

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ЛОКАЦІЙ ГРИЗУНІВ НА ПОЛЯХ ДЛЯ ОРГАНІЗАЦІЇ ЗАХИСНИХ ЗАХОДІВ В АГРОНОМІЇ

М. О. Кіктєв, кандидат технічних наук, доцент

Д. А. Градобоєв, аспірант

О. О. Опришко, кандидат технічних наук, доцент

А. А. Кармацьких, студентка

Д. О. Мельник, студент

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: d.gradoboev@nubip.edu.ua

Анотація. *Однією з головних проблем аграрного сектору України є зниження врожайності через вплив шкідників, зокрема мишоподібних гризунів. За оцінками експертів, в Україні щорічні втрати врожаю від гризунів можуть становити до 20 % в залежності від рівня популяції шкідників. Відповідно, пошкодження зернових культур через активність гризунів у 2020 році оцінювалося в понад 1,2 мільйона тон, що у фінансовому вираженні становить більше 400 мільйонів гривень (за даними Міністерства аграрної політики та продовольства України). Результатами статті є підготовка та аналіз даних в результаті моніторингу рельєфу місцевості для ідентифікації курганів, створених гризунами. Виконано аналіз мікрорельєфу і побудову його DBSCAN моделі з використанням синтетичних LiDAR-даних, кластеризацію аномальних підвищень методом та збереження результатів для подальшого аналізу з використанням мови програмування R.*

Ключові слова: *поля, гризуни, ідентифікація нор, рельєф, БПЛА, LiDAR, аналіз даних, машинне навчання, мова R*

Актуальність. Шкода, якої завдають гризуни зерновим культурам, є досить різноманітною. Вони можуть викопувати висіяне зерно, поїдати проростки, підгризати стебла, зрізати й об'їдати колосся тощо. Розмір втрат урожаю значною мірою залежить від чисельності шкідників. У роки масового розмноження гризунів наслідки можуть бути катастрофічними. Наприклад, у 1914 році на території сучасної України полівки знищили 80 % усіх посівів жита та пшениці. У Чехословаччині в 1950-х роках озима пшениця зазнала пошкоджень від гризунів на 22–69 %, жито – на 19–72 %, ячмінь – на 8,5–15 %. Однак навіть у роки, коли їхня чисельність є середньою, шкода може бути чималою. Підряд Мишоподібні є

найважливішим за кількістю шкідливих видів і завданою ними шкодою. До шкідників належать сліпак звичайний (*Spalax microphthalmus* Güld.), хом'як звичайний (*Cricetus cricetus* L.), водяна полівка (*Arvicola terrestris*), європейська (*Clethrionomys glareolus* Schr.), звичайна (*Microtus arvalis* Pall.), східноєвропейська (*M. levis*) та суспільна (*M. socialis*) полівки. У південно-східній Австралії хатня миша (*Mus domesticus*) в окремі роки знижує урожай пшениці на кілька відсотків, як показано в роботі Glen Saunders (2010) в [1]. Збитки у виробництві зерна в Каліфорнії лише від каліфорнійського ховраха (*Spermophilus beecheyi*) становлять від 8 до 12 мільйонів доларів на рік за даними Karen Gebhardt (2011) в [2]. Навіть незначна популяція гризунів є небезпечною, зокрема звичайні полівки розмножуються 4–6 разів на рік, народжуючи по 4–8 дитинчат за один виводок, як показано в роботі Budhan S. Pukazhenthі (2024) в [3]. Відповідно питання ідентифікації мишоподібних гризунів на полях є актуальним з огляду на перспективи збереження врожаю.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Поведінку різних видів мишоподібних гризунів в центральній Європі досліджувалось в роботі Marta Heroldová (2011) в [4] де порівнювали характер ушкодження від різних типів мишей а саме лісних, польових та карликових польових. Авторами було показано істотну різницю щодо схеми враження рослин, це відповідно ускладнить ідентифікацію шкідника за характером ураження, особливо з урахуванням можливості одночасного присутності на полі кількох різних типів мишоподібних шкідників. Інший підхід щодо ідентифікації наявності гризунів на полях на прикладі лугових собачок (*Synomys ludovicianus*) показано в роботі Sean P. Kearney (2023) в [5]. При дослідженнях автори з використанням БПЛА шукали не тварин, а їх нори як безпосередньо у видимому діапазоні, так і за враженням рослин з використанням індексів вегетації. Попри позитивні результати автори мали складнощі з вибором активних нор, а також із впливом на ці споруди господарської діяльності в рослинницькій галузі, тобто при моніторингу потрібно враховувати можливу динаміку об'єктів. У роботі Hussein K. Chlaib (2014) в [6] проводились масштабні дослідження структури нор гризунів з використанням георадару щодо їх можливого

впливу на споруди. Аналогічні дослідження стосовно впливу гризунів на стан пасовищ в Китаї проводилися в роботі Joseph P. Lambert (2025) в [7], де вивчали вплив отрутохімікатів, і відповідно також використовували наземні обстеження. Попри переконливі результати такі наземні дослідження погано масштабуються і навряд чи прийнятні в аграрній галузі з урахуванням потрібних площ для обстеження.

