

М. О. Кравець
(Національний авіаційний університет)

АНАЛІЗ І МОДЕЛЮВАННЯ МІГРАЦІЇ РАДІОНУКЛІДІВ ЦЕЗІЙ-137 В КАСКАДІ ОРІХУВАТСЬКИХ СТАВКІВ

Побудована базова модель перенесення радіонукліда ^{137}Cs по каскаду Оріхуватських ставків. Проведено моніторингові дослідження каскаду. На основі натурних даних зроблена екстраполяція базової моделі і отримана більш точна модель перенесення ^{137}Cs . Показана принципова можливість за натурними даними верифікувати параметри камерної моделі. На основі математичного моделювання показаний розподіл радіонуклідів як між компонентами ставка, так і по каскаду. Отримані моделі можна використовувати для прогнозу та реконструкції рівнів забруднення та стану екологічної безпеки біоти такого каскаду.

Ключові слова: камерні моделі, радіонуклід, біота, депонування радіонуклідів, донні відкладення, каскад ставків.

М. О. Кравець

АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МИГРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ ЦЕЗИЙ-137 В КАСКАДЕ ОРЕХОВАТСКИЕ ПРУДЫ

Построена базовая модель переноса радионуклида ^{137}Cs по каскаду Ореховатских прудов. Проведено мониторинговые исследования каскада. На основе натурных данных, сделана экстраполяция базовой модели и получена более точная модель переноса ^{137}Cs . Показана принципиальная возможность за натурными данными верифицировать параметры камерной модели. На основе математического моделирования показано распределение радионуклидов как между компонентами пруда, так и по каскаду. Полученные модели можно использовать для прогноза и реконструкции уровней загрязнения и состояния экологической безопасности биоты такого каскада.

Ключевые слова: камерные модели, радионуклид, биота, депонирование радионуклидов, донные отложения, каскад прудов.

М. О. Kravets

ANALYSIS AND MODELING OF CS-137 RADIONUCLIDES MIGRATION IN THE CASCADE OF ORIHUVATSKY PONDS

Basic model of ^{137}Cs radionuclide transfer in the cascade of Orihuvatsky ponds has been built. Monitoring studies of the cascade have been conducted. On the basis of the observation data, extrapolation of the basic model has been done and more accurate model of ^{137}Cs transfer has been obtained. The principal possibility of model verification according to the natural data has been shown. On the basis of mathematical modeling the distribution of radionuclides as between components rate each within separate pond, and in the whole cascade has been investigated. The models can be used for the prediction and reconstruction of pollution levels and the state of environmental safety of the biota of such cascade.

Key words: box model, radionuclide, biota, radionuclides depositing, bottom sediment, cascade of ponds.

Вступ. Радіоекологічна ситуація, що склалася в Україні після Чорнобильської катастрофи і за умов експлуатації АЕС, потребує вирішення найскладнішого комплексу наукових і практичних проблем, пов'язаних перш за все з екологічно надійною переробкою, захороненням і зберіганням радіоактивних матеріалів і відходів у зоні відчуження ЧАЕС і в регіоні експлуатації АЕС. Мова йде про найгостріші практичні завдання, з вирішенням яких не можна зволікати, оскільки будь-яка відстрочка тягне за собою багаторазове зростання фінансових витрат. Це в свою чергу потребує подальшого розвитку глибоких наукових радіоекологічних досліджень і адекватних практичних завдань технологічних рішень. Дослідження динаміки, розподілу, міграції радіонуклідів і їх дії на біосистеми на різних рівнях є основою для оцінки стану екосистем [1].

Аналіз розподілу радіонуклідів у водоймах. Радіоактивне забруднення водних екосистем може відбуватися у формі великого різноманіття форм і складу речовин, що містять радіонукліди. Під час надходження радіоактивних речовин у вигляді аерозолів на водну поверхню і з території водозбору, шляхом поверхневого стоку, відбувається їхнє розсіювання у водній товщі та подальший розподіл по компонентах водних екосистем зі встановленням певної динамічної рівноваги, що визначається динамікою процесів сорбції і десорбції між рідкою (вода) і твердою (донні відкладення, зависла речовина) фазами, а також накопиченням радіонуклідів живими організмами.

