

Бурдо О.С.¹, Пономаренко Л.П.², Зарубіна Н.Є.¹

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, пр-т Науки 47,
email: o_bourdeaux@ukr.net*

¹Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

*²Національний технічний університет України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, пр.Берестейський 37,
email: ronomarenko.lilia@lll.kpi.ua*

ЕКСПОНЕНЦІЙНІ ЗАЛЕЖНОСТІ В РАДІОЕКОЛОГІЇ

Анотація. У роботі проаналізовано дані багаторічних досліджень вмісту ^{137}Cs у грибах (*Suillus luteus*) на території зони відчуження Чорнобильської атомної електростанції (полігон Дитятки). Було отримано дані про експоненційну залежність зменшення рівнів питомої активності ^{137}Cs у грибах з часом. Окреслено можливості щодо прогнозування подальшої поведінки цього радіонукліду в екосистемі в цілому, а також забруднення зазначеного виду їстівних грибів.

Abstract. The paper analyzes the data of our own long-term studies of the content of ^{137}Cs in mushrooms (*Suillus luteus*) in the exclusion zone of the Chornobyl nuclear power plant (Dityatka landfill). Data were obtained on the exponential dependence of the decrease in the levels of specific activity of ^{137}Cs (ecological half-life) in mushrooms over time. Possibilities for predicting the further behavior of this radionuclide in the ecosystem as a whole, as well as the contamination of the specified species of edible mushrooms, are outlined.

Ключові слова: радіонуклід, ^{137}Cs , період напіврозпаду, Чорнобильська атомна електростанція

Key words: radionuclide, ^{137}Cs , half-life, Chornobyl Nuclear Power Plant

Історія експоненціальної функції налічує багато віх та внесків таких видатних учених як Дж. Неппер, Л. Ейлер, І. Бернуллі, К. Гаусс, П. Лаплас та ін. Зокрема дослідження Гаусса сприяли отриманню експоненційних розподілів та створенню перших ймовірнісних моделей. Це заклало основу сучасного розуміння та формалізації експоненціальної функції, яка з тих пір стала фундаментальним поняттям у математиці та має широке застосування в різних наукових дисциплінах, включаючи фізику, техніку, економіку та біологію. Експоненційні функції застосовуються в радіоекології (розділ

біології), зокрема, для моделювання поширення радіонуклідів у довкіллі; оцінки довгострокових наслідків радіоактивного забруднення; дослідження динаміки міграції радіоактивних елементів в екосистемах.

Покажемо, як «працює» експоненціальна функція для аналізу часового розподілу радіоцезію в екосистемі.

Довгоіснуючий біологічно значущий радіонуклід ^{137}Cs вважається основним небезпечним штучним радіонуклідом, присутнім у сучасному середовищі [1,2]. Радіоцезій є побічним продуктом ядерного поділу урану і потрапляє в навколишнє середовище під час аварій на атомних електростанціях, випробуванні ядерної зброї тощо. Екологічний (T_{eco}) та ефективний (T_{eff}) періоди напіврозпаду використовують для опису процесів видалення радіонуклідів із довкілля. Ефективний період напіврозпаду ^{137}Cs – це час, необхідний для зниження активності радіоцезію вдвічі на одиницю маси, без урахування відмінностей між внутрішнім і зовнішнім забрудненням або особливостей механізмів виведення [3,4]. T_{eff} поєднує фізичний розпад, який визначається за допомогою фізичного періоду напіврозпаду та екологічні втрати, які описується екологічним періодом напіврозпаду T_{eco} . Екологічний період напіврозпаду T_{eco} визначає тільки екологічні втрати. Це інтегральна характеристика, включає всі процеси зниження радіоактивності в навколишньому середовищі, крім фізичного розпаду [5,6]. Оскільки T_{eco} не враховує фізичний розпад, він ідентичний для різних ізотопів одного елемента [7]. Математична кореляція між T_{eff} і T_{eco} описується формулою:

$$\frac{1}{T_{\text{eff}}} = \frac{1}{T_{1/2}} + \frac{1}{T_{\text{eco}}},$$

де $T_{1/2}$ – фізичний період напіврозпаду.

Для ^{137}Cs $T_{1/2} = 30,05$ років [8]. Визначення T_{eff} і T_{eco} проводили для різних об'єктів і територій, забруднених радіоцезієм внаслідок глобальних опадів після випробувань ядерної зброї, аварій на атомних електростанціях, скидів і викидів ядерних установок [9, 10].

Швидкість розпаду радіонуклідів в об'єктах довкілля характеризується часом, протягом якого активність радіонукліда зменшується у 2 рази. Активність радіонуклідів у момент часу t визначається формулою:

$$A(t) = A(0) \cdot 2^{-\mu t},$$

де $A(0)$ – питома активність радіонукліда в момент часу $t = 0$, μ – коефіцієнт, що описує швидкість спадання активності з часом.

