

**... ФІЗІОЛОГІЯ РОСЛИН ... PLANT PHYSIOLOGY ...**

УДК: 631.811.98+581.522.5+ 632.12+(477.63)

**Протекторно-стимулюючий ефект гетероауксину при допосівній підготовці насіння бобових і злакових трав для фіторекультивуації техногенних ландшафтів**  
**В.М.Савосько**

*Криворізький педагогічний інститут, ДВНЗ «Криворізький національний університет» (Кривий Ріг, Україна)*  
*savosko@list.ru*

В умовах модельного експерименту досліджено вплив гетероауксину на морфометричні характеристики люцерни посівної (*Medicago sativa* L.) та райграсу пасовищного (*Lolium perenne* L.) при їх вирощуванні безпосередньо у техногенних субстратах шахтних хвостосховищ. Встановлено, що на 30-ий день експерименту дія фітогормону компенсує фітотоксичність субстратів, частково – «молодих» та повністю – «лежалих». Для фіторекультивуації техногенних ландшафтів доцільне попереднє замочування насіння у 10<sup>-8</sup>% розчині гетероауксину.

**Ключові слова:** люцерна посівна (*Medicago sativa* L.), райграс пасовищний (*Lolium perenne* L.), фітогормони, фітотестування, морфометричні параметри, техногенні субстрати, шахтні хвостосховища.

**Протекторно-стимулирующий эффект гетероауксина при допосевной подготовке семян бобовых и злаковых трав для фиторекультивации техногенных ландшафтов**  
**В.М.Савосько**

В условиях модельного эксперимента исследовано влияние гетероауксина на морфометрические характеристики люцерны посевной (*Medicago sativa* L.) и райграса пастбищного (*Lolium perenne* L.) при их выращивании непосредственно в техногенных субстратах шахтных хвостохранилищ. Установлено, что на 30-й день эксперимента действие фитогормона компенсирует фитотоксичность субстратов: частично – «молодых» и полностью – «лежалых». Для фиторекультивации техногенных ландшафтов целесообразно предварительное замачивание семян в 10<sup>-8</sup>% растворе гетероауксина.

**Ключевые слова:** люцерна посевная (*Medicago sativa* L.), райграс пастбищный (*Lolium perenne* L.), фитогормоны, фитотестирование, морфометрические параметры, техногенные субстраты, шахтные хвостохранилища.

**Protective-stimulating effect of heteroauxin in pre-sowing preparation of the seeds of legume and cereal grasses for phytorecultivation of technogenic landscapes**  
**V.M.Savosko**

In a model experiment there have been studied the effect of heteroauxin on the morphometric characteristics of alfalfa (*Medicago sativa* L.) and ryegrass (*Lolium perenne* L.) during their growing directly in technogenic substrates of mine tailings. It has been found that on the 30th day of the experiment phytohormone action compensates phytotoxicity of substrates, partially – for "young" and fully – for "stale." For phytorecultivation of technogenic landscapes it is advisable presoaking seeds in 10<sup>-8</sup>% solution of heteroauxin.

**Key words:** alfalfa (*Medicago sativa* L.), ryegrass (*Lolium perenne* L.), plant hormones, phytotesting, morphometric parameters, technogenic substrates, mine tailings.

## Вступ

Оптимізація порушених і девастрованих земель є актуальною проблемою більшості сучасних промислових регіонів, особливо гірничорудних. Проте впровадження повноцінної їх рекультивациї гальмується фінансовими (брак коштів) та організаційними причинами (відсутністю достатньої кількості пухких гірських порід та родючих ґрунтів) (Малахов, 2003; Кучерявий, 2003). Тому вважається перспективним створення культурфітоценозів безпосередньо на техногенних субстратах – проведення «прямої фіторекультивациї» (Савосько, 2011а; Панас, 2009). Однак субстрати таких земель зазвичай характеризуються несприятливими фізико-хімічними властивостями та високими рівнями фітотоксичності, що негативним чином впливає на ріст та розвиток рослин (Кучерявий, 2003; Панас, 2009; Савосько, 2011б; Савосько и др., 2010). У зв'язку з цим так актуальна розробка інноваційних технологій щодо підвищення стійкості рослин до негативної дії едафотопів порушених та девастрованих земель.

Серед техногенних ландшафтів Криворізького регіону дуже особливими, з наукової точки зору, є шахтні хвостосховища. У 50–60-их роках минулого сторіччя майже при кожному залізорудному руднику були збудовані польові збагачувальні фабрики (ПЗФ). Робота цих фабрик зумовила утворення відходів збагачення (хвостів) та будівництво для їх збереження спеціальних гідротехнічних споруд – хвостосховищ. Однак, після початку експлуатації потужних гірничо-збагачувальних комбінатів, робота ПЗФ була припинена, а їх хвостосховища були залишені поза увагою та без проведення рекультивацийних робіт. В подальшому вони були частково знищені (внаслідок повторного використання їх території або потрапляння до зони обвалення), а частково збереглися та поступово самозаростають. В наш час шахтні хвостосховища Криворіжжя – це унікальні наукові полігони з дослідження регенерації екосистем та розробки інноваційних технологій оптимізації порушених земель (Малахов, 2003; Савосько, 2011а).

Активне використання фітогормонів є поширеною практикою в різноманітних природничих заходах сьогодення: сільському та лісовому господарствах, декоративному озелененні й біотехнології (Гут, Крамарець, 2011; Заколесник, 2006; Кузнецова, 2011). Останнім часом теоретично обґрунтовуються та практично перевіряються можливості використання регуляторів та активаторів росту рослин в природоохоронній діяльності. Так, доведений за морфометричними та біохімічними показниками протекторний ефект окремих фітогормонів до дії на тест-рослини полютантів (Артюшенко, Гришко, 2013; Бучко та ін., 2002; Гришко, Демура, 2009; Лелюк, Терек, 2007) та несприятливих екологічних умов (Жмурко, 2011; Жмурко, Джамєєв, 2001; Yamamoto et al., 2011). Проте майже залишилося поза увагою дослідників питання використання регуляторів та активаторів росту рослин при допосівній підготовці насіння для прямої фіторекультивациї техногенних ландшафтів.

