

УДК 57.044

Т.Ф. ЯКОВИШИНА, канд. сільгосп.-господ. наук, доц.
ДВНЗ “Придніпровська державна академія будівництва та архітектури”

ЕКОЛОГІЧНЕ НОРМУВАННЯ ПОЕЛЕМЕНТНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТУ УРБООКОСИСТЕМИ ВАЖКИМИ МЕТАЛАМИ ЗА ФОНОВОЮ КОНЦЕНТРАЦІЄЮ

Мета. У статті проаналізовано існуючі в Україні та за кордоном підходи щодо нормування поелементного забруднення ґрунтів важкими металами за ГДК, концентрацією природного геохімічного фону, інтегральним показником біологічного стану, Soil Screening Value, показані їх переваги та недоліки. Актуальність даної роботи стосується пошуку показників характеристики екологічної небезпеки і розробки системи нормування забруднення ґрунту, як абіотичної складової будь-якої екосистеми, що зазнала антропогенного втручання в техногенно навантажених регіонах відносно важких металів. Гострота проблеми висвітлена на тлі урбоєкосистеми, де функціонування промислових підприємств зумовлює створення урбанізованого геохімічного фону, котрий може перевищувати природний в декілька разів.

Методи дослідження. Надані вимоги щодо екологічних норм, які мають бути орієнтовані на вирішення завдань оптимального функціонування екологічних властивостей ґрунтів, забезпечення їх сталості, відновлення родючості, збереження земельних ресурсів шляхом мінімізації негативного впливу.

Наукова новизна. На прикладі м. Дніпро здійснена екологічна оцінка поелементного забруднення ґрунтів урбоєкосистеми міддю за запропонованою системою нормування.

Змістовно обґрунтовано використовувати для екологічного нормування поелементного забруднення важкими металами ґрунту урбоєкосистем концентрації їх природного геохімічного фону, як за валовим вмістом, так і за рухомими формами.

Практична значимість. Запропоновано при встановленні ступеня екобезпеки зважати також на вміст рухомих форм забруднювачів, як таких, що завдяки своїй мобільності здатні мігрувати трофічними ланцюгами в екосистемах. Визначено інтенсивність забруднення Cu ґрунтів урбоєкосистеми м. Дніпро за валовим вмістом – як слабку та за рухомими формами – дуже сильну.

Результат. Встановлено, що підвищення рухомості, через втрату буферної здатності міськими ґрунтами, відбивається на невідповідності результатів оцінок за валовим вмістом і рухомими формами важких металів.

Ключові слова: важкі метали, мідь, ґрунт, забруднення, урбоєкосистема, нормування.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Проблема пошуку показників екобезпеки і розробка системи нормування забруднення ґрунту - абіотичної складової будь-якої екосистеми, що зазнала антропогенного втручання набуває актуальності в техногенно навантажених регіонах відносно важких металів (ВМ) - хімічних елементів 1-3 класу токсичності. Особливо гостро проблема постає в урбоєкосистемах, де функціонування підприємств зумовлює створення урбанізованого геохімічного фону, котрий може перевищувати природний. Екологічні норми мають бути орієнтовані на вирішення завдань оптимального функціонування екологічних властивостей ґрунтів, забезпечення їх сталості, відновлення родючості, збереження земельних ресурсів шляхом мінімізації негативного впливу на ґрунти [1]. Саме тому за умов низьких фонових концентрацій та високих значень ГДК виникає питання пошуку системи нормування для адекватної оцінки рівня екологічної небезпеки забруднення ґрунту.

Аналіз досліджень і публікацій. Значення існуючих нормативів стосовно валового вмісту ВМ носить досить загальний характер, адже вони були розроблені для ґрунтів в цілому (ГДК) або для їх груп (ОДК) з подібними властивостями, котрі визначають їх стійкість до забруднення (вміст гумусу, гранулометричний склад, рН, тощо) [2,3]. Отже норматив ГДК повинен відбивати вище зазначені властивості [4,5], однак в дійсності цього не відбувається, приміром для всіх ґрунтів України (сірі лісні, дерново-підзолисті, чорноземи, каштанові) ГДК Cu для валового вмісту становить 55 мг/кг, у рухомих форм - 3 мг/кг [6].

