

ПРИНЦИПИ ФІТОТОКСИКОЛОГІЧНОГО НОРМУВАННЯ МЕТАЛІВ

Н. О. Риженко

Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління

вул. Митрополита Василя Липківського, 35, м. Київ, 03035, Україна. E-mail: alsko2011@ukr.net

Розроблено принципи фітотоксикологічного нормування металів. Розраховано фітогранично допустиму концентрацію рухомих форм металів у ґрунті (на прикладі агроценозу ячменю ярого), яку запропоновано використовувати для нормування гранично допустимого рівня металів у ґрунті по відношенню до фітокомпонента як біологічної системи. Запропоновано використовувати показники концентрації металів у контрольних умовах (без забруднення металами) та показник фітолетальної дози 5% (концентрація рухомих форм металів у ґрунті, яка викликає 5% зменшення біомаси тест-культури) для розрахунку фіто гранично допустимої концентрації. Встановлено, що найбільше значення фітогранично допустимої концентрації було для цинку, найменше - для кадмію. За показником фітогранично допустимої концентрації по відношенню до ячменю ярого метали розташувалися в ряд: Cd>Ni>Pb>Cu>Co>Zn (дерново-середньопідзолистий ґрунт) та Cd>Pb>Ni>Cu>Co>Zn (чорнозем типовий малогумусний). За показником фітолетальної дози, яка викликає 5% зменшення біомаси ячменю ярого, метали розташувалися в ряд: Cd>Ni>Co>Cu>Pb>Zn (дерново-середньопідзолистий ґрунт), Cd> Cu> Ni> Co> Pb>Zn (чорнозем). Фітотоксикологічне нормування дає змогу не тільки оцінити екологічний ризик для створення оптимального управління екологічною безпекою, але й охарактеризувати токсичність поллютанту по відношенню до біологічного об'єкта.

Ключові слова: метали, фітотоксикологічне нормування, фітогранично допустима концентрація.

ПРИНЦИПЫ ФИТОТОКСИКОЛОГИЧЕСКОГО НОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ

Н. А. Рыженко

Государственная экологическая академия последипломного образования и управления

ул. Митрополита Василия Липковского, 35, г. Киев, 03035, Украина. E-mail: alsko2011@ukr.net

Разработаны принципы фитотоксикологического нормирования металлов. Рассчитана фитопредельно допустимая концентрация подвижных форм металлов в почве (на примере агроценоза ячменя ярого), которая предложена для нормирования предельно допустимого содержания металла в почве для фитоконпонента как биологического объекта. Показатели концентрации металлов в контрольных условиях (без загрязнения металлами) и показатель фитолетальной дозы 5% (концентрация подвижных форм металлов в почве, которая вызывает 5% уменьшение биомассы тест-культуры) предложено использовать для расчёта фитопредельно допустимой концентрации. По показателю фитогранично допустимой концентрации металлы расположены в ряд: Cd>Ni>Pb>Cu>Co>Zn (дерново-среднеподзолистая почва) и Cd>Pb>Ni>Cu>Co>Zn (чернозем типичный малогумусный). По показателю фитолетальной дозы, которая вызывает 5% уменьшение биомассы ячменя ярого, металлы расположены в ряд: Cd>Ni>Co>Cu>Pb>Zn (дерново-среднеподзолистая почва), Cd> Cu> Ni> Co> Pb>Zn (чернозем). Фитотоксикологическое нормирование дает возможность не только обоснование оценки экологического риска для формирования оптимальных форм управления экологической безопасности, но и охарактеризовать токсичность поллютанта по отношению к биологическому объекту.

Ключевые слова: металлы, фитотоксикологическое нормирование, фитопредельно допустимая концентрация.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Питання фітотоксикологічного нормування розглядається вченими різних країн вже не одне десятиріччя, проте є не вирішеним і в теперішній час [1–4]. Адже йдеться завжди про гігієнічне нормування, минаючи екотоксикологічний, а тим більше - фітотоксикологічний аспекти. Відсутня єдина наукова концепція нормування в області охорони навколишнього середовища в цілому з врахуванням оцінки стану всіх компонентів біосфери. Встановлення гігієнічних нормативів з точки зору системної парадигми неможливе без урахування впливу на екосистему, оскільки вона є середовищем існування людини. Сучасна ситуація характеризується тим, що, незважаючи на певне зниження рівня забруднення довкілля промисловими підприємствами, зберігаються підвищені концентрації токсичних речовин у ґрунті, природних, у тому числі в питних водах, атмосферному повітрі [1, 2]. У разі ж аварійних ситуацій та у зонах підвищеного екологічного навантаження нормування сприяє суттєво-

му зниженню екологічного збитку та усуненню негативних наслідків у екосистемі [1–4].