Метою нашої роботи було виявлення впливу гетероауксину (ГАУК) при допосівній підготовці насіння люцерни посівної (*Medicago sativa* L.) та райграсу пасовищного (*Lolium perenne* L.) для фіторекультивациї шахтних хвостосховищ Криворіжжя.

## Об'єкт та методи досліджень

Дослідження були проведені з субстратами шахтних хвостосховищ Криворізького залізорудного регіону (шахти ім. Артема та шахти ім. Леніна). Слід зазначити, що хвостосховище шахти ім. Артема почало діяти з кінця 50-их років ХХ ст. та знаходилося в активній експлуатації до початку 90-их років того ж сторіччя. При цьому його територія використовувалася як місце накопичення відходів збагачення та високомінералізованих шахтних вод. Враховуючи час останнього складування, субстрати хвостосховища шахти ім. Артема зазвичай називають «молоді хвости». Хвостосховище шахти ім. Леніна активно експлуатували до середини 60-их років минулого сторіччя та використовували лише для складування відходів збагачення. В наш час на його території утворився спонтанний рослинний покрив. Тому субстрати цього хвостосховища мають назву «лежалі хвости».

На території зазначених шахтних хвостосховищ були обрані дослідні ділянки з типовими еколого-едафічними умовами. В межах ділянок методом конверта були відібрані змішані зразки субстратів з шару 0–20 см. Як контроль використовували зразки фонового ґрунту (чорнозему звичайного), які були відібрані поза межами техногенного впливу. Зразки субстратів та ґрунту висушували, розтирали та просіювали крізь сито з розміром отворів 1,00 мм.

Як тест-об'єкт використовували люцерну посівну (*Medicago sativa* L.), сорт «Надія», та райграс пасовищний, (*Lolium perenne* L.), сорт «Дрогобицький-2». На думку провідних фахівців, ці види

трав'янистих рослин є дуже перспективними для фіторекультивуації порушених земель промислових регіонів (Зубова, 2004; Добровольский, 1979; Лихолат, 2003; Мазур, 1981).

Насіння бобових та злакових трав попередньо замочували в розчинах гетероауксину (дослід) та дистильованій воді (контроль) протягом 14 годин при температурі +27–28°C. В роботі використовували концентрації фітогормону:  $10^{-4}$ ,  $10^{-5}$ ,  $10^{-6}$ ,  $10^{-7}$ ,  $10^{-8}$ ,  $10^{-9}$ ,  $10^{-10}$ %.

Веgetаційний дослід проводився на базі оранжереї природничого факультету КПІ ДВНЗ «КНУ» в округлих ( $d=10$  см) поліетиленових посудинах висотою 12 см, що вміщують 0,9 кг чорнозему та 1,1 кг субстратів. Після зволоження чорнозему/субстратів в кожен посудину висівали однаково число проростків тест-рослин – 5 шт. Протягом вегетації вологість в посудинах підтримували на рівні 60% від повної вологоємності при природному рівні освітленості і температурі +22–25°C. У кожному варіанті дослідів було 55 рослин, повторність дослідів – п'ятикратна (Журбицкий, 1968).

На 30-у добу рослини вилучали з субстратів та чорнозему, підраховували кількість справжніх листків і корінців, вимірювали приріст головного кореня та надземної частини. На основі отриманих результатів розраховували наступні індекси: толерантності (IT), ростового інгібування (IPI) та кореневий (KI) (Leita et al., 1993; Wilkins, 1978). Статистичну обробку отриманих даних проводили відповідно до методів варіаційної, кореляційної та регресійної статистик, при рівні значущості  $p < 0,05$  (Лакин, 1990). У табл. 1 наведені середні значення та їх похибки.

### Результати та обговорення

Отримані в результаті проведення модельних дослідів дані свідчать про нормальний ріст та розвиток тест-рослин за умов їх вирощування на чорноземі (табл. 1). Так, у люцерни посівної (*Medicago sativa* L.) на 30 день експерименту сформувалося від одного до трьох справжніх листків (в середньому  $1,96 \pm 0,1$  шт.), та від одного до шести корінців (в середньому  $1,69 \pm 0,17$  шт.). При цьому висота надземної частини становила  $6,02 \pm 0,24$  см, а довжина корінців –  $2,44 \pm 0,18$  см. Біометричні показники росту райграсу пасовищного (*Lolium perenne* L.) на 30 день експерименту виявились більш розвиненими. На цей час у рослин сформувалися від двох до трьох листків ( $2,55 \pm 0,08$  шт. в середньому) та від 5 до 56 корінців ( $27,00 \pm 2,27$  шт. в середньому). Висота надземної частини цих тест-рослин становила  $18,54 \pm 0,52$  см (діапазон коливань: 17,70–24,00 см), а довжина підземної частини –  $12,43 \pm 0,91$  см (діапазон коливань: 21,10–22,50 см).

Встановлено, що вирощування тест-рослин без попередньої обробки насіння гетероауксином продемонструвало певний токсичний ефект техногенних субстратів шахтних хвостосховищ Криворіжжя (табл. 1). Так, висота надземної частини люцерни посівної при вирощуванні на субстратах хвостосховища шахти ім. Артема становила лише 43% від значень, отриманих на чорноземі. При цьому більш фітотоксичними виявились «молоді хвости», у порівнянні з «лежалими», які чинять менший негативний вплив на морфометричні характеристики рослин. Слід зазначити, що більш чутливими до негативної дії техногенних субстратів є морфометричні показники надземної частини люцерни посівної. В той час як характеристики підземної частини цієї тест-рослини виявились майже нечутливими до дії «молодих хвостів», а вплив «лежалих хвостів» май, навпаки, стимулюючий ефект. Останній факт дещо парадоксальний, та, на нашу думку, зумовлений вилуговуванням фітотоксичних елементів до певних мінімальних значень, які і спричиняють стимуляцію показників росту та розвитку цього виду тест-рослин.

