

БІОАКУМУЛЯЦІЯ ^{40}K У РІЗНИХ ВИДАХ РИБ РІЧКОВИХ ЕКОСИСТЕМ ЖИТОМИРСЬКОГО ПОЛІССЯ

Роман МАХІНЬКО

У статті представлено результати комплексного дослідження біоаккумуляції природного радіонуклідів ^{40}K у тканинах чотирьох видів промислових риб (товстолобик *Hypophthalmichthys molitrix*, короп *Cyprinus carpio*, карась *Carassius auratus*, щука *Esox lucius*), виловлених у річці Здвиж Житомирської області в січні 2025 року. Проведено порівняльний аналіз концентрації ^{40}K у різних анатомічних частинах риб – їстівній частині (м'язова тканина) і голові з внутрішніми органами. Вимірювання питомої активності ^{40}K здійснювали методом гамма-спектрометрії з використанням сертифікованого обладнання згідно з міжнародними стандартами. Установлено, що найвищі показники питомої активності ^{40}K зафіксовано в хижих видів риб – щуки (156,00 Бк/кг у м'язовій тканині та 113,00 Бк/кг у голові з внутрішніми органами), тоді як у рослиноїдних і всеїдних видів (товстолобик, короп) ці показники були значно нижчими (85,80 і 62,90 Бк/кг у м'язовій тканині відповідно). Виявлено закономірність концентрування ^{40}K переважно в м'язовій тканині порівняно з головою та внутрішніми органами для всіх досліджуваних видів риб, що відрізняється від характеру розподілу техногенних радіонуклідів. Найбільша різниця і концентрації між анатомічними частинами тіла зафіксована в щуки (38,1 %) і товстолобика (43,5 %), тоді як для коропа й карася ця різниця становила 17,1 % та 18,8 % відповідно. Продемонстровано, що, на відміну від техногенних радіонуклідів (^{137}Cs , ^{90}Sr), для яких типовим є накопичення в кістковій тканині й внутрішніх органах, ^{40}K як фізіологічно активний елемент концентрується переважно в м'язовій тканині. Статистичний аналіз даних підтверджує видоспецифічність накопичення ^{40}K , що пов'язано з трофічною спеціалізацією й особливостями метаболізму різних видів риб. Зафіксовані рівні вмісту ^{40}K знаходяться в межах регіональних фонових значень для водойм Українського Полісся. Отримані результати мають вагоме значення для оцінювання радіоекологічного стану водних екосистем у віддалений період після аварії на Чорнобильській АЕС і можуть бути використані для моніторингу якості водних біоресурсів і розроблення рекомендацій щодо їх безпечного використання.

Ключові слова: радіоекологія, ^{40}K , біоаккумуляція, прісноводні риби, річка Здвиж, радіонукліди.

Кафедра екології, Поліський національний університет, Старий бульвар, 7, Житомир, Житомирська обл., 10002, Україна; e-mail: vse-svit@ukr.net

Bioaccumulation of ^{40}K in different fish species of river ecosystems of Zhytomyr Polissia Makhinko R.

The article presents the results of a comprehensive study of bioaccumulation of the natural radionuclide ^{40}K in tissues of four commercial fish species (silver carp *Hypophthalmichthys molitrix*, common carp *Cyprinus carpio*, crucian carp *Carassius auratus*, pike *Esox lucius*) caught in the Zdyzh River of Zhytomyr region in January 2025. A comparative analysis of ^{40}K concentration in different anatomical parts of fish – edible part (muscle tissue) and head with internal organs – was conducted. Measurement of specific activity of ^{40}K was performed by gamma spectrometry using certified equipment according to international standards. It was established that the highest indicators of specific activity of ^{40}K were recorded in predatory fish species – pike (156.00 Bq/kg in muscle tissue and 113.00 Bq/kg in head with internal organs), while in herbivorous and omnivorous species (silver carp, common carp) these indicators were significantly lower (85.80 and 62.90 Bq/kg in muscle tissue, respectively). A pattern of ^{40}K concentration predominantly in muscle tissue compared to the head and internal organs was revealed for all studied fish species, which differs from the distribution pattern of technogenic radionuclides. The greatest difference in concentration between anatomical body parts was recorded in pike (38.1 %) and silver carp (43.5 %), while for common carp and crucian carp this difference was 17.1 % and 18.8 %, respectively. It has been demonstrated that, unlike technogenic radionuclides (^{137}Cs , ^{90}Sr), which typically accumulate in bone tissue and internal organs, ^{40}K as a physiologically active element concentrates mainly in muscle tissue. Statistical analysis of the data confirms the species specificity of ^{40}K accumulation, which is related to trophic specialization and metabolic characteristics of different fish species. The recorded levels of ^{40}K content are within the regional background values for water bodies of Ukrainian Polissia. The obtained results are important for assessing the radioecological state of aquatic

