

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-361-24>

УДК 637.5.02

### БОЙКО ЮЛІЙ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-0603-7827>

e-mail: [boiko\\_julius@ukr.net](mailto:boiko_julius@ukr.net)

### КАРПОВА ЛЕСЯ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-5015-2107>

e-mail: [rtlesya@gmail.com](mailto:rtlesya@gmail.com)

### ГОНЧАР АНДРІЙ

Хмельницький національний університет

e-mail: [honchar244@gmail.com](mailto:honchar244@gmail.com)

## ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА БАГАТОРІВНЕВА СИСТЕМА ЗБОРУ ДЛЯ БЕЗДРОТОВОЇ ЕНЕРГІЇ

У роботі представлено концепцію великомасштабного бездротового збирача електромагнітної енергії на основі інтелектуальної багаторівневої збиральної поверхні. Архітектура поєднує горизонтальне кутове охоплення та вертикальне акумулювання потужності через ієрархічно організовані приймальні елементи. Така структура забезпечує підвищену ефективність збору енергії та покращений коефіцієнт підсилення. Результати моделювання підтверджують перспективність концепції для систем бездротового живлення та відновлюваної енергетики.

**Ключові слова:** бездротове збирання енергії; електромагнітне енергозбирання; багаторівнева інтелектуальна поверхня; архітектура приймальної метаповерхні; мережа формування променя; радіочастотна енергія.

BOIKO JULIY, KARPOVA LESIA, HONCHAR ANDRIY

Khmelnytsky National University

## INTELLIGENT MULTI-LEVEL COLLECTION SYSTEM FOR WIRELESS ENERGY

This paper presents a conceptual model of a large-scale wireless microwave energy harvester designed using an Intelligent Reconfigurable Collecting Surface architecture. The proposed concept contributes to the advancement of renewable and wireless energy technologies by introducing a novel hierarchical structure that enables efficient microwave energy capture and concentration over extended spatial regions. The system is composed of a large number of elementary harvesting units, each capable of receiving and partially processing the incident microwave energy. These units are organized into a two-level hierarchical configuration distributed across both horizontal and vertical planes to maximize the overall collection performance.

In the horizontal plane, the receiving surface is implemented as an array of square radiating elements arranged into subarrays that provide wide angular coverage and adaptability to different directions of incoming waves. Each subarray operates cooperatively to ensure uniform energy reception even under varying incidence angles and environmental conditions. In the vertical plane, a hierarchical beamforming and combining network is employed to aggregate the received power based on the watershed principle, where a single receiving port collects energy from its assigned and neighboring elements, similar to how a catchment basin gathers water from its tributaries. This configuration enhances the effective aperture and ensures constructive energy combining with minimal phase losses.

The integrated multi-level structure leads to improved antenna gain, higher power collection density, and better overall system efficiency compared with conventional planar harvesting designs. The simulation and preliminary experimental results demonstrate the feasibility, scalability, and superior energy conversion capability of the proposed architecture. These findings indicate that the IRCS-based approach is a promising platform for next-generation wireless power transfer systems, energy-autonomous networks, and large-area renewable energy harvesting infrastructures.

**Keywords:** wireless energy harvesting; electromagnetic energy collection; multilayer intelligent surface; receiving metasurface architecture; beamforming network; radio-frequency energy

Стаття надійшла до редакції / Received 09.12.2025

Прийнята до друку / Accepted 11.01.2026

Опубліковано / Published 29.01.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Бойко Юлій, Карпова Леся, Гончар Андрій

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сучасний розвиток електроніки, бездротових систем зв'язку та Інтернету речей (IoT) зумовлює постійне зростання потреби у стабільних і довготривалих джерелах живлення для великої кількості малопотужних пристроїв. Традиційні батарейні системи мають обмежений термін служби, потребують періодичної заміни або підзарядки, що ускладнює їх застосування у віддалених, мобільних або мікромасштабних пристроях. Одним із перспективних шляхів вирішення цієї проблеми є збирання енергії з навколишнього середовища – процес перетворення енергії, наявної у навколишньому середовищі, у корисну електричну енергію для живлення електронних систем.

