

*У статті представлена розробка математичної моделі для системи комплексного радіоекологічного моніторингу промислово-міської агломерації м. Дніпродзержинська (Україна). Розглянуто систему моніторингу як складову частину контуру управління і проаналізовано основні математичні залежності, що описують цей процес. Визначено особливості регіону досліджень та сформульовано критерії вирішення подібних задач*

*Ключові слова: математична модель, комплексний моніторинг, контур управління, промислово-міська агломерація*

*В статье представлена разработка математической модели для системы комплексного радиоэкологического мониторинга промышленно-городской агломерации г. Днепропетровска (Украина). Рассмотрена система мониторинга как часть контура управления и проанализированы основные математические зависимости, описывающие этот процесс. Определены особенности региона исследований и сформулированы критерии решения подобных задач*

*Ключевые слова: математическая модель, комплексный мониторинг, контур управления, промышленно-городская агломерация*

# РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ СИСТЕМИ КОМПЛЕКСНОГО РАДІОЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ МІСТА ДНІПРОДЗЕРЖИНСЬКА

**В. О. Ковач**

Молодший науковий співробітник, аспірант  
Державна установа «Інститут геохімії навколишнього  
середовища Національної академії наук України»  
пр. Ак. Паладіна, 34-а, м. Київ, Україна, 03680  
E-mail: valeriakovach@gmail.com

## 1. Вступ

Урановидобувна галузь (як і галузі, що добувають інші метали та сировину) представлена послідовним рядом виробництв: видобуток – збагачення (отримання мінеральних чи породних концентратів) – отримання первинного промислового продукту у вигляді солей урану [1].

Вміст урану більший за природній його вміст в земній корі (кларки) або офіційно встановлені гранично допустимі концентрації (ГДК), кількість урану на тій чи іншій ділянці земної кори негативно впливають на навколишнє середовище, особливо на живі організми, перш за все на людину: по-перше – як токсичний елемент і продуцент токсичних радіонуклідів; по-друге – як джерело радіоактивного випромінювання. У силу цього роботи з видобутку, збагачення, переробки руд, зберігання, переробки та захоронення відходів гірничодобувних, збагачувальних і гідрометалургійних виробництв уранової галузі вимагають особливих заходів безпеки, як промислової, так і екологічної [2]. При всіх роботах і виробництвах в урановій галузі повинні строго дотримуватися норми радіаційної безпеки (НРБ), затверджені офіційно [3].

Найбільш шкідливим наслідком при збагаченні руд є накопичення значних обсягів відхідних вод, хвостів і шламів збагачення. Відхідні води скидаються в спеціальні відстійники, вони містять численні шкідливі сполуки розчинених і твердих компонентів, що здатні викликати зараження поверхневих і підземних вод значних територій. Хвости і шлами складаються

в спеціальних поглибленнях на денній поверхні, вони завжди обводнені за масою, хоча поверхневий шар може бути в ряді випадків сухим. Вони займають значні земельні ділянки, приводять до зміни природних ландшафтів; дренаж збагачених токсичними речовинами вод призводить до засолення і забруднення поверхневих і підземних вод; вітрова ерозія сухих поверхонь хвостів і шламосховищ призводить до запилення повітря та забруднення прилеглих територій пилом, який часто містить токсиканти [4].

Останні часто представлені найдрібнішими урановмісними радіоактивними частинками пилу, які можуть не тільки забруднювати поверхневий шар ґрунту і поверхневі води, а й осідати безпосередньо на незахищених ділянках людського тіла або потрапляти в легені при диханні. Особливо небезпечні еманції радіоактивних газів (радону і торону) [5].

З метою зниження негативного екологічного впливу від відвальних порід і шламів збагачення рудної маси вони можуть використовуватися як закладний матеріал у відпрацьований простір гірських виробок; доступ до них поверхневих вод повинен бути обмежений; вони повинні бути гідроізолювані від ґрунтових вод; повинен бути проведений комплекс заходів щодо захисту від вітрової ерозії, розмиву і розносу на суміжні території. У проектах повинна бути передбачена подальша рекультивация території гірничого відводу [6].

Екологічні проблеми урановидобувних і уранопереробних виробництв завжди були предметом особливої уваги відомчих, місцевих та громадських організацій. Для мінімізації шкоди, що завдається та

рекультивува́ції територій потрібні значні трудові, матеріальні та фінансові витрати [7].

