

УДК [504.5:628.4.047]:638.132.2
DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.139.1.35>

ІНТЕНСИВНІСТЬ НАКОПИЧЕННЯ РАДІОНУКЛІДІВ ВЕГЕТАТИВНОЮ МАСОЮ ФАЦЕЛІЇ ПИЖМОЛИСТОЇ

Кущенко М.І. – аспірант кафедри екології та охорони навколишнього середовища,
Вінницький національний аграрний університет

Аварія на Чорнобильській АЕС спричинила викид радіонуклідів у навколишнє середовище, що призвело до значного забруднення території України, зокрема Житомирської, Київської, Чернігівської, Рівненської, Сумської та Волинської областей. Радіоактивні речовини, які потрапили в ґрунт, здатні мігрувати за ланцюгом ґрунт-рослина-живі організми, викликаючи негативні наслідки для екосистем. Особливу небезпеку становить радіоактивне забруднення сільськогосподарських угідь, оскільки радіонукліди здатні накопичуватись у рослинах, що може призвести до забруднення продукції. У зв'язку з необхідністю реабілітації забруднених земель, фітореMediaція, зокрема використання фацелії пижмолистої, виявляється перспективним екологічно чистим методом. Фацелія пижмолиста, однорічна медоносна рослина, відзначається невибагливістю до ґрунтових умов сприяє поліпшенню структури ґрунту і зниженню його кислотності. Поряд з цим фацелія є хорошою нектаропилконосною рослиною. Дослідження проводилися на дерново-опідзолених піщаних ґрунтах житомирської області протягом 2022-2024 років, з вмістом ^{137}Cs у ґрунтах до 5 Ки/км^2 . Визначено вміст радіонуклідів (цезій-137, калій-40, радій-226 та торій-232) у вегетативній масі фацелії. Дослідження проведені в умовах Полісся північного. Виявлено що вегетативна маса фацелії накопичує цезію-137 – $58,1 \text{ Бк/кг}$, калій-40 – $440,5 \text{ Бк/кг}$, радій-226 – $26,8 \text{ Бк/кг}$ та торій-232 – $19,2 \text{ Бк/кг}$. Результати показали, що калій-40 мав найвищу питому активність, що вказує на його значний вміст у ґрунті порівняно з іншими радіонуклідами. Сумарне винесення радіонуклідів з 1 гектара ґрунту становило 100750 Бк , з яких більшість припадала на калій-40. Результати свідчать про перспективність використання фацелії пижмолистої в якості ефективного фітореMediaнта для очищення забруднених радіонуклідами ґрунтів, що має велике значення для екологічної безпеки та сільськогосподарського виробництва.

Ключові слова: фацелія пижмолиста, цезій-137, калій-40, радій-226, торій-232, ґрунт, вегетативна маса, концентрація.

Kutsenko M.I. Intensity of accumulation of radionuclides by the vegetative mass of *Phacelia tanacetifolia* Benth

The accident at the Chernobyl NPP caused the release of radionuclides into the environment, which led to significant pollution of the territories of Ukraine, in particular the Zhytomyr, Kyiv, Chernihiv, Rivne, Sumy, and Volyn regions. Radioactive substances that have entered the soil are able to migrate along the soil-plant-living organisms chain, causing negative consequences for ecosystems. Radioactive contamination of agricultural land poses a special danger, as radionuclides can accumulate in plants, which can lead to product contamination. In connection with the need to rehabilitate contaminated lands, phytoremediation, in particular the use of *Phytium phacelia*, appears to be a promising environmentally friendly method. *Phacelia tansy*, an annual honey-bearing plant, is noted for its unpretentiousness to soil conditions, helps to improve the structure of the soil and reduce its acidity. Along with this, *phacelia* is a good nectar-pollinating plant. Research was conducted on turf-podzolic sandy soils of the Zhytomyr region during 2022-2024, with the content of ^{137}Cs in the soil up to 5 Ки/км^2 . The content of radionuclides (cesium-137, potassium-40, radium-226 and thorium-232) in the vegetative mass of *phacelia* was determined. The research was carried out in the conditions of the Northern Polissia. It was found that the vegetative mass of *phacelia* accumulates cesium-137 – 58.1 Bq/kg , potassium-40 – 440.5 Bq/kg , radium-226 – 26.8 Bq/kg and thorium-232 – 19.2 Bq/kg . The results showed that potassium-40 had the highest specific activity, indicating its significant removal from the soil compared to other radionuclides. The total release of radionuclides from 1 hectare of soil was $100,750 \text{ Bq}$, the majority of which was potassium-40. The results indicate the prospects

