озимої пшениці можна розглядати як одну з можливостей підвищення урожайності. Що особливо важливо зараз – в умовах значного зростання народонаселення планети, змін клімату, відсутності нових орних площ та невеликих щорічних приростів врожайності пшениці.

З літератури відомо про різні можливості збільшення ЕВР. Зокрема, за рахунок оптимізації мінерального живлення (Li et al., 2011; Mahbod et al., 2013), водного режиму (Hussain et al., 2004; Han et al., 2008; Lollato, Edwards, 2015), способу (Tao et al., 2018) та терміну (Chaudhary et al., 2016) сівби. Ще одним важливим джерелом підвищення ЕВР може бути генетичний потенціал сортів. Зокрема, показано, що у п'яти сучасних сортів пшениці, які істотно відрізнялися за фенологічним розвитком, висо-

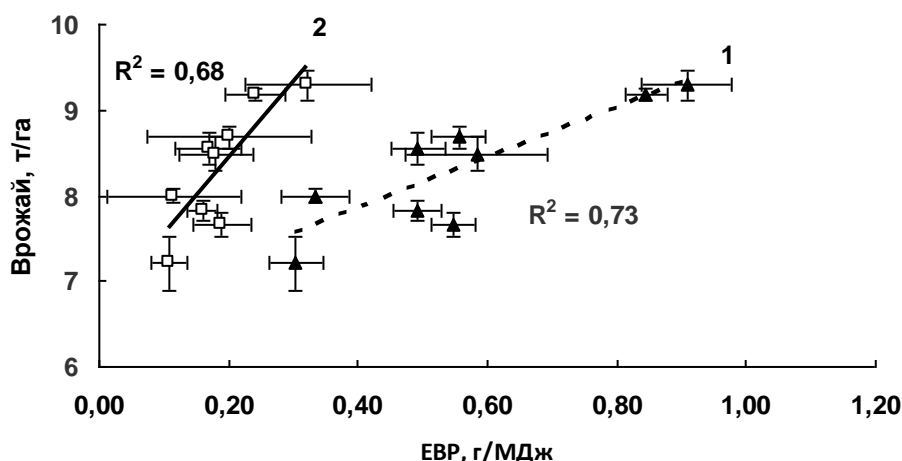


Рис. 4. Залежність урожаю озимої пшениці від ефективності використання радіації протягом періоду цвітіння – молочна стиглість (1) та молочна – молочно-воскова стиглість (2).

Примітка. Вертикальні та горизонтальні лінії показують похибку середніх значень, відповідно, урожаю та ЕВР.

Таблиця 2. Коефіцієнти кореляції між урожаєм озимої пшениці та ефективністю використання радіації її посівами в окремі періоди вегетації

| Період                              | Коефіцієнт кореляції | Критерій Фішера |      |      |
|-------------------------------------|----------------------|-----------------|------|------|
|                                     |                      | фактичний       | 0,05 | 0,01 |
| Цвітіння – молочна стиглість        | 0,85±0,20            | 4,36            | 2,37 | 3,50 |
| Молочна – молочно-воскова стиглість | 0,82±0,22            | 3,82            | 2,37 | 3,50 |

Число ступенів свободи = 7.

Таблиця 3. Оцінка впливу обробки рослин пшениці мікроелементним комплексом Аватар-1 і його сумішшю з карбамідом та сортових особливостей на ефективність використання ФАР посівами пшениці озимої в окремі періоди вегетації

| Фактор    | Число ступенів свободи | Критерій Фішера     |          |             |      |
|-----------|------------------------|---------------------|----------|-------------|------|
|           |                        | фактичний за період |          | теоретичний |      |
|           |                        | Цвітіння – МС       | МС – МВС | 0,05        | 0,01 |
| Сорт      | 2                      | 30,33**             | 3,74*    | 3,28        | 5,28 |
| Обробка   | 2                      | 16,33**             | 2,84     | 3,28        | 5,28 |
| Взаємодія | 4                      | 0,28                | 0,10     | 2,65        | 3,91 |

Примітки: МС – молочна стиглість, МВС – молочно-воскова стиглість; \*, \*\* - різниця істотна при  $P < 0,05$  та  $P < 0,01$ , відповідно.