В Україні, як і у всіх колишніх країнах Союзу в результаті видобутку і переробки уранової руди, спочатку для військових цілей, потім для атомної енергетики, утворилося багато радіоактивно-забруднених територій. Прикладом такого забруднення є хвосту уранового виробництва колишнього Виробничого об'єднання «Придніпровський хімічний завод» (ВО «ПХЗ»), що знаходяться в промислово-міській агломерації м. Дніпродзержинська [8]. Однак недостатнє фінансування унеможливило практичну реалізацію всіх заходів на території міста – не виконані вже розроблені проекти, не дотримуються вимоги чинного законодавства, що тягне наростання екологічних ризиків для проживання і здоров'я населення міста та прилеглих територій.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В таких провідних та високо розвинутих країнах як Канада, США та Австралія [9–11] системи комплексного радіоекологічного моніторингу будуються з урахуванням кліматичних умов, відстані до населених пунктів, об'єктів водозабору, щоб мінімізувати негативних вплив на людину та зменшити потенційну загрозу забруднення об'єктів навколишнього середовища, що знаходяться в зоні впливу уранових хвостосховищ. Ще однією передумовою проведення успішної реабілітації земель є економічна компонента. В цих країнах комерційні урановидобувні підприємства вкладають гроші у фонди виведення шахт з експлуатації ще на початку своєї діяльності, що запобігає утворенню нових покинутих забруднених об'єктів видобутку урану, щоб їх очищення не оплачувалося за гроші платників податків [12].

Країни ЄС [13, 14] є яскравим прикладом правильного підходу до реалізації програм з розміщення постів радіоекологічного моніторингу. Проводиться не тільки ремедіація та реабілітація територій, з урахуванням всіх кліматичних факторів, особливостей місцевого ландшафту але і проходить довготривалий процес роботи з громадськістю щодо приведення території в суспільно прийнятний естетичний стан. Важливо підкреслити, що істотні відмінності у вартості програм визначаються лише планованим кінцевим станом і рівнем соціальної прийнятності очікуваного результату реабілітації [15].

В Україні у межах промислово – міської агломерації м. Дніпродзержинська сформувався специфічний мікроклімат. Його формування зумовлене впливом антропогенних чинників – викидами великих промислових підприємств і специфікою забудови міста. Якісний стан повітря незадовільний. В атмосфері міста спостерігаються перевищення граничних концентрацій газових домішок, аерозолів і пилу, що істотно впливає на радіаційний режим, теплофізичні та інші характеристики повітряного середовища.

На території ВО «ПХЗ» та за його межами утворено сім хвостосховищ («Західне», «Центральний яр», «Південно-східне», «Дніпровське», «Сухачівське» (перша і друга секції) і «Лантанова фракція»), два сховища відходів уранового виробництва («ДП- 6» і «База С»)

і цех для отримання окису-закису урану з азотнокислих розчинів (будівля № 103).

У хвостосховищах накопичено до 42 млн. т відходів переробки уранових руд (далі - відходи-хвосту) загальною активністю  $3,2 \times 10^{15}$  Бк (середня питома активність – 76 кБк/кг). У сховищах відходів уранового виробництва «ДП-6» і «База С» накопичено до 0,2 млн. т відходів уранового виробництва загальною активністю  $4,4 \times 10^{14}$  Бк (середня питома активність – 2,3 МБк/кг). Загальна площа хвостосховищ – 2,77 млн. м<sup>2</sup>. Потужність експозиційної дози знаходиться в межах від 10 до 35000 мкР/год [16].

Відходи-хвосту складавались в прилеглих до Придніпровського хімічного заводу глиняних кар'єрах і ярах, які для цього не були спеціально підготовлені.

Екологічні проблеми промислово-міської агломерації м. Дніпродзержинська в останні роки настільки загострилися, що їх можна з впевненістю віднести до загальнонаціональних екологічних проблем. За рівнем техногенного навантаження Дніпропетровська область знаходиться на другому місці в Україні, а за обсягом промислових викидів в атмосферу м. Дніпродзержинськ займає в області друге місце.