На нашу думку, приналежність райграсу пасовищного до іншого класу зумовила відмінну, у порівнянні з попередньою тест-рослиною, реакцію на вплив техногенних субстратів шахтних хвостосховищ Криворіжжя (табл. 1). Максимальне пригнічення було встановлено за умов впливу «лежалих хвостів» на підземну частину рослин цього виду. Так, довжина корінців та їх кількість становили, відповідно, 53 та 55% від значень, отриманих при вирощуванні рослин на чорноземі. При дії «молодих хвостів» ці показники дещо більші та знаходяться на рівні 67–73 %, відносно варіанту «Чорнозем». Також доведено, що інгібуючий ефект дії субстратів шахтних хвостосховищ на морфометричні показники надземної частини тест-рослин знаходився на рівні 79–86 % від значень умовного контролю.

Загалом, аналіз отриманих результатів показав наявність значного фітотоксичного ефекту субстратів шахтних хвостосховищ Криворіжжя. Цей факт актуалізує використання протекторно-стимулюючого ефекту гетероауксину при допосівній підготовці насіння бобових і злакових трав.

Таблиця 1.  
Вплив гетероауксину на ріст тест-рослин на субстратах різних шахтних хвостосховищ (М±m)

Показник росту	Субстрат	Контроль (без ГАУК)	Обробка насіння ГАУК в концентрації, %						
			10 <sup>-10</sup>	10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-4</sup>
Тест-рослина люцерна посівна ( <i>Medicago sativa</i> L.)									
Листків, шт.	Чорнозем	1,96±0,10	-	-	-	-	-	-	-
	Субстрат 1	1,16±0,06**	1,69±0,05*	1,80±0,04*	1,66±0,05*	1,47±0,06*	1,42±0,04*	1,25±0,05*	0,84±0,06*
	Субстрат 2	1,68±0,11**	2,42±0,11*	2,79±0,09*	2,79±0,12*	2,37±0,12*	2,35±0,08*	2,20±0,12*	2,00±0,11*
Висота пагона, см	Чорнозем	6,02±0,24	-	-	-	-	-	-	-
	Субстрат 1	2,58±0,13**	3,04±0,11	2,99±0,09	3,78±0,08*	3,76±0,12*	3,58±0,11*	3,35±0,12*	2,61±0,08
	Субстрат 2	5,78±0,29	7,01±0,25*	7,12±0,29*	7,42±0,32*	7,27±0,24*	6,56±0,26*	6,49±0,22	6,09±0,21
Корінців, шт.	Чорнозем	1,69±0,17	-	-	-	-	-	-	-
	Субстрат 1	1,67±0,22	4,00±0,18*	4,67±0,15*	5,89±0,19*	3,87±0,19*	2,33±0,11	1,75±0,08	1,67±0,05
	Субстрат 2	2,68±0,33**	10,00±0,51*	13,11±0,68**	9,84±0,45*	8,47±0,36*	7,35±0,24*	4,40±0,15*	3,70±0,04
Довжина корінців, см	Чорнозем	2,44±0,18	-	-	-	-	-	-	-
	Субстрат 1	2,31±0,19	3,86±0,12*	4,15±0,16*	4,19±0,12*	3,56±0,17*	3,15±0,10*	2,33±0,08	2,32±0,06
	Субстрат 2	4,04±0,30**	6,78±0,19*	7,75±0,21*	8,14±0,19*	6,58±0,15*	6,26±0,12*	4,76±0,08*	4,02±0,05
Тест-рослина райграс пасовищний ( <i>Lolium perenne</i> L.)									
Листків, шт.	Чорнозем	2,55±0,08	-	-	-	-	-	-	-
	Субстрат 1	2,11±0,05**	2,03±0,05	2,05±0,06	2,11±0,04	2,15±0,05	2,09±0,07	2,00±0,08	1,98±0,07
	Субстрат 2	2,11±0,05**	3,06±0,08*	3,10±0,07*	3,00±0,05*	2,57±0,07*	2,45±0,06*	2,19±0,06*	2,13±0,05
Висота пагона, см	Чорнозем	18,54±0,52	-	-	-	-	-	-	-
	Субстрат 1	14,58±0,60**	12,64±0,55*	13,34±0,45	14,45±0,32	13,75±0,28	13,54±0,32	13,68±0,29	11,73±0,12*
	Субстрат 2	15,91±0,53**	23,27±0,89*	24,56±0,95*	21,74±1,01*	17,51±0,84	16,87±0,96	16,01±0,88	15,99±0,85
Корінців, шт.	Чорнозем	27,00±2,27	-	-	-	-	-	-	-
	Субстрат 1	19,68±1,68**	12,10±1,01*	15,95±0,99*	18,75±0,99	28,89±1,05*	30,05±1,18*	25,15±1,02*	19,90±0,89
	Субстрат 2	14,74±0,95**	34,50±0,96*	36,25±1,21*	38,74±1,22*	24,32±0,85*	22,95±0,75*	18,50±0,86*	18,15±0,69*
Довжина корінців, см	Чорнозем	12,43±0,91	-	-	-	-	-	-	-
	Субстрат 1	8,29±0,61**	3,52±0,36*	2,79±0,25*	4,52±0,29*	10,44±0,46*	11,99±0,59*	7,61±0,47	6,45±0,32
	Субстрат 2	6,55±0,74**	14,28±0,78*	14,83±0,89*	14,66±0,84*	9,98±0,74*	9,62±0,72*	8,16±0,68*	4,94±0,26

Примітки: субстрат 1 – хвостосховище шахти ім. Артема («молоді хвости»); субстрат 2 – хвостосховище шахти ім. Леніна («лежалі хвости»); \* – різниця з контролем 1 (субстрат без ГАУК) істотна при P<0,05; \*\* – різниця з контролем 2 (Чорнозем) істотна при P<0,05.