Проте в цих роботах наведено, що польові миші на зимовий період будують сховища характерної форми курганів. Результати вивчення цих споруд представлено в роботі Laura Godó (2025) в [8], де показано вплив цих споруд на рослинність, і відповідно можливість ідентифікації шкідника по характеру змін рослинності. Тобто результати Laura Godó підтверджують висновки Sean P. Kearney, проте шкода від гризунів може стати за великою до того часу, як буде можливо здійснити ідентифікацію за зміною стану рослинних насаджень. Дослідження курганів, збудованих гризунами, проводилися в роботі D. Simeonovska-Nikolova (2014) в [9], де було проведено вимірювання геометричних розмірів цих курганів в Болгарії та Молдові. Авторами встановлено, що висота кургану може становити в середньому 30 см, а ширина порядку метра.



Рис. 1. Курган створений мишами на полі

[<https://agrodopomoga.com.ua/news/myshi-i-drugie-gryzuny-na-pole-chto-delat>]

Кургани миші створюють для накопичення припасів на зимовий період і їх наявність свідчить про присутність гризунів на полі. Відповідно при ідентифікації таких споруд можна точково вносити хімічні засоби захисту, зокрема з використанням безпілотних літальних апаратів та роботизованих платформ.

Мета дослідження – розробка методики виявлення мишиних курганів за результатами дистанційного моніторингу.

Матеріали та методи дослідження. Виявлення гризунів у сільськогосподарських угіддях є критично важливим для мінімізації втрат урожаю. Ефективна ідентифікація потребує комплексного підходу, що поєднує різні методи для підвищення точності визначення місць скупчення гризунів та оцінки їхньої чисельності (табл. 1).

1. Класифікація методів ідентифікації гризунів у польових умовах

Аналіз слідів життєдіяльності. Гризуни залишають характерні сліди своєї присутності, які можуть слугувати маркерами їхньої активності:	<ul style="list-style-type: none">○ Екскременти. Визначення виду гризунів за формою та розміром екскрементів є одним із найпростіших методів моніторингу.○ Пошкодження рослин. Сліди зубів на коренях, стеблах, листках та зернових колосках допомагають встановити видову приналежність шкідників.○ Підземні тунелі та нори. Особливості будови нор (глибина, діаметр входу, розгалуженість) можуть свідчити про конкретний вид гризунів.○ Залишки корму. Гризуни часто залишають купи злаків або інших продуктів харчування, що може вказувати на рівень їхньої активності.
Використання фотопасток. Камери з датчиками руху дозволяють автоматично реєструвати активність гризунів у нічний час.	Це дає змогу: <ul style="list-style-type: none">○ Отримати точні дані про видовий склад популяції гризунів.○ Визначити пікові періоди їхньої активності.○ Аналізувати поведінкові особливості шкідників у природних умовах.
Грунтові радари та геофізичні методи. Георадарні дослідження дозволяють отримати	Ця технологія є перспективною для досліджень у великих масштабах і допомагає: <ul style="list-style-type: none">○ Визначити структуру підземних сховищ гризунів.○ Оцінити рівень загрози руйнування ґрунтового покриву.