З наведеного вище випливає, що проблеми, які існують на промайданчику колишнього ВО «ПХЗ», мають комплексний характер і стосуються багатьох аспектів, а саме: екологічних, технологічних, медичних, соціальних. Саме тому наявність у промислово – міській агломерації м. Дніпродзержинська систем комплексного автоматизованого радіоекологічного моніторингу зможе вирішити цілий комплекс проблем, що стосуються міста і які неможливо вирішити на галузевому, місцевому чи регіональному рівні. Отже, держава має взяти на себе повну відповідальність за безпеку м. Дніпродзержинськ та його мешканців. А створення систем комплексного радіоекологічного моніторингу стане першим етапом на шляху вирішення екологічних проблем міста та його жителів.

## 3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є розробка математичної моделі (на початковому етапі) для радіоекологічного комплексного автоматизованого моніторингу промислово-міської агломерації м. Дніпродзержинська, яка б дозволила показати необхідну кількість постів для того, щоб можна було контролювати та стежити за важкою екологічною ситуацією, що склалася у місті.

Для досягнення поставленої мети автором були вирішені наступні наукові задачі:

– здійснення аналізу світового досвіду організації систем моніторингу на об'єктах урановидобувної та переробної промисловостей, з використанням фондових даних;

– розглянуто екологічну ситуацію та радіоекологічний стан міста Дніпродзержинськ та території зони впливу хвостосховищ колишнього уранового виробництва ВО «Придніпровський хімічний завод» з використанням фондових даних попередніх досліджень і матеріалів власних польових ландшафтно-геохімічних та радіоекологічних обстежень зазначених територій;

– розробці математичної моделі комплексного моніторингу промислово-міської агломерації міста Дніпродзержинська.

#### 4. Система моніторингу, як складова частина контуру управління

Контур управління – об'єктивно існуюча складова, що забезпечує будь-який процес управління, досить докладно досліджений вітчизняними [17, 18] та зарубіжними [19–21] вченими, що і показано на рис. 1. Об'єктом може бути як технічний агрегат, так і підприємство чи регіон навколишнього природного середовища, що і буде пояснено у нашому випадку.

Інформація про стан об'єкта управління постійно надходить до елементів спостереження і передається в підсистему збору та обробки інформації. Дані, що надходять, приводяться у відповідність з вимогами, раніше сформульованими в системі, і надходять одночасно в підсистему аналізу даних і в самі бази даних. Безпосередньо бази даних, у свою чергу, мають зворотний зв'язок з усіма підсистемами, з якими вони взаємодіють. У бази даних і в підсистему збору даних також може надходити інформація від зовнішніх джерел (якщо такі занесені як елементи, що надають інформацію).

Підсистема аналізу даних покликана систематизувати всі інформаційні елементи за певний проміжок часу і сформулювати завдання прогнозу розвитку ситуації і визначення впливів на об'єкт управління або його складові частини. На основі отриманих завдань підсистема моделювання та визначення варіантів керуючих рішень здійснює моделювання заданих сценаріїв розвитку ситуації, на підставі яких розробляє варіанти управлінських рішень. Ці варіанти доповідаються керівнику – особі, що приймає рішення, який може, у відповідності зі своїми обов'язками та за допомогою проаналізованих критеріїв вибрати один з варіантів або доручити зробити (прийняти) інший. Тоді підсистема моделювання продовжує працювати до отримання результату, який задовольняє керівника та вимогам, щодо прийняття рішень управлінських рішень на заданих об'єктах.

Після прийняття рішення воно надходить в підсистему оформлення та доведення рішення, де набуває форму, раніше визначену системою (наприклад, управляючі дії у вигляді телекомунікаційних команд в автоматизованих системах, у формі розпоряджень, наказів, інструкцій в адміністративних системах тощо).