Одним з основних гігієнічних нормативів є гранично допустима концентрація (ГДК) [5]. При встановленні ГДК у ґрунті чи рослині не беруться до уваги ризики впливу токсиканту на фіто-компонент. Аналогічний нормативний показник для фітокомпоненту наразі відсутній. Коли йдеться про шкідливий вплив на рослини, то зазвичай досліджують різні прояви фітотоксичності, натомість єдиної концепції нормування поллютантів стосовно фітокомпоненту екосистеми немає. Однак фітокомпонент є головним акумулятором забрудників в екосистемі, зокрема і металів. Відомо, що одним з головних індексів стану функціонування екосистем є продуктивність. Саме продуктивність екосистеми (а частка фітопродукції є, як правило, є домінуючою у загальній біопродукції) має бути тим першочерговим та ключовим показником, який інформує про стан екосистеми при забрудненні [1, 3]. Особливе значення, з погляду на стан довкілля, відіграють мікроелементи (trace

elements, microelements), які водночас в певних дозах можуть стати токсичними (Cd, Pb, Cu, Co, Ni, Zn). Регламентування сполук металів, які завжди були присутні в біосфері як необхідні вітальні речовини у вигляді різних сполук (оскільки існує багато комбінацій із аніонами, лігандами) має певні особливості. Адже установити шкідливу дозу речовини, присутньої у природному середовищі, складніше, ніж штучно синтезовану. Тим більше ускладнюється задача нормування металів для рослинної компоненти. Адже метали завжди присутні в рослинному організмі в невеликих кількостях як необхідні мікроелементи. Тому важливою задачею фітотоксикології є розробка надійних розрахункових методів оцінки токсичності металів для фітокомпонента екосистеми.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. В гігієнічному регламентуванні існує багато формалізацій розрахунку ГДК у різних середовищах, які враховують або коефіцієнт кумуляції (відношення сумарної дози, що викликає ефект (смертельний) у 50% дослідних особин при багаторазовому дробному введенні, до величини дози, яка викликає той же ефект при одноразовій дії), або Lim_{ac} - (лімакута-поріг одноразової дії токсичної речовини, мінімальна порогова доза, що викликає зміни показників життєдіяльності організму, що виходять за межі пристосованих фізіологічних реакцій) тощо [5]. Всі ці формалізації розроблені з метою виявлення в організмі людини порогових доз (шкідливого впливу). У світовій практиці досить дієвим та широко вживаним є підхід нормування за допомогою показників *LOEC* та *NOEC*. Саме ці показники використовують для розрахунку *MATC* «максимально допустимої токсичної концентрації» (*maximum acceptable toxicant concentration*), яку застосовують для оцінки токсичності речовин у водному середовищі. *MATC* розраховується за формулою [6]:

$$MATC = \sqrt{(NOEC) \cdot (LOEC)}, \quad (1)$$

де *NOEC* (*no observed effect concentration*) – концентрація, яка не викликає видимого ефекту, концентрація відсутності дії; *LOEC* (*lowest observed effect concentration*) – мінімальна концентрація, при якій спостерігається вплив речовини [6]. В нашій роботі ми використали цей підхід для розрахунку фітогранично допустимої концентрації (*ФГДК*):

$$ФГДК = \sqrt{C_{контр.} \cdot PhLD_5}, \quad (2)$$

де *PhLD₅* (фітолетальна доза 5%) – це концентрація у ґрунті, яка викликає 5% зниження біомаси рослин, $C_{контр.}$ – це концентрація на контрольному варіанті без внесення штучних фонів металів.

Виявлення мінімального суттєвого ефекту є дуже важливим, тому що навіть відносно невеликі зміни продуктивності фітоценозів ведуть часто до незворотних змін у функціонуванні екосистеми загалом (згідно першого та четвертого наслідків Закону Внутрішньо динамічної рівноваги та Закону Боуліча «фазових реакцій») [1]. Слабкі дії можуть не викли-

кають у природній системі відповіді реакцій до тих пір, поки, накопичившись, вони не призведуть до розвитку бурного динамічного процесу; цей принцип використовують зазвичай у екологічному прогнозуванні. Будь-яке місцеве перетворення природи викликає в глобальній сукупності біосфери і в її найкрупніших підрозділах відповідні реакції, що призводять до зміни еколого-економічного потенціалу (правило «Трішкіна кафтану»), збільшення якого можливе лише за рахунок значного збільшення енергетичного вкладення [1]. Мінімальний ефект негативного впливу токсиканту у екосистемі на рівні 5 % був порахований у експерименті за допомогою пробіт-аналізу, оскільки визначити точно дозу, яка б викликала точно певний фітотоксичний ефект та ще й в умовах різних ґрунтових субстратів, є складним, затратним, а іноді, навіть, неможливим завданням [5, 7].