тривимірні моделі нір, визначити їхню глибину та розгалуженість.	<ul style="list-style-type: none">○ Виявити зв'язки між популяційною динамікою гризунів та ерозійними процесами в агроєкосистемах.
Акустичний моніторинг.	Використання спеціалізованих мікрофонів дозволяє реєструвати: <ul style="list-style-type: none">○ Звуки, що видають гризуни під час копання нір.○ Акустичні сигнали, які вони використовують для комунікації.○ Шумове забруднення, спричинене переміщенням колоній гризунів.
Феромонні пастки.	Деякі види гризунів реагують на феромонні приманки, що дає змогу <ul style="list-style-type: none">○ Оцінити чисельність гризунів у конкретній локації.○ Визначити статеве співвідношення популяції.○ Дослідити територіальну поведінку шкідників.
Біомаркери та ДНК-аналіз. Генетичні методи дозволяють визначати присутність певних видів гризунів шляхом аналізу залишків їхньої ДНК у ґрунті, воді або на рослинах:	<ul style="list-style-type: none">○ Метагеномний аналіз допомагає ідентифікувати навіть невеликі популяції шкідників.○ Специфічні біомаркери дозволяють диференціювати види гризунів за слідами їхньої життєдіяльності.○ Цей метод особливо корисний для моніторингу важкодоступних територій, де традиційні методи можуть бути малоефективними.
Лазерне сканування поверхні.	Лідарні технології допомагають аналізувати мікрорельєф поля та виявляти: <ul style="list-style-type: none">○ Деформації ґрунтової поверхні, спричинені діяльністю гризунів.○ Розташування активних нор та курганів.○ Взаємозв'язки між пошкодженнями ґрунту і змінами вегетаційного покриву.

Кожен із цих методів має свої переваги і обмеження, тому найбільш ефективним є поєднання кількох технологій у комплексних системах моніторингу. У нашому дослідженні ми обрали метод лазерного моніторингу [10] для обстеження поверхні і подальшої ідентифікації нор гризунів. Метод потребує використання спеціалізованого обладнання – датчика Lidar. Приклад використання цього метода

на основі лазерної хмари точок для побудови маршруту робота в саду показаний в статті [11].

Методи реалізації проекту. У цьому дослідженні було виконано аналіз мікрорельєфу з використанням синтетичних LiDAR-даних для ідентифікації курганів, створених гризунами. Використані методи включають генерацію .las файлу (додаток 1), побудову цифрової моделі рельєфу (DEM), кластеризацію аномальних підвищень методом DBSCAN та збереження результатів у форматі .csv для подальшого аналізу.

Створення LiDAR-файлу. Цей етап дозволяє згенерувати синтетичний .las файл, що містить хмару точок з реалістичним мікрорельєфом, включаючи штучні кургани. Генерацію файлу, а не реальні дані обрано з таких причин:

- Обмежений доступ до реальних LiDAR-даних для сільськогосподарських територій.
- Можна змодельовати кургани з відомими характеристиками та перевірити точність методів їх виявлення.
- Можна легко змінювати параметри, такі як висота, кількість і розмір курганів.
- Придатність для тестування алгоритмів – генеровані дані дозволяють перевірити роботу алгоритмів без впливу шумів реального середовища.

Методика генерації даних. У процесі виконання проекту згенеровано рівномірний набір точок у межах поля розміром 100×100 метрів. До кожної точки було додано базову висоту з невеликим випадковим шумом для імітації природного рельєфу. Виконано моделювання курганів гризунів, використовуючи 10 гаусових підвищень з випадковими центрами, радіусами (від 3 до 8 метрів) і висотами (від 0.5 до 1.5 метрів), а також збережено точки у форматі .las для подальшої обробки.

У результаті отримано файл `synthetic_lidar.las`, що містить 100 000 точок із змодельованим рельєфом. При цьому кургани чітко виділяються у висотному профілі.

Побудова цифрової моделі рельєфу (DEM). Цей етап використовується для того, щоб перетворити хмару точок на цифрову модель рельєфу для подальшого

аналізу. Цифрова модель рельєфу (DEM) – це 2D-репрезентація рельєфу поверхні (рис. 2), де кожному пікселю відповідає певна висота.