Слід зазначити, що при короткочасному надходженні у водойми радіонукліди достатньо швидко поглинаються донними відкладеннями та водними організмами, внаслідок чого їх питома активність у воді швидко знижується. Концентрація ж багатьох радіонуклідів у водяних рослинах, тваринах і донних відкладеннях може тривалий час зберігатися на високому рівні, що перевищує їхню концентрацію у воді на порядки величин [2].

Потрапляючи в водний об'єкт, радіонукліди вступають у взаємодію з водним середовищем і можуть перебувати в іонодисперсному, молекулярному і колоїдному станах, а також сорбуватися на зважених частках і частинках донних відкладів. Форма існування радіонукліда у водній масі залежить як від його хімічних властивостей, так і від складу і властивостей води. Хімічний склад води формується під впливом геохімічних особливостей району, характеру підстилаючих порід і ґрунтового ландшафту, хімічного складу живильних вод, біологічних процесів і господарської діяльності людини [3].

Радіонукліди, що надійшли у водні екосистеми, сорбуються завислими частками і осідають, зазнають радіоактивного розпаду, накопичуються водною біотою, що призводить до самоочищення води озера. Однак в результаті цих процесів донні відкладення, в яких накопичуються радіонукліди, стають довгостроковим «депо» забруднювачів і джерелом вторинного радіоактивного забруднення. Повітряна і гідрологічна міграція радіонуклідів з водойм, надходження радіонуклідів у підземні води призводять до їх поступового поширення в навколишньому середовищі, включенню в харчові ланцюги [4].

Мета роботи – дослідити процеси перенесення та накопичення забруднюючих речовин в каскаді водойм методом камерних моделей.

Матеріали і методи. У роботі використовувався математичний метод камерних моделей. Метод камерних моделей, який спирається на теорію радіоємності радіоекології, багато років успішно використовують для опису перенесення (переходу) і міграції радіонуклідів в екосистемах. Встановлено, що зниження показника радіоємності в екосистемі відображає зниження благополуччя і надійності її біоти [5].

Згідно з методом камерних моделей, весь ланцюг перенесення радіонуклідів поділяють на камери. Взаємодія між камерами задається за допомогою коефіцієнтів переходу радіонуклідів із однієї камери в іншу за одиницю часу (найчастіше за рік). Коефіцієнти вибираються за натурними дослідженнями та розрахунками [6-9].

Для цього дослідження (2014-2015 роки) відбиралися проби донних відкладень, водних рослин, зокрема рогозу широколистого, очерету звичайного, ряски малої, рдесту гребінчастого, і сірого лісового ґрунту Оріхуватського каскаду водойм. Відібрані проби висушувалися і були виміряні на вміст ^{137}Cs , за допомогою гамма-спектрометра СЕГ-01.

Розрахунки проведені в програмі MAPLE 13 на основі диференційних рівнянь. Поведінка ^{137}Cs була проаналізована, оскільки він є основним дозоутворюючим ізотопом в забруднених водоймах і в їх біотичних компонентах. В побудовані моделі (рис. 1) увійшли такі камери, як «ґрунт», «вода», «донні відклади», «біота».

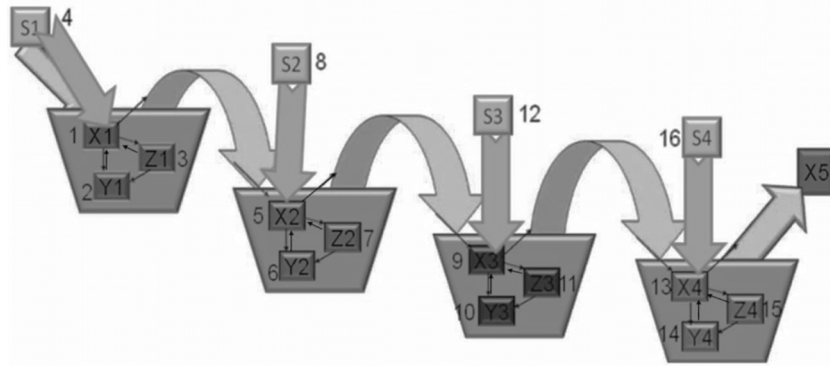


Рисунок 1 – Блок-схема каскаду Голосіївських ставків:
X – вода, *Y* – донні відкладення, *Z* – біота, *S* – ґрунт.