тою рослин, лі посіву, накопиченням сухої речовини та урожайністю, ефективність використання світла також відрізнялася (Awal et al., 2017). Вищою вона була у найбільш урожайних сортів.

Дисперсійний аналіз впливу обробки рослин пшениці мікроелементним комплексом Аватар-1 і його сумішшю з карбамідом та сортових особливостей на ефективність використання ФАР посівами досліджених сортів пше-

ниці озимої в окремі періоди вегетації показав, що ЕВР сильніше залежала від сортових особливостей, ніж від дії обробок (табл. 3).

Значний вплив генетичного потенціалу сортів може бути пов'язаним з роботою їх фотосинтетичного апарату. За літературними даними, оптимізація роботи фотосинтетичного апарату на різних рівнях його організації може збільшити зернову продуктивність на 10-60% (Long et al., 2006; 2015; Blankenship et al., 2011;

Drewry et al., 2014). Серед найбільш перспективних шляхів посилення фотосинтезу вважають посилення експресії генів, що пов'язані з ефективнішим використанням світла в процесі фотосинтезу (Furbank et al., 2015). Зокрема, показано, що у високопродуктивного сорту озимої пшениці більш ефективна регуляція енергетичного балансу фотосинтетичного процесу, ніж у менш продуктивного сорту (Прядкіна, 2014). Також встановлено, що за рахунок збільшення експресії генів, пов'язаних з пігментами віолаксантинного циклу, які беруть участь у захисті фотосинтетичного апарату від надлишку освітлення, маса сухої речовини генетично модифікованих рослин тютюну підвищилася на 15% (Kromdijk et al., 2016; Leonelli et al., 2016). Тобто більш ефективне використання світла в процесі фотосинтезу позитивно впливає на продукування біомаси.

У той же час, обробка рослин пшениці мікроелементним комплексом Аватар-1 та його сумішшю з карбамідом також істотно збільшувала ефективність використання ФАР посівами досліджених нами сортів пшениці (рис. 3, табл. 3). Оскільки застосований комплекс мікроелементів відрізняється низьким вмістом металів-мікроелементів, можна припустити, що позитивний вплив такої обробки може бути пов'язаним з їх впливом на окремі регуляторні механізми фотосинтетичного процесу. Зокрема, на рослинах арабідопсису встановлено, що магній може впливати на експресію генів, пов'язаних з фотозахистними системами фотосинтетичного апарату (Verbruggen, Hermans, 2017). Також виявлено підвищення відносного рівня експресії антиоксидантних ферментів (супероксиддисмутази та пероксидази), у оброблених цинком рослин пшениці за умов посухи, порівняно з контролем (Ma et al., 2017).

Отже, встановлено, що сучасні сорти озимої пшениці відрізняються за ефективністю перетворення енергії сонячної радіації на біомасу в репродуктивний період їх розвитку. Вища ЕВР у сорту Астарта свідчить про перспективність використання цього сорту у селекційних програмах. Збільшення ЕВР у оброблених рослин вказує, що позакореневе підживлення рослин комплексом мікроелементів та сумісне застосування з карбамідом також може сприяти підвищенню врожайності, що важливо для впливу на хід формування врожаю та розробки біоекологічних технологій наступного покоління.

