

ЕКОЛОГІЯ

УДК 581.1+ 546.77+ 635.652+ 535.37

А. І. ГЕРЦ, О. Б. КОНОНЧУК

Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка
вул. М. Кривоноса, 2, Тернопіль, 46027

ЗМІНА ДЕЯКИХ ФІЗІОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ РОСЛИН *PHASEOLUS VULGARIS* L. ЗА РІЗНОЇ КОНЦЕНТРАЦІЇ НАНОМОЛІБДЕНУ

Досліджено у ґрунтовій вегетаційній культурі вплив позакореневого підживлення рослин квасолі звичайної сорту Буковинка різними концентраціями молібденового нанопрепарату. На підставі методу індукованої флуоресценції хлорофілу (ІФХ) та проведених морфо-фізіологічних досліджень встановлено, що оптимальною концентрацією мікроелементу є 240 мг/л. Виокремлено групу параметрів флуоресценції хлорофілу *a*, зокрема F_{PSII} , ϕNPQ , що пов'язані з продуктивністю сорту та чутливі до зміни концентрації розчину молібдену для позакореневого внесення.

Ключові слова: квасоля звичайна, *Phaseolus vulgaris* L., молібден, ріст, хлорофіл, флуоресценція, індукція флуоресценції хлорофілу, нефотохімічне гасіння, ефективність фотохімії ФС II

Молібден відіграє важливу роль у багатьох фізіологічних процесах рослин, оскільки входить до складу більше ніж двадцяти ферментів. Перш за все, цей мікроелемент впливає на азотний обмін рослин, оскільки є компонентом нітратредуктази, нітрогенази, активує реакції амінування і переамінування, необхідний для синтезу леггемоглобіну тощо, що особливо важливо для бобових культур [3, 10, 20]. Молібден необхідний під час білкового синтезу, вуглеводного обміну та обміну фосфорних сполук, синтезу вітамінів і хлорофілів тощо [17].

Дефіцит молібдену виявляється в першу чергу на кислих ґрунтах через його зв'язування оксидами алюмінію і заліза та органічними сполуками [7, 10, 18]. Тому, у сільськогосподарському виробництві нестачу мікроелементу усувають не лише оптимізацією рівня кислотності і внесенням мінеральних добрив у ґрунт, а й застосуванням під час передпосівної обробки насіння та позакореневим підживленням рослин [7, 17, 19, 21, 24].

Підвищити ефективність застосування молібдену може його використання у формі нанопрепаратів, які володіють значно вищою біоактивністю, порівняно із звичайними мікродобривами, завдяки активнішому і тривалішому проникненню діючої речовини з наночастинок у рослини та менш вираженою фітотоксичною дією. Передпосівна обробка насіння та обприскування рослин такими препаратами забезпечує стимулювання їх росту, підвищення стійкості до абіотичних і біотичних стресових чинників, оптимізує симбіотичну азотфіксацію, зумовлює вищу продуктивність тощо [1, 11, 15, 23].

Отже, метою нашого дослідження було за ростовими процесами і станом фотосинтетичного апарату рослин квасолі звичайної встановити найефективнішу концентрацію наномолібденового препарату вітчизняного виробництва для позакореневого підживлення.

Матеріал і методи досліджень

У дослідях використовували квасолю звичайну (*Phaseolus vulgaris* L.) сорту Буковинка, який відноситься до середньостиглих форм зернового напрямку продуктивності та рекомендований до вирощування у Лісостепу і Степу України з 2004 року.

Досліди проводились у лабораторії фізіології рослин і мікробіології кафедри ботаніки та зоології Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Рослини вирощувались у вегетаційних посудинах на чорноземі типовому малогумусному за 80% польової вологості та штучному освітленні 15 кЛк.

Досліджуваний молібденовий препарат є колоїдним розчином мікроелементу концентрації 100 мг/л, який виготовлений в Інституті біоколоїдної хімії ім. Ф. Д. Овчаренка НАН України (м. Київ) шляхом відновлення Мо у розчині K_2MoO_4 з подальшою стабілізацією наночастинок багатоатомними спиртами.

Квасолю у фазу перших справжніх листків обприскували водними розчинами нанопрепарату концентрації 120, 240 і 360 мг/л молібдену (варіанти, відповідно, Mo_{120} , Mo_{240} , Mo_{360}) чи дистильованою водою (контроль).

Експеримент тривав до фази трьох листків, під час якої досліджували висоту рослин, масу сирі і сухої речовини за загальноприйнятими методиками [4], загальну площу листової поверхні методом висічок [8] та за допомогою ПЗ Petiole Android App, вміст основних листових пігментів фотометрично [12].

Оцінка стану фотосинтетичного апарату рослин здійснювалась методом індукції флуоресценції хлорофілу (ІФХ). Вимірювання проводили за допомогою РАМ-флуорометра MultispeQ Beta [22].

Повторність визначень 4-6-кратна. Статистичне опрацювання даних проводили за допомогою програми *MS Excel* та *RStudio*.

Результати досліджень та їх обговорення

Вирощування квасолі звичайної сорту Буковинка у ґрунтовій вегетаційній культурі показало, що позакореневе підживлення рослин нанопрепаратом молібдену позитивно впливає на ростові процеси вже у фазу третього справжнього листка (табл. 1).