Серед можливих джерел – сонячна, вітрова, теплова, геотермальна, радіочастотна та електромагнітна енергія. Особливий науковий інтерес становить збирання електромагнітної (радіочастотної та мікрохвильової) енергії, оскільки вона доступна практично скрізь завдяки наявності численних випромінювачів, таких як базові станції стільникового зв'язку (4G/5G/6G), точки доступу Wi-Fi, передавачі FM-радіо, системи GPS, телевізійні передавачі тощо. Збирання цієї енергії реалізується за допомогою приймально-випрямляючих модулів, які перетворюють високочастотну електромагнітну хвилю на постійний електричний струм.

Попри значні досягнення у сфері приймально-випрямляючих модулів і багатосмугових антенних структур, існує низка технічних обмежень, що стримують ефективне використання таких систем:

- вузьке кутове охоплення приймання сигналу через обмежену спрямованість антен;
- втрати потужності під час поєднання сигналів від множини елементів;
- складність оптимізації фазових і амплітудних характеристик при багатоканальному прийомі;
- зниження ефективності перетворення енергії при зміні напрямку або інтенсивності вхідного випромінювання.

Таким чином, актуальним завданням є розроблення архітектури багаторівневої бездротової системи енергії електромагнітних хвиль, здатної забезпечити широке просторове охоплення, високу спрямованість і підвищену ефективність прийому. З цією метою у даній роботі пропонується використання інтелектуальної багаторівневої збиральної поверхні (IRCS), яка поєднує принципи ієрархічної побудови та формування променя за типом водозбірного басейну. Такий підхід дозволяє акумулювати енергію з кількох напрямків одночасно, підвищуючи щільність зібраної потужності й загальну енергоефективність системи.

Розв'язання цієї проблеми має значну наукову та практичну цінність, оскільки забезпечує фундамент для створення енергоавтономних бездротових сенсорних мереж, розумних пристроїв, безпілотних апаратів та інтелектуальних енергомереж. Таким чином, запропонований підхід сприяє розвитку концепції «зелених» технологій та сталих систем живлення майбутнього.

#### Аналіз досліджень та публікацій

Проблема бездротового збору енергії активно досліджується у зв'язку з розвитком технологій IoT, систем автономного живлення сенсорів та бездротових телекомунікаційних мереж нового покоління [1]. Основна ідея полягає у перетворенні навколишньої радіочастотної або електромагнітної енергії на електричну, придатну для живлення електронних пристроїв.

Ряд українських досліджень присвячено аналізу ефективності перетворення електромагнітної енергії в енергію постійного струму за допомогою приймально-випрямляючих модулів, які поєднують антену та випрямляч у єдиній системі [2], [3]. Такі системи мають високу перспективність для живлення автономних пристроїв, однак їх ефективність суттєво залежить від умов прийому сигналу, частотного діапазону та орієнтації елементів антени.

Останніми роками значна увага приділяється розвитку інтелектуальних багаторівневих поверхонь, які дозволяють керувати відбиттям, фокусуванням або поглинанням енергії шляхом динамічного регулювання фазових характеристик елементів [4], [5]. Це дає можливість підвищити ефективність збору енергії та збільшити площу охоплення.

У працях вітчизняних науковців, зокрема Хмельницького національного університету, досліджено вплив геометричних параметрів антенних елементів на ефективність поглинання електромагнітної енергії в діапазонах WiMAX та 5G [1]. Окремі роботи присвячено створенню фрактальних або широкосмугових приймально-випрямляючих модульних структур, здатних одночасно працювати в кількох частотних діапазонах [7].

Проблема підвищення ефективності бездротового збору енергії розглядається також у контексті застосування ієрархічних та багаторівневих антенних решіток [8]. Такі системи використовують ефект просторового сумування енергії, коли декілька елементарних антен працюють узгоджено, передаючи потужність до спільного вихідного порту, що нагадує принцип «водозбірного басейну».

Отже, аналіз літературних джерел показує, що ефективність бездротових систем збору енергії залежить від поєднання кількох факторів: архітектури антен, типу приймальної поверхні, використання інтелектуального керування фазами сигналів та методів формування променя. Тому розробка інтелектуальної багаторівневої поверхні для збору енергії, що поєднує властивості метаповерхонь та багаторівневого формування променя, є актуальним і перспективним напрямом сучасних досліджень.