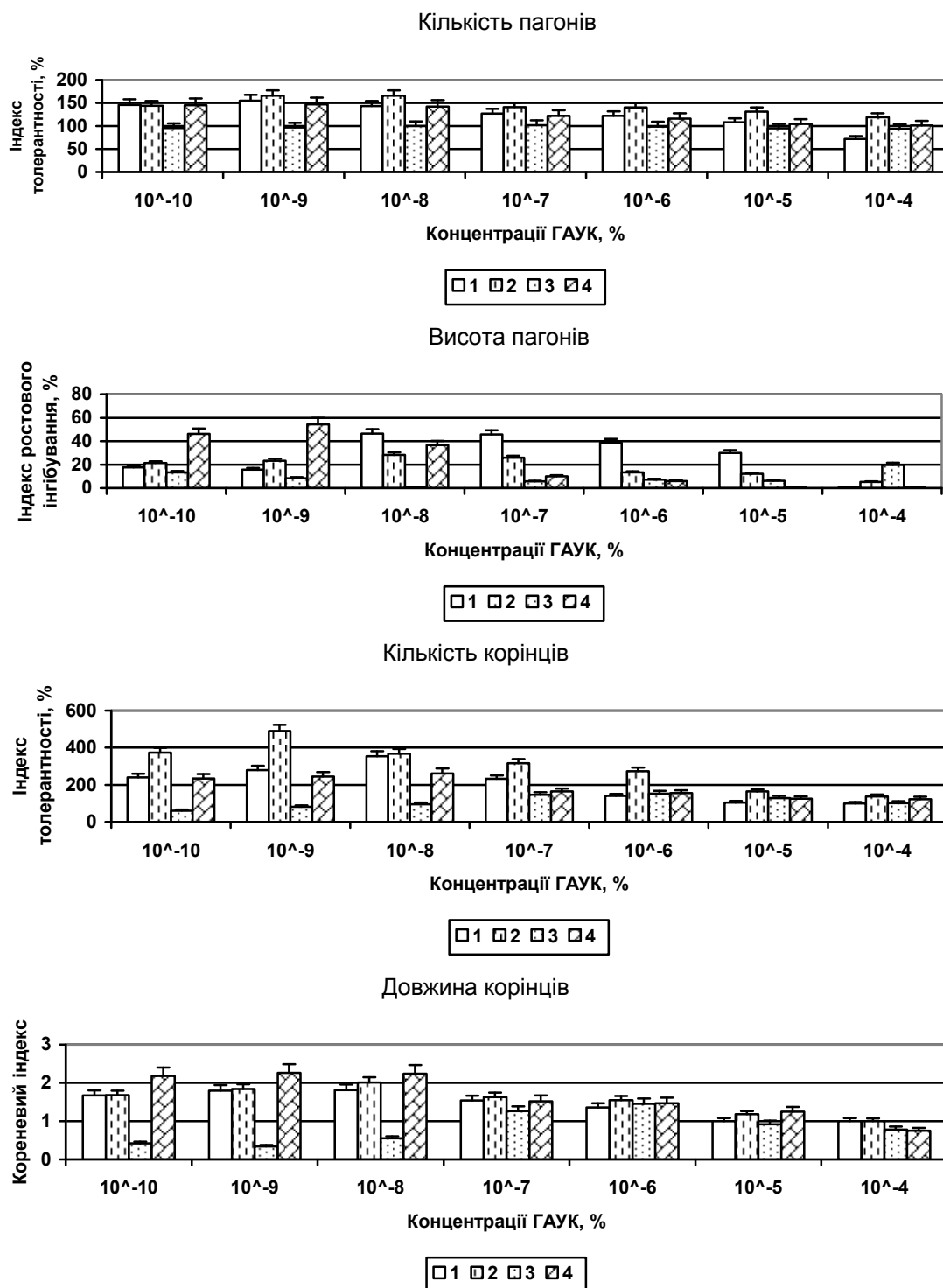
Застосування розчинів гетероауксину під час замочування насіння тест-рослин в більшості випадків позитивним чином вплинуло на морфометричні характеристики цих проростків (рис.). Так, стимулюючий ефект фітогормону зумовлює статистично достовірне збільшення кількості справжніх листків у люцерни посівної ( $IT=107-166\%$ ) та довжини надземної частини ( $IP=5,4-46\%$ ). При цьому слід зазначити, що ефект дії фітогормону мав більший вплив на тест-рослини за умов вирощування на «лежалих хвостах».

Як відомо, підземна частина судинних рослин першою стикається з впливом едафічних факторів та зазнає значних фізіологічних та біохімічних змін (Дерфлинг, 1985; Полевой, 1986). Водночас коренева система рослин виступає потужним бар'єром, що гальмує, а за певних обставин зупиняє негативний вплив таких факторів. Тому позитивна дія розчинів гетероауксину на морфометричні характеристики кореневої системи люцерни посівної виявилась більш ефективною. Так, встановлено достовірне збільшення у тест-рослин кількості корінців ( $IT=104-367\%$ ) та їх довжини ( $KI=1,18-2,01$ ). При цьому слід підкреслити, що така ефективність дії фітогормону була майже однаковою, як на «молодих», так і на «лежалих хвостах» (рис.). На нашу думку, це зумовлено фізіологічною особливістю гетероауксину, який чинить позитивний вплив в першу чергу на кореневу систему рослин.

Загально визнано, що протекторна та стимулююча дія гетероауксину також має певну видоспецифічну обумовленість. Тому позитивний ефект впливу цього фітогормону на райграс посівний виявився дещо менший, у порівнянні з попередньою тест-рослиною. Отримані результати модельних дослідів вказують, що морфометричні параметри надземної частини райграсу пасовищного за умов вирощування на «молодих хвостах» знаходяться на рівні контрольних значень. Лише в окремих варіантах модельного досліду спостерігається позитивний ефект дії гетероауксину на кількість корінців та їх довжину. Так, при концентрації фітогормону  $10^{-5}-10^{-7}\%$  індекс толерантності кількості корінців знаходиться в діапазоні  $128-153\%$ , а при концентрації  $10^{-6}$  і  $10^{-7}\%$  кореневий індекс довжини підземної частини тест-рослин дорівнює  $1,45$  та  $1,26$  відповідно (рис.).

