

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ LORAWAN У ЗАВДАННЯХ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА ПЕРЕДКАРПАТТЯ

Б. І. РИМАР

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,
вул. Коцюбинського, 2, м. Чернівці, 58012
e-mail: rymar.bohdan@chnu.edu.ua

У представленій роботі здійснено огляд сучасних тенденцій та напрямів застосування технології LoRaWAN у завданнях точного землеробства. Наведено приклади із світової практики та оцінено перспективи її адаптації до умов Передкарпатського регіону України. Дослідження ґрунтується на детальному аналізі широкого кола джерел, включаючи міжнародні наукові публікації, практичні кейси реалізації мереж LoRaWAN у аграрному секторі різних країн та успішні ініціативи щодо цифровізації сільського господарства. Особлива увага приділяється перевагам технології LoRaWAN над іншими, зокрема великому радіусу дії, низькому енергоспоживанню, простоті розгортання мереж та можливості створення приватних IoT-інфраструктур. Дослідження містить порівняльний аналіз технічних характеристик LoRaWAN з іншими популярними бездротовими рішеннями на ринку, зокрема NB-IoT, Sigfox, Wi-Fi, LTE-M, враховуючи такі фактори, як дальність зв'язку, енергоефективність, пропускна здатність, надійність передачі даних, а також економічна доцільність їх використання у сільській місцевості, особливо у гірських та передгірських районах. Особливу увагу в роботі приділено аналізу агроекологічних та кліматичних умов Передкарпаття, зокрема рельєфу, особливостям ґрунтів (високий рівень кислотності, неоднорідність), що визначають специфіку ведення точного землеробства в регіоні. Виявлено, що застосування мережі LoRaWAN є оптимальним варіантом для ефективного вирішення завдань моніторингу кислотності ґрунтів, що дозволяє вчасно і точно реагувати на зміни параметрів середовища, економити ресурси та підвищувати врожайність. Представлена типова архітектура IoT-системи аграрного моніторингу, яка включає сенсорні пристрої, зокрема датчики вологості, кислотності, температури ґрунту, ілюзії передачі даних, а також хмарні платформи зберігання, обробки інформації та взаємодії із користувачем для агрономічного аналізу даних і оперативного управління процесами в господарстві. Детально описано схему та принцип функціонування даної системи, наведено рисунки та порівняльні таблиці, що ілюструють переваги використання LoRaWAN у порівнянні з іншими аналогічними технологіями. Робота містить практичні рекомендації щодо розгортання мереж LoRaWAN у Передкарпатті. У результаті проведеного огляду та аналізу зроблено висновок, що впровадження технології LoRaWAN є перспективним, економічно та технологічно виправданим рішенням, яке може забезпечити сталий розвиток аграрного сектора регіону, покращити екологічні показники сільського господарства та сприяти підвищенню конкурентоспроможності місцевих агровиробників на українському та міжнародному ринках.

Ключові слова: LoRaWAN, точне землеробство, LPWAN, Передкарпаття, кислотність ґрунту, бездротові сенсори, IoT, аграрний моніторинг, автономні датчики, цифрове сільське господарство.

Вступ. Точне землеробство - це сучасний підхід до управління агротехнологіями, який базується на використанні інформаційних технологій та даних про стан ґрунтів із високою просторовою та часовою роздільною здатністю. Метою точного землеробства є оптимізація використання ресурсів (добрив, води, засобів захисту рослин) та підвищення урожайності за рахунок точного виявлення неоднорідності умов на різних ділянках поля. Одним із ключових компонентів цієї концепції є Інтернет речей (IoT) - мережа взаємопов'язаних сенсорів та пристроїв, що збирають і передають дані про стан агроекосистеми в реальному часі. Серед технологій бездротової передачі даних особливої уваги в аграрному секторі набули LPWAN (Low-Power Wide-Area Network), які

забезпечують велику дальність зв'язку та низьке енергоспоживання. Найбільш поширеним представником LPWAN для сільського господарства являється технологія LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) (Aernouts et al., 2020; Bicomakuba1 et al., 2025) .