В теперішній час розроблено декілька підходів щодо нормування ступеня забруднення ґрунту згідно емерджентної оцінки порушення його екологічних функцій, котрі він виконує в екосистемі, а саме: визначення небезпечної кількості хімічного елементу через зниження інтегрального показника біологічного стану [7], використання Soil Screening Value - нормативу якості, котрий регламентує рівень безпечного для людини вмісту ВМ [7, 9]. Проте встановлені за методиками [7-9] безпечні кількості ВМ майже не відрізняються від концентрацій природного геохімічного фону, адже в межах фонових територій за умов відсутності антропогенного нава-

нтаження на вміст хімічних елементів впливають геохімічні особливості покривних відкладень, різноманіття корінних порід, вміст органічної речовини, рН ґрунтового середовища, гідрологічний режим, інтенсивність промивання ґрунтового профілю, вміст високодисперсних мінералів [7]. Ще більше проблем постає при нормуванні забруднення рухомими формами ВМ, адже високобуферні ґрунти зазвичай характеризуються їх низькою забезпеченістю.

Нормування поелементного забруднення ґрунту ВМ, відправною точкою, якого, є концентрація, притаманна природному геохімічному фонові, досить успішно використовують В. В. Добровольський (1999)[10] та S. H. Rahman (2012)[11], деякі розбіжності мають тільки запропоновані ними шкали оцінки екобезпеки. Однак виникають деякі сумнівні відносно відповідності одержаних результатів за валовим вмістом і рухомими формами. Крім того за умов значної строкатості забруднення урбоєкосистеми внаслідок антропогенного впливу постає потреба визначення його інтенсивності з урахуванням ареалів розповсюдження hot spots, що й було здійснено на прикладі м. Дніпро.

Постановка завдання. Мета роботи полягала в нормуванні поелементного забруднення ґрунту урбоєкосистеми м. Дніпро міддю відносно фонових концентрацій її валового вмісту та рухомих форм в зональному ґрунті з подальшим встановленням ступеня екологічної небезпеки за існуючими методиками.

Методика досліджень. Екологічну оцінку поелементного забруднення ґрунтів урбоєкосистеми м. Дніпро Си проводили в мережі екомоніторингу [12]: розмір сітки (2×2 км), загальна кількість ключових ділянок відбору проб - 65, з яких за характером функціонального призначення припадало на промислову зону - 9, висотну забудову - 13, приватний сектор - 26, зелену (рекреаційну) зону - 17. Проби ґрунту відбирали методом конверту з глибини 0-10 см, репрезентативна проба складалася з 25 індивідуальних проб [13].

У відібраних зразках визначали валовий вміст Си атомно-абсорбційним методом після кислотної обробки ґрунту, а її рухомі форми - у витягу ААБ (рН 4,8) за стандартними методиками [14, 15]. Обробку одержаних результатів здійснювали методами математичної статистики [16].

Оцінку забруднення Си ґрунтів урбоєкосистеми м. Дніпро проводили відносно природної флуктуації за вмістом кожної досліджуваної форми згідно коефіцієнту концентрації або аномальності за В. В. Добровольським (1999) (K_c), використовуючи формулу (1) [10, 11]

$$K_c = C_p / C_\phi, \quad (1)$$

де C_p - вміст ВМ в досліджуваному ґрунті (мг/кг); C_ϕ - фоновий вміст ВМ в зональному ґрунті (мг/кг).

Безпосередньо оцінку інтенсивності поелементного забруднення ВМ відносно природного геохімічного фону притаманного зональному ґрунту виконували, користуючись шкалою, запропонованою В. Б. Ільїним (1995) (табл. 1).