Побудова та аналіз базової моделі. Базова модель Голосіївських ставків побудована на основі блок-схеми і враховує швидкості переходу радіонуклідів між камерами та всередині кожної камери між водою, біотою і донними відкладеннями:

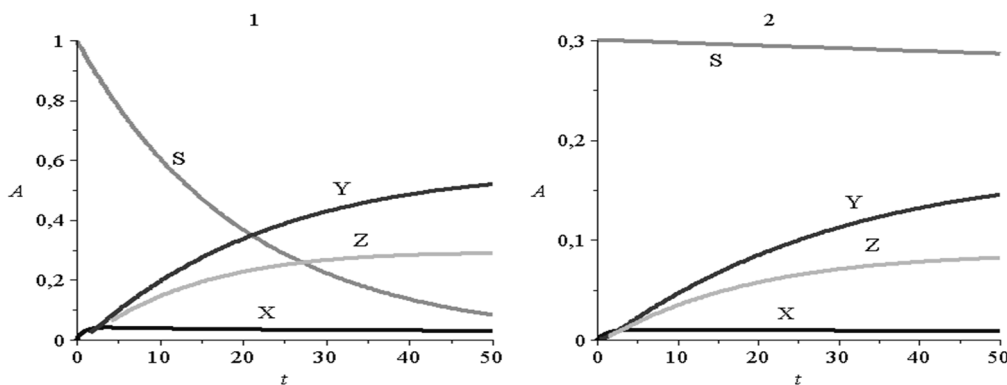
$$\begin{aligned}
 dX1/dt &= a41*S1(t) + a31*Z1(t) + a21*Y1(t) - (a13 + a12 + a15)*X1(t), \\
 dY1/dt &= a12*X1(t) + a32*Z1(t) - a21*Y1(t), \quad dZ1/dt = a13*X1(t) - (a32 + a31)*Z1(t), \quad dS1/dt = -a41*S1(t), \\
 dX2/dt &= a85*S2(t) + a75*Z2(t) + a65*Y2(t) + a15*X1(t) - (a57 + a56 + a59)*X2(t), \\
 dY2/dt &= a56*X2(t) + a76*Z2(t) - a75*Y2(t), \quad dZ2/dt = a57*X2(t) - (a76 + a75)*Z2(t), \quad dS2/dt = -a85*S2(t), \\
 dX3/dt &= a129*S3(t) + a119*Z3(t) + a1110*Y3(t) + a59*X2(t) - (a911 + a910 + a913)*X3(t), \\
 dY3/dt &= a910*X3(t) + a1110*Z3(t) - a109*Y3(t), \quad dZ3/dt = a911*X3(t) - (a1110 + a119)*Z3(t), \quad dS3/dt = -a129*S3(t), \\
 dX4/dt &= a1613*S4(t) + a1513*Z4(t) + a1514*Y4(t) + a913*X3(t) - (a1315 + a1314 + a1317)*X4(t), \\
 dY4/dt &= a1314*X4(t) + a1514*Z4(t) - a1413*Y3(t), \quad dZ4/dt = a1315*X3(t) - (a1514 + a1513)*Z3(t), \\
 dS4/dt &= -a1613*S4(t),
 \end{aligned}$$

де *a* – коефіцієнти переходу радіонуклідів між камерами: *X*1-4 – вода, *Y*1-4 – донні відкладення, *Z* – біота, *S*1-4 – ґрунт.