Досліджувані ґрунти: дерново-середньопідзолистий супіщаний (рН сол. – 5,5, гідролітична кислотність 2,7 мг-екв./100г, вміст гумусу за Тюріним 0,87%, ступінь насиченості основами 58%) під посівом ячменю ярого (*Hordeum vulgare L.*). Проведення польових, вегетаційних досліджень та відбір зразків ґрунту і рослин відбувався за загально прийнятими методиками [7]. Визначення металів у ґрунті проводили методом тонкошарової хроматографії [8]. Схема дослідю наведена у табл. 1.

Таблиця 1 – Схема дослідю

Контроль (без внесення штучних фонів металів у ґрунт), мг/кг	
Cu ²⁺ :	Zn ²⁺ :
100 мг/кг	600 мг/кг
150 мг/кг	900 мг/кг
200 мг/кг ⁻¹	1200 мг/кг
300 мг/кг ¹	1500 мг/кг
Co ²⁺ :	Ni ²⁺ :
60 мг/кг	70 мг/кг
300 мг/кг	210 мг/кг
480 мг/кг	350 мг/кг ¹
540 мг/кг	420 мг/кг
600 мг/кг	700 мг/кг
Cd ²⁺ :	Pb ²⁺ :
15 мг/кг	150 мг/кг
30 мг/кг	300 мг/кг
60 мг/кг	450 мг/кг
90 мг/кг	900 мг/кг
150 мг/кг	1200 мг/кг
300 мг/кг	1500 мг/кг

Результати експерименту щодо впливу металів у ґрунті на зменшення біомаси ячменю наведено у табл. 2. Значення *PhLD₅* в нашій роботі знаходили за допомогою регресійних рівнянь (табл. 3) та таблиці переведення процента летальності (зниження продуктивності) у пробіти за Доспеховим Б.А. [7]. Значення *PhLD₅* є концентрацією рухомих форм металу у ґрунті, яка викликає 5 % зниження фітопродуктивності. Значення пробіта, яке відповідає 5 % летальності або зменшенню фітопродуктивності є 3,36 [7].

Таблиця 2 – Вплив рухомих форм металів у ґрунті на зменшення біомаси ячменю ярого