Матеріали та методи. LoRaWAN - це відкритий протокол мережевого рівня, що працює на базі модуляції LoRa у неліцензованому діапазоні частот. Він дозволяє пристроям передавати дані на великі відстані з мінімальними енергозатратами. Типовий радіус дії LoRaWAN у сільській місцевості становить до 15 км прямої видимості (Jeongwoo et al., 2019) , що у десятки разів перевищує дальність традиційних WLAN чи PAN технологій. Це відкриває можливості для моніторингу великих

площі сільгоспугідь за допомогою відносно невеликої кількості базових станцій (шлюзів). Крім того, LoRaWAN підтримує зіркоподібну топологію мережі, де численні сенсори

надсилають дані на шлюзи, а ті - до централізованого мережевого серверу (Levchenko et al.,2019).

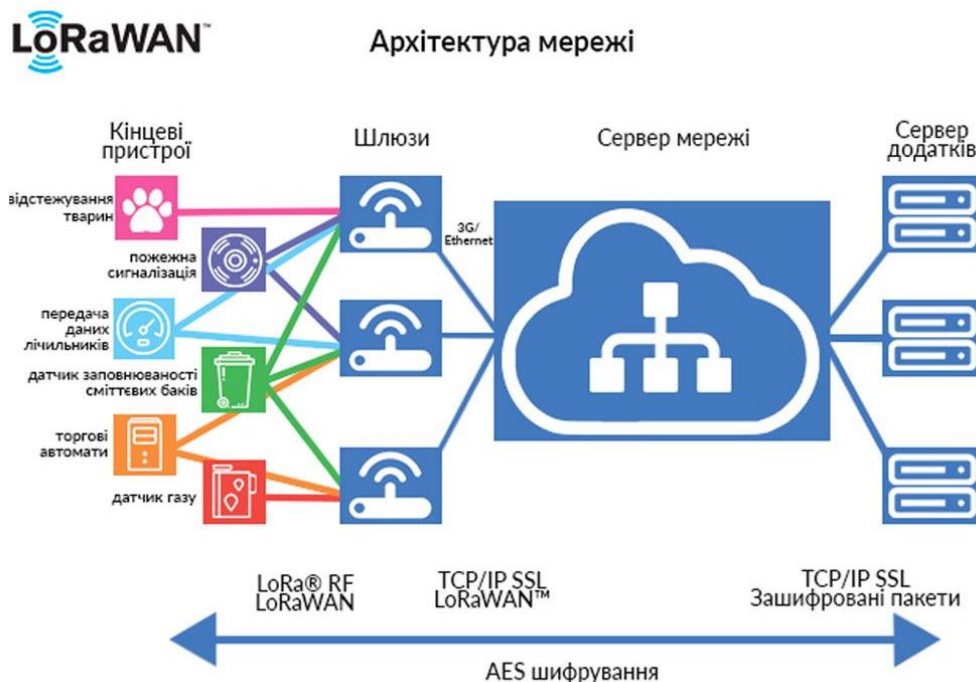


Рис 1. Архітектура мережі LoRaWAN

Fig 1. LoRaWAN network architecture

Така архітектура сприяє збільшенню часу автономної роботи датчиків. Технологія LoRaWAN належить до класу LPWAN, тож її найближчими аналогами є системи далекого радіозв'язку з низьким енергоспоживанням - передусім NB-IoT та Sigfox (Levchenko et al.,

2019). Водночас для ряду локальних задач в агросекторі можуть використовуватися і традиційніші бездротові протоколи ближнього радіусу дії - Wi-Fi, Bluetooth, Sigfox, LTE-M. Кожна з цих технологій має свої переваги (табл.1.).

Таблиця 1.

Порівняльний аналіз LPWAN технологій для точного землеробства

Table 1.

Comparative analysis of LPWAN technologies for precision agriculture

Характеристика	LoRaWAN	NB-IoT	Sigfox	LTE-M	Wi-Fi
Дальність дії	15 км	10 км	40 км	10 км	100м
Тривалість роботи від батареї	10 років	2 роки	10 років	2 роки	12 годин
Швидкість передачі даних	0,3 - 50 кбіт/с	До 66 кбіт/с	100 біт/с	100 Мбіт/с	1 Гбіт/с
Макс. корисне навантаження	242 байт	1280 байт	12 байт	1280 байт	46 Гбайт
Складність розгортання	Середня (потрібні шлюзи)	Низька (залежить від оператора)	Низька (залежить від оператора)	Низька (залежить від оператора)	Середня (потрібні точки доступу)
Можливість	Так	Ні	Ні	Ні	Так

приватних мереж					
Придатність для передачі типових агро даних	Висока (сенсорні дані)	Висока	Дуже низька (прості сповіщення)	Висока (комплексні дані, оновлення ПЗ)	Низька (для польових сенсорів через дальність)

Висока адаптивність LoRaWAN до різноманітних середовищ, порівняно з іншими LPWAN технологіями, такими як Sigfox, LTE-M та NB-IoT, робить її особливо ефективною для багатьох застосувань, включаючи моніторинг у сільському господарстві (Bicamumakuba1 et al., 2025).