of using Phacelia pygmylum as an effective phytoremediant for cleaning soil contaminated with radionuclides, which is of great importance for environmental safety and agricultural production.

Key words: *Phacelia tanacetifolia Benth, cesium-137, potassium-40, radium-226, thorium-232, soil, vegetative mass, concentration.*

Постановка проблеми. Аварія на Чорнобильській атомній електростанції спричинила потрапляння в навколишнє природне середовище приблизно 50 млн. Кі різних радіонуклідів. Це призвело до значного забруднення територій України, зокрема, 50% Житомирської області, 26% Київської. Також близько 26% забруднених площ припадає на Чернігівську, Рівненську, Сумську і Волинську області [4]. Радіоактивні елементи, що входять до складу ядерного палива, сконцентрувались в об'єктах довкілля, звідки частково мігрують за ланцюгом ґрунт–рослина–живі організми, спричинюючи у них низку негативних змін [7].

Одним із найгостріших наслідків цієї катастрофи є радіоактивне забруднення сільськогосподарських угідь, включаючи орні землі, ліси та луки. Радіонукліди в ґрунті перебувають у рухомому стані, і їх переміщення відбувається через різні його прошарки [6]. Швидкість такого переміщення радіонуклідів залежить від фізико-хімічних властивостей ґрунту, зокрема, вмісту мінеральних та органічних речовин. Дослідження показують, що міграція цезію-137 у мінеральних дерново-підзолистих ґрунтах у десятки разів нижча, ніж у торф'яних і торф'яно-болотних ґрунтах. Ці особливості характерні для територій екологічної зони Полісся, де ґрунти містять не більше 1,0% глини, 0,8-1,2% гумусу, 3-5% мулистої фракції. Це призводить до високої міграції радіонуклідів, що ще більше ускладнює ситуацію з радіоактивним забрудненням та його наслідками для навколишнього середовища [5].

Сьогодні деякі території, які були забруднені радіонуклідами внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС, знову повертаються до виробництва сільськогосподарської продукції. Такі ґрунти потребують реабілітації через очищення їх від радіонуклідів для виробництва безпечної продукції. Тому, одним з ключових завдань є ефективне очищення територій, постраждалих від катастрофи. Одним із екологічно чистих та перспективних методів відновлення забруднення територій є фітореMediaція. Цей підхід передбачає використання рослин-фітореMediaнтів для очищення ґрунтів, стічних вод та атмосферного повітря. ФітореMediaція має декілька переваг: вона є безвідходною, не потребує значних фінансових витрат, а також сприяє покращенню екологічної ситуації в регіоні.

В дослідженнях, спрямованих на відновлення радіоактивних ґрунтів, акцент зроблено на фацелії пижмолистій. Ця рослина виявилася перспективною для фітореMediaції, оскільки має високу здатність до накопичення радіонуклідів. Використання фацелії пижмолистої не лише сприяє зменшенню рівня забруднення ґрунтів, але також покращує їх структуру і родючість [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Фацелія пижмолиста – це однорічна трав'яниста нектаропилконосна рослина, що відзначається своєю скоростиглістю та високою продуктивністю. Батьківщиною фацелії пижмолистої є Каліфорнія. Фацелія є досить скоростиглою рослиною. Ця рослина забезпечує бджіл нектаром, не лише в літку, але й на початку весни та пізно восени. Цвітіння починається приблизно через 35 днів після посіву і триває до 40 днів. Однією з основних переваг фацелії пижмолистої є її невибагливість до умов ґрунту, досить тривале цвітіння та значне виділення нектару. Вона виділяє значну кількість нектару, що сприяє високій медопродуктивності – з 1 га можна отримати понад 250 кг меду [2]. Фацелія також є кормом для багатьох сільськогосподарських тварин. Вона характеризується

високим вмістом незамінних амінокислот (проліну, лейцину, валіну, фенілаланіну та ін.), що робить її цінною поживною кормовою культурою [3].