Метал	D Вміст металу у ґрунті (1 М НСІ витяжка), мг/кг	Вага рослин, г	Вага рослин порівняно до контролю, %	Зменшення біомаси ячменю, %	lg D	Значення пробіту
Дерново-середньопідзолистий ґрунт						
Cd	22,9±0,3	25,3±0,20	80,70	19,3	1,36	4,12
	46,4±0,5	18,2±0,10	57,80	42,2	1,67	4,80
	77,1±0,6	12,3±0,10	39,30	60,7	1,89	5,28
	101,2±0,8	7,3±0,10	23,55	76,5	2,00	5,74
	153,1±1,2	1,4±0,05	4,40	95,6	2,18	6,75
Pb	231,9±2,6	27,2±0,2	86,50	13,5	2,37	3,92
	347,7±3,8	24,6±0,2	78,30	21,7	2,54	4,23
	695,1±4,3	15,2±1,5	48,30	51,7	2,84	5,05
	930,0±5,0	7,5±0,5	24,19	75,8	2,97	5,71
	1158,3±5,6	1,7±0,1	5,50	94,5	3,06	6,64
Cu	67,2±0,9	28,2±0,3	89,70	10,3	1,83	3,72
	102,9±1,6	25,1±0,3	80,00	20,0	2,01	4,16
	135,5±1,9	15,0±0,1	48,40	51,6	2,13	5,05
	173,8±1,8	5,5±0,1	17,60	82,4	2,24	5,92
Zn	427,4±4,2	26,8±0,3	85,40	14,6	2,63	3,96
	550,3±4,9	24,8±0,3	79,10	20,9	2,74	4,19
	685,7±5,2	11,5±0,2	37,1	62,9	2,84	5,33
	743,0±6,0	3,5±0,1	11,20	88,8	2,87	6,23
Co	36,5±0,4	30,8±0,4	98,0	2,0	1,56	2,95
	125,0±1,2	29,2±0,2	93,0	7,0	2,10	3,52
	159,6±1,7	16,64±0,1	53,0	47,0	2,20	4,92
	191,0±2,0	8,80±0,5	28,0	72,0	2,28	5,58
	219,6±2,0	3,2±0,1	10,2	89,8	2,34	6,28
Ni	39,0±0,4	30,9±0,5	98,5	1,5	1,59	2,95
	91,4±1,0	29,3±0,5	93,2	6,8	1,96	3,52
	148,9±1,5	17,0±0,2	54,0	46,0	2,17	4,90
	178,9±1,8	8,0±0,1	25,5	74,5	2,25	5,67
	210,0±2,2	2,8±0,1	9,0	91,0	2,32	6,34
Чорнозем типовий малогумусний						
Cd	20,8±0,2	30,2±0,4	94,30	6,0	1,32	3,45
	41,7±0,4	23,4±0,3	73,10	26,9	1,62	4,39
	68,2±0,5	15,8±0,2	49,30	50,7	1,83	5,03
	92,5±0,7	10,5±0,2	33,9	66,1	1,97	5,41
	138,9±1,5	5,6±0,1	17,50	82,5	2,14	5,95
Pb	212,6±2,4	29,4±0,3	91,73	8,3	2,33	3,59
	319,7±4,0	31,5±0,3	98,41	1,6	2,50	2,95
	653,8±5,7	18,7±0,2	58,50	41,5	2,82	4,8
	902,5±7,8	10,0±0,2	32,3	67,7	2,95	5,47
	1062,0±9,8	3,3±0,1	10,20	89,8	3,03	6,23
Cu	59,5±0,6	30,8±0,3	96,10	3,9	1,77	3,25
	87,6±1,0	28,9±0,3	90,30	9,7	1,94	3,72
	111,0±1,4	20,0±0,2	64,52	35,5	2,05	4,64
	144,3±1,2	15,4±0,2	48,10	51,9	2,16	5,05
Zn	382,3±3,5	29,5±0,1	92,20	7,8	2,58	3,59
	483,5±3,8	27,7±0,3	86,70	13,3	2,68	3,87
	640,5±5,8	16,3±0,2	52,58	47,4	2,81	4,92
	656,5±7,0	9,8±0,2	30,50	69,5	2,82	5,52
Co	41,5±0,4	31,1±0,4	99,0	1,0	1,62	2,67
	132,7±1,5	30,0±0,4	95,6	4,4	2,12	3,25
	164,0±1,7	18,5±0,3	58,9	41,1	2,21	4,73
	215,8±2,5	9,8±0,2	31,2	68,8	2,33	5,5
	245,5±2,5	0,6±0,1	1,8	98,2	2,39	7,05

Метал	D Вміст металу у ґрунті (1 М HCl витяжка), мг/кг	Вага рослин, г	Вага рослин порівняно до контролю, %	Зменшення біомаси ячменню, %	lg D	Значення пробіту
Ni	43,0±0,3	31,1±0,3	99,0	1,0	1,63	2,67
	97,0±0,7	29,6±0,3	94,3	5,7	1,99	3,45
	154,8±1,1	18,2±0,2	58,1	41,9	2,19	4,80
	186,5±2,0	8,6±0,2	27,4	72,6	2,27	5,61
	222,5±2,4	3,5±0,1	11,1	88,9	2,35	6,23

Таблиця 3 – Залежність між LgD та пробітом

Метал	Рівняння регресії
Дерново-середньопідзолистий ґрунт	
Cd	$y = 3,0274x - 0,1749 (R^2 = 0,94)$
Pb	$y = 3,6038x - 4,8227 (R^2 = 0,92)$
Zn	$y = 9,036x - 20,099 (R^2 = 0,85)$
Cu	$y = 5,3198x - 6,2087 (R^2 = 0,93)$
Co	$y = 3,8571x - 3,4384 (R^2 = 0,80)$
Ni	$y = 4,1516x - 3,4822 (R^2 = 0,88)$
Чорнозем типовий малогумусний	
Cd	$y = 3,0225x - 0,5224 (R^2 = 0,99)$
Pb	$y = 4,113x - 6,6035 (R^2 = 0,84)$
Zn	$y = 7,6369x - 16,317 (R^2 = 0,89)$
Cu	$y = 4,9278x - 5,594 (R^2 = 0,95)$
Co	$y = 4,8313x - 5,6795 (R^2 = 0,71)$
Ni	$y = 4,944x - 5,7593 (R^2 = 0,92)$

Графічна формалізація залежності «доза-ефект» представлена на рисунках 1 - 2. По осі *ox* відкладено десятичний логарифм дози, а по осі *oy* відкладено пробіт.