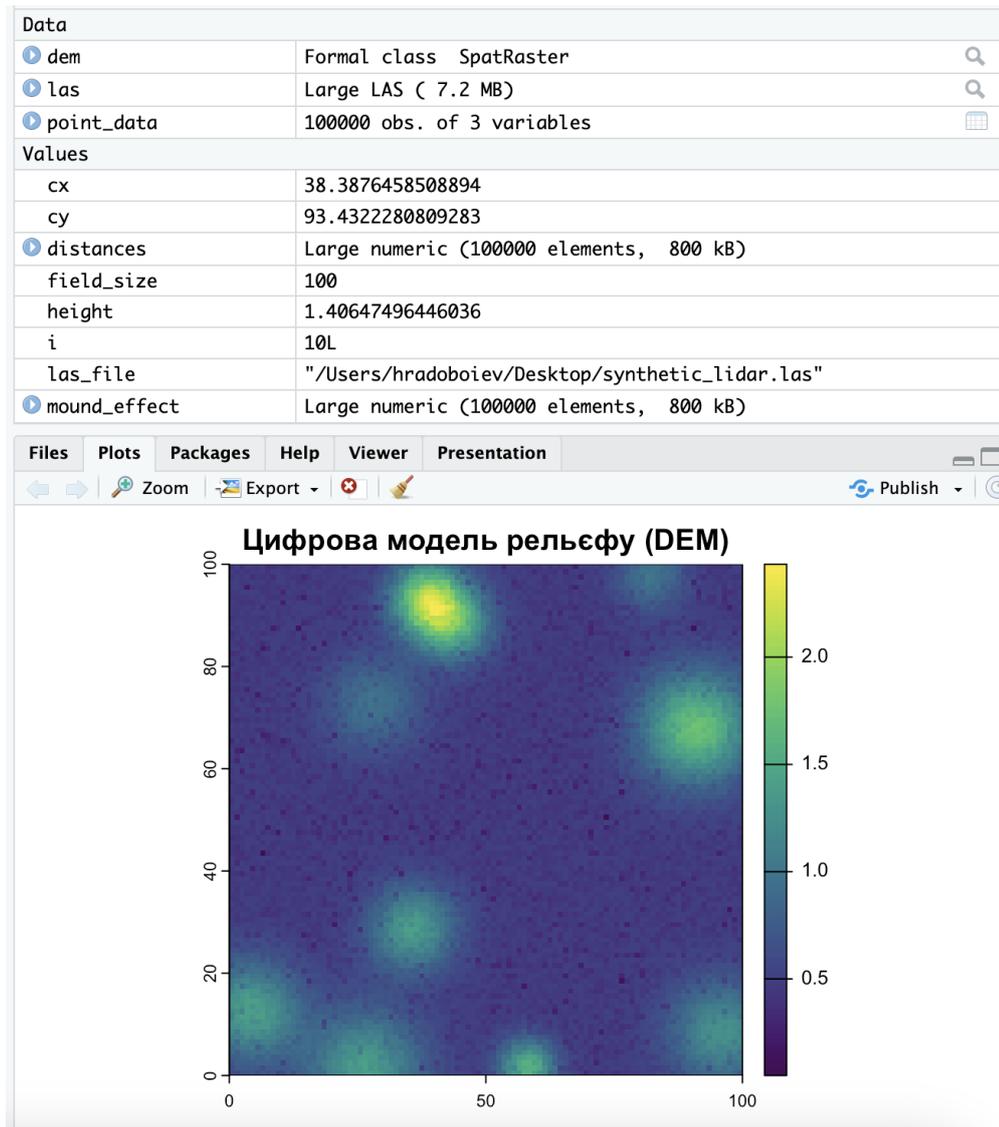


Рис. 2. Побудова цифрової моделі рельєфу (DEM)

Вона дозволяє:

- Візуалізувати висоти рельєфу у вигляді карти.
- Аналізувати зміну висот на досліджуваній території.
- Виявляти локальні підвищення, які можуть відповідати курганам гризунів.

Методика побудови DEM полягає в завантаженні LiDAR-даних з `synthetic_lidar.las` у середовище R, створенні DEM шляхом інтерполяції висот з роздільною здатністю 1 м/піксель і візуалізації отриманого рельєфу для перевірки точності відображення

курганів (додаток 2). У результаті побудовано цифрову модель рельєфу (DEM), яка чітко відображає кургани. На графіку DEM видно аномальні підвищення, що відповідають курганам гризунів (рис. 2).

Виділення аномальних підвищень. Цей етап проекту призначений для визначити кургани гризунів на основі висотних аномалій. Методика включає:

1. Розраховано поріг висоти як 95-й перцентиль, тобто точки, які входять у топ-5 % за висотою, визначені як потенційні кургани.
2. Відфільтровано решту даних, залишивши лише підвищення, які можуть бути курганами.
3. Візуалізовано виділені кургани на основі DEM.

У результаті отримано карту виявлених курганів (рис. 3). Кургани чітко виділені як локальні підвищення на DEM. Код програми наведено в додатку 3.