На основі середніх значень швидкостей переносу радіонуклідів взятих з натурних досліджень та за результатами розрахунків були встановлені коефіцієнти переходу ¹³⁷Cs із камери в камеру:

$$\begin{aligned}
 a41 &= 0.05, \quad a12 = 0.6, \quad a21 = 0.04, \quad a13 = 0.35, \quad a31 = 0.03, \quad a15 = 0.05, \quad a32 = 0.02, \quad a85 = 0.03, \quad a56 = 0.6, \\
 a65 &= 0.04, \quad a57 = 0.35, \quad a75 = 0.03, \quad a59 = 0.05, \quad a76 = 0.02, \quad a129 = 0.03, \quad a910 = 0.6, \quad a109 = 0.04, \\
 a911 &= 0.35, \quad a119 = 0.03, \quad a913 = 0.05, \quad a1110 = 0.02, \quad a1613 = 0.02, \quad a1314 = 0.6, \quad a1413 = 0.04, \\
 a1315 &= 0.35, \quad a1513 = 0.03, \quad a1317 = 0.05, \quad a1514 = 0.02 \quad [7].
 \end{aligned}$$

Результати дослідження по моделі показані на рис. 2.



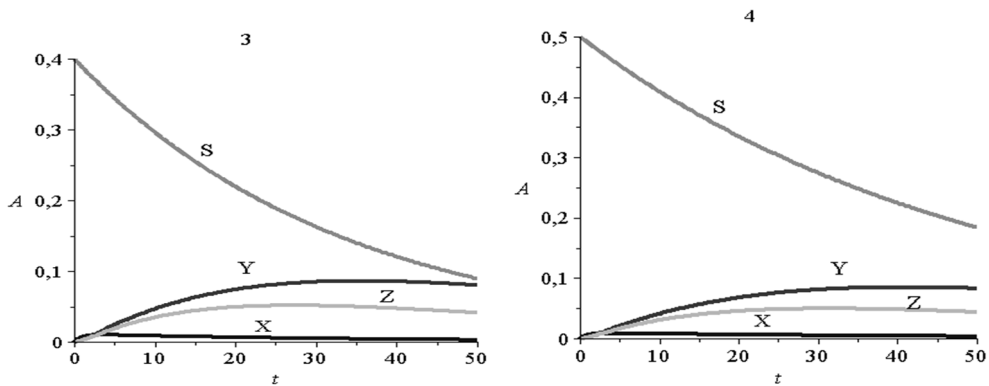


Рисунок 2 – Базові моделі динаміки накопичення радіонукліда ^{137}Cs протягом 50 років у компонентах водної екосистеми в:

1 – першому ставку; 2 – другому ставку; 3 – третьому ставку; 4 – четвертому ставку;
 X – вода; Y – донні відкладення; Z – біота; S – ґрунт.

В результаті найбільше накопичення радіонуклідів спостерігається у першому ставку. Помітне поступове очищення від радіонуклідів по каскаду. З часом спостерігається їх накопичення у донних відкладеннях і біоті ^{137}Cs .

Екстраполяція та аналіз моделі, згідно з результатами натурних досліджень. Результати натурних досліджень представлені в табл. 1.

Таблиця 1

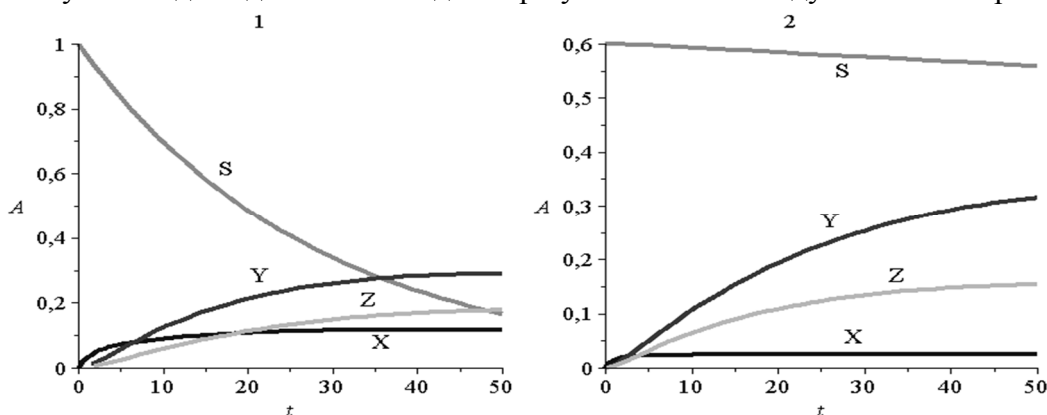
Активність ^{137}Cs (Бк) у компонентах екосистеми Оріхуватського каскаду ставків