## ЛІТЕРАТУРА

- Доспехов Б.А. 1973. Методика полевого опыта. Москва : 335 с.
- Клімат України [За ред. Ліпінського В.М., Дячук В.А., Бабіченко В.М.]. 2003. Київ : 343 с.
- Куперман Ф.М. 1977. Морфофизиология растений. Москва : 288 с.
- Ничипорович А.А. 1963. О путях повышения продуктивности фотосинтеза в посевах. В: Фотосинтез и вопросы продуктивности растений. Москва: Изд-во АН СССР, с. 5-36
- Прядкіна Г.О. 2014. Фізіологічні основи підвищення продуктивності рослин озимої пшениці. Київ : 192 с.
- Руководство гидрометеорологическим станциям и постам по актинометрическим наблюдениям. 1973. Ленинград : 223 с.
- Стасик О.О., Кірізій Д.А. 2011. Регуляторні зв'язки і лімітувальні чинники в системі фотосинтез – продукційний процес та перспективи їх оптимізації. Физиология и биохимия культ. растений. 43 : 226-238.
- Косінов М.В., Каплуненко В. Г. 2009. Патент України на корисну модель № 38391. Спосіб отримання карбоксилатів металів «Нанотехнологія отримання карбоксилатів металів». МПК (2006): C07C 51/41, C07F 5/00, C07F 15/00, C07C 53/126 (2008.01), C07C 53/10 (2008.01), A23L 1/00, B82B 3/00. Опубл. 12.01.2009, бюл. № 1/2009
- Acreche M.M., Briceno-Felix G., Sanchez J.A.M., Slafer G.A. 2009. Radiation interception and use efficiency as affected by breeding in Mediterranean wheat. Field Crop Res. 110 : 91-97.
- Amirani D.Sh., Kasraei P. 2015. The effect of foliar application of microelements on phenological and physiological characteristics of Mung bean under drought stress. Int. J. Agron Agric Res. 7 : 1-8.
- Armour T., Jamieson P., Nichols A., Zyskowski R. 2004. Breaking the 15 t/ha wheat yield barrier: A discussion. In: Proc. 4<sup>th</sup> Int. Crop Science Congr., Brisbane, Australia. 26 Sept. – 1 Oct. 2004.
- Awal M.A., Amin M.R., Rhaman M.S., Shelley I.J., Rahman M.Sh. 2017. Canopy Characters and Light-Use Efficiency of Some Modern Wheat Varieties in Bangladesh. J. Agricult. Ecol. Res. Int. 11 : 1-16.
- Blankenship R.E., Tiede D.M., Barber J., Brudvig G.W., Fleming G., Ghirardi M., Gunner M.R., Junge W., Kramer D.M., Melis A., Moore T.A., Moser C.C., Nocera D.G., Nozik A.J., Ort D.R., Parson W.W., Prince R.C., Sayre R.T. 2011. Comparing photosynthetic and photovoltaic efficiencies and recognizing the potential for improvement. Science. 332 : 805-809.
- Chen Y.H., Yu S.L., Yu Z.W. 2003. Relationship between amount or distribution of PAR interception