ecosystems in the long term after the Chornobyl accident and can be used for monitoring the quality of aquatic bioresources and developing recommendations for their safe use.

Key words: radioecology, ^{40}K , bioaccumulation, freshwater fish, Zdyvzh River, radionuclides.

Department of Ecology, Polissia National University, 7, Staryi Boulevard, Zhytomyr, Zhytomyr reg., 10002, Ukraine; e-mail: vse-svit@ukr.net

Вступ

Радіоекологічний моніторинг водних екосистем залишається актуальним питанням для територій, що зазнали радіаційного забруднення внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС. Особливий інтерес при цьому становлять водні біоресурси, оскільки прісноводні риби є не лише індикаторами стану гідроекосистем, а й важливим елементом харчового раціону населення (Махінко 2024а). Серед природних радіонуклідів особливу увагу привертає калій-40 (^{40}K) – ізотоп калію з періодом напіврозпаду $1,248 \cdot 10^9$ років, який є невід’ємним складником біохімічних процесів в організмах і має значну біологічну активність (Makhinko 2024b).

На відміну від техногенних радіонуклідів цезій-137 (^{137}Cs), стронцій-90 (^{90}Sr), які потрапили в навколишнє середовище внаслідок аварії на ЧАЕС (UNSCEAR 2022; Kong et al. 2022), ^{40}K є природним радіонуклідом, що постійно наявний у всіх екосистемах. Однак динаміка його накопичення в організмах гідробіонтів залежить від багатьох факторів, включаючи трофічний рівень і спе-

цифіку метаболізму різних видів (Marenkov et al. 2010; Dvoretzkyi et al. 2016).

Територія Українського Полісся характеризується підвищеною чутливістю до радіаційного забруднення через особливості ландшафтно-геохімічних умов, що сприяють міграції радіонуклідів у системі «грунт-вода-гідробіонти» (State Institution «Ukrainian Hydrometeorological Institute» 2015). Тому дослідження біоаккумуляції ^{40}K у промислових видах риб цього регіону має вагоме науково-практичне значення для оцінювання радіоекологічної ситуації та безпеки використання водних біоресурсів.

Мета дослідження – визначити особливості акумуляції природного радіонукліду ^{40}K у різних анатомічних частинах прісноводних риб річки Здвиж Житомирської області, а також установити видоспецифічні закономірності цього процесу.

Матеріал та методи

Польовий етап дослідження проведено 8 січня 2025 року на річці Здвиж поблизу села Карабачин, Брусилівського району, Житомирської області.