Ця культура морозостійка, витримує морози до $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ і здатна виділяти нектар навіть після осінніх заморозків.

Відсоток схожості насіння за нормативами становить 87-92%, а схожість зберігається протягом 3-4 років. Норми висіву для фацелії складають приблизно 8 кг насіння на гектар, але на середніх або навіть поганих ґрунтах цю норму збільшують до 10-12 кг.

Насіння фацелії починає сходити зазвичай на 8 день, якщо погода волога. У сухих умовах період проростання може затягнутися до 2 тижнів. Найкращі результати щодо схожості показує насіння, висіяне одночасно з посівом ранніх ярих культур. Фацелія активно вирощується у садах, на полях, дачних та городніх ділянках, як декоративну, компостну, кормову, сидеральну, медоносну рослину. Цю рослину використовують як попередник для рапсу та різних овочевих культур. Фацелію можна сіяти як основну, так і проміжну культуру, що дозволяє ефективно використовувати ґрунти і покращувати їх якість.

Однією з особливостей фацелії є її інсектицидні властивості. На ділянках, де вона росте, спостерігається значне зменшення кількості шкідливих комах, як дротняки, ґрунтова нематода, попелиця, бульбочкові довгоносики. Фацелія також відлякує сарану, а в спільних посівах з горохом відзначається суттєве зниження зараження його гороховим зерноїдом. Рослина сприяє підвищенню повітропроникності ґрунту, збагаченню його азотом, а також знижує рівень кислотності ґрунту. Це, в свою чергу, сприяє зникненню деяких бур'янів (мокрецю, кінського щавлю, молочаю, хвоща польового та ін.).

Фацелія характеризується швидким ростом та інтенсивним нарощуванням біомаси. До моменту бутонізації вона здатна утворювати на площі 100 м^2 250-300 кг зеленої маси, яка за своєю дією рівноцінна внесенню близько 300 кг перегною в ґрунт. До того ж зрізана біомаса швидко розкладається, збагачуючи ґрунт калієм, азотом та іншими корисними органічними речовинами. Для досягнення інтенсивного розкладання зелених залишків необхідно забезпечити достатню вологість, тому в посушливі періоди рекомендується використати додаткові поливи чи інші способи зволоження біомаси, що сприяли ефективному використанню фацелії.

Матеріали та методика досліджень. Дослідження по вивченню інтенсивності накопичення радіонуклідів вегетативною масою фацелії проводилася на дерново-опідзолених піщаних ґрунтах в умовах м. Коростень Житомирської області протягом 2022-2023 рр. Фацелію вирощували згідно загальноприйнятої технології, яка включала обробіток ґрунтів, висів насіння та догляд за посівами.

Відбір ґрунтів для радіологічних досліджень проводили методом конверту, який передбачає відбір зразків з кожного поля у п'яти різних місцях (по квадрату і по центру) на глибині переорювання ґрунту. Підбір зразків ґрунту із змішаної з п'яти точок партії відбирали методом точкових проб по 0,5 кг. Вегетативну масу фацелії відбирали по завершенню фази бутонізації шляхом її скошування. Площа скошування становила 1 м^2 у п'яти точках. Після цього з отриманих зразків формували загальну партію з п'яти точок, проводячи в точкові відбори по 5 кг.

Вміст радіонуклідів (цезію-137, калію-40, радію-226 та торію-232) проводили у сертифікованій лабораторії смт. Чабани, Київська область, державна установа «Держґрунтохорона».

Площі ділянок поля, на яких вирощувалась фацелія, склали 25 м^2 у трьох кратні повторності.