Результати досліджень. Серед джерел надходження Си в навколишнє середовище м. Дніпро з подальшим депонуванням в ґрунті слід особливо відзначити підприємства кольорової металургії, транспорт, зварювання, гальванізацію, спалювання палива, у кількості 13 із загальним викидом 2,061 т, що в становить на 1 км² близько 0,0015 т за даними Головного управління статистики в Дніпропетровській області.

Таблиця 1

Шкала інтенсивності забруднення ґрунтів ВМ відносно природного геохімічного фону, (В.В.Добровольський, 1999) [10]

Категорія інтенсивності забруднення	Коефіцієнт аномальності (K_c)	
	1	2
Природна флуктуація вмісту ВМ та окремі сигнали забруднення	< 5,0	< 1,0
Слабке забруднення	5,1-10,0	1,1-2,0
Помірне забруднення	10,1-30,0	2,1-6,0
Сильне забруднення	> 30,0	> 6,0

Примітка: 1 – за даними емісійної спектроскопії; 2 – за середнім значенням концентрації активних форм ВМ.

Оцінку поелементного забруднення ґрунтового покриву урбоєкосистеми м. Дніпро Си проводили враховуючи фактори територіального розповсюдження та інтенсивності надлишкових кількостей в кожній окремій hot spot за В. В. Добровольським (1999), (табл. 2).

Таблиця 2

Інтенсивність поелементного забруднення ґрунту ВМ з урахуванням розповсюдження [10]

Інтенсивність забруднення (K_c)	Метод визначення ВМ	Розповсюдження забруднення, % від загальної площі			
		< 1,0	1,0-4,9	5,0-20,0	> 20,0
Слабка	1	Н	Сл	Сл	П
	2				
Помірна	1	Сл	Сл	П	С
	2				
Сильна	1	Сл	П	С	ДС
	2				
Дуже сильна	1	П	С	ДС	ДС
	2				

Примітка: 1 – за даними емісійної спектроскопії; 2 – за середнім значенням концентрації активних форм ВМ; Сл – слабе забруднення; П – помірне забруднення; С – сильне забруднення; ДС – дуже сильне забруднення.

Валовий вміст міді в ґрунтах урбоєкосистеми м. Дніпро згідно K_c відносно природного геохімічного фону відповідав природній флуктуації з середнім перевищенням по районам до 2,7 разів (Чечелівський, Центральний), що зумовлювалось наявністю промислових зон (табл. 3).

Таблиця 3

Нормування поелементного забруднення C_u ґрунтів урбоєкосистеми м. Дніпро відносно природного геохімічного фону за валовим вмістом

Адміністративна одиниця	Категорія забруднення ґрунту			
	природна флуктуація	слабка	помірна	сильна
Амур-Нижньодніпровський район	<u>1.03 (0.40-1.99)</u> 12	<u>7.17</u> 1		
Індустріальний район	<u>1.43 (0.50-3.27)</u> 5			
Новокодацький район	<u>1.91 (0.52-4.66)</u> 12			
Самарський район	<u>1.22 (0.24-2.78)</u> 8			
Соборний район	<u>1.27 (0.29-2.15)</u> 8			
Центральний район	<u>2.25 (1.17-2.90)</u> 3			
Чечелівський район	<u>2.69 (1.13-4.71)</u> 7	<u>5.55</u> 1	<u>27.23</u> 1	
Шевченківський район	<u>1.94 (0.78-4.76)</u> 7			
Лівобережжя	<u>1.17 (0.24-3.27)</u> 25	<u>7.17</u> 1		
Правобережжя	<u>1.95 (0.29-4.76)</u> 37	<u>5.55</u> 1	<u>27.23</u> 1	
м. Дніпро	<u>1.64 (0.24-4.76)</u> 62	<u>6.36 (5.55-7.17)</u> 2	<u>27.23</u> 1	

Примітка: чисельник – середнє значення та в дужках межі коливань в ґрунтах відповідної категорії забруднення; знаменник – кількість ключових ділянок відбору проб ґрунту.