Якщо $t = \frac{1}{\mu} = T_{eff}$, то $A(t) = A(0) \cdot 2^{-t/T_{eff}}$. Прологарифмувавши ліву і праву частину цієї рівності, одержимо вираз:

$$\ln(A(t)) = \ln(A(0)) - \left(\frac{t}{T_{eff}}\right) \cdot \ln 2$$

Цей вираз відповідає лінійній залежності $A(t) = b - at$, де $b = \ln A(0)$, $a = \ln 2 / T_{eff}$ – тангенс нахилу прямої $A(t)$. Оскільки $T_{eff} = (\ln 2) / a$, то $\frac{a}{\ln 2} = \frac{1}{T_{1/2}} + \frac{1}{T_{eco}}$. Одержане співвідношення дозволяє розрахувати

екологічний період напіврозпаду T_{eco} [7]. Величина $\frac{1}{T_{eco}} = \beta$ – швидкість зменшення питомої активності ^{137}Cs досліджуваного об'єкта, $T_{eff}, T_{eco}, T_{1/2}$ мають розмірність часу (роки), розмірність β – 1/рік.

У роботі проаналізовано дані власних багаторічних досліджень вмісту ^{137}Cs у грибах (маслюк звичайний – *Suillus luteus* (L.: Fr.) S.F.Gray) на території зони відчуження Чорнобильської атомної електростанції (полігон Дитятки).

На рис. 1 представлено характерну залежність питомої активності ^{137}Cs у маслюку. Кожна точка на графіку представляє середньорічне значення вмісту цього радіонукліду у Бк/кг сирої маси.

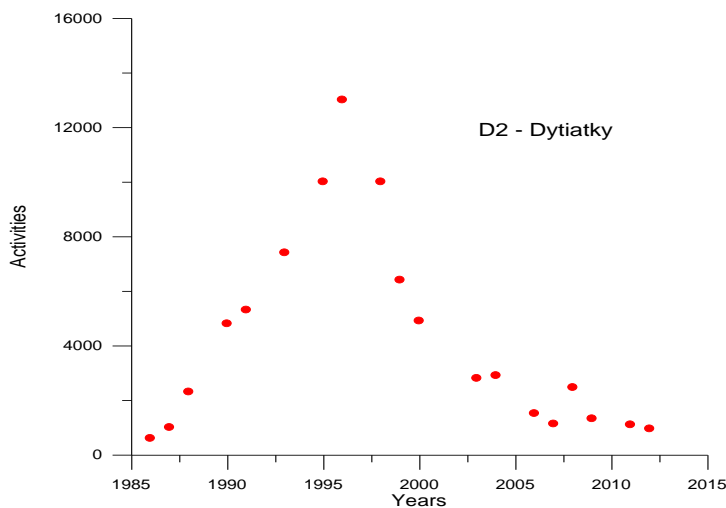


Рис. 1. Вміст ^{137}Cs у маслюку звичайному на полігоні Дитятки, зона відчуження Чорнобильської АЕС, Бк/кг сирої ваги.

Від 1986 р. питома активність ^{137}Cs у цьому виді грибів збільшується майже постійно із року в рік. Цей процес відбувається завдяки випадінням радіоцезію на ґрунт після аварії та поступового зростання його доступності для біоти. Через 10 років після аварії практично увесь цей радіонуклід стає біологічно активним та максимально накопичується у грибах, потім вміст ^{137}Cs зменшується. Одержаний графік показує, що чим більше значення вмісту цього радіонукліду спостерігалось у грибах, тим більш різкий спад кривої. Відповідно при невеликих значеннях концентрації спадання йде повільніше.

Припустимо, що зменшення питомої активності ^{137}Cs у маслюку також відбувається за експоненціальним законом:

$$\frac{dy}{dt} = -ky(t)$$

Розв'язком цього рівняння є експоненціальна залежність:

$$y(t) = y_0 e^{-kt}$$

Для перевірки припущення прологарифмуємо дані, подані на рис. 1, і отримаємо результати, представлені на рис. 2.

Можна вважати, що точки на спадаючій правій частині графіка укладаються на пряму, а відхилення від прямої пов'язані із дослідженням складних живих систем, на які впливають багато факторів. Це призводить до відхилення точок від класичної прямої, розрахованої методом найменших квадратів (Рис. 3). Отримані параметри лінійної залежності, яка описує спадання рівнів питомої активності ^{137}Cs у маслюку на полігоні Дитятки можна використовувати для створення прогнозу подальшої поведінки цього радіонукліду в екосистемі в цілому, а також забруднення цього виду їстівних грибів.