- and grain output of wheat communities. *Acta Agron. Sinica*. 29 : 730-734.
- Drewry D.T., Kumar P., Long S.P. 2014. Simultaneous improvement in productivity, water use, and albedo through crop structural modification. *Global Change Biol.* 20 : 1955-1967.
- Furbank R.T., Quick W.P., Sirault X.R.R. 2015. Improving photosynthesis and yield potential in cereal crops by targeted genetic manipulation: prospects, progress and challenges. *Field Crop Res.* 182 : 19-29.
- Han H., Li Z., Ning T., Zhang X., Shan Y., Bai M. 2008. Radiation use efficiency and yield of winter wheat under deficit irrigation in North China. *Plant Soil Environ.* 54 : 3130-319.
- Hay R.K.M., Porter J.R. 2006. *The Physiology of Crop Yield*. 2<sup>nd</sup> ed. Oxford, U.K. Blackwell Publishing Company : 328 p.
- Hussain A., Chaudhry M.R., Wajid A., Ahmad A., Ibrahim M.R.M., Goheer A.R. 2004. Influence of water stress on growth, yield and radiation use efficiency of various wheat cultivars. *Int. J. Agr. Biol.* 6 : 1074-1079.
- Chaudhary J.L., Patel S.R., Verma P.K., Manikandan N., Khavse R. 2016. Thermal and radiation effect studies of different wheat varieties in Chhattisgarh plains zone under rice-wheat cropping system. Article in *Mausam*, 67 : 677-682.
- Jung S., Faust F.E., Schubert S. 2017. Limiting physiological processes for maize growth under Mg deficiency. XVIII International Plant Nutrition Colloquium; 2017 Aug 19-24; Copenhagen, pp. 227-228.
- Kromdijk J., Glowacka K., Leonelli L., Gabilly S.T., Iwai M., Niyogi K.K., Long S.P. 2016. Improving photosynthesis and crop productivity by accelerating recovery from photoprotection. *Science*. 354 : 857-861.
- Leonelli L., Erickson E., Lyska D., Niyogi K.K. 2016. Transient expression in *Nicotiana benthamiana* for rapid functional analysis of genes involved in non-photochemical quenching and carotenoid biosynthesis. *Plant J.* 88 : 375-386.
- Li H.L., Luo Y., Ma J.H. 2011. Radiation-use efficiency and the harvest index of winter wheat at different nitrogen levels and their relationships to canopy spectral reflectance. *Crop Pasture Sci.* 62 : 208-217.
- Li Q.Q., Chen Y.H., Liu M.Y., Xunbo Z., Songlie Y., Baodi D. 2008. Effect of irrigation and planting patterns on radiation use efficiency and yield of winter wheat in North China. *Agricn. Water Manage.* 95 : 469-476.
- Lollato R.P., Edwards J.T. 2015. Maximum Attainable Wheat Yield and Resource-Use Efficiency in the Southern Great Plains. *Crop Sci.* 55: 2863-2876.
- Long S.P., Ainsworth E.A., Leakey A.D.B., Nösberger J., Ort D.R. 2006. Food for thought: Lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO<sub>2</sub> concentrations. *Science*. 312 : 1918-1921.