Біометричну обробку отриманих результатів досліджень проводили з урахуванням середнього арифметичного значення (М), середнього квадратичного відхилення (m) та достовірності різниці середніх значень (критерії Р). Для позначення ймовірності в таблицях використовуються умовні позначення: Р < 0,05*; Р < 0,01**; Р < 0,001***.

Результати досліджень. Аналіз вмісту радіонуклідів у вегетативній масі фацелії пижмолистої (табл. 1) показав, що вміст цезію-137 склав 60,4 Бк/кг калію-40 – 458,6 Бк/кг, радію-226 – 27,8 Бк/кг та торію-232 – 18,8 Бк/кг відповідно.

Таблиця 1

**Вміст радіонуклідів у вегетативній масі фацелії пижмолистої, Бк/кг
(n=3, М ± m), 2022 р.**

Радіонукліди	Вміст радіонукліду			
	I	II	III	Середнє по групі
Цезій-137	59,9	60,4	60,9	60,4 ± 0,41
Калій-40	430	458,6	488	458,6 ± 23,68
Радій-226	29,6	27,8	26,2	27,8 ± 1,39
Торій-232	19,4	18,8	18,0	18,8 ± 0,57

У вегетативній масі фацелії пижмолистої загальний вміст радіонуклідів становив 565,6 Бк/кг, з яких 10,7% цезію-137, 81,1% калію-40, 4,9% радію-226 та 3,3% торію-232. Тобто, найвищий вміст радіонуклідів у вегетативній масі фацелії спостерігався по калію-40. Його вміст перевищував рівень цезію-137 – у 7,6 рази (Р < 0,001), радію-226 – у 15,4 рази (Р < 0,001) та торію-232 – у 25,9 рази (Р < 0,001). Ці дані свідчать про високу здатність фацелії до накопичення калію-40.

Таблиця 2

**Вміст радіонуклідів у вегетативній масі фацелії пижмолистої, Бк/кг
(n=3, М ± m), 2023 р.**

Радіонуклід	Вміст радіонукліду			
	I	II	III	Середнє по групі
Цезій-137	57,3	54,9	55,6	55,9 ± 11,5 ^{xxx}
Калій-40	421	420	430	423 ± 80,6
Радій-226	27,3	26,0	24,5	25,9 ± 4,9 ^{xxx}
Торій-232	20,1	19,1	20,0	19,7 ± 3,7 ^{xxx}

За результатами досліджень (табл. 2) виявлено, що протягом вегетаційного періоду 2023 року вегетативній масі фацелії пижмолистої вміст цезію-137 склав 55,9 Бк/кг, калію-40 – 223 Бк/кг, радію-226 – 25,9 Бк/кг та торію-232 – 19,7 Бк/кг.

Загальна кількість радіонуклідів становила 524,5 Бк/кг, з якої 11,5% припадало на цезій-137, 87,6% – на калій-40, 4,9% – на радій-226 та 3,7% – на торій-232. Найвищою питомою активністю у вегетативній масі фацелії пижмолистої характеризувався калій-40. Його вміст у вегетативній масі фацелії пижмолистої перевищував вміст цезію-137 – у 7,5 рази (Р < 0,001), радію-226 – у 16,3 рази (Р < 0,001) та торію-232 – у 21,4 рази (Р < 0,001).

Таблиця 3

**Вміст радіонуклідів у вегетативній масі фацелії пижмолистої, Бк/кг
(n=3, M ± m), 2024 р.**

Радіонуклід	Вміст радіонукліду			Середнє
Цезій-137	60,0	60,1	54,2	58,1 ± 3,38
Калій-40	460,2	450,4	410,7	440,5 ± 26,42
Радій-226	27,5	25,0	28,0	26,8 ± 1,31
Торій-232	20,4	20,3	17,0	19,2 ± 1,58

За результатами досліджень (табл. 3) встановлено, що у 2024 році загальна кількість радіонуклідів у вегетативній масі фацелії пижмолистої складала 544,6 Бк/кг, із яких 10,6% цезію-137, 80,8% калію-40, 4,9% радію-226 та 3,5% торію-232.