Розрахунок ФГДК та $PhLD_5$. Залежність між LgD та пробітом для Cd (дерново-середньопідзолистий ґрунт) має вигляд:

$$y = 3,0274x - 0,1749 \quad (3)$$

Звідси: якщо пробіт дорівнює 3,36 ($PhLD_5$), то $3,36 = 3,0274x - 0,1749$, звідси $x = 1,168$ (4)

Антилогрифм (1,168) = 14,72 - $PhLD_5$

$$ФГДК_{Cd} = \sqrt{14,72 * 0,1} = 1,21 \quad (5)$$

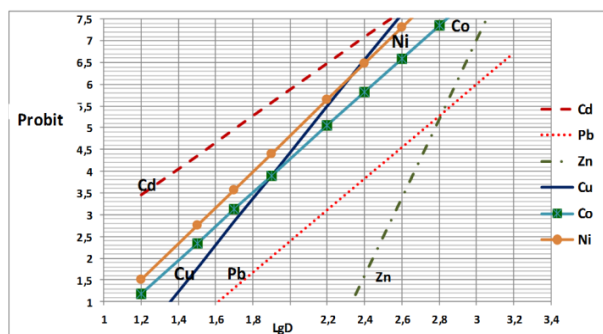


Рисунок 1 – Залежність між LgD металів та пробітами в умовах дерново-середньопідзолистого ґрунту

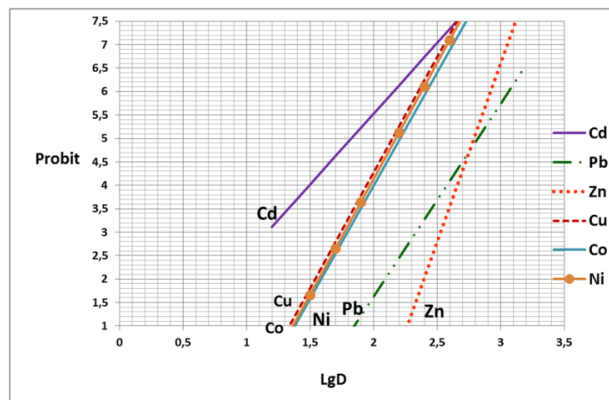


Рисунок 2 – Залежність між LgD металів та пробітами в умовах чорнозему типового малогумусного

Залежність між LgD та пробітом для свинцю (дерново-середньопідзолистий ґрунт) має вигляд:

$$y = 3,6038x - 4,8227 \quad (6)$$

Якщо пробіт дорівнює 3,36 ($PhLD_5$), то $3,36 = 3,6038x - 4,8227$, звідси $x = 2,271$. (7)

Антилогрифм (2,271) = 186,64 - $PhLD_5$

$$ФГДК_{Pb} = \sqrt{186,64 * 0,3} = 7,48 \quad (8)$$

Залежність між LgD та пробітом для міді (дерново-середньопідзолистий ґрунт) має вигляд:

$$y = 5,3198x - 6,2087 (R^2 = 0,93) \quad (9)$$

Звідси: якщо пробіт дорівнює 3,36 ($PhLD_5$), то $3,36 = 5,3198x - 6,2087$, звідси $x = 1,7987$. (10)

Антилогрифм (1,7987) = 62,91 - $PhLD_5$

$$ФГДК_{Cu} = \sqrt{62,91 * 0,92} = 7,6 \quad (11)$$

Залежність між LgD та пробітом для цинку (дерново-середньопідзолистий ґрунт) має вигляд:

$$y = 9,036x - 20,099 (R^2 = 0,85)$$

Звідси: якщо пробіт дорівнює 3,36 ($PhLD_5$), то $3,36 = 9,036x - 20,099$, звідси $x = 2,596$. (12)

Антилогрифм (2,596) = 394,46 - $PhLD_5$ або LOEC

$$\text{ФГДК}_{\text{Zn}} = \sqrt{394,46 * 2,4} = 30,77. \quad (13)$$

Залежність між LgD та пробітом для нікелю (дерново-середньопідзолистий ґрунт) має вигляд: $y = 4,1516x - 3,4822$ ($R^2 = 0,88$)

Звідси: якщо пробіт дорівнює 3,36 (PhLD_5), то $3,36 = 4,1516x - 3,4822$, звідси $x = 1,7$. (14)

Антилогрифм (1,7) = 50,12 - PhLD_5

$$\text{ФГДК}_{\text{Ni}} = \sqrt{50,12 * 1,1} = 7,42. \quad (15)$$

Залежність між LgD та пробітом для кобальту (дерново-середньопідзолистий ґрунт) має вигляд: $y = 3,8571x - 3,4384$ ($R^2 = 0,80$)

Звідси: якщо пробіт дорівнює 3,36 (PhLD_5), то $3,36 = 3,8571x - 3,4384$, звідси $x = 1,8$. (16)