№ ставка	A (Бк) ґрунт	A (Бк) донні	A (Бк) біота
1	68	50	28,2
2	102	48	24,4
3	74,25	42,5	17
4	80,5	38	15,2

Екстраполяція проведена на 30 років і порівняна з результатами проведеного моніторингу. Коефіцієнти переходу радіонукліда із камери в камеру були скореговані згідно з натурними даними:

$a_{41}=0.036$, $a_{12}=0.3$, $a_{21}=0.14$, $a_{13}=0.12$, $a_{31}=0.04$, $a_{15}=0.05$, $a_{32}=0.035$, $a_{85}=0.035$, $a_{56}=0.6$,
 $a_{65}=0.05$, $a_{57}=0.4$, $a_{75}=0.04$, $a_{59}=0.05$, $a_{76}=0.02$, $a_{129}=0.021$, $a_{910}=0.8$, $a_{109}=0.01$,
 $a_{911}=0.6$, $a_{119}=0.01$, $a_{913}=0.05$, $a_{1110}=0.03$, $a_{1613}=0.023$, $a_{1314}=0.5$, $a_{1413}=0.02$,
 $a_{1315}=0.4$, $a_{1513}=0.03$, $a_{1317}=0.15$, $a_{1514}=0.026$.

Результати дослідження по моделі Оріхуватського каскаду показані на рис. 3.



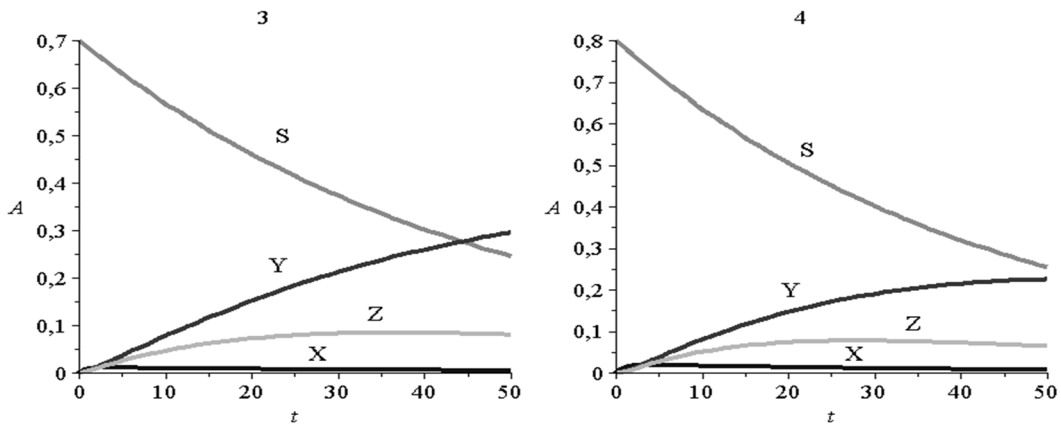


Рисунок 3 – Моделі динаміки накопичення радіонукліду ^{137}Cs протягом 50 років у компонентах Орівуватського каскаду ставків в:
 1 – першому ставку; 2 – другому ставку; 3 – третьому ставку; 4 – четвертому ставку;
 X – вода; Y – донні відкладення; Z – біота; S – ґрунт

В результаті найбільше накопичення радіонуклідів спостерігається у першому ставку. Помітне поступове очищення від радіонуклідів по каскаду. З часом спостерігається їх накопичення у донних відкладеннях і біоті. Найбільше накопичення ^{137}Cs спостерігається в першому ставку, а далі концентрації зменшуються по каскаду. Орівуватський каскад виявився класичним прикладом очищення каскадної системи водойм від радіонукліди з кожним наступним ставком в каскаді

Щодо початкового забруднення, згідно з моделлю, найбільше радіонуклідів потрапило у перший і останній ставок. Розподіл відносно одиниці по каскаду $S_1(0)=1$, $S_2(0)=0.6$, $S_3(0)=0.7$, $S_4(0)=0.8$. За 30 років радіонуклідне забруднення найбільше накопичилося в першому ставку (хоча коефіцієнт накопичення в донних відносно невеликий), далі рівень забруднення спадає. Найбільші коефіцієнти накопичення у донних відкладах і біоті спостерігаються у другому і третьому ставку. Отже, при плануванні заходів слід звернути увагу на перший і останній ставок каскаду.