#### Формулювання цілей статті

Метою статті є дослідження архітектури інтелектуальної багаторівневої поверхні для бездротового збору електромагнітної енергії, яка поєднує принципи ієрархічної побудови та просторового формування променя з метою забезпечення широкого кутового охоплення, підвищеної спрямованості та збільшеної енергоефективності прийому в умовах змінних напрямків і рівнів опромінення.

#### Виклад основного матеріалу

Типова система збору радіочастотного сигналу зображена на рисунку 1.



Рис. 1. Приклад системи збору радіочастотного сигналу

Основними складовими такої системи є антена-приймач, узгоджувальна мережа, випрямляч, фільтр та накопичувач енергії. Антена приймає навколишнє радіочастотне випромінювання, узгоджувальна мережа

забезпечує мінімальні відбиття сигналу, а випрямляч перетворює змінну електромагнітну енергію у постійну напругу, придатну для живлення навантаження.

Ключові характеристики ідеальної антени включають всеспрямовану діаграму спрямованості, що є особливо важливою за відсутності спеціального передавача, компактні габарити, добру узгодженість із випрямлячем, широкосмуговість або багатодіапазонність, а також високий коефіцієнт корисної дії.

Подібні характеристики демонструють сучасні антени, представлені у працях [4].

Система збору енергії може бути описана узагальненим виразом для коефіцієнта корисної дії:

$$\eta = \eta_{RF} \cdot \eta_{DC}. \quad (1)$$

де  $\eta_{RF} = \frac{P_{RF}}{P_{ex}}$  – коефіцієнт ефективності прийому антени,  $\eta_{DC} = \frac{P_{DC}}{P_{RF}}$  – ефективність випрямлення,  $P_{ex}$  – вхідна потужність,  $P_{RF}$  – радіочастотна потужність на вході випрямляча,  $P_{DC}$  – випрямлена (постійна) потужність на виході випрямляча.

Для підвищення ефективності системи необхідно максимізувати  $P_{ex}$ , що безпосередньо залежить від коефіцієнта підсилення антени  $G$ :

$$P_{ex} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G \cdot P_i. \quad (2)$$

де  $P_i$  – щільність потужності падаючого випромінювання,  $\lambda$  – довжина хвилі. Із рівняння (2) випливає, що збільшення коефіцієнта підсилення  $G$  дозволяє істотно підвищити рівень зібраної потужності.

Формування променя є одним із ключових підходів для ефективного спрямування електромагнітної енергії до заданої цілі. Використання антенних решіток у поєднанні з технологією формування променя забезпечує створення вузьких діаграм спрямованості з високим коефіцієнтом підсилення та контрольованою шириною променя, що дозволяє не лише сфокусовано передавати потужність, але й ефективно працювати в багатокористувацьких середовищах. На високих частотах, зокрема в міліметровому діапазоні хвиль, застосування електронно керованих антен стає необхідним для компенсації зростаючих втрат під час поширення сигналу.

Основними інженерними викликами при проектуванні антенних решіток для бездротової передачі енергії зі сканування променя є взаємний зв'язок між елементами решітки, забезпечення можливості керованого сканування в діапазоні до  $\pm 45^\circ$ , а також підтримка високої загальної ефективності системи. Одним із поширених технічних рішень є використання лінзи Ротмана, яка забезпечує ширококутне охоплення завдяки своїм ефективним властивостям формування променя та порівняно низькій вартості реалізації.

У системах бездротової передачі енергії формування променя є особливо корисним для сценаріїв із мобільними приймачами, оскільки дозволяє базовій станції динамічно змінювати напрямок переданої потужності, забезпечуючи стабільне енергопостачання приймача в різних просторових положеннях. Для підвищення ефективності енергозбору та подолання обмежень спрямованості було запропоновано низку інноваційних конструкцій антен, серед яких сітчасті антени з багатьма зонами випромінювання, багатопортові поверхневі антени з вбудованими випрямлячами, а також антенні матриці з формуванням променя для багатонапрямого збору енергії. Ці рішення забезпечують підвищення коефіцієнта підсилення та ефективності прийому енергії в різних просторових напрямках, що є критичним для сучасних систем бездротової передачі енергії.