У варіантах дослідів з «лежалими хвостами» позитивний ефект дії гетероауксину на морфометричні характеристики райграсу пасовищного виявився більш істотним. Результати досліджень свідчать, що статистично достовірно збільшилась у тест-рослин кількість листків ( $IT=102-142\%$ ) та їх довжина ( $IP=10-54\%$ ). Як і у попередніх випадках, підземна частина рослин є більш чутливою до позитивної дії фітогормону. При цьому встановлено збільшення кількості корінців ( $IT=123-263\%$ ) та їх довжини ( $KI=125-226\%$ ).

Використання у наших дослідженнях двох систем контролю (вирощування тест-рослин на техногенних субстратах без ГАУК (контроль 1) та чорноземах (контроль 2)) дає змогу порівняти протекторно-стимулюючі ефекти дії гетероауксину з потенційною фітотоксичністю субстратів шахтних хвостосховищ Криворіжжя. Субстрати хвостосховища шахти ім. Артема («молоді хвости») характеризуються значними рівнями фітотоксичності. Тому позитивна дія гетероауксину лише частково компенсує негативні ефекти цих субстратів (на рівні морфометричних характеристик підземної частини тест-рослин). Ця закономірність характерна як для люцерни посівної, так і для райграсу пасовищного. Субстрати хвостосховища шахти ім. Леніна («лежалі хвости») є закономірно менш фітотоксичними. На думку дослідників (Кучерявий, 2003; Панас, 2009; Савосько, 2011а), це зумовлено, в першу чергу, вимиванням дощовими водами хімічних елементів у більш глибокі шари едафотопів, а також позитивним впливом більш сукцесійно розвинених фітоценозів. Тому стимулюючий ефект впливу гетероауксину зумовлює повну компенсацію фітотоксичності субстратів цих «лежалих хвостів» для обох видів тест-рослин.



**Рис. Морфометричні індекси тест-рослин з дією різних концентрацій гетероауксину**

Примітки: варіанти дослідів: 1 – тест-рослина люцерна посівна (*Medicago sativa* L.), субстрати хвостосховища шахти ім. Артема; 2 – тест-рослина люцерна посівна (*Medicago sativa* L.), субстрати хвостосховища шахти ім. Леніна; 3 – тест-рослина райграс пасовищний (*Lolium perenne* L.), субстрати хвостосховища шахти ім. Артема; 4 – тест-рослина райграс пасовищний (*Lolium perenne* L.), субстрати хвостосховища шахти ім. Леніна.

Як відомо, використання в сучасних дослідженнях кореляційно-регресійних розрахунків є поширеною практикою, яка дозволяє більш поглиблено проаналізувати отримані результати та обґрунтувати найбільш перспективні природоохоронні заходи (Каменская, 2006; Математическое моделирование..., 1975). Проведені кореляційні розрахунки підтвердили наявність статистично достовірного зв'язку між протекторно-стимулюючим ефектом дії гетероауксину та морфометричними характеристиками тест-рослин (табл. 2). Аналіз отриманих результатів показав, що статистично достовірними є 14 коефіцієнтів кореляції (із 16 теоретично можливих). При цьому у всіх випадках математичні знаки цих коефіцієнтів ( $r < 0$ ) вказують на наявність лише зворотного зв'язку. Тобто, при збільшенні концентрацій розчинів гетероауксину відбувається зменшення числових значень морфометричних характеристик тест-рослин. Слід зазначити, що в шести випадках числові значення модулів коефіцієнтів кореляції вказують на наявність сильного зв'язку ( $0,7 < |r^2| < 0,9$ ), в семи – середнього ( $0,5 < |r^2| < 0,7$ ) та в одному випадку – слабого ( $0,3 < |r^2| < 0,5$ ).

**Таблиця 2.**

**Кореляційна матриця залежностей показників росту тест-рослин від концентрації гетероауксину**

Варіанти досліджу	Показник росту			
	Кількість погонів	Висота пагонів	Кількість корінців	Довжина корінців
1	-0,84**	-0,71**	-0,51*	-0,60*
2	-0,65*	-0,71**	-0,62*	-0,71**
3	-0,53*	-0,79*	-0,10	-0,03
4	-0,56*	-0,43*	-0,50*	-0,71**

*Примітки: варіанти досліджу – див. пояснення до рисунка; \* – коефіцієнти кореляції достовірні на рівні значущості  $P < 0,05$ ; \*\* – коефіцієнти кореляції достовірні на рівні значущості  $P < 0,01$ .*

Аналіз даних табл. 2 показав, що серед морфометричних показників тест-рослин кількість листків та максимальна висота надземної частини характеризуються більш тісним кореляційним зв'язком з концентраціями розчинів гетероауксину. Морфометричні характеристики люцерни посівної, у порівнянні з райграсом пасовищним, більш кореляційно залежні від концентрацій фітогормону. Кореляційний зв'язок також є більш сильним у варіантах дослідів з «лежалими хвостами», у порівнянні з «молодими».

В якості регресійної моделі були обрані поліноми третього порядку, які мають загальний вигляд:  $y = a + bx + cx^2$ , де  $x$  – концентрація розчинів гетероауксину,  $y$  – морфологічні характеристики тест-рослин,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – емпіричні коефіцієнти. Як відомо, у декартовій системі координат лінія рівняння поліномів третього порядку характеризується наявністю зони максимуму. Під цим терміном, зазвичай, розуміють відрізок значень на осі  $X$ , який припадає на найвищі показники значень осі  $Y$ . Слід підкреслити, що в межах цієї зони значення функції поступово збільшуються до певного рівня (пік зони максимуму), а в подальшому поступово зменшуються. Таким чином, можливо виявити такі значення концентрацій гетероауксину, які обумовлюють максимальні показники морфометричних характеристик тест-рослин (їх показників росту).