Таблиця 1

Показники росту та площа листків рослин квасолі звичайної сорту Буковинка за дії наномолібдену різних концентрацій у фазу трьох листків

Показник	Контроль	Mo_{120}	Mo_{240}	Mo_{360}
висота рослини, г	18,7±1,3	21,6±0,5	21,2±1,8	21,5±0,6
маса сирі надземної частини, г	3,48±0,29	5,09±0,21*	7,95±0,63*	4,86±0,30*
маса сирих листків на рослині, г	2,03±0,19	3,01±0,14*	5,53±0,52*	2,89±0,16*
площа листової поверхні, см ²	176,7±16,8	229,0±10,7*	289,8±27,2*	216,9±12,1
маса сухого стебла, г	0,18±0,02	0,28±0,01*	0,29±0,03*	0,29±0,02*

Примітка: * – зміни порівняно з контролем вірогідні ($P < 0,05$)

Висота рослин у дослідних варіантах підвищувалась на 13,4-15,5% до контролю без значних відмінностей залежно від концентрації мікроелементу.

Відомо, що важливішим показником оцінки ростових процесів рослин є не їх лінійний ріст, а процеси накопичення ними маси [2]. Так, маса сирі надземної частини рослин квасолі зростала достовірно на 128,4% після обробки молібденом концентрації 240 мг/л та на 46,3% і 39,7% до контролю, відповідно, 120 і 360 мг/л. Аналогічна тенденція виявлена і за підвищенням маси сирих листків – у варіанті Mo_{120} на 48,3%, Mo_{240} – 172,4% і Mo_{360} – 42,4% та їх загальної площі – на 29,6%, 64,0% і 22,8% до контролю, відповідно. Накопичення маси сухої речовини у стеблах відбувалось достовірно інтенсивніше, ніж у контрольних рослин, на 55,6-61,1% і, як і ріст, без значних відмінностей залежно від концентрації мікроелементу.

Аналіз даних реакції рослин квасолі за ростовими процесами на досліджувані концентрації молібдену вказує на переважаюче стимулювання мікроелементом накопичення сирової маси у надземній частині рослин за рахунок значніших асимілятивних і ростових процесів, перш за все, у листках, що виразилось у підвищенні їх маси і площі та маси сухих речовин у стеблі. Найвищі показники стимулювання наростання маси сирової речовини надземної частини та площі і маси листків виявляє застосування розчину наномолібдену концентрації 240 мг/л.

Відомо, що мінеральне живлення здійснює стимулюючий вплив на утворення і функціонування фотосинтетичного апарату, а сам фотосинтез здатний підвищувати ефективність використання елементів мінерального живлення. Проте, зазначений взаємозв'язок залежить від багатьох чинників, у першу чергу, форми, дози та способу застосування елементів живлення [5].

Важливим фізіологічним показником у дослідженнях впливу молібдену на рослини є вміст фотосинтетичних пігментів, адже за нестачі мікроелементу знижується вміст хлорофілів, на листках можуть з'явитись жовті плями і навіть скручування і висихання [7].

Спектрофотометричне визначення вмісту в листках хлорофілу *a* виявило його найвище зростання у дослідному варіанті Мо240 – на 18,4% до контролю, а після обробки мікроелементом концентрації 120 і 360 мг/л, відповідно, на 6,3% і 10,0% (табл. 2).

Зростання хлорофілу *b* і основних каротиноїдів було значніше після застосування максимальної досліджуваної концентрації молібдену у 360 мг/л – на 36,2% і 39,3% порівняно з контролем. Молібден концентрації 240 мг/л підвищував вміст зазначених пігментів на 18,5% і 5,3% та 120 мг/л – 4,2% і 7,0% до контролю, відповідно (табл. 2).

У функціональному відношенні хлорофіли та каротиноїди складають єдину систему [5]. Так, під впливом нанопрепарату незначно змінювалось співвідношення між ними, за виключенням зростання на 12,5% до контролю відношення суми хлорофілів *a* і *b* до каротиноїдів у варіанті Мо240 та зменшення на 9,1% цього співвідношення і на 19,2% балансу хлорофілу *a* і хлорофілу *b* після застосування мікроелементу концентрацією 360 мг/л (табл. 2). Така неоднакова зміна цих показників може свідчити про певну специфічність метаболічних процесів зумовлених дією молібдену та можливим негативним впливом високої концентрації мікроелементу у 360 мг/л, адже відомо, що зростання каротиноїдів відіграє важливу роль у формуванні захисних механізмів фотосинтетичного апарату рослин до несприятливих факторів [14].

Таблиця 2

Вміст листових пігментів у рослинах квасолі звичайної сорту Буковинка за дії наномолібдену різних концентрацій у фазу трьох листків, мг/100 г сирової маси

Показник	Контроль	Мо ₁₂₀	Мо ₂₄₀	Мо ₃₆₀
хлорофіл <i>a</i>	70,0±1,5	74,4±0,7	82,9±3,4*	77,0±6,6
хлорофіл <i>b</i>	155,4±2,7	161,9±3,9	184,1±5,4*	211,6±5,1*
основні каротиноїди	30,0±0,6	32,1±0,6	31,5±0,9	41,8±0,6*
хлорофіл <i>a</i> / хлорофіл <i>b</i>	0,45	0,46	0,45	0,36
хлорофіл <i>a+b</i> / каротиноїди	7,51	7,36	8,45	6,90

Примітка: * – зміни порівняно з контролем вірогідні (P<0,05)

Оскільки, фотосинтез є необхідною умовою ефективного використання елементів мінерального живлення та з метою обґрунтування вищеписаних морфо-фізіологічних відмінностей, очевидно обумовлених дією йонів молібдену, здійснено оцінку стану ФС II у *P. vulgaris* методом індукованої флуоресценції хлорофілу *a* (ІФХ) [9, 13].