Результати та їх обговорення. Світовий досвід застосування LoRaWAN у сільському господарстві вже достатньо широкий і демонструє ефективність цієї технології для різних напрямів точного землеробства. За останнє десятиліття з'явилася значна кількість наукових публікацій та пілотних проєктів, присвячених використанню мереж LoRaWAN для моніторингу стану ґрунтів, кліматичних умов, управління зрошенням, спостереження за станом тварин тощо. Один із перспективних напрямів - моніторинг параметрів ґрунту, таких як вологість, температура, вміст поживних елементів та pH за допомогою бездротових сенсорів.

Дослідження продемонструвало успішне розгортання приватної мережі LoRaWAN для контролю мікроклімату у теплицях (Білоус, 2017). В даному проєкті мережа сенсорів збирала дані про температуру, вологість ґрунту, електропровідність розчину та освітленість у промисловій теплиці, передаючи їх на сервер для подальшого аналізу. Система забезпечила стабільний збір даних і мала низьке енергоспоживання, що підтверджує придатність LoRaWAN для аграрних умов із наявністю перешкод та вимогою великої відстані зв'язку. Інше дослідження у Західній Європі присвячене використанню LoRaWAN у виноградарстві, а саме було розгорнуто мережу сенсорів на виноградниках для контролю вологості ґрунту та параметрів повітря, що дозволило оптимізувати режими зрошення на основі отриманих даних (Aernouts et al., 2020) . Такі кейси свідчать, що LoRaWAN успішно інтегрується в проєкти точного землеробства, забезпечуючи збирання критичних даних у реальному часі.

Окрім наукових експериментів, є багато практичних впроваджень LoRaWAN на фермерських господарствах. Як приклад можна розглянути компанії-члени LoRa Alliance, які діляться досвідом використання даної технології у тваринництві та бджільництві. Зокрема, мережі

LoRaWAN отримали широке застосування для моніторингу стану пасік. В прикладі розглядається відстеження температури та вологості у вуликах, активності бджіл та контроль за великою рогатою худобою за допомогою носимих трекерів на основі LoRaWAN, що передають місцезнаходження та фізіологічні параметри тварин (Lora Alliance;2020).

У рослинництві LoRaWAN-сенсори встановлюються на полях для вимірювання вологості ґрунту та прогнозування потреби в зрошенні, а також як частина систем моніторингу погодних умов та кислотності

Для реалізації рішень точного землеробства на базі LoRaWAN необхідний набір апаратних та програмних компонентів:

- Кінцеві пристрої (сенсори). Для сільського господарства розроблено широкий спектр сенсорів, здатних вимірювати різноманітні параметри, наприклад вологість, температуру, електропровідність (EC), кислотність (pH), вміст макроелементів (NPK) (Aernouts et al., 2020; Bicamumakuba1 et al., 2025).
- Шлюзи (Gateways). Шлюзи є мостами між кінцевими пристроями та сервером. Їх основні функції - прийом даних LoRa від сенсорів та передача їх на мережевий сервер через IP-мережу (Nowatzki et al., 2021).
- Мережевий сервер (Network Server), який відповідає за управління мережею, автентифікацію пристроїв, дедуплікацію пакетів даних., динамічне управління швидкістю передачі даних (ADR) та маршрутизацію даних на відповідний сервер додатків.

Сервер додатків (Application Server). Даний сервер отримує розшифровані дані від мережевого сервера та відповідає за їх подальшу обробку, зберігання, аналіз та візуалізацію. Він надає користувачам інтерфейси для доступу до даних (веб-панелі, мобільні додатки), а також може мати API для інтеграції з іншими системами управління системою або аналітичними платформами.