Нормування вмісту C_u в міських ґрунтах відносно природного геохімічного фону, за розрахунком коефіцієнту концентрації, надало можливість встановити ступінь забруднення як слабку, частково помірну, в той час як на більшості території спостерігалась природна флуктуація з окремими hot spots в промислових зонах. Поодинокі hot spots, які відповідали слабкій та помірній категоріям забруднення ґрунту, були зафіксовані на лівобережжі в зонах впливу річкового порту Амур-Гавань та Дніпропетровського металургійного заводу ім. Комінтерну; на правобережжі в промисловій зоні ПАТ “Євраз ДМЗ”, на території Дніпровської залізничної станції, а також в Краснопіллі.

На периферії міста були виявлені процеси деконцентрації даного хімічного елемента в ґрунті на 14 ділянках території лівого берегу (Амур-Нижньодніпровський - 8, Індустріальний - 2, Самарський район - 4) та 8 - правого берегу (Новокодацький - 4, Соборний і Шевченківський

райони по 2), що пояснюється порушення ґрунтового профілю внаслідок будівництва, як приватного житла, так і високоповерхівок, а саме, недотриманням вимог охорони навколишнього природного середовища при проведенні земляних робіт, які окрім облаштування фундаментів також включають зняття родючого шару ґрунтового покриву, складування його в буртах під час процесу будівництва, а по закінченню розповсюдження по забудованій території з обов'язковим озелененням. Зменшення валової міді від 2 до 4 разів порівняно з фоною концентрацією на фоні погіршення водно-фізичних та агрохімічних властивостей негативно відбивалось на головній екологічній функції міських ґрунтів – забезпеченні елементами мінерального живлення рослин, що, в свою чергу, призводило до збіднення фітоценозів, а в деяких випадках майже їх повної відсутності.

Нормування забруднення ґрунту урбоекосистеми м. Дніпро згідно рухомих форм Cu за природним геохімічним фоном відносно зонального для Північного Степу України - чорнозему звичайного малогумусного важкосуглинкового надало зовсім інші результати (табл. 4), так переважаючою категорією забруднення була помірна - 27 ділянок та сильна - 26 ділянок відбору проб, що зумовлювалось окрім надходження міді у вигляді легкорозчинних сполук, також порушенням буферної властивості безпосередньо самого міського ґрунту, що полягала у закріпленні катіонів Cu^{2+} ГВК, органічною речовиною, тощо.

Таблиця 4

Нормування поелементного забруднення Cu ґрунтів урбоекосистеми м. Дніпро відносно природного геохімічного фону за рухомими формами

Адміністративна одиниця	Категорія забруднення ґрунту			
	природна флуктуація	слабка	помірна	сильна
Амур-Нижньодніпровський район		<u>1.50 (1.43-1.57)</u> 4	<u>3.36 (2.86-4.07)</u> 4	<u>45.58 (6.14-196.71)</u> 5
Індустріальний район	<u>0.79</u> 1		<u>2.83 (2.21-3.14)</u> 3	<u>9.00</u> 1
Новокодацький район			<u>4.65 (2.64-5.86)</u> 7	<u>23.87 (6.79-76.64)</u> 5
Самарський район	<u>0.21</u> 1	<u>1.54 (1.21-1.86)</u> 2	<u>4.50 (3.00-6.00)</u> 2	<u>6.98 (6.36-7.71)</u> 3
Соборний район	<u>0.79</u> 1	<u>1.21</u> 1	<u>3.93 (2.79-5.07)</u> 5	<u>8.64</u> 1
Центральний район			<u>2.29</u> 1	<u>10.86 (9.29-12.43)</u> 2
Чечелівський район			<u>5.00 (4.36-5.57)</u> 4	<u>58.93 (13.36-21.79)</u> 5
Шевченківський район		<u>1.86 (1.71-2.00)</u> 2	<u>5.00</u> 1	<u>8.40 (6.29-11.57)</u> 4
Лівобережжя	<u>0.50 (0.21-0.79)</u> 2	<u>1.51 (1.21-1.86)</u> 6	<u>3.44 (2.21-6.00)</u> 9	<u>28.65 (6.14-196.71)</u> 9
Правобережжя	<u>0.79</u> 1	<u>1.64 (1.21-2.00)</u> 3	<u>4.42 (2.29-5.86)</u> 18	<u>28.09 (6.29-76.64)</u> 17
м. Дніпро	<u>0.60 (0.21-0.79)</u> 3	<u>1.55 (1.21-2.00)</u> 9	<u>4.09 (2.21-6.00)</u> 27	<u>28.28 (6.14-196.71)</u> 26