Антилогрифм (1,8) = 63,1 - PhLD_5

$$\text{ФГДК}_{\text{Co}} = \sqrt{63,1 * 1,5} = 9,7. \quad (17)$$

Залежність між LgD та пробітом для кадмію (чорнозем) має вигляд: $y = 3,0225x - 0,5224$ ($R^2 = 0,99$)

Звідси: якщо пробіт дорівнює 3,36 (PhLD_5), то $3,36 = 3,0225x - 0,5224$, звідси $x = 1,2845$. (18)

Антилогрифм (1,2845) = 19,25 - PhLD_5

$$\text{ФГДК}_{\text{Cd}} = \sqrt{19,25 * 0,11} = 1,46. \quad (19)$$

Залежність між LgD та пробітом для свинцю (чорнозем) має вигляд: $y = 4,113x - 6,6035$ ($R^2 = 0,84$)

Звідси: якщо пробіт дорівнює 3,36 (PhLD_5), то $3,36 = 4,113x - 6,6035$, звідси $x = 2,422$. (20)

Антилогрифм (2,422) = 264,24 - PhLD_5

$$\text{ФГДК}_{\text{Pb}} = \sqrt{264,24 * 0,32} = 9,2. \quad (21)$$

Залежність між LgD та пробітом для міді (чорнозем) має вигляд: $y = 4,9278x - 5,594$ ($R^2 = 0,95$)

Звідси: якщо пробіт дорівнює 3,36 (PhLD_5), то $3,36 = 4,9278x - 5,594$, звідси $x = 1,817$. (22)

Антилогрифм (1,817) = 65,61 - PhLD_5

$$\text{ФГДК}_{\text{Cu}} = \sqrt{65,61 * 2,6} = 13,1. \quad (23)$$

Залежність між LgD та пробітом для цинку (чорнозем) має вигляд: $y = 7,6369x - 16,317$ ($R^2 = 0,89$)

Звідси: якщо пробіт дорівнює 3,36 (PhLD_5), то $3,36 = 7,6369x - 16,317$, звідси $x = 2,58$. (24)

Антилогрифм (2,58) = 380,19 - PhLD_5

$$\text{ФГДК}_{\text{Zn}} = \sqrt{380,19 * 5,3} = 44,9. \quad (25)$$

Залежність між LgD та пробітом для кобальту (чорнозем) має вигляд: $y = 4,8313x - 5,6795$ ($R^2 = 0,71$)

Звідси: якщо пробіт дорівнює 3,36 (PhLD_5), то $3,36 = 4,8313x - 5,6795$, звідси $x = 1,87$. (26)

Антилогрифм (1,87) = 74,13 - PhLD_5

$$\text{ФГДК}_{\text{Co}} = \sqrt{74,13 * 2,5} = 13,61. \quad (27)$$

Залежність між LgD та пробітом для нікелю (чорнозем) має вигляд: $y = 4,944x - 5,7593$ ($R^2 = 0,92$)

Звідси: якщо пробіт дорівнює 3,36 (PhLD_5), то $3,36 = 4,944x - 5,7593$, звідси $x = 1,845$. (28)

Антилогрифм (1,845) = 69,98 - PhLD_5

$$\text{ФГДК}_{\text{Ni}} = \sqrt{69,98 * 2,3} = 12,69. \quad (29)$$

У табл. 4 представлено значення PhLD_5 (мінімальна концентрація, при якій спостерігається вплив речовини, тобто концентрація зменшення фітопродуктивності на рівні 5%, $C_{\text{контр}}$ (концентрація, яка не викликає видимого ефекту, концентрація відсутності дії), ФГДК (фітотоксикологічна гранично допустима концентрація).

Таблиця 4 – Значення PhLD_5 , $C_{\text{контр}}$, ФГДК , Cd, Pb, Zn, Cu, Ni, Co

Метал	PhLD_5 , мг/кг рухомих форм ґрунту	$C_{\text{контр}}$, мг/кг рухомих форм ґрунту	ФГДК
Дерново-середньопідзолистий ґрунт			
Cd	14,72	0,10±0,02	1,21
Pb	186,64	0,30±0,05	7,48
Zn	394,46	2,40±0,3	30,77
Cu	62,91	0,92±0,1	7,60
Co	57,94	1,50±0,15	9,77
Ni	50,12	1,10±0,1	7,40
Чорнозем типовий малогумусний			
Cd	19,25	0,11±0,02	1,46
Pb	264,24	0,32±0,05	9,20
Zn	380,19	5,30±0,5	44,90
Cu	65,61	2,60±0,2	13,10
Co	74,13	2,50±0,2	13,61
Ni	69,98	2,30±0,3	12,69