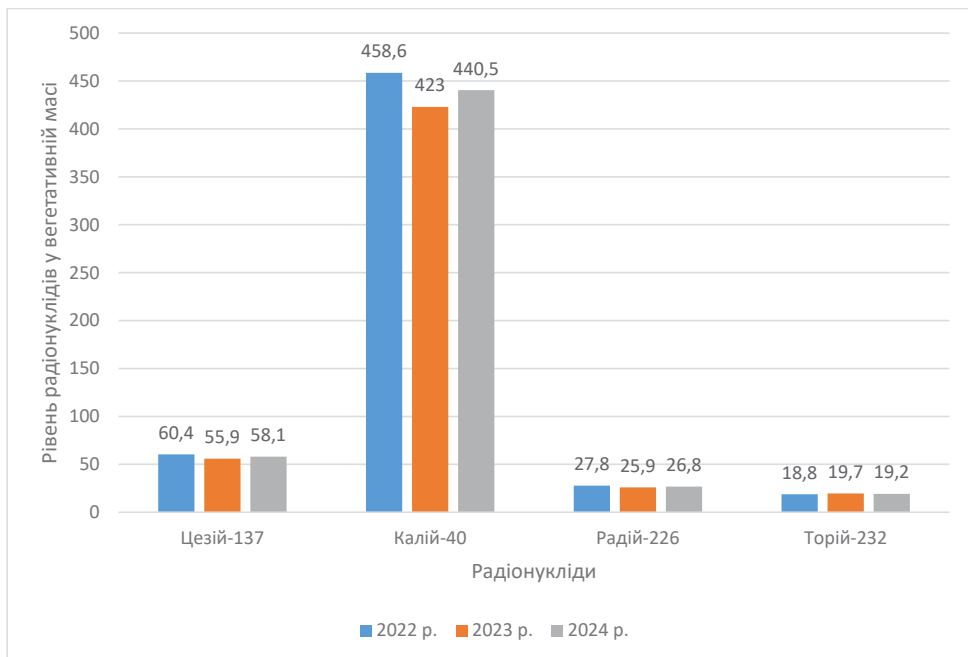


Рис. 1. Накопичення радіонуклідів вегетативною масою фацелії пижмолистої, в середньому за 2022-2024 рр.

Аналіз вмісту радіонуклідів у вегетативній масі фацелії пижмолистої (рис. 1) показав, що в середньому за три роки досліджень даний показник по цезію-137 склав 58,1 Бк/кг калію-440,5 Бк/кг, радію-226 – 26,8 Бк/кг та торію-232 – 19,2 Бк/кг.

Водночас, необхідно відмітити деяке зниження вмісту радіонуклідів у вегетативній масі у фацелії пижмолистої у 2023 році порівняно з 2024 р. Виявлено, що у вегетативній масі фацелії пижмолистої нижчий вміст цезію-137 – на 74,0%, калію-40 – на 7,7% та радію-232 – на 6,8%.

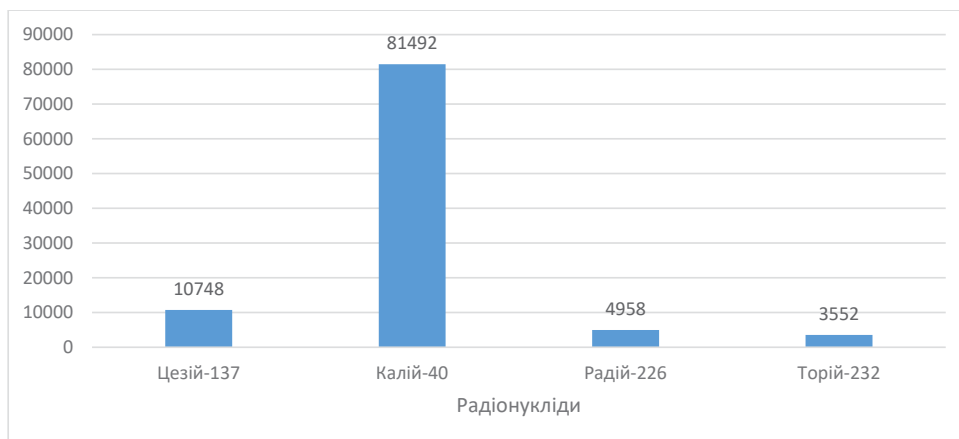


Рис. 2. Винесення з ґрунту радіонуклідів з вегетативною масою фацелії пижмолистої, Бк/га