Примітка: чисельник – середнє значення та в дужках межі коливань в ґрунтах відповідної категорії забруднення; знаменник – кількість ключових ділянок відбору проб ґрунту.

Висока буферність чорнозему звичайного відбивається на рухомості Cu , котра в нативних умовах становить 0,14 мг/кг, що складає 0,01 % від валу, втім як в умовах забруднення вона сягала до 29 % при перевищенні природного геохімічного фону за валовим вмістом більш ніж в 7 разів локально на лівобережжі. Природний ґрунт на досліджуваній ділянці, в районі Амур Гавань, майже не зберігся, за ґрунтовым профілем він представлений урбаноземом насипного типу, досить сильно розбавленого піщаними фракціями і включеннями природного та антропогенного походження, з накладанням викидів Дніпропетровського металургійного заводу ім. Комінтерну. Процеси деконцентрації рухомих форм міді були слабо виражені - 2 ділянки на лівобережжі та 1 на правобережжі м. Дніпро. Доцільно, реальний рівень забруднення встановлювати на вмістом рухомих форм, котрі здатні включатися в трофічні ланцюги і мігрувати в біоценозі [13], тому дана ситуація являє значну екологічну небезпеку для функціонування ур-

боекосистеми м. Дніпро і потребує за умов незначного перевищення фону до слабого та помірного рівня забруднення за валовим вмістом, впровадження міроприємств з фітостабілізації рухомості Cu за рахунок вирощування толерантних до забруднення рослин в поєднанні із заходами по хімічній детоксикації.

Визначення тільки валового вмісту не надає реальної картини спричиненої небезпеки для урбоекосистеми, що було встановлено на прикладі м. Дніпро, адже не враховується рухомість та потенційна доступність катіонів Cu^{2+} для кореневої системи рослин, отже можливість включення їх в трофічні ланцюги, крім того це в значній мірі утруднює вибір та подальшу ефективність міроприємств з детоксикації забруднених ґрунтів.

Картографування за коефіцієнтом концентрації надало змогу встановити інтенсивність розповсюдження забруднення за валовим вмістом Cu по території м. Дніпро як слабку та за рухомими формами – дуже сильну відповідно 3,6 % і 19,2 % від загальної площі міста.

Висновки. Змістовно обґрунтовано використовувати для екологічного нормування поелементного забруднення ВМ ґрунту урбоекосистем концентрації природного геохімічного фону, як за валовим вмістом, так і за рухомими формами. Запропоновано при встановленні ступеня екобезпеки зважати також на вміст рухомих форм забруднювачів, як таких, що завдяки своїй мобільності здатні мігрувати трофічними ланцюгами в екосистемах. Визначено інтенсивність забруднення Cu ґрунтів урбоекосистеми м. Дніпро за валовим вмістом – як слабку та за рухомими формами – дуже сильну. Встановлено, що підвищення рухомості, через втрату буферної здатності міськими ґрунтами, відбивається на невідповідності результатів оцінок за валовим вмістом і рухомим формами.