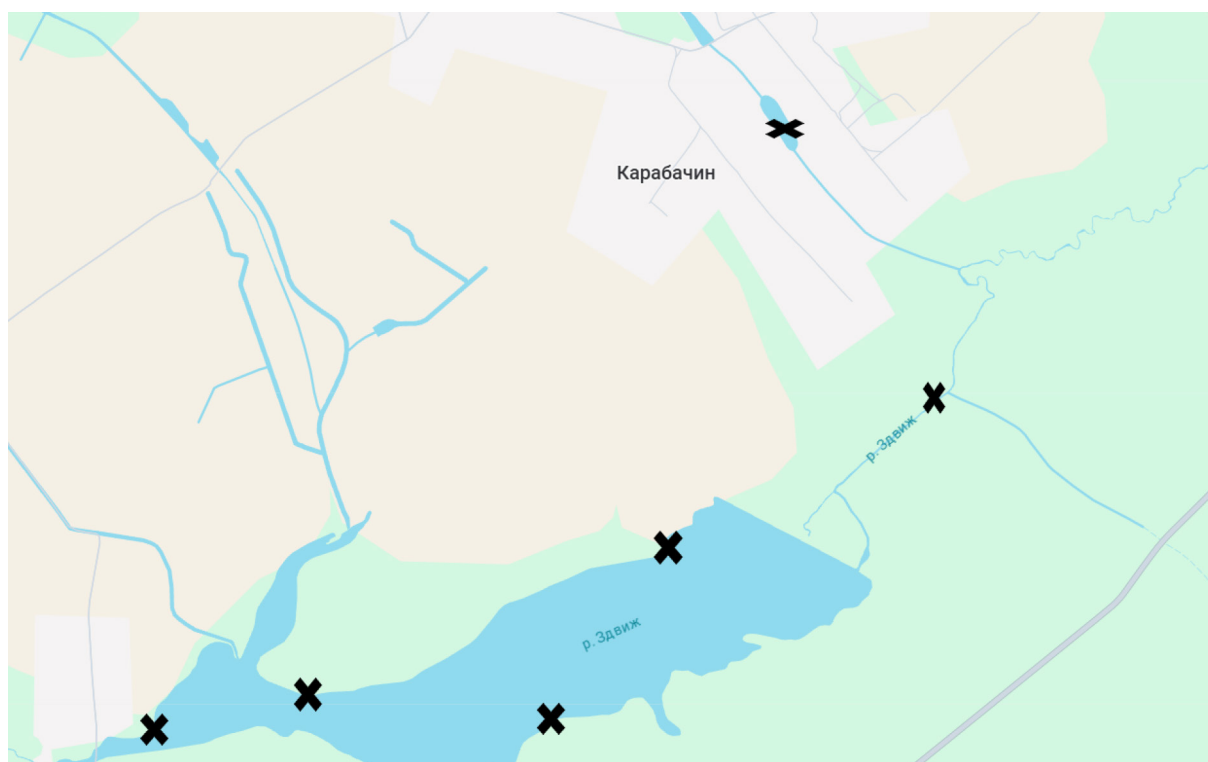


Рис. 1. Місця відбору проб на річці Здвиж (Житомирська область)

Fig. 1. Sampling sites on the Zdyvzh River (Zhytomyr region)

Вибір цього місця обґрунтований типовими гідрологічними умовами середнього перебігу річки, доступністю до водотоку та репрезентативністю проб для цілей гідроекологічного моніторингу (рис. 1).

У процесі дослідження виловлено чотири види риб, які характерні для іхтіофауни річкових екосистем Українського Полісся: товстолобик (*Hypophthalmichthys molitrix* Valenciennes, 1844), короп (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758), карась (*Carassius auratus* Linnaeus, 1758), щука (*Esox lucius* Linnaeus, 1758). Для кожного зразка риби ділили на дві фракції – їстівну частину (м'язова тканина/туша) і голову з внутрішніми органами для окремого аналізу. Усього проаналізовано по три зразки кожного виду риб, тобто загалом 12 проб (4 види × 2 анатомічні частини × 3 зразки).

Аналітичні вимірювання здійснено у вимірювальній лабораторії Поліського національного університету, яка сертифікована відповідно до вимог ДСТУ ISO 10012:2005. Визначення питомої активності ^{40}K проводили методом гамма-спектрометрії. Для вимірювань застосовували спектрометр МКС-АТ1315 (виробник – АТОМТЕХ). Процедура включала два основні етапи:

Попереднє вимірювання фоновому спектру (робочого й контрольного) протягом 3 годин із його збереженням у пам'яті приладу.

Аналіз наважок рибних проб, поміщених у спеціальні ємності типу Марінеллі, з подальшим розміщенням у захисний блок спектрометра. Дослідження проводили на сирій масі без попередньої пробопідготовки. Для аналізу відбирали середні частини філе м'язової тканини без луски і шкіри. Ємності типу Марінеллі заповнювали повністю з метою дотримання геометрії вимірювання.

Реєстрацію гамма-випромінювання здійснювали сцинтиляційним блоком з кристалом NaI(Tl) розміром 63 × 63 мм. Спектри обробляли в режимі

реального часу за допомогою програмного забезпечення SPTR.

Окрім цього, для контролю потужності експозиційної дози гамма-випромінювання використовували спектрометр-дозиметр МКГ-АТ1321, обладнаний сцинтиляційним детектором NaI (25 × 40 мм) і лічильником Гейгера-Мюллера. Вимірювання проводили в безперервному режимі в стандартних лабораторних умовах.