Стан фотосистеми II (ФС II) оцінюється за низкою параметрів ІФХ (табл. 3). Найбільш інформативним, серед них, є міра ефективності фотохімії ФС II на світлі – ФПСII (ефективний

квантовий вихід фотохімічних реакцій у ФС II, параметр Жанті), що визначає частку світла, поглинутого хлорофілом, асоційованим з ФС II, яка використовується на фотохімію [9, 13]. У якості параметрів, що характеризують теплову дисипацію енергії, використовують нефотохімічне гасіння флуоресценції (NPQt) і квантовий вихід нефотохімічного гасіння флуоресценції (ϕ NPQ) [22].

Таблиця 3

Флуоресцентні параметри та відносний вміст хлорофілу листків квасолі звичайної сорту Буковинка за дії наномолібдену різних концентрацій у фазу трьох листків, в.о.

Показник	Контроль	Mo ₁₂₀	Mo ₂₄₀	Mo ₃₆₀
Φ_{PSII}	0,63±0,007	0,65±0,007	0,68±0,005*	0,65±0,006
% до контролю	-	103,0	107,9	103,0
NPQt	0,49±0,016	0,39±0,008*	0,38±0,010*	0,46±0,030
	-	79,5	77,5	93,8
ϕ NPQ	0,12±0,004	0,09±0,002*	0,08±0,001*	0,10±0,007
% до контролю	-	75,0	66,6	83,3
ϕ NO	0,24±0,003	0,24±0,005	0,23±0,005	0,23±0,003
% до контролю	-	100,0	95,8	95,8
qL	0,53±0,012	0,55±0,017	0,60±0,017*	0,57±0,013
% до контролю	-	103,7	113,2	107,5
LEF	26,15±1,16	28,92±1,27	27,23±2,05	29,63±1,27
	-	110,6	104,1	113,3
Rfd	1,76±0,05	1,93±0,06	2,12±0,05*	1,91±0,06
% до контролю	-	109,6	120,5	108,5
SPAD	35,25±2,01	37,63±1,23	41,62±1,49*	37,66±0,59
% до контролю	-	106,7	118,1	106,8

Примітка: * – зміни порівняно з контролем вірогідні (P<0,05)

Аналізуючи вплив наномолібдену на флуоресцентні параметри фотосинтетичного апарату *P. vulgaris* (табл. 3), зауважимо, що не лише Φ PSII, NPQt, ϕ NPQ, але й такі параметри, як частка реакційних центрів ФС II, що знаходяться у відкритому стані (qL), частка світла, котра йде на активацію нерегульованих процесів у ФС II (ϕ NO) та лінійний електронний транспорт (LEF) певною мірою (залежно від варіанту досліду) реагують на присутність молібдену, як мікроелемента у розчині для позакореневого підживлення. На те, що вплив мікроелементу є позитивним, вказують дані відносного вмісту хлорофілу (SPAD) [22] у листках квасолі. У всіх досліджуваних варіантах (порівняно з контролем) SPAD зростає, а за концентрації молібдену 240 мг/л відмінність є статистично достовірною (табл. 3). Цей параметр широко використовується в якості індикатора азотного статусу рослин та є месенджером перших проявів стресу [22], який, враховуючи отримані нами дослідні значення SPAD, не виникає за дії використаних нами концентрацій молібдену.

Для встановлення взаємозв'язку та впливу вищезгаданих параметрів флуоресценції хлорофілу *a* на вегетативну масу рослин, було побудовано кореляційну матрицю (табл. 4). Матриця кореляції маси сирової надземної частини (див. табл. 1) та параметрів флуоресценції хлорофілу (див. табл. 3) дозволила виділити наступні параметри: Φ PS II, SPAD, індекс життєздатності (Rfd), які позитивно корелюють із збільшенням вегетативної маси рослин. Коефіцієнт кореляції (r) становить 0,51, 0,52 та 0,53 відповідно.

Отже, збільшення маси сирової надземної частини, маси окремо взятих сирих листків, площі листової поверхні (див. табл. 1) обумовлене зростанням вмісту хлорофілу та рівня квантового виходу електронного транспорту у ФС II (табл. 4). Збільшення частки нефотохімічних процесів ϕNPQ ($r = -0,50$) у ФС II, знижує фотосинтетичну продуктивність рослин, що цілком закономірно та узгоджується з літературними даними [13].