Нині обчислювальні моделі поєднують рівняння експоненціального розпаду з просторовим аналізом і методами оцінки ризику для моделювання транспортування радіоактивних забруднень у складних екологічних системах. Ці моделі допомагають приймати рішення щодо відновлення, планування евакуації та довгострокових стратегій моніторингу.

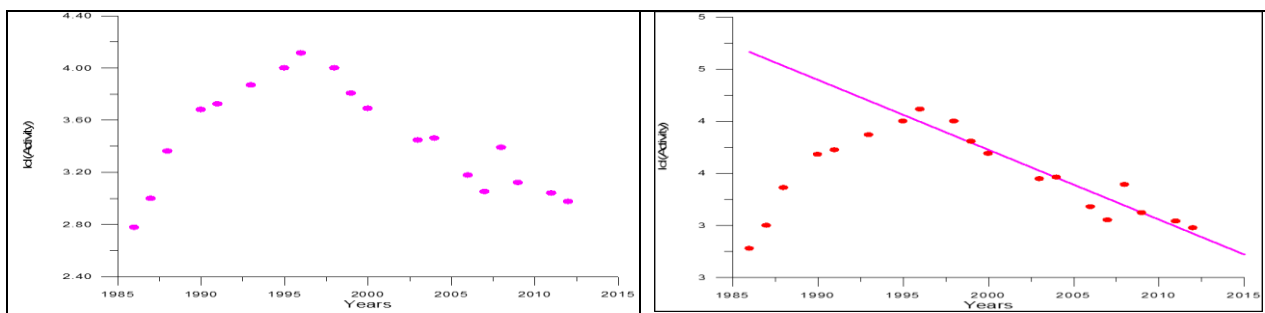


Рис. 2. Вміст ^{137}Cs у масляку звичайному на полігоні Дитятки, зона відчуження Чорнобильської АЕС, Бк/кг сирової ваги (логарифмічна шкала).

Рис. 3. Вміст ^{137}Cs у масляку звичайному на полігоні Дитятки, зона відчуження Чорнобильської АЕС (логарифм питомої активності), Бк/кг сирової ваги.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Venturi, S. Cesium in Biology, Pancreatic Cancer, and Controversy in High and Low Radiation Exposure Damage—Scientific, Environmental, Geopolitical, and Economic Aspects. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2021**, *18*, 8934. <https://doi.org/10.3390/ijerph18178934>.
- [2] Svendsen, E.R.; Kolpakov, I.E.; Stepanova, Y.I.; Vdovenko, V.Y.; Naboka, M.V.; Mousseau, T.A.; Mohr, L.C.; Hoel, D.G.; Karmaus, W.J.J. 137-Cesium Exposure and Spirometry Measures in Ukrainian Children Affected by the Chernobyl Nuclear Incident. *Environ. Health Perspect.* **2010**, *118*, 720–725. <https://doi.org/10.1289/ehp.0901412>.
- [3] Taylor, H.W.; Hutchison-Benson, E.; Svoboda, J. Search for Latitudinal Trends in the Effective Half-Life of Fallout ^{137}Cs in Vegetation of the Canadian Arctic. *Can. J. Bot.* **1985**, *63*, 792–796. <https://doi.org/10.1139/b85-101>.
- [4] Paller, M.H.; Jannik, G.T.; Baker, R.A. Effective Half-Life of Caesium-137 in Various Environmental Media at the Savannah River Site. *J. Environ. Radioact.* **2014**, *131*, 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.10.024>.
- [5] Škrkal, J.; Rulík, P.; Fantínová, K.; Burianová, J.; Helebrant, J. Long-Term ^{137}Cs Activity Monitoring of Mushrooms in Forest Ecosystems of the Czech Republic. *Radiat. Prot. Dosim.* **2013**, *157*, 579–584. <https://doi.org/10.1093/rpd/nct172>.
- [6] Zibold, G.; Klemm, E. Ecological Half-Times of ^{137}Cs and ^{90}Sr in Forest and Freshwater Ecosystems. *Radioprotection* **2005**, *40*, <https://doi.org/10.1051/radiopro:2005s1-073>.
- [7] AMAP. *AMAP Assessment 2002: Radioactivity in the Arctic*; AMAP: Tromsø, Norway, 2004; p. 22.
- [8] Bé, M.-M.; Chisté, V.; Dulieu, C.; Browne, E.; Baglin, C.; Chechev, V.; Kuzmenko, N.; Helmer, R.; Kondev, F.; MacMahon, D.; et al. *Table of Radionuclides, Cs-137*; Monographie BIPM-5; Bureau International des Poids et Mesures, Pavillon de Breteuil: Sèvres, France, 2006; Volume 3.
- [9] Zarubina, N. The Influence of Biotic and Abiotic Factors on ^{137}Cs Accumulation in Higher Fungi after the Accident at Chernobyl NPP. *J. Environ. Radioact.* **2016**, *161*, 66–72. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.11.014>.