Статистичне оброблення результатів здійснювали за допомогою методів описової статистики з використанням середніх значень, стандартних відхилень і графіків варіацій. Усі дослідження виконували в межах науково-дослідної теми «Радіоекологічна оцінка водних біоресурсів у віддалений період після аварії на Чорнобильській атомній електростанції», зареєстрованої в МОН України (№ 0124U000593).

Результати та обговорення

У межах виконання дослідження проаналізовано вміст радіонукліду ^{40}K у тканинах чотирьох видів риб, виловлених у річці Здвиж. З метою порівняння рівнів накопичення радіонукліду ділили на дві основні анатомічні частини: м'язову тканину (тушу) і голову з внутрішніми органами. Радіоактивність визначали з урахуванням стандартного відхилення (SD), яке становило в середньому 10 % від основного показника, що забезпечує належний рівень точності. Результати вимірювань представлено в таблиці 1.

Аналіз отриманих результатів виявив суттєві відмінності в акумуляції ^{40}K між різними видами риб. Найвищі показники питомої активності радіонукліду зафіксовано в щуки (*Esox lucius*) – хижаго виду з верхівки трофічної піраміди водної екосистеми. У м'язовій тканині щуки питома активність ^{40}K становила 156,00 Бк/кг, а в голові з внутрішніми органами – 113,00 Бк/кг. Найнижчі концентрації ^{40}K виявлено в коропа (*Cyprinus*

Таблиця 1. Концентрація радіонукліду ^{40}K у тканинах риб із річки Здвиж, Бк/кг ($n = 3$; $P < 0,05$)

Table 1. Concentration of radionuclide ^{40}K in fish tissues from the Zdvyzh River, Bq/kg ($n = 3$; $P < 0,05$)

№ з/п	Шифр зразка	Вміст ^{40}K , Бк/кг ± SD
1	Товстолобик: голова, внутрішні органи	59,77 ± 5,9
2	Товстолобик: туша	85,80 ± 8,5
3	Короп: голова, внутрішні органи	53,70 ± 5,4
4	Короп: туша	62,90 ± 6,2
5	Карась: голова, внутрішні органи	98,50 ± 9,1
6	Карась: туша	117,00 ± 11,2
7	Щука: голова, внутрішні органи	113,00 ± 11,0
8	Щука: туша	156,00 ± 15,8

Розподіл ^{40}K , Бк/кг, у різних частинах тіла риб

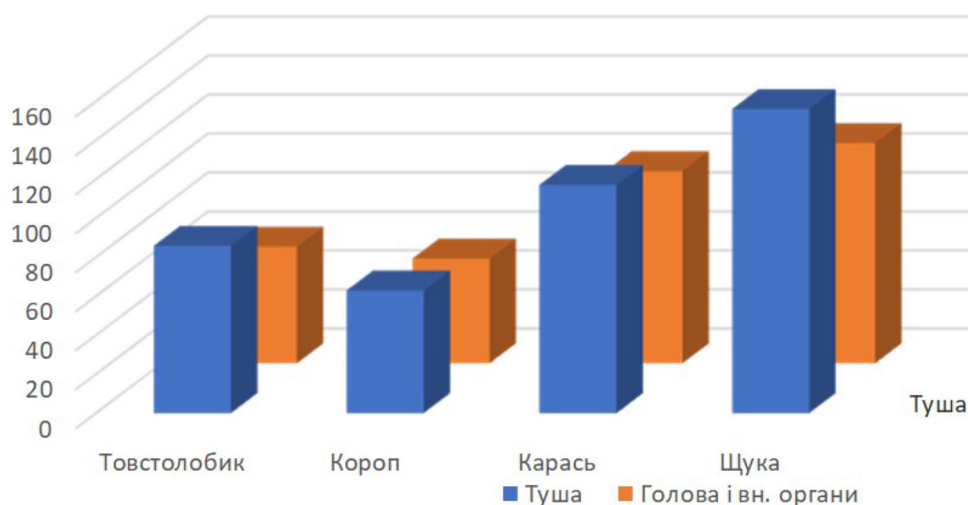


Рис. 2. Розподіл ^{40}K в туші та голові (з внутрішніми органами) риб (2025 рік)

Fig. 2. Distribution of ^{40}K in muscle tissue and head (with internal organs) of fish (2025)

саргіо) – 62,90 Бк/кг у м'язовій тканині та 53,70 Бк/кг у голові з внутрішніми органами. На рисунку 2 наведено порівняльну характеристику розподілу радіонуклідів ^{40}K у тканинах різних видів риб.