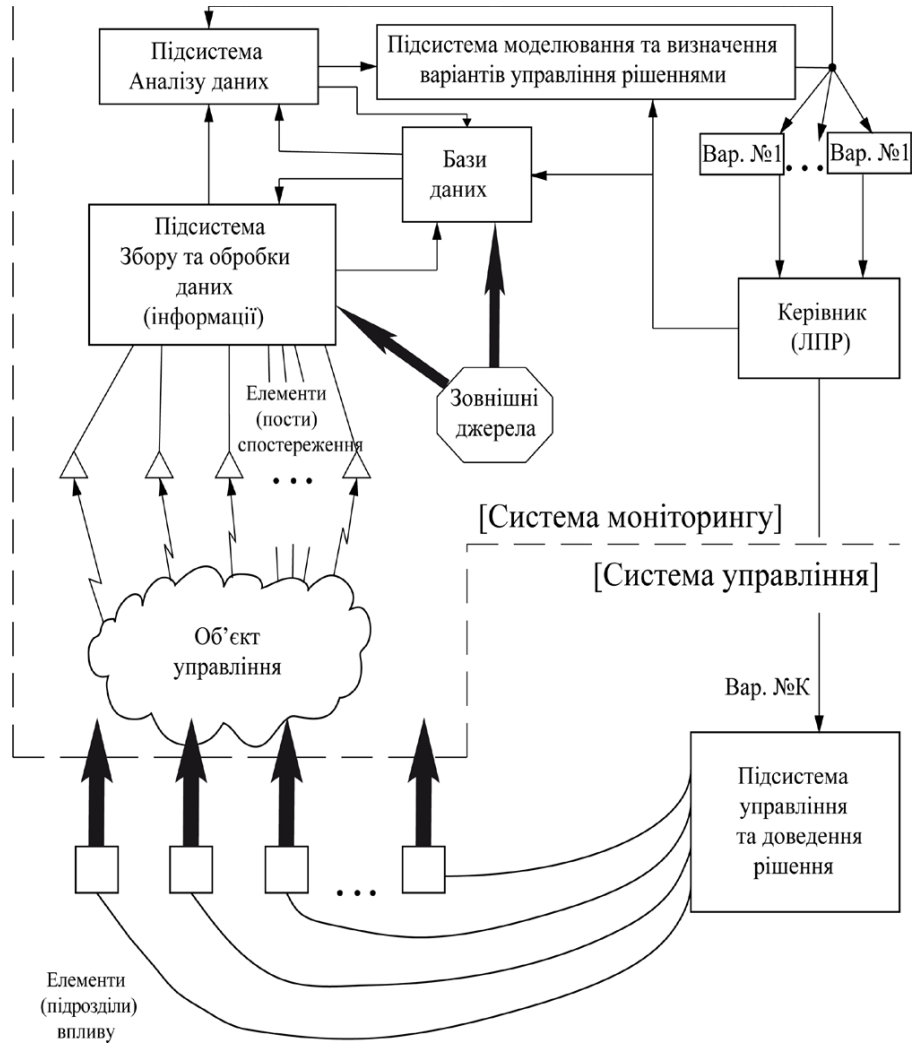


Рис. 1. Контур управління та його складові частини

Елементи впливу або підрозділу адміністративної структури впливають на об'єкт управління відповідно до отриманих команд. Результати вимірювання в стані об'єкта управління фіксуються елементами спостереження і починається новий цикл процесу управління.

#### 5. Формування загального опису процесу управління у контурі та його обговорення

Складова частина контуру управління, що забезпечує збір обробку даних і моделювання (прогнозування) ситуації є системою моніторингу. Загальний процес управління в контурі описується наступним функціоналом:

$$I = V(x(t_k), t_k) + \int_{t_0}^{t_k} Q(x, t) dt + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_k} (u^T K^{-1} u + u_p^T K^{-1} u_p) dt, \quad (1)$$

де  $x$  –  $n$ -вимірний вектор стану об'єкта, що належить простору  $R_x$ ,  $u$  –  $m$ -вимірний вектор керуючих впливів,  $u_p$  –  $m$ -вимірний вектор оптимальних керуючих впливів,  $V(x(t_k), t_k)$  і  $Q(x, t)$  – що задані, як позитивно-визначені і диференціюються  $x$  в  $R_x$  ска-

лярні функції зазначених аргументів,  $K = \text{diag}(k_1, \dots, k_m)$  – матриця заданих коефіцієнтів,  $[t_0, t_k]$  – заданий цикл процесу управління у часі.

Математично задача управління зводиться до утримання фазового вектора всередині заданої області  $\Omega_d$  простору станів  $\Omega$ , що досягається мінімізацією функціоналу (1).

Якщо стан об'єкта управління описується прогнозованою моделлю, то управління об'єктом як мінімізація функціоналу (1) буде описуватися:

$$\dot{x} = f(x,t) = \phi(x,t)v, \quad v = u, \tag{2}$$

де  $f(x,t)$  і  $\phi(x,t)$  –  $n$ -мірна і матрична  $(n+m)$  диференціюються по  $x$  в  $R_x$  функції зазначених аргументів,  $v$ - $m$ -вимірний вектор стану об'єкта управління,  $u$ - $m$ -вимірний вектор шуканих швидкостей зміни елементів впливу, що входять в останню складову частину функціоналу (1).