Таблиця 4

Кореляційна матриця параметрів флуоресценції хлорофілу а за дії наномолібдену під час позакореневого внесення, г

	SPAD	Φ_{PSII}	NPQt	qL	ϕNPQ	ϕNO	LEF	RFd	маса сирової надземної частини, г
SPAD	1,00	0,44	-0,21	0,45	-0,32	-0,39	0,03	0,46	0,52
Φ_{PSII}	0,44	1,00	-0,64	0,89	-0,85	-0,70	0,00	1,00	0,51
NPQt	-0,21	-0,64	1,00	-0,23	0,95	-0,09	0,14	-0,61	-0,43
qL	0,45	0,89	-0,23	1,00	-0,53	-0,94	0,07	0,91	0,41
ϕNPQ	-0,32	-0,85	0,95	-0,53	1,00	0,23	0,10	-0,83	-0,50
ϕNO	0,39	-0,70	-0,09	-0,94	0,23	1,00	-0,12	-0,73	-0,27
LEF	0,03	0,00	0,14	0,07	0,10	-0,12	1,00	0,01	-0,14
RFd	0,46	1,00	-0,61	0,91	-0,83	-0,73	0,01	1,00	0,53
маса сирової надземної частини, г	0,52	0,51	-0,43	0,41	-0,50	-0,27	-0,14	0,53	1,00

Незважаючи на велику кількість літературних джерел щодо впливу металів на фотохімічні та фізіологічні процеси рослин, на сьогодні немає цілісної картини змін у реакціях фотосинтезу під впливом цього типу стресу [22]. У цілому, відомо, що високі концентрації важких металів інгібують фотосинтез. Хоча, вплив окремих металів є специфічним для конкретних видів рослин і навіть сортів [6].

Щоб оцінити вплив різних концентрацій йонів молібдену на вище згадані параметри (табл. 4), що характеризують стан ФС II, поряд із однофакторним дисперсійним аналізом (ANOVA), було проведено додатковий після-аналіз (post-hoc) із застосуванням критерію Тьюкі [16].

З'ясовано, що ΦPSII , NPQt, ϕNPQ , частка реакційних центрів ФС II (РЦ ФС II), які знаходяться у відкритому стані (qL), відносний вміст хлорофілу (SPAD) та індекс життєздатності (RFd) чутливі до зміни концентрації наномолібдену у розчині ($P < 0,05$) для позакореневого підживлення рослин (табл. 5, рис. 1).

Таблиця 5

Попарне порівняння варіантів досліджень із застосуванням критерію Тьюкі (виявлення розміру впливу різних концентрацій наномолібдену на параметри флуоресценції хлорофілу а)

Варіанти	р-величина							
	Φ_{PSII}	NPQt	ϕNPQ	ϕNO	qL	LEF	RFd	SPAD
Mo ₁₂₀ - Контроль	0,240	0,024*	0,022*	0,989	0,903	0,590	0,235	0,591
Mo ₂₄₀ - Контроль	0,004*	0,016*	0,002*	0,373	0,050*	0,965	0,003*	0,016
Mo ₃₆₀ - Контроль	0,360	0,773	0,474	0,726	0,501	0,380	0,345	0,566
Mo ₂₄₀ - Mo ₁₂₀	0,188	0,982	0,681	0,166	0,131	0,849	0,141	0,142
Mo ₃₆₀ - Mo ₁₂₀	0,986	0,098	0,256	0,433	0,850	0,981	0,988	0,999
Mo ₃₆₀ - Mo ₂₄₀	0,094	0,063	0,033*	0,872	0,416	0,646	0,070	0,133

Примітка: * – зміни порівняно з контролем вірогідні

До іншої групи параметрів флуоресценції, найменш чутливих до зміни концентрації наночастинок молібдену під час позакореневого внесення, належать лінійний електронний

транспорт (LEF) та частка світла, котра йде на активацію нерегульованих процесів у ФС II (ϕ_{NPQ}) [22].

Таким чином, отримано ряд параметрів флуоресценції хлорофілу *a*, що можуть продемонструвати не лише короткотривалу, а й довготривалу післядію металів на фотосинтетичну активність квасолі звичайної сорту Буковинка.

Щодо питання впливу концентрації металу в розчині, яке є дискусійним у ряді літературних джерел, необхідно зауважити, що концентрація наномолібдену 240 мг/л позитивно впливає на перебіг первинних процесів фотосинтезу (табл. 4.). У *P. vulgaris*, за таких умов, на фоні високого вмісту хлорофілів у листках, збільшується частка світла, яка реалізується через фотохімічні процеси, про що свідчать параметр ФПСII та суттєво знижується рівень квантового виходу нефотохімічного гасіння флуоресценції (ϕ_{NPQ}) (табл. 3, 5; рис. 1).