Напрямок подальших досліджень потрібно зосередити на розробці блоку оцінки в системі екологічного моніторингу, який би враховував нормування якості водно-фізичних і агрохімічних властивостей, показників поелементного та поліелементного забруднення ВМ, буферної властивості ґрунту, його фітотоксичності, що забезпечить дотримання норм екобезпеки стану урбоекосистем.

Список літератури

1. Концепція екологічного нормування допустимого антропогенного навантаження на ґрунтовий покрив. – Харків, 2004. – 24 с.
2. Колесников С. И. Разработка региональных экологических нормативов содержания загрязняющих веществ в почвах юга России [Электронный ресурс] / С. И. Колесников, К. Ш. Казеев, Т. В. Денисова, Е. В. Даденко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2012. – № 82 (08). – Режим доступа к журналу: <http://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-regionalnyh-ekologicheskikh-normativov-soderzhanija-zagryaznyayuschih-veschestv-v-pochvah-yuga-rossii>.
3. Мислива Т. М. Концептуальні засади здійснення екологічного нормування важких металів / Т. М. Мислива // Вісник Житомирського національного агроекологічного університету. – 2012. – № 1, Т. 1. – С. 76–90.
4. Патица В. П. Агроекологічний моніторинг та паспортизація сільськогосподарських земель : метод.-норм. забезпечення / В. П. Патица, О. Г. Тараріко. – К.: Фітосоціоцентр, 2002. – С. 35–37.
5. Околелова А. А. Достоверность оценки загрязнения почв тяжелыми металлами [Электронный ресурс] / А. А. Околелова, Т. М. Минкина, А. С. Мерзлякова, В. П. Кожевникова // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2014. – № 101 (07). – Режим доступа к журналу: <http://cyberleninka.ru/article/n/dostovernost-otsenki-zagryazneniya-pochv-tyazhelyimi-metallami>.
6. Чернова О. В. Допустимые и фоновые концентрации загрязняющих веществ в экологическом нормировании (тяжелые металлы и другие химические элементы) / О. В. Чернова, О. В. Бекецкая // Почвоведение. – 2011. – №9. – С. 1102–1113.
7. Колесников С. И. Экологическое состояние и функции почв в условиях химического загрязнения / С. И. Колесников, К. Ш. Казеев, В. Ф. Вальков. – Ростов-на-Дону: Изд-во Ростиздат, 2006. – 385 с.
8. Carlon C. Derivation method of soil screening values in Europe / C. Carlon // A review and evaluation of national procedures towards harmonization. – European Commission: Joins Research Centre, 2007. – 306 p.
9. Swartjies F. A. Risk-based assessment of soil and ground-water quality in the Netherlands: standards and remediation urgency / F. A. Swartjies // Risk Analysis. – 1999. – V. 19. – №6. – P. 1235–1249.
10. Добровольский В. В. Ландшафтно-геохимические критерии оценки загрязнения почвенного покрова тяжелыми металлами / В. В. Добровольский // Почвоведение. – 1999. – № 5. – С. 639–645.
11. Rahman S. H. Assessment of heavy metal contamination of agricultural soil around Dhaka Export Processing Zone (DEPZ), Bangladesh: implication of seasonal variation and indices / S. H. Rahman, D. Khanam, T. M. Adyel, M. S. Islam // Applied sciences. – 2012. – № 2. – P. 584–601.
12. Балюк С. А. Ґрунтово-геохімічне обстеження урбанізованих територій / С. А. Балюк, А. І. Фатєєв, М. М. Мірошніченко. – Харків: ННЦ “ІГА ім. О.Н. Соколовського” УААН, 2004. – 54 с.
13. Яковичина Т. Ф. Екологічний моніторинг: контроль і детоксикація важких металів в ґрунтах урбоекосистем / Т. Ф. Яковичина. – Дніпропетровськ: Нова ідеологія, 2013. – 101 с.

14. **Методические указания** по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. – Москва: 1992. – 61 с.