Розрахунки довели, що в 14 випадках (з 16 теоретично можливих) рівняння регресії статистично достовірно відображають математичну залежність показників морфометричних характеристик тест-рослин від концентрацій гетероауксину (табл. 3).

Розраховані коефіцієнти детермінації вказують, що кількість листків тест-рослин на 14–92 % залежить від концентрації гетероауксину в розчинах, максимальна висота надземної частини – на 64–83 %, кількість корінців – на 33–83 %, максимальна довжина підземної частини – на 29–90 %.

Фітотоксичність «молодих хвостів», а також нестабільність їх фізико-хімічних властивостей зумовлюють, на нашу думку, значно меншу, у порівнянні з «лежалими хвостами», залежність морфометричних характеристик тест-рослин від концентрацій розчинів гетероауксину. Також слід зазначити, що люцерна посівна виявилась більш чутливою, ніж райграс пасовищний, до дії певних концентрацій фітогормону.

Таблиця 3.  
Регресійна модель залежностей показників росту тест-рослин (y) від концентрації гетероауксину (x)

Варіанти досліджу	Показник росту	Рівняння регресії	D	Зона максимуму, %	
				Інтервал	Пік
1	Кількість пагонів, шт.	$Y = -0,45 + 0,45 \cdot x - 0,02 \cdot x^2$	0,878	$10^{-8} - 10^{-10}$	$10^{-9}$
	Висота пагонів, см	$Y = -0,77 + 1,28 \cdot x - 0,091 \cdot x^2$	0,039	-	-
	Кількість корінців, шт.	$Y = -3,98 + 1,72 \cdot x - 0,086 \cdot x^2$	0,628	$10^{-7} - 10^{-9}$	$10^{-8}$
	Довжина корінців, см	$Y = -0,42 + 0,83 \cdot x - 0,038 \cdot x^2$	0,812	$10^{-7} - 10^{-9}$	$10^{-8}$
2	Кількість пагонів, шт.	$Y = 0,74 + 0,42 \cdot x - 0,024 \cdot x^2$	0,603	$10^{-7} - 10^{-9}$	$10^{-8}$
	Висота пагонів, см	$Y = 3,67 + 0,83 \cdot x - 0,048 \cdot x^2$	0,636	$10^{-7} - 10^{-9}$	$10^{-8}$
	Кількість корінців, шт.	$Y = -6,21 + 3,03 \cdot x - 0,126 \cdot x^2$	0,821	$10^{-8} - 10^{-10}$	$10^{-9}$
	Довжина корінців, см	$Y = -2,95 + 2,33 \cdot x - 0,133 \cdot x^2$	0,707	$10^{-7} - 10^{-9}$	$10^{-8}$
3	Кількість пагонів, шт.	$Y = 1,64 + 0,128 \cdot x - 0,009 \cdot x^2$	0,137	$10^{-6} - 10^{-8}$	$10^{-7}$
	Висота пагонів, см	$Y = 5,24 + 2,48 \cdot x - 0,174 \cdot x^2$	0,096	-	-
	Кількість корінців, шт.	$Y = -12,38 + 13,17 \cdot x - 1,09 \cdot x^2$	0,326	$10^{-5} - 10^{-7}$	$10^{-6}$
	Довжина корінців, см	$Y = -6,29 + 5,29 \cdot x + 0,45 \cdot x^2$	0,293	$10^{-5} - 10^{-7}$	$10^{-6}$
4	Кількість пагонів, шт.	$Y = 1,46 + 0,171 \cdot x - 0,001 \cdot x^2$	0,915	$10^{-7} - 10^{-9}$	$10^{-8}$
	Висота пагонів, см	$Y = 15,91 - 0,69 \cdot x + 0,159 \cdot x^2$	0,830	$10^{-8} - 10^{-10}$	$10^{-9}$
	Кількість корінців, шт.	$Y = 2,54 + 3,93 \cdot x - 0,0405 \cdot x^2$	0,785	$10^{-7} - 10^{-90}$	$10^{-8}$
	Довжина корінців, см	$Y = -2,95 + 2,33 \cdot x - 0,133 \cdot x^2$	0,903	$10^{-7} - 10^{-9}$	$10^{-8}$

Примітка: варіанти досліджу – див. пояснення до рисунка.

Узагальнюючи результати регресійних розрахунків, слід зазначити наступне. При допосівній підготовці насіння для фіторекультивуації «молодих хвостів» найбільш оптимальними концентраціями гетероауксину є  $10^{-8}\%$  для люцерни посівної, та  $10^{-6}\%$  для райграсу пасовищного. В той час як для фіторекультивуації «лежалих хвостів» доцільно використовувати  $10^{-8}\%$  розчин цього фітогормону як для люцерни посівної, так і для райграсу пасовищного.

#### Висновки

Розчини гетероауксину в концентраціях  $10^{-4}$ – $10^{-10}$  % позитивним чином вплинули на морфометричні показники надземної та кореневої систем люцерни посівної (*Medicago sativa* L.) та райграсу пасовищного (*Lolium perenne* L.) при їх вирощуванні у субстратах шахтних хвостосховищ Криворіжжя. Позитивна дія фітогормону лише частково компенсує негативні ефекти «молодих хвостів» (ріст та розвиток кореневої системи) та зумовлює повну компенсацію фітотоксичності субстратів «лежалих хвостів».

При допосівній підготовці насіння для фіторекультивуації «молодих хвостів» найбільш оптимальними концентраціями гетероауксину є: для люцерни посівної  $10^{-8}\%$ , для райграсу пасовищного  $10^{-6}\%$ . Для фіторекультивуації «лежалих хвостів»  $10^{-8}\%$  розчин цього фітогормону є найбільш оптимальним для обох видів тест-рослин.