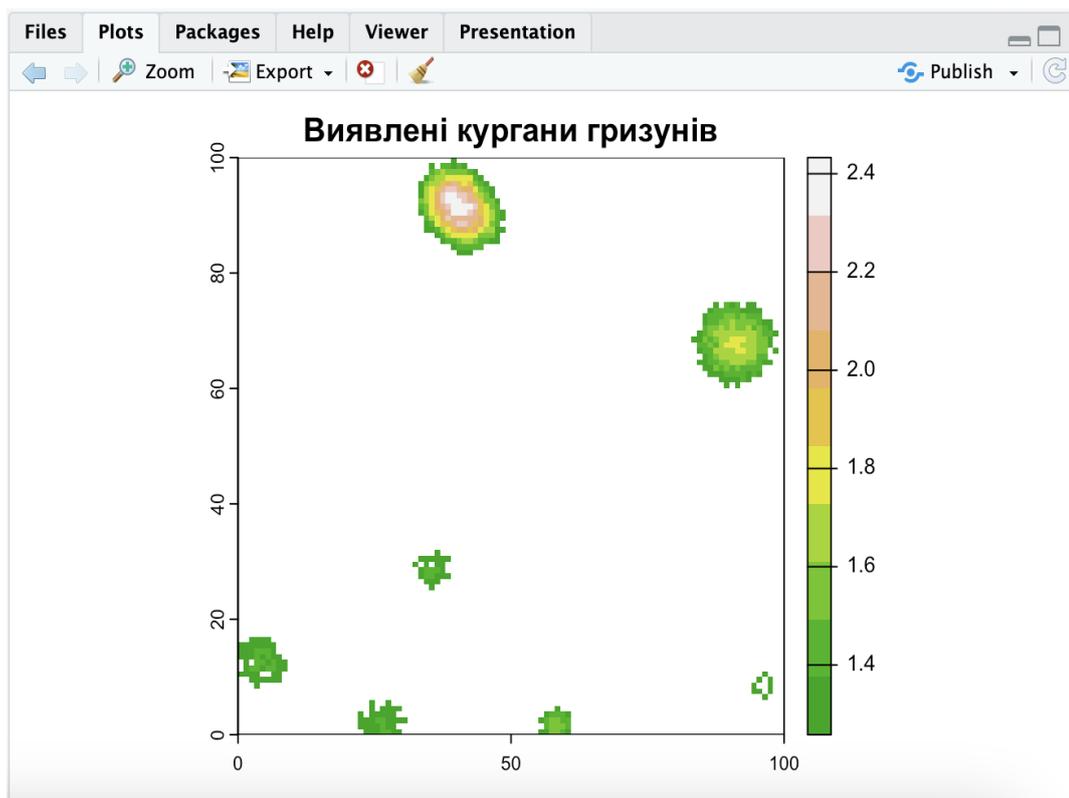


Рис. 3. Виділення курганів гризунів за висотою

Класифікація курганів методом DBSCAN (*Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise*) використовує методи машинного навчання для групування курганів гризунів.

- Групує точки, що мають високу щільність, що ідеально підходить для виявлення курганів.
- Відкидає точки, які не належать до жодного кластеру (шумові точки).
- Не потребує попереднього задання кількості кластерів, що є перевагою порівняно з методом K-Means.

Методика кластеризації включає:

1. Виділено хмару точок (X, Y, Z) з файлу .las.
2. Запущено алгоритм DBSCAN ($\text{eps} = 0.5$, $\text{minPts} = 5$) для автоматичної кластеризації.
3. Призначено кожній точці номер кластера, що відповідає певному кургану.
4. Візуалізовано результат кластеризації, де кожен колір відповідає окремому кургану.

У результаті отримано автоматично знайдені кургани. Кургани правильно згруповані в окремі кластери (рис. 4). Збереження результатів у .csv готує результати для подальшого аналізу. Методика представлена в додатку 4 і включає:

1. Збережено координати виявлених курганів разом із їх кластерними мітками.
2. Формат CSV містить X, Y, Z, cluster_id, що дозволяє легко аналізувати дані.

У результаті отримано файл mounds_detected.csv, придатний для аналізу в інших середовищах (GIS, Python, тощо). Дані можуть бути використані для точкового внесення пестицидів або прогнозування розмноження гризунів.

Результати досліджень та їх обговорення.

Використання технологій дистанційного зондування для моніторингу гризунів в Україні: переваги та обмеження. Одним із основних напрямів досліджень у цьому контексті є використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для аерофотозйомки. Ця технологія дозволяє здійснювати моніторинг великих сільськогосподарських угідь без необхідності покривати величезні площі вручну. В Україні, де аграрна діяльність охоплює понад 42 мільйони гектарів

сільськогосподарських земель, такий підхід є надзвичайно важливим для ефективного управління шкідниками. Відповідно до даних Державної служби статистики України лише в 2022 році площа посівів зернових культур в Україні склала 14,1 мільйона гектарів, з яких більше 30 % припадає на пшеницю та кукурудзу — культури, що найбільше страждають від гризунів. За допомогою БПЛА можна не тільки отримати детальні зображення полів, а й за допомогою спеціальних камер, таких як тепловізори або мультиспектральні камери, виявляти ознаки присутності гризунів. Наприклад, тепловізійні камери здатні фіксувати температурні аномалії, пов'язані з підземними норами або активністю гризунів на поверхні. Окрім того, мультиспектральні знімки допомагають виявляти зміни в рослинному покриві, що може свідчити про шкоду, яку завдають гризуни.