Порівняльний аналіз розподілу ^{40}K в різних анатомічних частинах риб показав, що для всіх досліджуваних видів характерне підвищене накопичення радіонукліду в м'язовій тканині порівняно з головою та внутрішніми органами. Різниця в концентрації між цими частинами була найбільш вираженою в щуки (38,1 %) і толстолобика (43,5 %), тоді як для коропа й карася ця різниця становила 17,1 % та 18,8 % відповідно.

Отримані результати демонструють чітку видоспецифічність накопичення ^{40}K у тканинах риб різних екологічних груп. Найвищі показники радіоактивності в хижих видів (щука) порівняно з рослиноїдними й усеїдними (толстолобик, короп, карась) можна пояснити особливостями їхнього трофічного статусу та біологічною магіфікацією радіонуклідів у харчових ланцюгах водної екосистеми. Така закономірність узгоджується з результатами досліджень Маренкова та співавторів (Marenkov et al. 2010), які виявили подібну тенденцію для техногенних радіонуклідів у риб Дніпровського водосховища.

Отримані результати також узгоджуються з дослідженнями Дворецького та співавторів (Dvoretzkyi et al. 2016), які вивчали радіоекологічний стан водойм Придніпров'я. Автори встановили, що природний радіонуклід ^{40}K більшою мірою акумулюється в м'язовій тканині іхтіофагів (хижих риб) порівняно з рослиноїдними видами,

що повністю підтверджується отриманими нами даними для щуки (хижак) і рослиноїдних видів (толстолобик, короп). Важливим є також висновок дослідників, що вміст радіонуклідів у рибі не перевищує допустимі рівні згідно з нормативами (Ministry of Health of Ukraine 1997; State Nuclear Regulatory Committee of Ukraine 2005), але при цьому необхідний постійний моніторинг водних екосистем через потенційну небезпеку вторинного забруднення.

Важливим аспектом дослідження є виявлення підвищеної концентрації ^{40}K у м'язовій тканині порівняно з головою та внутрішніми органами в усіх досліджуваних видів. Це відрізняється від характеру розподілу техногенних радіонуклідів (^{137}Cs , ^{90}Sr), для яких типовим є підвищене накопичення в кістковій тканині та внутрішніх органах (Махінко 2024а). Такі відмінності пояснюються фізіологічною роллю калію як макроелементу, що бере активну участь у метаболічних процесах, особливо в енергетичному забезпеченні м'язової тканини.

Порівнюючи отримані дані з результатами досліджень інших водойм Українського Полісся (Makhinko 2024b), можемо констатувати, що радіоекологічний стан річки Здвиж за вмістом природного радіонукліду ^{40}K у промислових видах риб знаходиться в межах регіональних фонових значень і не викликає занепокоєння з погляду радіаційної безпеки.

Це також відповідає даним архівних спостережень Державного агентства України з управління зоною відчуження (State Agency of Ukraine on Exclusion Zone Management 2023), що фіксують

стабільні рівні природної радіоактивності в річкових системах Житомирського Полісся протягом останніх років.

Варто зазначити, що дослідження проводили в межах трьох ділянок річки Здвиж поблизу села Карабачин, що обмежує можливість просторової екстраполяції результатів на всю річкову систему. Надалі планується розширити вибірку за рахунок різних ділянок і сезонів.

Необхідно зазначити, що природний радіонуклід ^{40}K має значно менший радіологічний ризик порівняно з техногенними радіонуклідами через його повсюдне поширення й адаптацію біологічних систем до його наявності протягом еволюції. Проте моніторинг його концентрації в промислових видах риб залишається важливим для комплексного оцінювання радіаційного навантаження на водні екосистеми й людину як кінцеву ланку трофічного ланцюга.