У загальному випадку вектор  $u$  може входити в функцію  $V$  і  $Q$  функціоналу (1). Припустимо, що в (1)  $V=0$ , тоді вектор стану об'єкта буде визначатися обчисленням інтеграла:

$$\dot{V} = -K \int_{\tau_n}^{\tau_k} Z^T(\tau) \frac{\alpha \kappa^T(X_M \tau)}{\alpha X_M} d\tau, \tag{3}$$

де  $\tau$  прискорений час з масштабом прискорення  $\kappa$ , тобто  $\tau u =$  (поточний момент часу), (кінцевий момент циклу управління),  $Z(\tau)$  матрична функція  $(n \times m)$  з нульовими початковими умовами  $Z(\tau_n) = 0, x_m$  – моделювання (прогнозований) вектор стану.

Прогнозна модель для цього випадку буде:

$$\frac{\alpha X_M}{\alpha \tau} + \kappa f(X_M, \tau) = \kappa \phi(X_M, \tau), \quad \frac{dV_M}{d\tau} = 0. \tag{4}$$

Початковою умовою для (4) є збіг векторів, тобто

$$\left. \begin{aligned} X_M(\tau_u) &= X(t_u) \\ V_M(\tau_u) &= V(t_u) \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

Як зазначалося раніше, формально, з точки зору математики, завдання управління зводиться до утримання фазового вектора до заданої області фазового простору. Це робиться введенням функції збитку (втрати, штраф і т. д.) у вигляді:

$$Q_n = \begin{cases} 0 & \text{при } X(t) \in \Omega_d, \\ p^T x + \gamma_e & \text{при } X(t) \notin \Omega_d, \end{cases} \tag{6}$$

де  $p$  –  $n$ -мірний вектор, що відповідає координатам збитку, які характеризуються строгістю кордонів області  $\Omega_d$ .

Якщо область  $\Omega_d$  опуклий багатогранник, то матричне управління являє собою рівняння гіперплощини відповідної грані  $\Omega_d$ .

Нехай є стаціонарний лінійний об'єкт:

$$X + \alpha X = bv, \quad v = u \tag{7}$$

та стаціонарна функція збитку (6). Тоді рішенням рівняння (1) при нульових початкових умовах, заданих в момент  $\tau_u$ , буде матрична функція:

$$Z(\tau) = \kappa \left\{ \int_{\tau_u}^{\tau} \exp[-\kappa \alpha (\tau - \tau')] d\tau' \right\} b. \tag{8}$$

## 6. Висновки

Розробка математичної моделі системи комплексного автоматизованого радіоекологічного моніторингу стане першим етапом для функціонування такої системи. За допомогою математичної моделі можливо аргументувати, яку саме кількість постів (одиночних елементів) потрібно встановити на досліджуваній території, щоб при найменших економічних затратах контролювати радіаційну обстановку у місті.

Проаналізувавши досвід провідних країн, можна побачити, що уже при початку видобутку вони турбуються про кінцевий результат або залучається неймовірна кількість коштів, щоб не тільки очистити забруднені території, а й привести їх в суспільно прийнятний естетичний стан. Важливо підкреслити, що істотні відмінності у вартості програм визначаються лише планованим кінцевим станом і рівнем соціальної прийнятності очікуваного результату реабілітації.

Отже, при розробці математичної моделі системи радіоекологічного моніторингу промислово-міської агломерації міста Дніпродзержинська, характеризуючи стан об'єкта управління, в тому числі і регіональної ділянки природної сфери, що визначається зміною матриць  $a$  і  $b$ , перша з яких характеризує елементи спостереження за об'єктом управління, а друга – елементи впливу на об'єкт управління. Це дає нам змогу розрахувати найоптимальнішу кількість постів (одиночних елементів) системи комплексного автоматизованого радіоекологічного моніторингу для промислово-міської агломерації м. Дніпродзержинська, що стане першим етапом на шляху до ремедіації та реабілітації зазначеної території, з урахуванням всіх кліматичних факторів та особливостей місцевого ландшафту, що дозволить контролювати екологічну ситуацію, що склалася на даний час у м. Дніпродзержинську.