Вагомим аргументом на користь LoRaWAN є позитивні результати, отримані фермерами після впровадження технології. Так, у рамках одного з кейсів точного землеробства (Codeluppi et. al; 2020) було встановлено мережу LoRaWAN

з бездротовими датчиками на полях для відстеження вологості, температури ґрунту та рівня поживних речовин, а також автоматизовано систему поливу на основі отриманих даних. Ферма обладнала LoRaWAN-метеостанцію для отримання локального прогнозу погоди. За підсумками сезону, впровадження LoRaWAN урожайність зросла на 15%, а споживання води для зрошення скоротилося на 20%. Результат пов'язаний з тим, що точковий полив на основі даних ґрунтових датчиків дозволив уникнути як недополиву, так і зайвих витрат води, а оптимальне живлення рослин підвищило їх продуктивність. Такі результати збігаються із загальносвітовою

тенденцією, впровадження smart farming рішень на основі LoRaWAN здатне забезпечити до 50% економії води та помітно підвищити врожайність за рахунок точного дозування ресурсів (LoRa Alliance; 2024). Такий підхід особливо актуальний для посушливих регіонів або там, де вода - дефіцитний ресурс. LoRaWAN надає можливість розмістити датчики в усіх ключових зонах поля, навіть якщо його площа складає десятки гектарів, і всі вони охоплюються сигналом від єдиного шлюзу. При цьому акумуляторного живлення датчиків вистачає на роки, тож система потребує мінімального обслуговування.

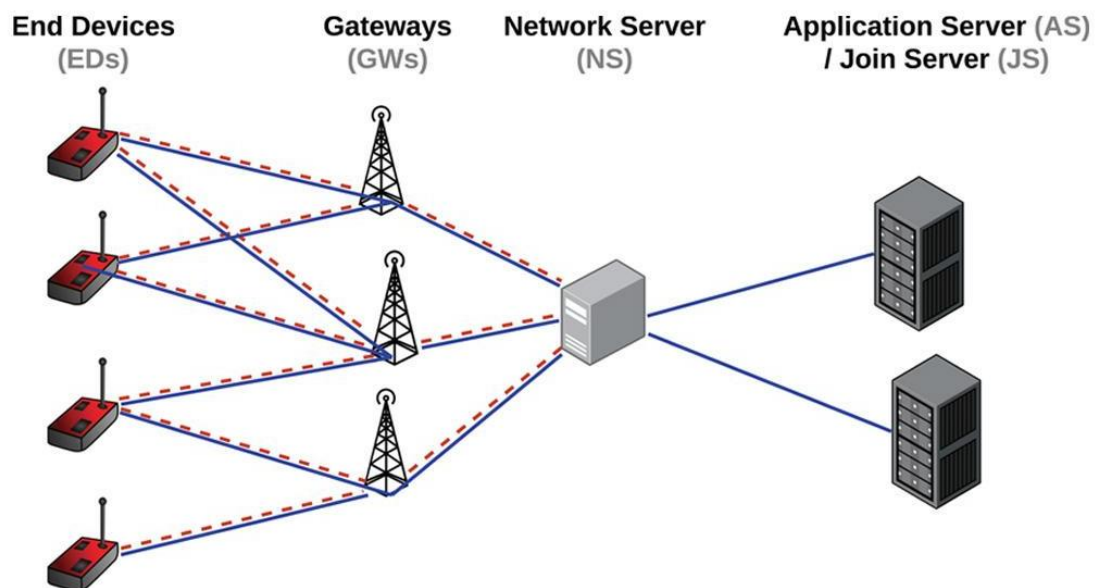


Рис 2. Архітектура мережі LoRaWAN для точного землеробства

Fig2. LoRaWAN network architecture for Precision Agriculture

Передкарпаття - це передгірна зона Українських Карпат, що характеризується хвилястим рельєфом та значним зволоженням, де переважають дерново-підзолисті ґрунти. Передкарпатський регіон України, що охоплює Чернівецьку, Івано-Франківську та Львівську області, має свої унікальні агропромислові особливості, стан ґрунтового покриву та топографічні характеристики, які визначають специфічні потреби та виклики для місцевих аграріїв. Технологія LoRaWAN може запропонувати ефективні рішення для більшості з проблем.