За результатами досліджень встановлено, що найвищий рівень винесення радіонуклідів з ґрунтів з вегетативною масою фацелії пижмолистої спостерігався для калію-40 який становив 81492 Бк з гектару площі. Порівнюючи вміст інших радіонуклідів, було виявлено, що калій-40 виноситься з ґрунту у значно більших обсягах. Так у порівнянні з цезієм-137, радієм-226 та торієм-232 з вегетативною масою фацелії пижмолистої виноситься більше калію-40 з ґрунту у 7,5 рази, 16,4 рази та 22,9 рази відповідно.

Висновки. Вирощування фацелії пижмолистої на дерново-опідзолених піщаних ґрунтах Житомирської області призводить до накопичення у вегетативній масі цезію-137 – 58,1 Бк/кг, калію-40 – 440,5 Бк/кг, радію-226 – 26,8 Бк/кг та торію-232 – 19,2 Бк/кг. Сумарне винесення радіонуклідів з одного гектару ґрунту із вегетативною масою фацелії пижмолистої складає 100750 Бк, з яких найбільшу частку складає калій-40 (80,8%), тоді як цезій-137 – 10,6%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Bacq-Labreuil A., Crawford J., Mooney S.J., Neal K.A. L. Ritz Phacelia (*Phacelia tanacetifolia* Benth.) affects soil structure differently depending on soil texture. *Plant and Soil*. 2019. Vol. 441. P. 543-554. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04144-4>
2. Cîrlig N., Țiței V., Iurcu-Străistaru E. Morphobiological features and the significance of the species *phacelia tanacetifoliabenth.* as honey plant. *Lucrări Științifice. Seria Agronomie*. 2023. Vol. 66 (1). P. 55-60.
3. Kruk J., Baranowska I., Buszewski B., Bajkacz S., Kowalski B., Ligor M. Flavonoids enantiomer distribution in different parts of goldenrod (*Solidago virgaurea* L.), lucerne (*Medicago sativa* L.) and phacelia (*Phacelia tanacetifolia* Benth.). *Chirality*. 2019. Vol. 31, Issue 2. P. 138-149. DOI: <https://doi.org/10.1002/chir.23041>
4. Romanchuk L.D., Fedonuk T.P., Khant, G.O. Radiomonitoring of plant products and soils of Polissia during the long-term period after the disaster at the Chernobyl Nuclear Power Plant. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 2017. Vol. 8, № 3. P. 444-454. DOI: <https://doi.org/10.15421/021769>
5. Мовенко В.І. Моніторинг радіаційного забруднення території Чорнобильської зони. *Технічні науки та технології*. 2020. № 2 (20). С. 297-307. DOI: [10.25140/2411-5363-2020-2\(20\)-297-307](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-2(20)-297-307)

6. Разанов С.Ф., Шевчук В.В., Коминар М.Ф. Вплив обробітку ґрунту на накопичення цезію-137 в квітковому пилку та в продуктах переробки його медоносною бджолою. *Сільське господарство та лісівництво*. 2021. № 3 (22). С. 161-173. DOI: 10.37128/2707-5826-2021-3-13

7. Разанов С.Ф., Шевчук В.В., Коминар М.Ф. Накопичення ^{137}Cs у меді, виробленому бджолами з нектару сільськогосподарських медоносів в умовах Північного Полісся. *Сільське господарство та лісівництво*. 2020. № 4 (19). С. 148-158. DOI: 10.37128/2707-5826-2020-4-13