За показником PhLD_5 , метали розташувалися в ряд: $\text{Cd} > \text{Cu} \geq \text{Ni} > \text{Co} > \text{Pb} > \text{Zn}$ (чорнозем) та $\text{Cd} > \text{Ni} \geq \text{Co} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Zn}$ (дерново-середньопідзолистий). Найбільш токсичним металом при мінімально ефективній (5%) дозі на рослини ячменю був кадмій на обох ґрунтах, найменш токсичними металами були Zn та Pb. Решта металів залежно від ґрунту при 5% токсичному ефекті мали близьку токсичність на

рівні 50,12-60,91 мг/кг рухомих форм на дерново-підзолистому ґрунті та відповідно 65,61-74,13 мг/кг рухомих форм на чорноземі. При цьому токсичність усіх металів на чорноземі була нижчою, ніж на слабо буферному дерново-середньопідзолистому ґрунті. Свинець через низьку фонову концентрацію у ґрунті (на рівні 0,3-0,32мг/кг рухомих форм у ґрунті) посів місце поруч із кадмієм. Адаже природня концентрація свинцю така ж невисока, як і для кадмію. Ані свинець, ані кадмій не відносяться до фізіологічно необхідних для рослин елементів, на відміну від цинку, міді, кобальту і нікелю. Не дивлячись на те, що 5 % фітотоксична доза свинцю знаходиться на рівні 186,64-264,24 мг/кг, через невисокий природний фоновий вміст ($C_{контр}$) свинцю в ґрунті, ФГДК для свинцю на обох досліджуваних ґрунтах знаходиться на рівні 7,48-9,2 мг/кг рухомих форм у ґрунті. Таким чином, складні механізми природних захисних бар'єрів рослин від токсичної дії та сукупність інших факторів, що впливають на токсичність, не дають можливості провести фітотоксикологічне нормування за одним показником. Аналогічно до гігієнічного нормування, встановлення фітотоксикологічного класу небезпеки поллютанта повинно враховувати низку індексів, які різнобічно характеризують прояви токсичності металів, які, є елементами, які завжди присутні в екосистемі у кларкових кількостях. Це ускладнює процедуру встановлення токсичності через те, що майже всі з досліджуваних елементів виконують певну роль в екосистемі. Адаже саме тому важливим є встановити грань між природною нормою та шкідливою кількістю в екосистемі. Тому встановлення показників $PhLD_5$, та ФГДК є важливим етапом фітотоксикологічного нормування та виявлення токсичності поллютантів.

ВИСНОВКИ. Розроблено принципи фітотоксикологічного нормування токсичних металів. Для фітотоксикологічного нормування запропоновано використання фітогранично допустимої концентрації металів у ґрунті. Запропоновано алгоритм розрахунку ФГДК.

За показником ФГДК по відношенню до ячменю ярого метали розташувалися в ряд:

$Cd > Ni \geq Pb \geq Cu > Co > Zn$ (дерново-середньопідзолистий) та $Cd > Pb > Ni > Cu \geq Co > Zn$ (чорнозем). Найбільше значення ФГДК – для цинку, найменше – для кадмію. За показником $PhLD_5$ по відношенню до ячменю ярого метали розташувалися в ряд: $Cd > Ni > Co > Cu > Pb > Zn$ (дерново-середньопідзолистий ґрунт), $Cd > Cu > Ni > Co > Pb > Zn$ (чорнозем).

Встановлення показників $PhLD_5$, та ФГДК дозволяє оцінити токсичність поллютантів по відношенню до рослин та регулювати антропогенний тиск на фітокомпонент як біологічну систему.

ЛІТЕРАТУРА

1. Реймерс Н.Ф. Экология (теории, законы, правила, принципы и гипотезы). – М: Журнал «Россия Молодая», 1994. – 367 с.
2. Алексеев Ю.В. Тяжелые металлы в агроландшафте. – СПб.: ПЯФ РАН, 2008. – 216 с.
3. Ryzhenko N.O., Kavetsky V.M. Probit Analysis for Cd, Pb, Cu, Zn Phytotoxicity Assessment // Biotechnologia Acta. – 2017. – 32 (т.2). – С. 67–74.
4. Щербаченко О.І. Важкі метали як токсичний фактор забруднення природного середовища: стійкість і адаптація рослин до їх впливу // Наукові записки державного природознавчого музею. – 2014. – Вип. 30. – С. 157–182.
5. Куценко С.А. Основы токсикологии: научно-методическое издание. – СПб.: ООО «Издательство Фолиант», 2004. – 720 с.
6. Rand, Gary (1995). Fundamentals of Aquatic Toxicology. USA: Boca Raton: CRC Press., P. 943
7. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.
8. Методичні вказівки по визначенню Hg, Zn, Co, Cd, Cu, Ni в ґрунті, рослинах, у воді методом тонкошарової хроматографії / В.М. Кавецький, Н.А. Макаренко, А.М. Ліщук та ін. // Методические указания по определению микроколичеств пестицидов в пищевых продуктах в кормах и внешней бреде. – К.: Минэкологии Украины, 2001. – Вып. 29. – С. 18–24.