- Long S.P., Marshall-Colon A., Zhu X.G. Meeting the global food demand of the future by engineering crop photosynthesis and yield potential. *Cell*. 161 : 56-66.
- Ma D., Sun D., Wang Ch., Ding H., Qin H., Hou J., Ding H., Qin H., Hou J., Huang X., Xie Y., Guo T. 2017. Physiological responses and yield of wheat plants in Zinc-mediated alleviation of drought stress. *Front Plant Sci.* 8 : 1-12.
- Mahbod M., Zand-Parsa Sh., Sepaskhah A.R. 2013. Adjustment of radiation use efficiency of winter wheat by air temperature at different irrigation regimes and nitrogen rates *Arch. Agr. Soil. Sci.* 2013. 60 : 49-66.
- Monteith J.L. 1977. Climate and efficiency of crop production in Britain. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 281 : 277-294.
- Plenet D., Mollier A., Pellerin S. 2000. Growth analysis of maize field crops under phosphorus deficiency. II. Radiation-use efficiency, biomass accumulation and yield components. *Pant Soil.* 224 : 259-272.
- Rawashdeh H., Sala F. 2014. Influence of iron foliar fertilization on some growth and physiological parameters of wheat at two growth stages. *Scientific Papers. Series A. Agronomy.* LVII : 306-369.
- Reynolds M., Foulkes J., Furbank R., Friffiths S., King J., Murchie E., Parry M.A.J., Slafer G. 2012. Achieving yield grains in wheat. *Plant Cell Environ.* 35 : 1799-1823.
- Reynolds M.P., Foulkes V.J., Slafer G.A., Berry P., Parry M.A., Snape J.W., Angus W.J. 2009. Raising yield potential in wheat. *J. Exp. Bot.* 60 : 1899-1918. doi: 10.1093/jxb/erp016.
- Sinclair T.R., Muchow R.C. 1999. Radiation-use efficiency. In: Sparks D.L. (ed.) *Advances in Agronomy*. New York : 215-265.
- Sinclair T.R. 2013. Transpiration: Moving from semi-empirical approaches to first principles. In: Fleisher D. (ed.) *Symposium – Improving tools to assess climate change effects on crop response: Modeling approaches and applications*, I, 4 Nov. 2013, Madison.
- Slattery R.A., Ort D. R. 2015. Photosynthetic Energy Conversion Efficiency: Setting a Baseline for Gauging Future Improvements in Important Food and Biofuel Crops. *Plant Physiol.* 168 : 383-392.
- Tao Z.Q., Wang D.M., Ma S.K., Yang Y.Sh., Zhao G.C., Chang X.T. 2018. Light interception and radiation use efficiency response to tridimensional uniform sowing in winter wheat. *J. Integrative Agricul.* 17 : 566-578.
- Verbruggen N., Hermans Ch. 2013. Physiological and molecular responses to magnesium nutritional imbalance in plants. *Plant Soil.* 368 : 87-99.
- Zheng T.C., Zhang X.K., Yin G.H., Wang L.N., Han Y.L., Chen L., Huang F., Tang J.W., Xia X.C.,



## ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ФОТОСИНТЕТИЧНО АКТИВНОЇ РАДІАЦІЇ

- He Z.H. 2011. Genetic gains in grain yield, net photosynthesis and stomatal conductance achieved in Henan Province of China between 1981 and 2008. *Field Crops Res.* 122 : 225-233.
- Zhu X., Long S.P., Ort D.R. 2010. Improving photosynthetic efficiency for greater yield. *Ann. Rev. Plant Biol.* 61 : 235-261.
- Zhu X.G., Long S.P., Ort D.R. 2008. What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass. *Curr. Opin. Biotechnol.* 19 : 153-159.
- ### REFERENCES
- Dosphehov B.A. 1973. *Metodika polevogo opyta (Field experience methods)*. Moscow : 335 p.
- Klimat Ukrainy (Climate of Ukraine) [Lipinskiy V.M., Dyachuk V.A., Babichenko V.M.] (eds.). 2003. Kyiv : 343 p.
- Kuperman F.M. 1977. *Morfofiziologiya rasteniy (Plant morphophysiology)*. Moscow : 288 p.
- Nichiporovich A.A. 1963. On ways to increase the productivity of photosynthesis in crops. In: *Fotosintez i voprosy produktivnosti rasteniy (Photosynthesis and problems of plant productivity)*. Moscow: Izd-vo AN SSSR, pp. 5-36.
- Pryadkina G.O. 2014. *Fiziologichni osnovi pidvyschennya produktivnosti roslin ozimoyi pshenitsi (Physiological basis of increasing the productivity of winter wheat)*. Kyiv : 192 p.
- Rukovodstvo gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam po aktinometricheskim nabludeniyam (Guide to hydrometeorological stations and posts on actinometric observations). 1973. Leningrad : 223 p.
- Stasik O.O., Kiriziy D.A. 2011. Regulatory mechanisms and limiting factors in the photosynthesis—productivity relationships and prospects for their optimization. *Fiziologiya i Biokhimiya Kult. Rastenii.* 43 : 226-238).
- Kosinov M.V., Kaplunenko V.G. 2009. Patent Ukrainy na korysnu model N 38391. Sposib otrimannya karboksilativ metaliv «Nanotehnologiya otrimannya karboksilativ metaliv». MPK (2006): C07C 51/41, C07F 5/00, C07F 15/00, C07C 53/126 (2008.01), C07C 53/10 (2008.01), A23L 1/00, B82B 3/00. Opubl. 12.01.2009, bul. № 1/2009.
- Acreche M.M., Briceno-Felix G., Sanchez J.A.M., Slaughter G.A. 2009. Radiation interception and use efficiency as affected by breeding in Mediterranean wheat. *Field Crop Res.* 110 : 91-97.
- Amirani D.Sh., Kasraei P. 2015. The effect of foliar application of microelements on phenological and physiological characteristics of Mung bean under drought stress. *Int. J. Agron Agric Res.* 7 : 1-8.
- Armour T., Jamieson P., Nichols A., Zyskowski R. 2004. Breaking the 15 t/ha wheat yield barrier: A discussion. In: *Proc. 4th Int. Crop Science Congr., Brisbane, Australia.* 26 Sept. – 1 Oct. 2004.
- Awal M.A., Amin M.R., Rhaman M.S., Shelley I.J., Rahman M.Sh. 2017. Canopy Characters and Light-Use Efficiency of Some Modern Wheat Varieties in Bangladesh. *J. Agricult. Ecol. Res. Int.* 11 : 1-16.
- Blankenship R.E., Tiede D.M., Barber J., Brudvig G.W., Fleming G., Ghirardi M., Gunner M.R., Junge W., Kramer D.M., Melis A., Moore T.A., Moser C.C., Nocera D.G., Nozik A.J., Ort D.R., Parson W.W., Prince R.C., Sayre R.T. 2011. Comparing photosynthetic and photovoltaic efficiencies and recognizing the potential for improvement. *Science.* 332 : 805-809.
- Chen Y.H., Yu S.L., Yu Z.W. 2003. Relationship between amount or distribution of PAR interception and grain output of wheat communities. *Acta Agron. Sinica.* 29 : 730-734.
- Drewry D.T., Kumar P., Long S.P. 2014. Simultaneous improvement in productivity, water use, and albedo through crop structural modification. *Global Change Biol.* 20 : 1955-1967.
- Furbank R.T., Quick W.P., Sirault X.R.R. 2015. Improving photosynthesis and yield potential in cereal crops by targeted genetic manipulation: prospects, progress and challenges. *Field Crop Res.* 182 : 19–29.
- Han H., Li Z., Ning T., Zhang X., Shan Y., Bai M. 2008. Radiation use efficiency and yield of winter wheat under deficit irrigation in North China. *Plant Soil Environ.* 54 : 3130-319.
- Hay R.K.M., Porter J.R. 2006. *The Physiology of Crop Yield.* 2nd ed. Oxford, U.K. Blackwell Publishing Company : 328 p.
- Hussain A., Chaudhry M.R., Wajid A., Ahmad A., Ibrahim M.R.M., Goheer A.R. 2004. Influence of water stress on growth, yield and radiation use efficiency of various wheat cultivars. *Int. J. Agr. Biol.* 6 : 1074-1079.
- Chaudhary J.L., Patel S.R., Verma P.K., Manikan-dan N., Khavse R. 2016. Thermal and radiation effect studies of different wheat varieties in Chhattis-garh plains zone under rice-wheat cropping system. *Article in Mausam,* 67 : 677-682.
- Jung S., Faust F.E., Schubert S. 2017. Limiting physiological processes for maize growth under Mg deficiency. XVIII International Plant Nutrition Colloquium; 2017 Aug 19-24; Copenhagen, pp. 227-228.
- Kromdijk J., Glowacka K., Leonelli L., Gabilly S.T., Iwai M., Niyogi K.K., Long S.P. 2016. Improving photosynthesis and crop productivity by accelerating recovery from photoprotection. *Science.* 354 : 857-861.
- Leonelli L., Erickson E., Lyska D., Niyogi K.K. 2016. Transient expression in *Nicotiana benthamiana* for rapid functional analysis of genes involved in non-