## Література

1. Лисиченко, Г. В. Уранові руди України [Текст] / Г. В. Лисиченко, Ю. П. Мельник та ін. – Київ: Наукова думка, 2010. – 221 с.
2. Кулиш, Е. А. Геохимия, минералогия, генезис и классификации месторождений урана [Текст] / Е. А. Кулиш, В. А. Михайлов. – К., 2006. – 213 с.
3. Ядерне законодавство України: Збірник нормативно – правових актів. В 2 т. Т. 1. [Текст] / за ред. Ю. С. Шамшученка; вид. 2-ге перероб. і допов. – К.: Вид. Дім «Ін Юре», 1999. – 648 с.

4. Свирякин, Б. И. О рекультивации хвостохранилищ [Текст] / Б. И. Свирякин, А. Г. Олейников, Н. Д. Стороженко, Р. А. Дурова // Цв. Мет. – 1988. – № 1. – С. 87–89.
5. Камзист, Ж. С. Основы инженерной геоэкологии: Методика эколого-геологических исследований [Текст] / Ж. С. Камзист, А. В. Коваленко. – М., 1991. – 113 с.
6. Анисимова, Л. И. Оценка миграции радионуклидов из могильника радиоактивных отходов. Геоэкология: проблемы и решения. Ч. 2 [Текст] : тез. докл. и сообщ. Всес. научн.-техн. конф. / Л. И. Анисимова, Л. М. Рогачевская // Гидрогеол. аспекты в экол. – М., 1991. – С. 115–116.
7. Укратом. Ситуация с хвостохранилищами в Украине [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://ru.iaea.org/posts/28>
8. Доповідь про стан ядерної та радіаційної безпеки в Україні у 2013 році [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://www.snrc.gov.ua>
9. Ковалко, М. П. Енергетична безпека – складова національної безпеки України [Текст] / М. П. Ковалко, С. П. Денисюк. – К. : УЕЗ, 1997. – 197 с.
10. Арапов, Ю. А. Урановые месторождения Чехословакии [Текст] / Ю. А. Арапов, В. Е. Бойцов. – М. : Недра, 1984. – 445 с.
11. Brosa, U. Nuclear scission [Text] / U. Brosa, S. Grossmann, A. Müller // Physics Reports. – 1990. – Vol. 197, Issue 4. – P. 167–262. doi:10.1016/0370-1573(90)90114-h
12. Mining and Milling the Uranium [Electronic resource] / Available at: <http://watd.wuthering-heights.co.uk/nuclear/gettinguranium.html>
13. Cathy Vakil, M. D., C. C. F. P., F. C. F. P. Human Health Implications of Uranium Mining and Nuclear Power Generation [Electronic resource] / M. D., C. C. F. P., F. C. F. P. Cathy Vakil, . Sc., M. Sc., M. D. Linda Harvey, BMay. – 2009. – Available at: <http://uranium-network.org/images/pdfs-u-rad-health/VAKIL-HARVEY-Human-health-implications-LONG-2009-May.pdf>
14. The Ux Consulting Company [Electronic resource] / Available at: <http://www.uxc.com>
15. World Nuclear Association. Military Warheads as a Source of Nuclear Fuel [Electronic resource] / Available at: <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Uranium-Resources/Military-Warheads-as-a-Source-of-Nuclear-Fuel>
16. Ukrainian Centre for Economic & Political Studies Named after Olexander Razumkov [Text] / Nuclear energy in the world and in Ukraine: state and prospects of development. – 2008. – Vol. 3. – P. 60.
17. Шумлянський, В. Моніторинг природного середовища після добування урану способом підземного вилуговування [Текст] / В. Шумлянський, М. Макаренко, І. Колябіна та ін. – К.: Логос, 2007. – 212 с.
18. Ядерная энергетика. Обращение с отработанным ядерным топливом и радиоактивными отходами [Текст] / под ред. акад. И. М. Неклюдова. – Киев: Наук. Думка, 2006. – 253 с.
19. IAEA-(IAEA RS-G-1.7). International cooperation on rehabilitation [Electronic resource] / IAEA, VIENNA, 2013. – Available at: [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te\\_1174\\_prn.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1174_prn.pdf)
20. Pinner, A. V. An assessment of the radiological protection of aspects at shallow underground burial place of radioactive waste [Text] / A. V. Pinner, C. R. Hemming, M. D. Hill // Nat. Radiol. Prot. Board». – 1984. – Vol. 161, Issue 81. – P. 1–33.
21. Hill, M. D. Principles used in assessing the input of radionuclide releases to the environment and in establishing of release limits [Text] : Proc. Int. conf. / M. D. Hill, N. T. Mitchell // Radioact. waste manag, 1983. – P. 109–125.