PRINCIPLES OF PHYTOTOXICOLOGICAL NORMALIZATION OF METALS

N. Ryzhenko

State Ecological Academy of Post-Graduate Education and Management

Purpose. To create principles of phytotoxic normalization of metals in soil. **Methodology.** Using the approach of calculation the Maximum Acceptable Toxicant Concentration, it has been proposed the calculation of Phyto Maximum Allowable Concentration of metal in soil (1N HCl) (on the example of agroecosystem of spring barley). Using the probit analysis, the phytolethal dose decreasing 5% of biomass has been obtained. **Results.** Metal concentration in unpolluted soil, and Phytolethal Dose which causes the 5% reduction of biomass have been obtained for calculation of Phyto Maximum Allowable Concentration of metal in soil. Phyto Maximum Allowable Concentration of each metal in soil (1N HCl) has been highlighted. The highest value of Phyto Maximum Allowable Concentration was for zinc, the least – for cadmium. We obtained the following ranking of the metals according to Phyto Maximum Allowable Concentration: $Cd > Ni \geq Pb \geq Cu > Co > Zn$ (sod podzolic soil) and $Cd > Pb > Ni > Cu \geq Co > Zn$ (typical low-humus chernozem). According to the Phytolethal Dose decreasing 5% of biomass the metals are arranged in the row: $Cd > Ni > Co > Cu > Pb > Zn$ (sod podzolic soil), $Cd > Cu > Ni > Co > Pb > Zn$ (chernozem). **Originality.** For the first time, we obtained the Phytolethal Dose of Cd^{2+} , Zn^{2+} , Co^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} in soil increasing 5 % of biomass. The Phyto Maximum Allowable Concentration of each metal in soil has been calculated. **Practical value.** Phytotoxicological regulation allows not only assess ecological risk for the creation of optimal management of ecological safety, but also characterize the toxicity of the pollutant in relation to the biological object. References 8, tables 4, figures 2.

Key words: metals, phytotoxic normalization, Phyto Maximum Allowable Concentration.

REFERENCES

1. Reymers, N.F. (1994), *Ekologija (teorii, zakony, pravila, principy i gipotezy)* [Ecology (theories, grounds, principles, rules and hypothesis)]. Moscow [in Russian].
2. Alekseyev, Yu.V. (2008), *Tjazhelye metally v agrolandshafte* [Heavy metals in agrolandscape], Sankt-Peterburg: PIYaPh [in Russian].
3. Ryzhenko, N.O., Kavetsky, V.M. (2017), *Probit Analysis for Cd, Pb, Cu, Zn Phytotoxicity Assessment. Biotechnologia Acta – 32* (2), pp. 67-74 [in English].
4. Scherbachenko, O.I. (2014), *Vazhki metaly yak toksychnyi faktor zabrudnennia pryrodnoho seredovyshcha: stiiikist i adaptatsiia roslyn do yikh vplyvu* [Heavy metals as a toxic factor of environment pollution: stability and adaptation of plants to their influence], *Naukovi zapysky derzhavnoho pryrodnavchoho muzeiu – Scientific notes of the State Natural History Museum*, 30, pp. 157–182 [in Ukrainian].
5. Kucenko, S.A (2004), *Osnovy toksikologii: nauchno-metodicheskoe izdanie* [Principles of Toxicology: scientific and methodologic edition], Sankt-Peterburg: Folyant [in Russian].
6. Rand, G. (1995), *Fundamentals of Aquatic Toxicology*. USA: Boca Raton, CRC Press. [in English].
7. Dospehov, B.A. (1985), *Metodika polevogo opyta* [Methodology of field experiment], Moscow: Agropromizdat [in Russian].
8. Kavetsky, V.N., Makarenko, N.A., Lishchuk, A.M., Buogis, A.M., Kavetsky, S.V. (2001), *Metodychni vказivky po vyznachenniu Hg, Zn, Co, Cd, Cu, Ni v gruntі, roslynakh, u vodi metodom tonkosharovoі khromatohrafii* [Chromatography Methods of the Hg, Zn, Co, Cd, Cu, Ni determination in soil, plant and water]. *Methodic of determination pesticides residues in food, forage and environment*. (Vol. 29). Kyiv: Minekolohiyi Ukrayiny [in Ukrainian].

Стаття надійшла 30.06.2017.