Отримані результати можуть бути використані при організації природоохоронних заходів з фіторекультивуації порушених та девастрованих земель. В майбутньому доцільно провести дослідження з використання гетероауксину безпосередньо у польових умовах (in situ). Також доцільно звернути увагу на комбіноване застосування фітогормонів та меліорантів для детоксикації субстратів шахтних хвостосховищ.

#### Список літератури

- Артюшенко Т.А., Гришко В.М. Вплив регуляторів росту на рівень фізіологічної адаптації гороху до стресового впливу кадмію та нікелю // Фізіологія рослин та генетика. – 2013. – Т.45, №5. – С. 417–424. /Artyushenko T.A., Gryshko V.M. Vplyv regulatoriv rostu na riven' fiziologichnoi adaptatsii gorokhu do stresovogo vplyvu kadmiyu ta nikelyu // Fiziologiya roslin ta genetika. – 2013. – T.45, №5. – S. 417–424./
- Бучко Г., Баранов В., Бучко Р., Терек О. Активність пероксидази та вміст фенолів у рослинах пшениці за дії агростимуліну та лазерного опромінення // Вісник Львівського університету. Серія біологічна. –



2002. – Вип.31. – С. 268–274. /Buchko G., Baranov V., Buchko R., Terek O. Aktyvnist' peroksydazy ta vmist fenoliv u roslynakh pshenytsi za dii agrostymulinu ta lazernogo oprominennya // Visnyk L'viv'skogo universytetu. Seriya biologichna. – 2002. – Vyp.31. – S. 268–274./

Гришко В.М., Демура Т.А. Вплив регуляторів росту на стійкість проростків кукурудзи, розвиток процесів пероксидного окиснення ліпідів і вміст аскорбінової кислоти за сумісної дії кадмію і нікелю // Физиология и биохимия культурных растений. – 2009. – Т.41, №4. – С. 335–343. /Gryshko V.M., Demura T.A. Vplyv regulyatoriv rostu na stiykist' prorostkiv kukurudzy, rozvytok protsesiv peroksydnogo okysnennya lipidiv i vmist askorbinovoi kysloty za sumisnoi dii kadmiiu i nikelyu // Fiziologiya i biokhimiya kul'turnykh rasteniy. – 2009. – T.41, №4. – S. 335–343./

Гут Р.Т., Крамарець В.О. Використання нових гормонів росту у практиці рослинництва та лісового господарства // Науковий вісник НЛТУ України. – 2011. – Вип.21.2. – С. 8–14. /Gut R.T., Kramarets' V.O. Vykorystannya novykh hormoniv rostu u praktytsi roslinnytstva ta lisovogo gospodarstva // Naukovyy visnyk NLTU Ukrainy. – 2011. – Vyp.21.2. – S. 8–14./

Дерфлинг К. Гормоны растений: Системный подход. – М.: Мир, 1985. – 304с. /Derfling K. Gormony rasteniy: Sistemnyy podkhod. – M.: Mir, 1985. – 304s./

Добровольский И.А. Эколого-биогеоценологические основы оптимизации техногенных ландшафтов степной зоны Украины путем озеленения и облесения. Автореф. дисс. ... д-ра. биол. наук / 03.00.16 – экология. – Днепропетровск, 1979. – 62с. /Dobrovolskiy I.A. Ekologo-biogeotsenologicheskiye osnovy optimizatsii tekhnogennykh landshaftov stepnoy zony Ukrainy putem ozeleneniya i obleseniya. Avtoref. diss. ... d-ra. biol. nauk / 03.00.16 – Ekologiya. – Dnepropetrovsk, 1979. – 62s./

Жмурко В.В. Фотопериодический и яровизационный контроль развития растений как система физиолого-биохимических и молекулярно-генетических механизмов // Регуляція росту і розвитку рослин: фізіолого-біохімічні і генетичні аспекти. Матеріали II Міжн. наук. конф. – Харків, 2011. – С. 25–28. /Zhmurko V.V. Fotoperiodicheskiy i yarovizatsionnyy kontrol' razvitiya rasteniy kak sistema fiziologo-biokhimiicheskikh i molekulyarno-geneticheskikh mekhanizmov // Regulyatsiya rostu i rozvytku roslin: fiziologo-biokhimiichni i genetychni aspekty. – Materialy II Mizhn. nauk. konf. – Kharkiv, 2011. – S. 25–28./

Жмурко В.В., Джамеєв В.Ю. Ріст, розвиток та фізіолого-біохімічні процеси у теплолюбних культур при адаптації до пониженої температури // Физиология растений на межі тисячоліть. Т.2. – Київ, 2001. – С. 182–190. /Zhmurko V.V., Dzhameyev V.Yu. Rist, rozvytok ta fiziologo-biokhimiichni protsesy u teplolyubnykh kul'tur pri adaptatsii do ponyzhenoi temperatury // Fiziologiya roslin na mezhi tysyacholit'. T.2. – Kyiv, 2001. – S. 182–190./

Журбицкий З.И. Теория и практика вегетационного метода. – М.: Наука, 1968. – 260с. /Zhurbitskiy Z.I. Teoriya i praktika vegetatsionnogo metoda. – M.: Nauka, 1968. – 260s./

Заколесник Н.В. Вплив регуляторів росту на процес утворення примордіїв *Pleurotus ostreatus* // Вісник Харківського національного університету імені В.Н.Каразіна. Серія: біологія. – 2006. – Вип.4, №748. – С. 134–138. /Zakolesnyk N.V. Vplyv regulyatoriv rostu na protses utvorennya prymordiiv *Pleurotus ostreatus* // Visnyk Kharkivs'kogo natsional'nogo universytetu imeni V.N.Karazina. Seriya: biologiya. – 2006. – Vyp.4, №748. – S. 134–138./