У цьому дослідженні основну увагу приділено конструктивній побудові та принципам організації збиральної поверхні модуля, яка є ключовою складовою запропонованої архітектури інтелектуальної багаторівневої енергозбиральної поверхні. Для моделювання структури використано декартове мозаїчне розбиття, що забезпечує модульність, регулярність та можливість масштабування приймальної площини.

На першому рівні ієрархічної організації кожна базова комірка реалізується у вигляді квадратного випромінювача, налаштованого поблизу власної резонансної частоти або сформованого з кількох піксельних піделементів, що дає змогу підвищити ефективність перетворення та поглинання електромагнітної енергії.

На другому рівні базові випромінювачі об'єднуються в підматриці розміром  $3 \times 3$ . Така конфігурація забезпечує формування узгоджених субмасивів із розширеною просторовою вибірковістю та покращеними характеристиками приймання.

Третій рівень організації передбачає об'єднання дев'яти підматриць другого рівня (також у форматі  $3 \times 3$ ), що формує масштабовану ієрархічну антенну надструктуру з розширеним кутовим охопленням і можливістю реалізації багатонапрямого збору енергії. Запропонована трирівнева організація забезпечує узгодженість між структурними елементами та підвищує ефективність просторового енергозбору (рис. 2).

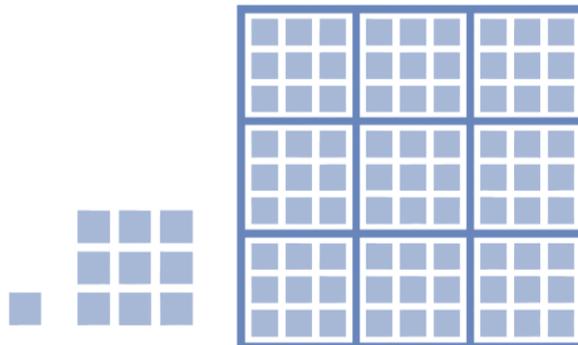


Рис. 2. Ієрархічна структура поверхні збирання енергії: перший, другий та третій рівні горизонтальної організації

Після опису горизонтальної організації системи розглянемо вертикальну структуру (рис. 3). У ній елементи підматриці  $3 \times 3$  підключені до мережі просторового формування променя без втрат із конфігурацією  $9 \times 9$ , що дозволяє ефективно узгоджувати фази та амплітуди сигналів. Під мережею формування променя розташовано двовимірний комбінатор потужності конфігурації 9:1. Його центральний вхід з'єднано з центральним виходом мережі формування променя, тоді як бічні входи під'єднуються до сусідніх підматриць. Така схема формує взаємопов'язану енергозбиральну структуру, що ілюструється на рисунку 4.



Рис. 3. Вертикальна структура підматриці з блоком формування напрямленості та фазовим керуванням



Рис. 4. Взаємозв'язок двох підматриць  $3 \times 3$  через комбінатор потужності

У цій конфігурації кожна підматриця не лише приймає енергію, але й частково передає її до суміжних елементів, забезпечуючи енергетичну інтеграцію між підмасивами. Таким чином, «ліва» підматриця  $3 \times 3$  живить «правий» комбінатор потужності, тоді як «права» підматриця живить «лівий» комбінатор.

На вихідному етапі сигнали з комбінаторів потужності надходять на відповідні випрямлячі, де електромагнітна енергія перетворюється у постійний струм. Для досягнення максимальної ефективності отримані джерела постійного струму з'єднуються у узгоджену енергетичну мережу, що мінімізує втрати та підвищує коефіцієнт корисної дії всієї системи.

Така багаторівнева та взаємопов'язана архітектура дозволяє досягти підвищеної ефективності збору енергії, а також забезпечує гнучкість у масштабуванні та адаптивності системи до змін умов навколишнього середовища.