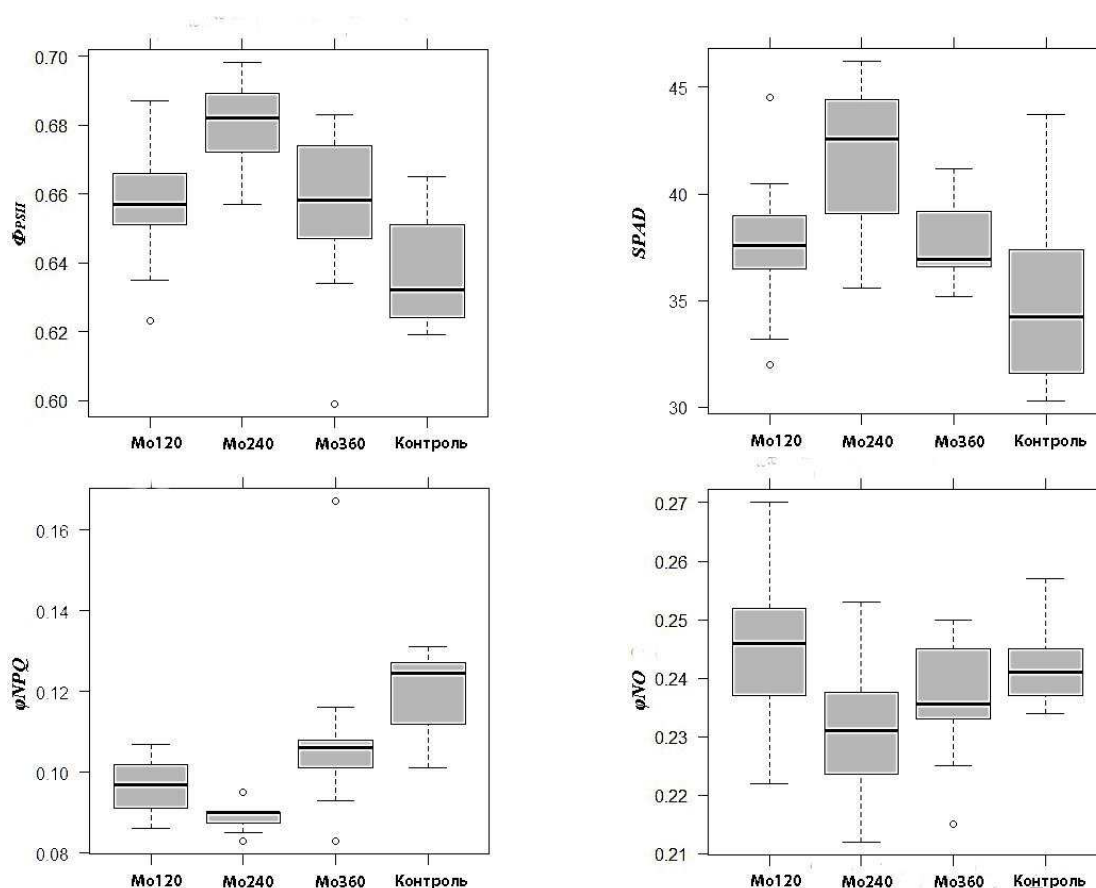


Рис. 1. Діаграми розмаху основних параметрів флуоресценції хлорофілу за дії наномолібдену різних концентрацій у фазу трьох листків, в.о.

У листках рослин, оброблених Mo120, також спостерігається суттєве ($P < 0,05$) інгібування нефотохімічних процесів, що відповідають за перетворення світлової енергії у тепло. Трьохкратне збільшення концентрації наномолібдену до 360 мг/л у розчині для позакореневого застосування, чинить протилежний ефект. Спостерігається тенденція до зниження фотосинтетичної ефективності та зростання квантового виходу нефотохімічного гасіння, що вказує на фотоінгібування ФС II.

Отже, збільшення концентрації наномолібдену до 360 мг/л у розчині для позакореневого живлення рослин, знижує F_m' -рівень флуоресценції, зумовлений максимальною відновленістю QA, та закритістю центрів ФС II. Відтак, через пригнічення фотосинтетичної ефективності ФС II та зростаючу роль нефотохімічних процесів трансформації світлової енергії рослиною, збільшення концентрації наномолібдену з 240 мг/л до 360 мг/л є не доцільним.

Висновки

Максимальні величини стимулювання ростових процесів рослин квасолі звичайної сорту Буковинка має концентрація наномолібдену 240 мг/л за показниками накопичення сирової маси у надземній частині рослин і площею листкової поверхні. За даних умов зростання, спостерігається максимальний квантовий вихід електронного транспорту ФС II, зростає частка відкритих РЦ ФС II, а відповідно знижується рівень нефотохімічного гасіння.

Молібден концентрацією у 120 мг/л хоча і не виявляє значного стимулюючого ефекту на пігментний комплекс листків квасолі, знижує рівень нефотохімічного гасіння хлорофілу. Концентрація 240 мг/л – вірогідно і рівномірно підвищує вміст хлорофілів *a* і *b*, а 360 мг/л – значно збільшує концентрацію хлорофілу *b* та основних каротиноїдів, що вказує на наявність стресу у рослин та доцільність позакореневого підживлення культури саме наномолібденом концентрації 240 мг/л.

Виокремлено групу параметрів флуоресценції хлорофілу *a*, що характеризують стан первинних процесів фотосинтезу у квасолі звичайної сорту Буковинка і пов'язані із збільшенням її вегетативної маси. Оскільки, параметри F_{PSII} , ϕNPQ , SPAD чутливі до дії йонів досліджуваного металу під час позакореневого внесення, вони можуть бути використані, як тест для експрес-оцінки стану рослини за довготривалої дії молібдену.