Зубова Л.Г. Теоретичні і прикладні основи відновлення техногенних ландшафтів до рівня природних (на прикладі териконових ландшафтів Донбасу). Автореф. дис. ... д-ра техн. наук / 21.06.01 – екологічна безпека. – Дніпропетровськ, 2004. – 32с. /Zubova L.G. Teoretychni i prykladni osnovy vidnovlennya tekhnogennykh landshaftiv do rivnya pryrodnykh (na prykladi terykonovykh landshaftiv Donbasu). Avtoref. dys. ... d-ra tekhn. nauk / 21.06.01 – ekologichna bezpeka. – Dnipropetrovsk, 2004. – 32s./

Каменская М.А. Информационная биология. – М.: Академия, 2006. – 368с. /Kamenskaya M.A. Informatsionnaya biologiya. – M.: Akademiya, 2006. – 368s./

Кузнецова О.В. Вплив стимуляторів росту на розвиток вегетативного міцелію *Pleurotus ostreatus* (Jacq.: Fr.) Kumm. // Біотехнологія. – 2011. – Т.4, №3. – С. 82–89. /Kuznetsova O.V. Vplyv stymulyatoriv rostu na rozvytok vegetatyvnoho mitseliyu *Pleurotus ostreatus* (Jacq.: Fr.) Kumm. // Biotekhnologiya. – 2011. – T.4, №3. – S. 82–89./

Кучерявий В.П. Фітомеліорація. – Львів: Вид-во «Світ», 2003. – 540с. /Kucheryavyy V.P. Fitomelioratsiya. – L'viv: Vyd-vo «Svit», 2003. – 540s./

Лакін Г.Ф. Биометрия. – М.: Высшая школа, 1990. – 352с. /Lakin G.F. Biometriya. – M.: Vysshaya shkola, 1990. – 352s./

Лелюк А., Терек О. Використання регуляторів росту рослин як протекторних сполук у разі забруднення важкими металами рослин сої та соняшнику // Вісник Львівського університету. Серія біологічна. – 2007. – Вип.43. – С. 228–232. /Lelyuk A., Terek O. Vykorystannya regulyatoriv rostu roslin yak protektrnykh spoluk u razi zabrudnennya vazhkymy metalamy roslin soi ta sonyashnyku // Visnyk L'viv'skogo universytetu. Seriya biologichna. – 2007. – Vyp.43. – S. 228–232./

Лихолат Ю.В. Еколого-фізіологічні основи формування дернових покривів в умовах степової зони України (стійкість, динаміка, техногенез). Автореф. дис. ... д-ра біол. наук. / 03.00.16 – екологія. – Чернівці, 2003. – 40с. /Lykholat Yu.V. Ekologo-fiziologichni osnovy formuvannya dernovykh pokryviv v umovakh stepovoi zony Ukrainy (stiykist', dynamika, tekhnogenez). Avtoref. dys. ... d-ra biol. nauk / 03.00.16 – ekologiya. – Chernivtsi, 2003. – 40s./

Мазур А.Е. Создание травянистых фитоценозов на эдафотопях отвалов угольных шахт Донбасса. – Автореф. дисс. ... канд. биол. наук / 03.00.16 – экология. – Днепропетровск, 1981. – 26с. /Mazur A.Ye. Sozdaniye travyanykhtykh fitotsenozov na edafotopakh otvalov ugoльныkh shakht Donbassa. – Avtoref. diss. ... kand. biol. nauk / 03.00.16 – ekologiya. – Dnepropetrovsk, 1981. – 26s./

- 
- Sozdaniye travyanistykh fitotsenzov na edafotopakh otvalov ugol'nykh shakht Donbassa. Avtoref. diss. ... kand. biol. nauk / 03.00.16 – ekologiya. – Dnepropetrovsk, 1981. – 26s./
- Малахов І.М. Техногенез у геологічному середовищі. – Кривий Ріг: Октант-Принт, 2003. – 252с. /Malakhov I.M. Tekhnogenez u geologichnomu seredovishchi. – Kryvyi Rig: Oktant-Print, 2003. – 252s./
- Математическое моделирование в биологии. – М.: Наука, 1975. – 156с. /Matematicheskoye modelirovaniye v biologii. – M.: Nauka, 1975. – 156s./
- Панас Р.М. Рекультивация земель. – Львів: Новий Світ-2000, 2009. – 222с. /Panas R.M. Rekul'tyvatsiya zemel'. – L'viv: Novyy Svit-2000, 2009. – 222s./
- Полевой В.В. Роль ауксина в системах регуляции у растений. – Л.: Наука, 1986. – 80 с. /Polevoy V.V. Rol' auksina v sistemakh regulyatsii u rasteniy. – L.: Nauka, 1986. – 80 s./
- Савосько В.М. Меліорація та фіторекультивация земель. – Кривий Ріг: Діоніс, 2011а. – 187с. /Savos'ko V.M. Melioratsiya ta fitorekul'tyvatsiya zemel'. – Kryvyi Rig: Dionis, 2011a. – 187s./
- Савосько В.М. Оцінка фітотоксичності субстратів шахтних хвостосховищ Криворіжжя // Промышленная ботаника. – 2011б. – Вып.11. – С. 19–25. /Savos'ko V.M. Otsinka fitotoksychnosti substrativ shakhtnykh khvostoskhovyshch Kryvorizhzhya // Promyshlennaya botanika. – 2011. – Vyp.11. – S. 19–25./
- Leita L., De Nobili M., Mondini C., Vaca-Garcia M.T. Response of Leguminosae to cadmium exposure // J. Plant Nutr. – 1993. – Vol.16. – P. 2001–2012.
- Wilkins D.A. The measurement of tolerance to edaphic factors by means of root growth // New Phytol. – 1978. – Vol.80, №3. – P. 623–633.
- Yamamoto K., Sakamoto H., Momonoki Y.S. Maize acetylcholinesterase is a positive regulator of heat tolerance in plants // Journal of Plant Physiology. – 2011. – Vol.168, issue 16. – P. 1987–1992.

---

**Представлено: Т.М.Альохіна / Presented by: T.M.Alekhina**

**Рецензент: В.В.Жмурко / Reviewer: V.V.Zhmurko**

*Подано до редакції / Received: 04.08.2014*