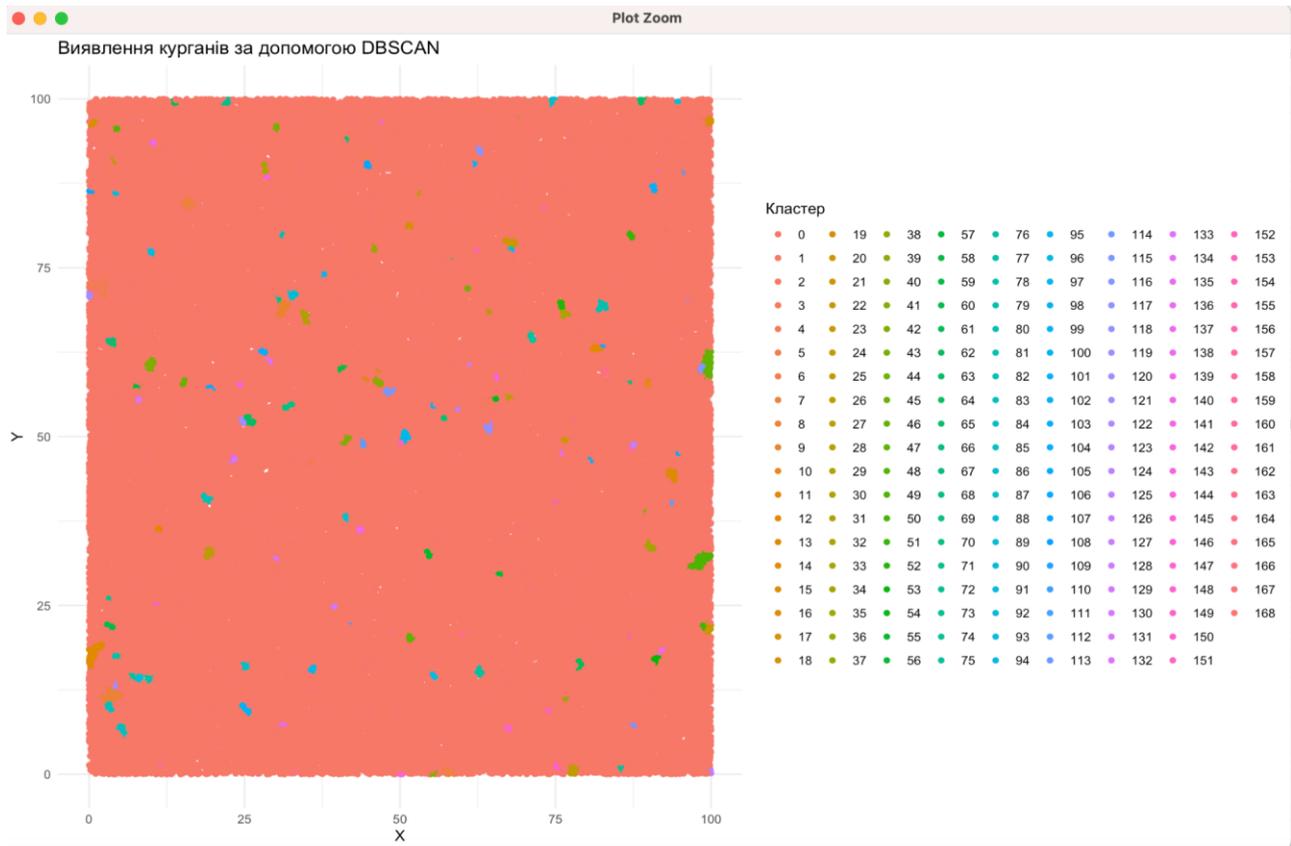


Рис. 4. Виявлення кластерів курганів методом DBSCAN для групування

Дослідження в Україні: застосування БПЛА для виявлення гризунів. В Україні вже проводяться дослідження з використання БПЛА для моніторингу популяцій гризунів на великих агрогосподарствах. Зокрема, в 2021 році було проведено пілотний проект на площі 500 гектарів в Одеській та Вінницькій областях, де

використовували БПЛА для моніторингу популяцій польових мишей. Згідно з результатами цього дослідження, було виявлено понад 150 активних нор на кожні 10 гектарів землі, що свідчить про високий рівень зараження полів. Ці технології дозволяють своєчасно виявити активність шкідників і вжити відповідних заходів, зокрема точкове внесення пестицидів або встановлення пасток. Зважаючи на важливість ідентифікації популяцій гризунів на ранніх етапах, ефективність цих технологій є надзвичайно високою.