1. Адамень Ф. Ф. Нанотехнології в аграрній сфері / Ф. Адамень // Вісник НАН України. — 2007. — № 9. — С. 15—17.
2. Біологічний азот : монографія / В. П. Патики, С. Я. Коць, В. В. Волкогон та ін.; За ред. В. П. Патики. — К. : Світ, 2003. — 424 с.
3. Буркин И. А. Физиологическая роль и сельскохозяйственное значение молибдена / И. А. Буркин. — М. : Наука, 1968. — 296 с.
4. Векірчик К. М. Фізіологія рослин : практикум / Векірчик К. М. — К. : Вища школа, 1984. — 241 с.
5. Гапоненко В. И. Влияние внешних факторов на метаболизм хлорофилла / В. И. Гапоненко. — Минск: Наука и техника, 1986. — 240 с.
6. Гольцев В. Н. Переменная и замедленная флуоресценция хлорофилла *a* — теоретические основы и практическое приложение в исследовании растений / В. Н. Гольцев, Х. М. Каладжи, М. А. Кузманова, С. И. Аллахвердиев. — М.-Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2014. — 220 с.
7. Городній М. М. Агрохімія: підруч. / М. М. Городній. — 4-те вид., переробл. та доповн. — К. : Арістей, 2008. — 936 с.
8. Грицаєнко З. М. Методи біологічних та агрохімічних досліджень рослин і ґрунту / З. М. Грицаєнко, А. О. Грицаєнко, В. П. Карпенко. — К.: ЗАТ «Нічлава», 2003. — 320 с.
9. Корнеев Д. Ю. Информационные возможности метода индукции флуоресценции хлорофилла / Д. Ю. Корнеев. — К. : Альтерпрес, 2002. — 187 с.
10. Коць С. Я. Мінеральні елементи і добрива в живленні рослин: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / С. Я. Коць, Н. В. Петерсон. — 2-е вид., переробл. і допов. — К. : Логос, 2009. — 184 с.
11. Нанотехнології в сучасному сільському господарстві / [Ситар О. В., Новицька Н. В., Таран Н. Ю. та ін.] // Фізика живого. — 2010. — Т.18, № 3. — С.113—116.
12. Починок Х. Н. Методы биохимического анализа растений / Х. Н. Починок. — К. : Наукова думка, 1976. — 333 с.
13. Регуляція фотосинтезу і продуктивність рослин: фізіологічні та екологічні аспекти / [Т.М. Шадчина, Б. І. Гуляєв, Д. А. Кірізії та ін.]. — К. : Фітосоціоцентр, 2006. — 384 с.
14. Таран Н. Ю. Каротиноїди фотосинтетичних тканин за умов посухи / Н. Ю. Таран // Физиология и биохимия культ. растений. — 1999. — Т. 31, № 6. — С. 414—422.
15. Фотосинтетична діяльність посівів сої на чорноземах типових / С. М. Каленська, Н. В. Новицька, Д. В. Андрієць, О. М. Холодченко // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Агрономія. — 2011. — Вип. 162, Ч. 1. — С. 82—89.
16. Шитиков В. К. Рандомизация и бутстреп: статистический анализ в биологии и экологии с использованием R / В. К. Шитиков, Г. С. Розенберг. — Тольятти : Кассандра, 2014. — 314 с.
17. Школьник М. Я. Микроэлементы в жизни растений / М. Я. Школьник. — Л. : Наука, 1974. — 325 с.
18. Vambara S. The potential roles of lime and molybdenum on the growth, nitrogen fixation and assimilation of metabolites in nodulated legume: A special reference to *Phaseolus vulgaris* L. [Електронний документ] / Sylvie Vambara, Patrick A. Ndakidemi // African Journal of Biotechnology. — 2010. —

- Vol. 8 (17). – P. 2482–2489. Режим доступу: <http://www.academicjournals.org/journal/AJB/article-full-text-pdf/D3A4A4B21341>.
Перевірено: 20.01.2017.
19. *Biological nitrogen fixation by common beans (Phaseolus vulgaris L.) increases with bio-char additions* [Електронний документ] / Marco A. Rondon, Johannes Lehmann, Juan Ramírez, Maria Hurtado // *Biology and Fertility of Soils*. — 2007. — Vol. 43. — P. 699–708. — Режим доступу до журн.: <https://www.researchgate.net/publication/200736491>. Перевірено: 22.11.2016.
 20. *Brodrick S. J. Molybdenum reserves of seed, and growth and N₂ fixation by Phaseolus vulgaris L.* [Електронний документ] / Stephanie J. Brodrick, M. K. Sakala, Kenneth E. Giller // *Biology and Fertility of Soils*. — 1992. — Vol. 13. — P. 39–44. — Режим доступу до журн.: <https://www.researchgate.net/publication/238360709>. Перевірено: 22.01.2017.
 21. *Elkhatib H. A. Growth and yield of common bean (Phaseolus vulgaris L.) in response to Rhizobium inoculation, nitrogen and molybdenum fertilization* [Електронний документ] / Elkhatib H. A. // *Alexandria Science Exchange Journal* — 2009. — Vol. 30, № 2. — P. 319–332. — Режим доступу до журн.: <http://alexexch.org/File/2009003002/En/2070.pdf>. Перевірено: 21.01.2017.
 22. *MultispeQ Beta: a tool for large-scale plant phenotyping connected to the open PhotosynQ network* [Електронний документ] / Sebastian Kuhlger, Greg Austic, Robert Zegarac et al // *R. Soc. open sci.* — 2016. — Vol. 3, №10. — Режим доступу до журн.: <http://rsos.royalsocietypublishing.org/content/3/10/160592>. Перевірено: 22.01.2017.
 23. *Sozer N. Nanotechnology and its applications in the food sector* [Електронний документ] / Sozer N., Kokini J. L. // *Trends Biotechnology*. — 2009. — Vol. 27, № 2. — P. 82–89. — Режим доступу до журн.: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19135747>. Перевірено: 22.11.2016.
 24. *The role of molybdenum in agricultural plant production* [Електронний документ] / Kaiser B. N., Gridley K. L., Brady J. N. et al // *Ann. Bot.* — 2005. — Vol. 96, № 5. — P. 745–754. — Режим доступу до журн.: <http://aob.oxfordjournals.org/content/96/5/745.full.pdf+html>. Перевірено: 22.01.2017.