На рис. 5 наведено діаграми спрямованості дальньої зони для підрешіток другого (а) та третього (б) рівнів організації. З рисунка видно, що діаграма спрямованості підрешітки третього рівня охоплює значно ширший кутовий простір порівняно з підрешіткою другого рівня. Підрешітки другого рівня доцільно використовувати у випадках, коли відомий напрямок або наявність конкретного передавача. Водночас підрешітки третього рівня є оптимальними для середовищ без чітко визначених або невідомих джерел випромінювання, оскільки забезпечують розширене просторове покриття.

На рис. 6 представлено результати моделювання рівнонаправленого кутового покриття, що додатково підтверджують ефективність об'єднання декількох променів у межах однієї структури. Такий підхід забезпечує стабільну потужність прийому сигналу в широкому діапазоні просторових напрямків, що є ключовим для ефективного збору енергії з навколишніх джерел.

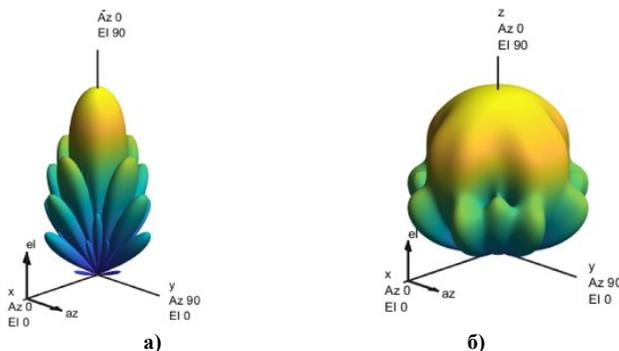


Рис. 5. Діаграми спрямованості підрешіток:  
а) – 2-го рівня; б) – 3-го рівня

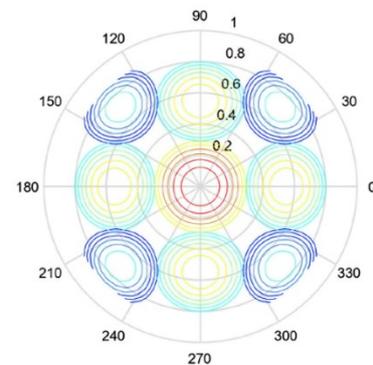


Рис. 6. Кутове покриття об'єднаних променів у межах системи збору енергії

Отримані результати демонструють, що запропонована архітектура належить до нового класу масштабованих рішень на основі антенних решіток, де поєднання трирівневої горизонтальної та вертикальної організації з матрицями формування променя дозволяє досягати високого коефіцієнта підсилення при контрольованій ширині променя. Така конфігурація може бути використана для створення інтелектуальних багаторівневих поверхонь збору енергії або «розумних оболонок», здатних ефективно вловлювати електромагнітну енергію з широкого кутового спектра.

На рис. 7 подано концептуальне зображення можливого практичного застосування – розгортання бездротової системи збору енергії на фасаді будівлі. Таке рішення відкриває перспективи інтеграції технологій енергозбирання в архітектурні конструкції, що сприятиме розвитку відновлюваної енергетики та підвищенню енергоефективності міських інфраструктур.

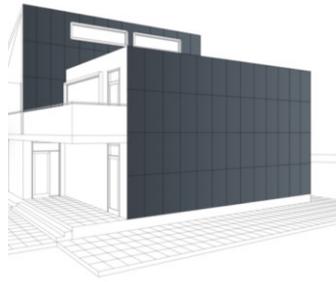


Рис. 7. Концепція розгортання системи збору енергії на стіні будівлі

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У даній роботі запропоновано та проаналізовано концепцію великомасштабного бездротового енергетичного колектора, реалізованого у вигляді електромагнітної метаповерхні з дворівневою організацією. Показано, що модульна структура приймальної площини та використання багаторівневого просторового сумування забезпечують ефективне акумулювання енергії та формування «енергетичного резонатора», який суттєво підвищує коефіцієнт корисної дії системи. Результати чисельного моделювання та напівнатурних випробувань підтвердили працездатність запропонованої архітектури, її широке кутове охоплення та високе підсилення за різних умов опромінення.