Перспективи впровадження технологій для моніторингу та контролю гризунів в Україні. Не зважаючи на наявні досягнення, в Україні є певні обмеження у використанні цих технологій. Одним із основних викликів є висока вартість БПЛА, що може коливатися від 200 до 1000 тисяч гривень залежно від моделі, а також необхідність професійної підготовки персоналу для їх використання. Крім того, для забезпечення максимальної ефективності моніторингу необхідна інтеграція даних з різних джерел — від супутникових знімків до наземних спостережень, що може вимагати значних витрат на інфраструктуру.

За оцінками ринку, вартість технологій дистанційного зондування в Україні за останні 5 років знизилася на 30-40 %, що робить їх більш доступними для аграріїв. Прогнозується, що у найближчі 5 років використання БПЛА для моніторингу шкідників може зрости на 60-70 % порівняно з 2023 роком, оскільки на ринку з'являються нові моделі безпілотників та знижується вартість супутникових знімків.

Результати можуть бути використані в агрономії, зокрема для моніторингу гризунів та розробки ефективних стратегій боротьби з ними. Майбутні дослідження будуть присвячені наступному:

- Використати реальні LiDAR-дані замість синтетичних.
- Оптимізувати параметри DBSCAN для покращення кластеризації.
- Додати теплові карти розподілу гризунів на основі часового аналізу.
- Використати 3D-візуалізацію для більш детального аналізу рельєфу.

Висновки та перспективи. Використання технологій дистанційного зондування, зокрема БПЛА, для моніторингу популяцій гризунів на полях в Україні є важливим кроком до забезпечення ефективного управління шкідниками в

сільському господарстві. Ці технології дозволяють не лише знижувати витрати на контроль за гризунами, але й значно покращують точність виявлення та своєчасність заходів, спрямованих на захист врожаю. У майбутньому вони можуть стати основою для створення інтегрованих систем моніторингу та захисту рослин, що допоможе аграріям України зберігати врожай та зменшувати втрати на великій території.

У результаті проведення цього дослідження:

- Успішно згенеровано синтетичні LiDAR-дані для дослідження рельєфу.
- Побудовано цифрову модель рельєфу, яка візуалізує кургани гризунів.
- Виділено висотні аномалії, що відповідають реальним курганам.
- Автоматично знайдено кургани методом DBSCAN без потреби ручного аналізу.
- Збережено результати у зручному форматі (.csv) для подальшого аналізу.

References

1. Saunders, G., Cooke, B., McColl, K., Shine, R., Peacock, T. (2010) "Modern approaches for the biological control of vertebrate pests: An Australian perspective", *Biological Control*, 52 (3), 288-295, <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2009.06.014>;
2. Gebhardt, K., Anderson, A., Kirkpatrick, K., Shwiff, S. (2011). "A review and synthesis of bird and rodent damage estimates to select California crops", *Crop Protection*, 30 (9), 1109-1116, <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2011.05.015>
3. Pukazhenti, B., Comizzoli, P. (2024). "Wild Mammalian Species as Naturally Occurring Models for Comparative Research in Reproductive Biology and Biomedical Science", Reference Module in Biomedical Sciences, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21477-6.00123-1>.
4. Heroldová, M., Tkadlec, E. (2011). "Harvesting behaviour of three central European rodents: Identifying the rodent pest in cereals", *Crop Protection*, 30 (1), 82-84, <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2010.09.002>.
5. Kearney, S., Porensky, L., Augustine, D., Pellatz, D. (2023). "Toward broad-scale mapping and characterization of prairie dog colonies from airborne imagery using deep learning", *Ecological Indicators*, 154, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110684>;
6. Chlaib, H., Mahdi, H., Al-Shukri, H., Su, M., Catakli, A., Abd, N. (2014). "Using ground penetrating radar in levee assessment to detect small scale animal burrows", *Journal of Applied Geophysics*, 103, 121-131, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.01.011>.

7. Lambert, J., Niu, Y., Shi, K., Riordan, P. (2025). "Forum: The History and Development of Small Mammal Control on China's Grasslands and Potential Implications for Conservation", *Rangeland Ecology & Management*, 98, 28-40, <https://doi.org/10.1016/j.rama.2024.07.001>.