Передкарпаття, включає складний рельєф та потенційні проблеми зі стабільністю традиційного зв'язку, що робить його ідеальним полігоном для демонстрації переваг LoRaWAN. За даними XI туру агрохімічного обстеження

земель с/г призначення у Чернівецькій області середньозважений показник рН сольової витяжки становив 5,8, що відповідає близькій до нейтральної реакції. Однак, 2,4 % площі займають кислі ґрунти, сильнокислих (рН 4,1-4,5), 6,5% середньокислі (рН 4,6-5,0) та слабокислих (рН 5,1-5,5) - 20,2%. (Зайцев та ін.; 2024). В Івано-Франківській області ситуація з кислотністю ґрунтів сільськогосподарських угідь загостерена, оскільки характеризується кислими та дуже кислими ґрунтами, що негативно впливає на їх родючість та вимагає своєчасного проведення заходів з вапнування (Давидюк та ін.; 2022). Враховуючи, що оптимальний рівень рН для переважної більшості сільськогосподарських культур знаходиться в діапазоні 6,0-7,5, моніторинг кислотності ґрунтів в реальному часі є критично важливим.

Таблиця 2.

Зведення ключових агрохімічних показників ґрунтів Передкарпатського регіону (Чернівецька, Івано-Франківська, Львівська області) за даними XI туру агрохімічного обстеження

Table 2.

Summary of key agrochemical indicators of soils of the Ciskarpattia region (Chernivtsi, Ivano-Frankivsk, Lviv regions) according to the data of the XI round of agrochemical survey

Область	Переважаючі типи ґрунтів	Ключові агрохімічні показники (рН, проблемні аспекти)
Чернівецька	Дерново-підзолисті, сірі лісові, чорноземи опідзолені.	Середньозважений рН 5,8. Значні площі кислих ґрунтів: 2,4% сильнокислих (рН 4,1-4,5), 6,5% середньокислих (рН 4,6-5,0), 20,2% слабокислих (рН 5,1-5,5).
Івано-Франківська	Буроземно-підзолисті, дерново-підзолисті, гірські буроземи.	Значна поширеність кислих та дуже кислих ґрунтів, що потребують вапнування. Низька природна родючість частини ґрунтів.
Львівська	Дерново-підзолисті, сірі лісові, лучні, торфовища.	Переважають землі з нейтральною реакцією ґрунтового розчину (31,3%), але наявні також кислі ґрунти.

Проблеми підкислення ґрунтів в областях Передкарпаття створюють чітку потребу в точному та регулярному моніторингу рН. LoRaWAN-сенсори рН пропонують технологічне рішення для даної специфічної регіональної проблеми (Aernouts et al. ; 2020). Традиційні методи аналізу ґрунту є дорогавартісними, трудомісткими та проводяться не так часто, як це

потрібно для оперативного реагування. Автоматизований моніторинг за допомогою LoRaWAN-сенсорів дозволить фермерам отримувати актуальні дані про рН в різних точках поля, що є основою для прийняття своєчасних рішень щодо вапнування та оптимізації живлення рослин.

Таблиця 3.

LoRaWAN-сумісні сенсори для точного землеробства в Передкарпатті

Table 3.

LoRaWAN-compatible sensors for precision agriculture in the Carpathian Mountains

Тип сенсора	Контрольовані параметри	Орієнтовний діапазон цін (грн)	Примітки щодо придатності для умов Передкарпаття
Вологість ґрунту	Об'ємний вміст води (VWC)	750-10500	Широкий діапазон температур, IP66/IP67/IP68
Температура ґрунту	Температура ґрунту на різній глибині	6900-10500	від -40 до +80°C, IP66/IP67
Електропровідність (EC) ґрунту	Рівень засоленості, вміст розчинних солей	6900-20000	0 до 23 dS/m, IP66/IP67
рН ґрунту	Кислотність/лужність ґрунтового розчину	5400-10000	IP67, стійкість до корозії
NPK ґрунту	Вміст азоту (N), фосфору (P), калію (K)	8000	IP68 для зонда, IP65 для корпусу
Температура повітря	Температура навколишнього	2000	від -40 до +85 °C, IP65/IP67

	середовища		
Вологість повітря	Відносна вологість повітря	2000	0 до 100 %RH, IP65/IP67
Атмосферний тиск	Барометричний тиск	6500	IP67
Інтенсивність світла	Рівень освітленості (PAR, УФ)	450	Для спеціалізованих досліджень

Дослідження показують, що правильне планування мережі, зокрема розміщення шлюзів на пагорбах або інших височинах, дозволяє значно покращити покриття в горбистій місцевості (Minew ; 2025). Поєднання великої дальності дії LoRaWAN та її здатності працювати в умовах складного рельєфу Передкарпаття робить дану технологію особливо ефективною, там, де технології типу Wi-Fi або Bluetooth є неефективними через малу дальність, а покриття мобільним інтернетом може бути обмеженим, нестабільним або взагалі відсутнім (555tv , 2025).