Перспективи подальших досліджень передбачають оптимізацію геометричних параметрів модульних елементів для підвищення щільності зібраної енергії, дослідження алгоритмів активного або напівактивного фазового керування для адаптивного формування променя, розширення робочого частотного діапазону та створення ширококутових збиральних поверхонь, інтеграцію енергозбирача з мікроелектронними перетворювачами й системами стабілізації вихідної потужності, а також виготовлення повномасштабного прототипу та експериментальне вивчення його характеристик у реальних умовах. Запропонований підхід формує основу для розвитку енергоавтономних телекомунікаційних і сенсорних систем та сприяє подальшому вдосконаленню технологій бездротового енергозбирання.

### Література

1. Аналіз антенних систем збору енергії для застосувань WiMAX та 5G / Л.В. Карпова, І.Р. Габруський // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Телекомунікації та радіотехніка. – 2024. – № 2. – С. 37–45.
2. Програмно-конфігуровані системи передавання, приймання та обробки інформації : монографія / Ю.М. Бойко, В.П. Ткачук, Л.В. Карпова. – Хмельницький : ХНУ, 2023. – 317 с.
3. Kumar M. An analytical framework of multisector rectenna array design for angular misalignment tolerant RF power transfer systems / M. Kumar, S. Kumar, A. Sharma // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2023. – Vol. 71. – P. 1835–1847.
4. Lin C. Hierarchical energy combining networks for large-scale wireless energy harvesting surfaces / C. Lin, Y. Zhang // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2024. – Vol. 72, № 4. – P. 4521–4534.
5. Фрактальні антени для бездротового енергозбирання / С.О. Тарасюк, В.В. Погорілий // Технічна електродинаміка. – 2021. – № 4. – С. 112–118.
6. Мікрохвильові ректенни для бездротового збору енергії / М.С. Хома, Л.О. Сорока // Електроніка та зв'язок. – 2019. – № 4(98). – С. 25–30.
7. Інтелектуальні реконфігуровані поверхні у бездротових мережах: стан та перспективи / О.Г. Петренко, Т.В. Кузьменко // Вісник Київського політехнічного інституту. Серія Радіотехніка. – 2022. – № 1. – С. 91–98.
8. Ефективність ректенних систем для живлення сенсорних пристроїв / О.С. Попович, В.П. Шевчук // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2021. – № 3(65). – С. 82–88.

### References

1. Analiz antenykh system zboru enerhii dlia zastosuvan WiMAX ta 5G / L.V. Karpova, I.R. Habruskyi // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. – 2024. – № 2. – S. 37–45.
2. Prohramno-konfiguruvani systemy peredavannia, pryimannia ta obrobky informatsii : monohrafiia / Yu.M. Boiko, V.P. Tkachuk, L.V. Karpova. – Khmelnytskyi : KhNU, 2023. – 317 s.
3. Kumar M. An analytical framework of multisector rectenna array design for angular misalignment tolerant RF power transfer systems / M. Kumar, S. Kumar, A. Sharma // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2023. – Vol. 71. – P. 1835–1847.
4. Lin C. Hierarchical energy combining networks for large-scale wireless energy harvesting surfaces / C. Lin, Y. Zhang // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2024. – Vol. 72, № 4. – P. 4521–4534.
5. Fraktalni anteny dlia bezdrotovoho enerhozbyrannia / S.O. Tarasiuk, V.V. Pohorylyi // Tekhnichna elektrodynamika. – 2021. – № 4. – S. 112–118.
6. Mikrohvylovi rektenny dlia bezdrotovoho zboru enerhii / M.S. Khoma, L.O. Soroka // Elektronika ta zviazok. – 2019. – № 4(98). – S. 25–30.
7. Intelktualni rekonfiguruvani poverkhni u bezdrotovykh merezhakh: stan ta perspektyvy / O.H. Petrenko, T.V. Kuzmenko // Visnyk Kyivskoho politekhnichnoho instytutu. Serii Radiotekhnika. – 2022. – № 1. – S. 91–98.
8. Efektyvnist rektennykh system dlia zhyvlennia sensorykh prystroiv / O.S. Popovych, V.P. Shevchuk // Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku. – 2021. – № 3(65). – S. 82–88.