Висновок

В результаті роботи отримана адекватна модель перенесення радіонукліду ^{137}Cs по каскаду Орівуватських ставків. Базова модель була екстрапольована після отримання натурних даних і є більш достовірною для цих водойм. Показана принципова можливість за натурними даними верифікувати параметри камерної моделі. Це показує адекватність розроблених моделей, та можливість використовувати їх для прогнозу та реконструкції рівнів забруднення та стану екологічної безпеки біоти такого каскаду.

Спостерігається зменшення вмісту радіонукліда при проходженні через всі компоненти водної екосистеми по каскаду ставків (у першому ставку більше, у четвертому – менше). Важливими природними факторами самоочищення досліджуваних водойм є седиментаційні процеси – адсорбція радіонуклідів на твердих зважених частинках і їх осадження у донні відкладення. Визначальна роль донних відкладень у процесі самоочищення водойм чітко прослідковується у цих моделях.

Орівуватський каскад виявився класичним прикладом очищення каскадної системи водойм від радіонуклідів з кожним наступним ставком в каскаді. Найбільші коефіцієнти накопичення у донних відкладеннях і біоті спостерігаються у другому і третьому ставку. Отже, при плануванні заходів слід звернути увагу на перший і останній ставок каскаду. Цікавим є те, що обидва ставки розташовані найближче до автодороги та житлового масиву. Хоча загалом каскад справляється із самоочищенням води від радіонуклідів.

Список літератури:

1. Радіонукліди у водних екосистемах України. Вплив радіонуклідного забруднення на гідробіоти зони відчуження Чорнобильської АЕС: Монографія / М.І. Кузьменко, В.Д. Романенко, В.В. Деревець, О.М. Волкова, Д.І. Гудков та ін. – К.: Чорнобильінтерінформ, 2001. – 318 с.
2. Кутлахмедов Ю. О. Радіоекологія / Кутлахмедов Ю.О., Матвєєва І. В., Петрусенко В. П., Родина В. В. – К.: ДЕА, 2011. – 192 с.,
3. Кутлахмедов Ю. О. Радіоекологія. Камерні моделі: навч. посіб. / Кутлахмедов Ю. О., Матвєєва І. В., Петрусенко В. П., Родина В. В. – К.: НАУ, 2013. – 84 с.
4. Оценка и регулирование качества окружающей природной среды / Под ред. А. Ф. Порядина и А. Д. Хованского. — М.: НУМЦ Мин-природы России; Изд. дом «Прибой», 1996. — 350 с.
5. Павлоцкая Ф.И. Формы нахождения радионуклидов в воде и донных отложениях некоторых промышленных водоемов ПО «Маяк» / Ф.И. Павлоцкая, А.П. Новиков, Т.А. Горяченкова [и др.] // Радиохимия. – 1998. – Т.40, № 5. – С.462-467.
6. Тимофеева-Ресовская Е. А. Распределение радиоизотопов по основным компонентам пресноводных водоемов / Е. А. Тимофеева-Ресовская. – Свердловск, 1963. – 78 с.
7. Оценка состояния биоты экосистем методами теории надежности и радиоемкости / Ю. О. Кутлахмедов, В. В. Родина, И. В. Матвеева, А. Г. Бевза. // Матеріали міжнародної конференції [„Охорона довкілля та проблеми збалансованого природокористування”], (Кам’янець-Подільський, 10-11 травня 2011 р.). / М-во освіти і науки України, КПНПУ. – Кам’янець-Подільський: Мошинський. – 2011. – С. 12–14.
8. Перспективы применения теории радиоемкости и надежности в современной радиэкологии и экологии / Ю. А.Кутлахмедов, В. В. Родина, И. В. Матвеева, А. Г. Бевза // Матеріали наук.-практ. конф. в рамках міжнародного форуму „Довкілля для України” [„Радіоекологія-2013. Чорнобиль-Фукусіма. Наслідки”], (Київ, 25-27 квітня 2013 р.). – Житомир : ЖДУ ім. І. Франка. – 2013.– С. 64–66.
9. Кутлахмедов Ю.А., Поликарпов Г.Г., Кутлахмедова-Вишнякова В.Ю. Применение теории радиоемкости экосистем для экологического нормирования в водных экосистемах // Другий з’їзд гідроекологічного товариства України (Київ, 27 - 31 жовтня 1997 р.): Тез. доп.– К., 1997.– С. 167.