Висновки. Проведений технологічний аналіз та обґрунтування перспектив застосування технології LoRaWAN у задачах точного землеробства Передкарпаття дозволяють зробити низку важливих висновків. Технологія LoRaWAN демонструє унікальне поєднання характеристик, що роблять її привабливою для аграрного сектору Передкарпаття. Ключовими перевагами є дальність зв'язку, надзвичайно низьке енергоспоживання, відносно низька вартість розгортання та експлуатації, а також здатність ефективно функціонувати в умовах складного рельєфу, характерного для Передкарпаття. Можливість створення приватних мереж забезпечує незалежність від операторів стільникового зв'язку, покриття яких у сільській місцевості може бути недостатнім. Застосування LoRaWAN відкриває широкі можливості для моніторингу критично важливих агрономічних параметрів, таких як вологість, температура, електропровідність та кислотність ґрунту. Це, в свою чергу, дозволяє вирішувати критичні проблеми землеробства в регіоні, пов'язані з поширеністю кислих ґрунтів та необхідністю оптимізації водного режиму.

Впровадження систем точного землеробства на базі LoRaWAN має значний потенціал для підвищення ефективності сільськогосподарського виробництва в Передкарпатті. Очікується суттєве економічна

вигода за рахунок зниження витрат на ресурси, зокрема воду, добрива, засоби захисту рослин, підвищення врожайності та якості продукції, а також зменшення трудових витрат. Окрім економічних переваг, технологія сприяє екологічній стійкості агровиробництва шляхом зменшення хімічного навантаження на довкілля та раціонального використання природних ресурсів.

Незважаючи на очевидні переваги, існують певні технічні, економічні та організаційні виклики, які потребують уваги. Це, зокрема, забезпечення стабільного покриття в умовах складного рельєфу, потреба в початкових інвестиціях та наявність кваліфікованих кадрів. Для успішного подолання викликів та повного розкриття потенціалу технології необхідні подальші цілеспрямовані дослідження, розробка та реалізація пілотних проєктів, а також створення сприятливих умов для широкого впровадження LoRaWAN, включаючи державну підтримку та співпрацю між наукою, бізнесом та аграріями.

Підсумовуючи, технологія LoRaWAN може стати важливим інструментом для модернізації, підвищення конкурентоспроможності та забезпечення сталого розвитку аграрного сектору Передкарпаття. Її впровадження відповідає як локальним викликам, з якими стикаються сільгоспвиробники регіону, так і глобальним трендам розвитку "розумного" фермерства та цифровізації сільського господарства. Подальші кроки у напрямку освоєння цієї технології сприятимуть переходу до ефективних, економічно вигідних та екологічно безпечних методів ведення агробізнесу в унікальних умовах Передкарпатського регіону.

Конфлікт інтересів. Автор заявляє, що дослідження проводилося за відсутності будь-яких комерційних або фінансових відносин, які можна було б витлумачити як потенційний конфлікт інтересів.

Список літератури:

1. 555tv. (2025). Карта покриття 4G/3G мобільних GSM операторів України. Retrieved June 11, 2025, from <https://555tv.com.ua/uk/karta-pokrytiya-4g-3g-operatorov-ukrainy>
2. Aernouts, M., Singh, R., & Weyn, M. (2020). Leveraging LoRaWAN Technology for Precision Agriculture in Greenhouses. *Sensors*, 20(7), 1827. <https://doi.org/10.3390/s20071827>
3. Білоус, О. С. (2017). Автоматизовані системи управління кліматом теплиці. *Ukrainian Journal of Educational Studies and Information Technology*, 5(1), 40-43. <https://doi.org/10.32919/uesit.2017.01.40-43>
4. Bicomakuba, E., Habineza, E., Samsuzzaman, M. N. R., & Chung, S.-O. (2025). IoT-enabled LoRaWAN gateway for monitoring and predicting spatial environmental parameters in smart greenhouses: A review. *Precision Agriculture and Sustainable Technologies*, 7(1). <https://doi.org/10.22765/pastj.20250003>
5. Choo, J., Yoon, J., Ji, M., & Jang, M. (2019). LoRa-based visual monitoring scheme for agriculture IoT. *IEEE Sensors Applications Symposium*. <https://doi.org/10.1109/SAS.2019.8706100>
6. Codeluppi, G., Cilfone, A., Davoli, L., & Ferrari, G. (2020). LoRaFarM: A LoRaWAN-based smart farming modular IoT architecture. *Sensors*, 20(7), 2028. <https://doi.org/10.3390/s20072028>
7. Давидюк, Г. В., Шкарівська, Л. І., Клименко, І. І., Довбаш, Н. І., & Дем'янюк, О. С. (2022). Еколого-агрохімічна оцінка стану агроландшафтів Івано-Франківської обл. *Agroecological Journal*, (1). <https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2022.255188>
8. Jooby. (2023). Comparing IoT Gateway Protocols: WiFi, LoRaWAN, and Zigbee. Retrieved May 2025, from <https://store.jooby.eu/comparing-iot-gateway-protocols-wifi-lorawan-and-zigbee/>
9. Levchenko, P., Bankov, D., Khorov, E., & Lyakhov, A. (2022). Performance comparison of NB-Fi, Sigfox, and LoRaWAN sensors. *Sensors*, 22(24), 9633. <https://doi.org/10.3390/s22249633>
10. LoRa Alliance. (2020). Why LoRaWAN is the Logical Choice for Crop Production Monitoring Solutions. https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/LA_WhitePaper_SmartAg_0520_v2.pdf
11. Minew. (2025). LoRaWAN Range: How Far Can It Reach & How to Maximize Its Coverage. Retrieved June 11, 2025, from <https://www.minew.com/lorawan-range-overview/>
12. Nebra Ltd. (2023). LoRa® Technology Revolutionises Agriculture: A Case Study (FarmX). Retrieved June 2025, from <https://www.nebra.com/pages/agriculture>
13. Nowatzki, J. (2021). Basics of LoRa Technology for Crop and Livestock Management. NDSU Agriculture Extension. Retrieved May 2025, from <https://www.ndsu.edu/agriculture/extension/publications/basics-lora-technology-crop-and-livestock-management>
14. Trackpac. (2025). Smart Agriculture IoT Sensors | LoRaWAN Farm Monitoring Solutions. Retrieved June 11, 2025, from <https://trackpac.io/sensors/lorawan-smart-agriculture/>
15. Зайцев, Ю. О., Гунчак, М. В., & Романова, С. А. (2022). Стан родючості ґрунтів Чернівецької обл. *Агроєкологічний журнал*, (4). <https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2022.273250>

References:

1. 555tv. (2025). Coverage Map of 4G/3G Mobile GSM Operators in Ukraine. Retrieved June 11, 2025, from <https://555tv.com.ua/uk/karta-pokrytiya-4g-3g-operatorov-ukrainy>
2. Aernouts, M., Singh, R., & Weyn, M. (2020). Leveraging LoRaWAN Technology for Precision Agriculture in Greenhouses. *Sensors*, 20(7), 1827. <https://doi.org/10.3390/s20071827>
3. Bicomakuba, E., Habineza, E., Samsuzzaman, M. N. R., & Chung, S.-O. (2025). IoT-enabled LoRaWAN gateway for monitoring and predicting spatial environmental parameters in smart greenhouses: A review. *Precision Agriculture and Sustainable Technologies*, 7(1). <https://doi.org/10.22765/pastj.20250003>
4. Bilous, O. S. (2017). Automated greenhouse climate control systems. *Ukrainian Journal of Educational Studies and Information Technology*, 5(1), 40-43. <https://doi.org/10.32919/uesit.2017.01.40-43>
5. Choo, J., Yoon, J., Ji, M., & Jang, M. (2019). LoRa-based Visual Monitoring Scheme for Agriculture IoT. *IEEE Sensors Applications Symposium*. <https://doi.org/10.1109/SAS.2019.8706100>
6. Codeluppi, G., Cilfone, A., Davoli, L., & Ferrari, G. (2020). LoRaFarM: A LoRaWAN-based smart farming modular IoT architecture. *Sensors*, 20(7), 2028. <https://doi.org/10.3390/s20072028>
7. Davydiuk, G. V., Shkarivska, L. I., Klymenko, I. I., Dovbash, N. I., & Demianyuk, O. S. (2022). Ecological and agrochemical assessment of agro-landscapes in Ivano-Frankivsk region. *Agroecological Journal*, (1). <https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2022.255188>
8. Jooby. (2023). Comparing IoT Gateway Protocols: WiFi, LoRaWAN, and Zigbee. Retrieved May 2025, from <https://store.jooby.eu/comparing-iot-gateway-protocols-wifi-lorawan-and-zigbee/>
9. Levchenko, P., Bankov, D., Khorov, E., & Lyakhov, A. (2022). Performance Comparison of NB-Fi, Sigfox, and LoRaWAN Sensors. *Sensors*, 22(24), 9633. <https://doi.org/10.3390/s22249633>
10. LoRa Alliance. (2020). Why LoRaWAN is the Logical Choice for Crop Production Monitoring Solutions. https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/LA_WhitePaper_SmartAg_0520_v2.pdf
11. Minew. (2025). LoRaWAN Range: How Far Can It Reach & How to Maximize Its Coverage. Retrieved June 11, 2025, from <https://www.minew.com/lorawan-range-overview/>
12. Nebra Ltd. (2023). LoRa® Technology Revolutionises Agriculture: A Case Study (FarmX). Retrieved June 2025, from <https://www.nebra.com/pages/agriculture>
13. Nowatzki, J. (2021). Basics of LoRa Technology for Crop and Livestock Management. NDSU Agriculture