- photochemical quenching and carotenoid biosynthesis. *Plant J.* 88 : 375-386.
- Li H.L., Luo Y., Ma J.H. 2011. Radiation-use efficiency and the harvest index of winter wheat at different nitrogen levels and their relationships to canopy spectral reflectance. *Crop Pasture Sci.* 62 : 208-217.
- Li Q.Q., Chen Y.H., Liu M.Y., Xunbo Z., Songlie Y., Baodi D. 2008. Effect of irrigation and planting patterns on radiation use efficiency and yield of winter wheat in North China. *Agricn. Water Manage.* 95 : 469-476.
- Lollato R.P., Edwards J.T. 2015. Maximum Attainable Wheat Yield and Resource-Use Efficiency in the Southern Great Plains. *Crop Sci.* 55: 2863-2876.
- Long S.P., Ainsworth E.A., Leakey A.D.B., Nösberger J., Ort D.R. 2006. Food for thought: Lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO<sub>2</sub> concentrations. *Science.* 312 : 1918-1921.
- Long S.P., Marshall-Colon A., Zhu X.G. Meeting the global food demand of the future by engineering crop photosynthesis and yield potential. *Cell.* 161 : 56-66.
- Ma D., Sun D., Wang Ch., Ding H., Qin H., Hou J., Ding H., Qin H., Hou J., Huang X., Xie Y., Guo T. 2017. Physiological responses and yield of wheat plants in Zinc-mediated alleviation of drought stress. *Front Plant Sci.* 8 : 1-12.
- Mahbod M., Zand-Parsa Sh., Sepaskhah A.R. 2013. Adjustment of radiation use efficiency of winter wheat by air temperature at different irrigation regimes and nitrogen rates *Arch. Agr. Soil. Sci.* 2013. 60 : 49-66.
- Monteith J.L. 1977. Climate and efficiency of crop production in Britain. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 281 : 277-294.
- Plenet D., Mollier A., Pellerin S. 2000. Growth analysis of maize field crops under phosphorus deficiency. II. Radiation-use efficiency, biomass accumulation and yield components. *Plant Soil.* 224 : 259-272.
- Rawashdeh H., Sala F. 2014. Influence of iron foliar fertilization on some growth and physiological parameters of wheat at two growth stages. *Scientific Papers. Series A. Agronomy.* LVII : 306-369.
- Reynolds M., Foulkes J., Furbank R., Friffiths S., King J., Murchie E., Parry M.A.J., Slafer G. 2012. Achieving yield gains in wheat. *Plant Cell Environ.* 35 : 1799-1823.
- Reynolds M.P., Foulkes V.J., Slafer G.A., Berry P., Parry M.A., Snape J.W., Angus W.J. 2009. Raising yield potential in wheat. *J. Exp. Bot.* 60 : 1899-1918. doi: 10.1093/jxb/erp016.
- Sinclair T.R., Muchow R.C. 1999. Radiation-use efficiency. In: Sparks D.L. (ed.) *Advances in Agronomy.* New York : 215-265.
- Sinclair T.R. 2013. Transpiration: Moving from semi-empirical approaches to first principles. In: Fleisher D. (ed.) *Symposium – Improving tools to assess climate change effects on crop response: Modeling approaches and applications*, I, 4 Nov. 2013, Madison.
- Slattery R.A., Ort D. R. 2015. Photosynthetic Energy Conversion Efficiency: Setting a Baseline for Gauging Future Improvements in Important Food and Biofuel Crops. *Plant Physiol.* 168 : 383-392.
- Tao Z.Q., Wang D.M., Ma S.K., Yang Y.Sh., Zhao G.C., Chang X.T. 2018. Light interception and radiation use efficiency response to tridimensional uniform sowing in winter wheat. *J. Integrative Agricul.* 17 : 566-578.
- Verbruggen N., Hermans Ch. 2013. Physiological and molecular responses to magnesium nutritional imbalance in plants. *Plant Soil.* 368 : 87-99.
- Zheng T.C., Zhang X.K., Yin G.H., Wang L.N., Han Y.L., Chen L., Huang F., Tang J.W., Xia X.C., He Z.H. 2011. Genetic gains in grain yield, net photosynthesis and stomatal conductance achieved in Henan Province of China between 1981 and 2008. *Field Crops Res.* 122 : 225-233.
- Zhu X., Long S.P., Ort D.R. 2010. Improving photosynthetic efficiency for greater yield. *Ann. Rev. Plant Biol.* 61 : 235-261.
- Zhu X.G., Long S.P., Ort D.R. 2008. What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass. *Curr. Opin. Biotechnol.* 19 : 153-159.