Висновки

Виявлено чітку видоспецифічність накопичення природного радіонукліду ^{40}K у тканинах прісноводних риб річки Здвиж, що проявляється в найвищих показниках питомої активності в хижого виду (щука) – 156,00 Бк/кг у м'язовій тканині та 113,00 Бк/кг у голові з внутрішніми органами.

Установлено закономірність розподілу ^{40}K у різних анатомічних частинах риб, що характеризується підвищеною концентрацією радіонукліду в м'язовій тканині порівняно з головою та внутрішніми органами для всіх досліджуваних видів. Найбільш виражена різниця спостерігається в щуки (38,1 %) і товстолобика (43,5 %).

Зафіксовані рівні вмісту ^{40}K у тканинах риб річки Здвиж знаходяться в межах регіональних фонових значень для водойм Українського Полісся й не становлять радіологічної небезпеки для споживачів рибної продукції.

Отримані дані можуть бути використані органами екологічного моніторингу, а також під час оцінювання санітарної безпеки виловленої риби в умовах постчорнобильського середовища.

Результатами можна скористатися для подальшого радіоекологічного моніторингу водних екосистем Полісся у віддалений період після аварії на Чорнобильській АЕС і розроблення рекомендацій щодо безпечного використання водних біоресурсів.

Подяка

Автор висловлює подяку співробітникам вимірювальної лабораторії Поліського національного університету за допомогу в проведенні аналітичних вимірювань.

State Institution "Ukrainian Hydrometeorological Institute" (2015) *Analiz radiatsiinoho stanu navkolyshnoho seredovyshecha terytorii Ukrainy* [Analysis of the radiation state of the environment of the territory of Ukraine]. *Naukovi pratsi*, 53 (40), 87–92 (in Ukrainian).

DVORETSKYI, A., SAPRONOVA, V., BAI-DAK, L. MARENKOV, O. (2016) Radioecology of the Pridniprovia water ecosystems. *Visnyk ZhNAU*, 1(55), 283–290 (in Ukrainian).

MAKHINKO, R. H. (2024a) Kompleksni zakhody po vidnovlenniu vodoim Zhytomyrskoho Polissia pislia Chornobylskoi katastrofy [Comprehensive measures for the restoration of water bodies in Zhytomyr Polissia after the Chornobyl disaster]. *Ekologichni nauky*, 3(54), 57–63. (in Ukrainian). DOI: 10.32846/2306-9716/2024.eco.3-54.7

MAKHINKO, R. (2024b) Long-term consequences of the Chornobyl disaster for aquatic ecosystems: A retrospective analysis and prognosis. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*, 15(2), 58–67. DOI: 10.69628/esbur/2.2024.58

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2022) Sources, effects and risks of ionizing radiation. UNSCEAR 2020/2021 report (Vol. 2). New York: United Nations Publications. Available from: <https://documents.un.org/doc/undoc/gen/v22/035/31/pdf/v2203531.pdf>

KONG, S., YANG, B., TUO, F., LU, T. (2022) Advance on monitoring of radioactivity in food in China and Japan after Fukushima nuclear accident. *Radiation Medicine and Protection*, 3(1), 37–42. DOI: 10.1016/j.radmp.2022.01.006

MARENKOV, O. M., DVORETSKIY, A. I., BILOKON, G. S. (2010) Radionuclides contamination of industrial types of fish of Dnieper reservoir. *Scientific Notes of Ternopil National Pedagogical University. Series: Biology*, 2(43), 338–341 (in Ukrainian).

Ministry of Health of Ukraine (1997) *Norms of radiation safety of Ukraine*. Kyiv: Ministry of Health of Ukraine. Available from: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0062282-97#Text> (accessed: 20.04.2025).

State Nuclear Regulatory Committee of Ukraine (2005) *National report on compliance with the obligations under the joint convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management*. Kyiv: State Nuclear Regulatory Committee of Ukraine. Available from: https://snriu.gov.ua/storage/app/sites/1/docs/Annual%20Reports/National%20Reports%20JC/JC_2005.pdf

State Agency of Ukraine on Exclusion Zone Management (2023) *Archival materials on the state of aquatic ecosystems in the Chornobyl exclusion zone*. Kyiv: State Agency of Ukraine on Exclusion Zone Management. Available from: <https://dazv.gov.ua/> (accessed: 20.04.2025).