А. И. Герц, А. Б. Конончук

Тернопольский национальный педагогический университет имени Владимира Гнатюка

ІЗМЕНЕНІЕ НЕКОТОРЫХ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАСТЕНИЙ *PHASEOLUS VULGARIS* L. ПРИ РАЗЛИЧНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ НАНОМОЛИБДЕНА

Исследовано в грунтовой вегетационной культуре влияние внекорневой подкормки растений фасоли обыкновенной сорта Буковинка различными концентрациями молибденового нанопрепарата.

Определено, что концентрация наномолибдена 240 мг/л стимулирует увеличение массы сырого вещества надземной части растений, прежде всего, за счет увеличения площади и массы листьев.

Внекорневая подкормка растений молибденом влияет на содержание фотосинтетических пигментов листа. Обнаружен максимальный рост хлорофилла *b* и основных каротиноидов после применения раствора с концентрацией 360 мг/л – на 36,2% и 39,3%, что может указывать на формирование фотосинтетическим аппаратом защитной реакции в ответ на стресс. Микроэлемент в концентрации 240 мг/л достоверно и равномерно повышал содержание хлорофиллов *a* и *b* на 18,4% и 18,5%, что указывает на целесообразность применения для внекорневой подкормки культуры именно этого раствора. Влияние молибдена в концентрации 120 мг/л на листовые пигменты статистически недостоверно в сравнении с контролем.

В работе, с целью обоснования морфо-физиологических различий обусловленных действием ионов молибдена, осуществлена оценка состояния ФС II в *P. vulgaris* методом индуцированной флуоресценции хлорофилла *a*.

Благодаря корреляционному анализу определены ряд параметров, а именно: относительное содержание хлорофилла (SPAD), эффективность фотохимии (ФПСII), индекс жизнеспособности (Rfd), которые положительно коррелируют ($r = 0,51-0,53$) с увеличением вегетативной массы растений, тогда как рост нефотохимических процессов фNPQ ($r = -0,50$) в ФС II, снижают фотосинтетическую продуктивность растений.

Выяснено, что ФПСII, фNPQ, часть реакционных центров ФС II, которые находятся в открытом состоянии (qL), SPAD и Rfd чувствительны к изменению концентрации наномолибдена в растворе ($P < 0,05$) для внекорневой подкормки растений.

Подтверждено, что концентрация наномолибдена 240 мг/л положительно влияет на первичные процессы фотосинтеза. При таких условиях, на фоне высокого содержания хлорофиллов в листьях *P. vulgaris*, увеличивается часть освещения, которая реализуется через фотохимические процессы, существенно снижается уровень квантового выхода нефотохимического тушения флуоресценции (фNPQ).

Концентрация наномолибдена 360 мг/л в растворе для внекорневого применения приводит к росту квантового выхода нефотохимического тушения, что свидетельствует о фотоингибировании ФС II.

Ключевые слова: фасоль обыкновенная, *Phaseolus vulgaris* L., молибден, рост, хлорофилл, флуоресценция, индукция флуоресценции хлорофилла, нефотохимическое тушение, эффективность фотохимии ФС II

A. I. Herts, O. B. Kononchuk

Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University, Ukraine

CHANGE OF PARTICULAR PHYSIOLOGICAL PARAMETERS OF *PHASEOLUS VULGARIS* L. PLANTS BY DIFFERENT CONCENTRATION OF NANOMOLYBDENUM

Molybdenum plays an important role in many physiological processes of plants as a part of more than twenty enzymes. First of all, this trace element influences the nitrogen metabolism of plants as a component of nitrate reductase, nitrogenase, activates the amination and transamination reaction required for the synthesis of leghemoglobin etc., which is especially important for legumes [5].

To increase its effectiveness molybdenum can be used in the form of nanopreparations, which have significantly higher biological reactivity compared to conventional micro fertilisers due to the longer and more active penetration of the active ingredient from nanoparticles into plants and its less phytotoxic influence [2].

The purpose of our study was to find out the most effective concentration of nanomolybdenum preparation by F. D. Ovcharenko Institute of Biocolloidal Chemistry) for foliar feeding of a plant.

Bukovynka cultivar of beans (*Phaseolus vulgaris* L.) growing in the greenhouse (in the stage of the first true leaves) has been used in the experiments. Plants were sprayed with aqueous solutions of molybdenum in concentrations of 120, 240 and 360 mg/l (respectively Mo₁₂₀, Mo₂₄₀, Mo₃₆₀) or with the distilled water (control).