- Extension. Retrieved May 2025, from <https://www.ndsu.edu/agriculture/extension/publications/basics-lora-technology-crop-and-livestock-management>
14. Trackpac. (2025). Smart Agriculture IoT Sensors | LoRaWAN Farm Monitoring Solutions. Retrieved June 11, 2025, from <https://trackpac.io/sensors/lorawan-smart-agriculture/>
15. Zaitsev, Yu. O., Gunchak, M. V., & Romanova, S. A. (2022). Soil fertility status of Chernivtsi region. *Agroecological Journal*, (4). <https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2022.273250>

PROSPECTS OF APPLICATION OF LORAWAN TECHNOLOGY IN PRECISION AGRICULTURE TASKS IN THE CARPATHIAN REGION

B. I. Rymar

*Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,
Ukraine, 58012, Chernivtsi, Kotsiubynsky 2 Str.
e-mail: rymar.bohdan@chnu.edu.ua*

The present study reviews current trends and applications of LoRaWAN technology in precision agriculture. It provides examples from global practice and assesses the prospects for its adaptation to the conditions of Ukraine's Precarpathian region. The research is based on a detailed analysis of a wide range of sources, including international scientific publications, practical case studies of LoRaWAN network deployments in the agricultural sector of various countries, and successful initiatives for digitalizing agriculture. Special attention is paid to the advantages of LoRaWAN over other technologies—particularly its long range, low energy consumption, ease of network deployment, and the ability to create private IoT infrastructures. The study offers a comparative analysis of LoRaWAN's technical characteristics against other popular wireless solutions on the market, including NB-IoT, Sigfox, Wi-Fi, and LTE-M, taking into account factors such as communication range, energy efficiency, throughput, data reliability, and the economic feasibility of their use in rural areas, especially in mountainous and foothill regions. Particular focus is given to the agro-ecological and climatic conditions of the Precarpathian region—its topography and soil characteristics (high acidity, heterogeneity)—which determine the specifics of implementing precision agriculture there. It has been shown that the deployment of LoRaWAN networks is an optimal solution for effective soil-acidity monitoring, enabling timely and accurate responses to environmental changes, conserving resources, and increasing crop yields. A typical architecture of an IoT-based agricultural monitoring system is presented, comprising sensor devices (soil-moisture, pH, and temperature sensors), data-transmission gateways, and cloud platforms for data storage, processing, and user interaction to support agronomic data analysis and real-time farm management. The system's design and operating principles are described in detail, supported by figures and comparative tables illustrating the benefits of LoRaWAN versus other similar technologies. Practical recommendations for deploying LoRaWAN networks in the Precarpathian region are provided. Based on the review and analysis, it is concluded that implementing LoRaWAN technology represents a promising, economically and technologically justified solution that can foster the sustainable development of the region's agricultural sector, improve its environmental performance, and enhance the competitiveness of local producers on both Ukrainian and international markets.

Keywords: LoRaWAN; precision agriculture; LPWAN; Precarpathian region; soil acidity; wireless sensors; IoT; agricultural monitoring; autonomous sensors; digital agriculture

Отримано редколегією 13.05.2025р.

ORCID ID

Богдан Римар: <https://orcid.org/0009-0007-2925-4812>