15. **Методи** аналізу ґрунту і рослин: методичний посібник / За заг. ред. **С.Ю. Булигіна**. – Харків: Інститут ґрунтознавства і агрохімії ім. О.Н. Соколовського, 1999. – 157 с.

16. **Лакін Г. Ф.** Биометрия / **Г. Ф. Лакін**. – Москва: Высшая школа, 1990. – 351 с.

Рукопис подано до редакції 17.03.17

УДК 622.733-52

А.А. ЖОСАН, канд. техн. наук, доц., О.Л. ФЕДОРЕНКО, студент
Криворожский национальный университет
[e-mail: jaa2301@inbox.ru](mailto:jaa2301@inbox.ru)

ДУАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ ПЕРЕВЕРНУТИМ МАЯТНИКОМ ЯК “ЧОРНИМ ЯЩИКОМ”

Мета. Проблема стабілізації перевернутого маятника привертає увагу багатьох дослідників з синтезу систем управління динамічними об'єктами. Його вважають одним з тестових об'єктів, на якому можна перевіряти якість систем управління об'єктами такими як: корабель з гвинтом, розташованим у задній частині, ракета, транспорт, що рухається за допомогою буксиру, механізми вертикального підйому, механізми роботів та ін. Існуючі роботи з даного напрямку базуються на лінійній концепції. Однак, більшість об'єктів є нелінійними та нестационарними. Тому такі методики не дають задовільного результату. Нейромережеві регулятори виявляються дуже громіздкими, потребують повторного тренування мережі. Метою даної роботи є розробка алгоритму стабілізації перевернутого маятника у верхньому нестійкому положенні та інших положеннях при різних початкових кутах відхилення. При цьому параметри та структура моделі маятника невідомі. Маятник розглядається як “чорний ящик”.

Методи дослідження. Методи дослідження ґрунтуються на концепції дуального непараметричного керування. На основі спостереження за об'єктом створюється розширена матриця стану, яка включає як керуючі дії так і реакцію на них. Ця матриця не містить і не потребує знання параметрів та структури об'єкта керування. Параметри матриці оновлюються на кожному кроці дискретності. За допомогою спеціального алгоритму обробки матриці одержується керуюча дія.

Наукова новизна. Наукова новизна полягає у тому, що шляхом чисельного моделювання з застосуванням концепції дуальної непараметричної моделі показана можливість стабілізації перевернутого маятника у різних положеннях (а не тільки у верхньому) при невідомих його параметрах.

Практична значимість. Отримані результати можна використати при створенні систем керування такими об'єктами як елементи роботи технічних систем, літальні апарати, буксири у системах водного транспорту. При цьому не виникає необхідність у вимірюванні та корекції параметрів регулятора при зміні параметрів об'єкта керування.

Результати. Одержані результати повністю підтвердили правильність обраного підходу щодо створення системи стабілізації руху перевернутого маятника у межах поставленої задачі. Особливо важливо, що вдалося досягти стабілізації горизонтального положення маятника при керуючій дії горизонтального напрямку.

Ключові слова: “чорний ящик”, розширена матриця стану, принцип суперпозиції, нейромережевих регулятор, рівняння Лагранжа, локальна модель, глобальна модель.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними задачами. Проблема стабілізації перевернутого маятника привертає увагу багатьох дослідників з синтезу систем управління динамічними об'єктами. Його вважають одним з тестових об'єктів, на якому можна перевіряти якість регуляторів. Цей об'єкт має ряд специфічних властивостей і пов'язаних з ними проблем:

- нелінійність математичної моделі;
- необхідність лінеаризації моделі і синтезу регулятора положення не для суто маятника, а для його моделі;
- наявність верхнього положення нестійкої рівноваги;
- проблема виводу маятника з нижнього положення стійкої рівноваги у верхнє положення (для цього у всіх відомих нам роботах, як правило, застосовується спеціальній окремий алгоритм);
- чутливість замкненої системи керування до змін параметрів;
- необхідність знання порядку та параметрів об'єкта керування.