After treatment of the plant with molybdenum concentration of 240 mg/l the mass of above-ground parts of plants significantly increased by 128.4% and by 46.3% and 39.7% for the concentration of 120 and 360 mg/l respectively. A similar trend was found with the increased weight of fresh leaves, by 172.4%, 48.3% and 42.4% (control – 2.03 ± 0.19) and their total area – by 64.0%, 29.6% and 22.8% compared to the control (176.7 ± 16.8 cm²).

Spectrophotometric determination of chlorophyll *a* amount in leaves showed its highest increase in the alteration Mo₂₄₀ – by 18.4% compared to controls (70.0 ± 1.5 mg / 100 g of fresh weight); after treatment of plants by concentrations of 120 and 360 mg/l the amount of chlorophyll *a* increased by 6.3% and 10.0% respectively. Increased chlorophyll *b* and basic kinds of carotenoids were significant after applying the maximum concentration of molybdenum (360 mg/l) – by 36.2% and 39.3% compared to the control (155.4 ± 2.7 mg/100 g of fresh weight). Molybdenum concentration of 240 mg/l induced the increase of the amount of these pigments by 18.5% and 5.3%, and the concentration of 120 mg/l – by 4.2% and 7.0% before control, respectively.

All these changes can indicate certain peculiarity of plant metabolism reaction to molybdenum and the possible negative effect of high concentration of the microelement in 360 mg/l. Since it is known that the increase of plant carotenoids plays an important role in the formation of the protective mechanisms of photosynthetic apparatus against adverse factors.

In order to justify the above mentioned morphological and physiological differences, the condition of PS II of beans was estimated by a method of induced fluorescence of chlorophyll *a*.

Correlation matrix of fresh weight of above-ground parts of plant, areas of leaf plates and fluorescence parameters of chlorophyll *a* allow to distinguish a few parameters as follows: relative chlorophyll content (SPAD) [4], Φ_{PSII} [3], the vitality index (Rfd) [1], as the parameters that positively correlate with the increase of the vegetative weight of plants – the correlation coefficient is 0.51-0.53.

It has been found out that the increase in weight of above-ground parts of plants, the weight and area of leaf surface is caused by chlorophyll amount and the level of quantum yield of electron transport in photosystem II. The increase of nonphotochemical quenching (ϕ NPQ) ($r = -0.50$) in PS II [4] reduces the photosynthetic productivity of plants.

To estimate the impact of different concentrations of molybdenum ions on parameters characterizing the state of PS II the one-way ANOVA test was conducted along with application of Tukey's test.

It was found that $\Phi_{PS II}$, ϕ NPQ, the fraction of PSII centres that are open (qL) [1, 3-4], the relative chlorophyll content (SPAD) and the vitality index (Rfd) are sensitive ($P < 0.05$) to changes in the nanomolibdenum concentration in the solution for foliar feeding of plants.

It is worth mentioning that nanomolibdenum concentration of 240 mg / l has a positive effect on the primary processes of photosynthesis. Under such condition, the portion of light for *Phaseolus vulgaris*, which is realised through photochemical processes, has increased as evidenced by the parameter of PSII, and the level of the quantum yield of nonphotochemical quenching (ϕ NPQ) has significantly reduced.

Nanomolibdenum concentration of 360 mg/l in the solution for foliar feeding of plants, reduces the Fm'-level of fluorescence. As a result, the role of nonphotochemical way of quenching the light energy increases. Thus, through inhibition of photosynthetic efficiency of photosystem II and the increasing role of nonphotochemical way of light energy transformation by the plant it is not appropriate to raise the concentration of nanomolibdenum from 240 mg/l to 360 mg/l.

Thus, nanomolibdenum with the concentration of 240 mg/l has the maximum stimulating effect in terms of accumulation of fresh weight of the above-ground parts of plants, area of leaf surface and the content of chlorophyll a and b for Bukovynka cultivar of beans.

We received a number of chlorophyll *a* fluorescence parameters, which show not only short-term but also long-term after-effect of molybdenum on photosynthetic activity of the beans.

A group of parameters of chlorophyll *a* fluorescence that can be used for the rapid estimation of long-term effect of microelements has been singled out.

Keywords: common bean, Phaseolus vulgaris L., molybdenum, growth, chlorophyll, fluorescence, induction of chlorophyll fluorescence, non-photochemical quenching, efficiency of photosystem II photochemistry

Рекомендує до друку
В. В. Грубінко

Надійшла 23.02.2017

УДК 574.3+579.834

В. В. ГУЛАЙ

Кіровоградський державний педагогічний університеті імені Володимира Винниченка
вул. Шевченка, 1, Кіровоград, 25006

ОСОБЛИВОСТІ ЕКОЛОГІЧНИХ ВЗАЄМОДІЙ МІЖ ПРЕДСТАВНИКАМИ КЛАСУ ПАПОРОТЕПОДІБНІ ТА ПАТОГЕННИМИ ЛЕПТОСПІРАМИ В УМОВАХ ПЕРЕЗВОЛОЖЕНИХ ЗЕМЕЛЬ

Природні вогнища лептоспірозів приурочені до прісних водойм та прилеглих ділянок перезволожених земель. Фоновими видами класу Папоротеподібні (*Polypodiopsida*) у фітоценозах перезволожених земель західного Лісостепу України є: щитник чоловічий (*Dryopteris filix-mas L.*) та теліптерис болотяний (*Thelypteris palustris L.*)