*Надійшла до редакції  
18.10.2018р.*

**EFFICIENCY OF USE OF PHOTOSYNTHETICALLY ACTIVE RADIATION  
IN WINTER WHEAT CROPS**

G. O. Priadkina<sup>1</sup>, O. O. Stasik<sup>1</sup>, O. S. Kapitanska<sup>2</sup>, O. E. Yarmolska<sup>3</sup>, N. V. Tsukrenko<sup>3</sup>

*<sup>1</sup>Institute of Plant Physiology and Genetics  
of National Academy of Sciences of Ukraine  
(Kyiv, Ukraine)*

*E-mail: galpryadk@gmail.com*

*<sup>2</sup>Ltd «Research and production company Kvadrat»  
(Kharkiv, Ukraine)*

*<sup>3</sup>Odesa State Ecological University  
(Odesa, Ukraine)*

The radiation use efficiency of three varieties of winter wheat with foliar treatment of a complex including 7 trace elements chelated with citric acid and its mixture with urea was investigated. During the reproductive period, both types of treatments contributed to an increase in the leaf area index (by 18–46%, compared with the control variants, depending on the variety and phase of development), weight of dry matter of aerial part of plants (by 10-52%) and the conversion efficiency of absorbed radiation into biomass (45-80%). The presence of varietal differences in the radiation use efficiency was established: the variety Astarta differed by higher values. It has been shown that the radiation use efficiency depended more strongly from varietal features than of treatments effects. A direct positive correlation was found between the yield of winter wheat and the radiation use efficiency. The mechanisms of increasing the conversion efficiency of absorbed radiation into biomass associated with varietal characteristics and caused by the treatment of plants are discussed.

**Key words:** *Triticum aestivum, winter wheat, radiation use efficiency, microelement complex, urea*

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИ АКТИВНОЙ РАДИАЦИИ  
ПОСЕВАМИ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ**

Г. А. Прядкина<sup>1</sup>, О. О. Стасик<sup>1</sup>, О. С. Капитанская<sup>2</sup>, Е. Е. Ярмольская<sup>3</sup>, Н. В. Цукренко<sup>3</sup>

*<sup>1</sup>Институт физиологии растений и генетики  
Национальной академии наук Украины  
(Киев, Украина)*

*E-mail: galpryadk@gmail.com*

*<sup>2</sup>ТОВ «НВК Квадрат»  
(Харьков, Украина)*

*<sup>3</sup>Одесский государственный экологический университет  
(Одесса, Украина)*

Исследовали эффективность использования фотосинтетически активной радиации у трех сортов озимой пшеницы при внекорневой обработке растений комплексом, включающим семь микроэлементов, хелатированных лимонной кислотой, и его смесью с карбамидом. В репродуктивный период вегетации оба типа обработок способствовали повышению листового индекса посевов (на 18-46% по сравнению с контрольными вариантами, в зависимости от сорта и фазы развития), массы сухого вещества надземной части растений (на 10-52%) и эф-

### **ПРЯДКІНА та ін.**

фektivности превращения поглощенной радиации в биомассу (на 45-80%). Установлено наличие сортовых различий по эффективности использования радиации: наиболее высокими ее значениями отличался сорт Астарт. Показано, что эффективность использования радиации сильнее зависела от сортовых особенностей, чем от действия обработок. Обнаружена прямая положительная корреляция между урожаем озимой пшеницы и эффективностью использования радиации. Обсуждаются механизмы увеличения эффективности превращения поглощенной радиации в биомассу, связанные с сортовыми особенностями и вызванные обработкой растений хелатными комплексами микроэлементов.

**Ключевые слова:** *Triticum aestivum*, озимая пшеница, эффективность использования радиации, комплекс микроэлементов, карбамид