References:

1. Radionuklidy u vodnykh ekosystemakh Ukrainy. Vplyv radionuklidnoho zabrudnennia na hidrobionty zony vidchuzhennia Chornobyls'koї AES: Monograph / M.I. Kuzmenko, V.D. Romanenko, V.V. Derevets, O.M. Volkova, D.I. Hudkov ta in. – K.: Chornobylinterinform, 2001. – 318 p. (in Ukr.)
2. Kutlakhmedov Iu. O. Radioekolohiia./Kutlakhmedov Iu.O., Matvieieva I. V., Petrusenko V. P., Rodina V. V. – K.: DEA, 2011. – 192 p. (in Ukr.)
3. Kutlakhmedov Iu. O. Radioekolohiia. Kamerni modeli: navch. posib./ Kutlakhmedov Iu. O., Matvieieva I. V., Petrusenko V. P., Rodina V. V. – K.: NAU, 2013. – 84 p. (in Ukr.)
4. Otsenka y rehulyrovanye kachestva okruzhaiushchei pryrodnoi sredy / Pod red. A. F. Poriadyna y A. D. Khovanskoho. — M.: NUMTs Myn-pryrody Rossyy; Yzd. dom «Pryboi», 1996. — 350 p. (in Rus.)
5. Pavlotskaia F.Y. Formy nakhozheniya radyonuklydov v vode y donnykh otlozheniyakh nekotorykh promyshlennykh vodoemov PO «Maiak» / F.Y. Pavlotskaia, A.P. Novykov, T.A. Horiachenkova [y dr.] // Radyokhymia. – 1998. – T.40, № 5. – P.462-467. (in Rus.)
6. Tymofeeva-Resovskaia E. A. Raspredelenye radyoyzotopov po osnovnym komponentam presnovodnykh vodoemov / E. A. Tymofeeva-Resovskaia. – Sverdlovsk, 1963. – 78 p. (in Rus.)

7. Otsenka sostoiانيا byoty ekosystem metodamy teoryy nadezhnomy y radyoemkomy / Iu. O.Kutlakhmedov, V. V. Rodyna, Y. V. Matveeva, A. H. Bevza. // Proceedings of the International Conference ["Environmental issues and sustainable nature"], (Kam'ianets-Podilskyi, 10-11 travnia 2011 r.). / M-vo osvity i nauky Ukrainy, KPNPU. – Kam'ianets-Podilskyi: Moshynskyi. – 2011. – P. 12–14. (in Rus.)

8. Perspektyvy prymenenya teoryy radyoemkomy y nadezhnomy v sovremennoi radyoekolohyy y ekolohyy / Iu. A.Kutlakhmedov, V. V. Rodyna, Y. V. Matveeva, A. H. Bevza. // Proceedings of the conference in the International Forum "Environment for Ukraine" ["Radioecology 2013. Chernobyl, Fukushima. Consequences"], (Kyiv, 25-27 April 2013) / Zhytomyr Vydavnytstvo ZhDU im. I. Franka. – 2013. – P. 64–66. (in Rus.)

9. Kutlakhmedov Iu.A., Polykarpov H.H., Kutlakhmedova-Vyshniakova V.Iu. Prymenenye teoryy radyoemkomy ekosystem dlia ekolohycheskoho normyrovanya v vodnykh ekosystemakh // Second Congress Hydroecological Society of Ukraine (Kyiv, 27 - 31 October 1997): Tez. dop. – K., 1997. – P. 167. (in Rus.)