8. Godó, L., Valkó, O., Borza, S., Ferenc, A., Kiss, R., Lukács, K., Deák, B. (2025). "Effects of mound building and caching by steppe mouse (*Mus spicilegus* Petényi) on the vegetation in agroecosystems", *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 379, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109359>;

9. Simeonovska-Nikolova, D., Beltcheva, M., Larion, A., Nistreanu, V., Metcheva, R. (2025). "Variations in the Mound Size of Mound-Building Mouse, *Mus spicilegus* between Bulgaria and Moldova", *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 20 (1), 125–128.

10. Florinsky, I. (2025). "Chapter 3 - Digital elevation models, Digital Terrain Analysis (Third Edition)", Academic Press, 73-97. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-24798-9.00016-9>

11. Kutyrev, A.; Kiktev, N.; Smirnov, I. (2024). Laser Rangefinder Methods: Autonomous-Vehicle Trajectory Control in Horticultural Plantings. *Sensors*, 24, 982. <https://doi.org/10.3390/s24030982>

IDENTIFICATION OF RODENTS LOCATIONS IN FIELDS FOR ORGANIZATION OF PROTECTIVE MEASURES IN AGRONOMY

N. Kiktev, D. Hradoboiev, O. Opryshko, A. Komarnytska, D. Melnyk

Abstract. *One of the main problems of the agricultural sector of Ukraine is the reduction of yields due to the impact of pests, in particular mouse-like rodents. According to experts, in Ukraine, annual crop losses from rodents can be up to 20% depending on the level of the pest population. Accordingly, damage to grain crops due to rodent activity in 2020 was estimated at over 1.2 million tons, which in financial terms is more than 400 million hryvnias (according to the Ministry of Agrarian Policy and Food of Ukraine). The results of the article are the preparation and analysis of data from monitoring the terrain relief to identify mounds created by rodents. Microrelief analysis and construction of its DBSCAN model using synthetic LiDAR data, clustering of anomalous elevations by the method and saving the results for further analysis using the R programming language.*

Key words: *fields, rodents, burrow identification, terrain, UAV, LiDAR, data analysis, machine learning, R language*

Додаток 1.

Генерація .las файлу в R

```
library(lidR)
library(data.table)

# Параметри генерації
num_points <- 100000 # Кількість точок
field_size <- 100 # Розмір поля (100x100 метрів)
```

```
# Генеруємо випадкові координати (X, Y)
set.seed(42) # Фіксуємо випадковість для повторюваних результатів
x <- runif(num_points, 0, field_size)
y <- runif(num_points, 0, field_size)

# Базова висота (рівний рельєф + шуми)
z <- runif(num_points, 0, 0.5)
# Додаємо "кургани" - зони підвищення рельєфу
num_mounds <- 10 # Кількість курганів
for (i in 1:num_mounds) {
  cx <- runif(1, 0, field_size) # Центр кургану X
  cy <- runif(1, 0, field_size) # Центр кургану Y
  r <- runif(1, 3, 8) # Радіус кургану
  height <- runif(1, 0.5, 1.5) # Висота кургану
  # Формуємо підвищення у вигляді гауссової кривої
  distances <- sqrt((x - cx)^2 + (y - cy)^2)
  mound_effect <- exp(-(distances^2) / (2 * (r^2))) * height
  # Додаємо до висоти
  z <- z + mound_effect
}

# Формуємо таблицю з точками
point_data <- data.table(X = x, Y = y, Z = z)

# Конвертуємо в LAS
las <- LAS(point_data)
# Зберігаємо у файл
writeLAS(las, "synthetic_lidar.las")
print("Файл synthetic_lidar.las створено!")
```

Додаток 2.

Побудова цифрової моделі рельєфу (DEM)

```
library(terra)
# Створюємо цифрову модель висот (DEM)
dem <- rasterize_sansopy(las, res = 1) # 1 м роздільна здатність
# Візуалізуємо DEM
plot(dem, main = "Цифрова модель рельєфу (DEM)")
```

Додаток 3.

Виділення курганів гризунів за висотою

```
# Визначаємо аномальні підвищення (наприклад, топ-5% висот)
height_threshold <- quantile(dem[], probs = 0.95, na.rm = TRUE)
# Відфільтруємо області, де висота більше за поріг
mounds <- dem
mounds[mounds < height_threshold] <- NA
# Візуалізуємо знайдені кургани
plot(mounds, col = terrain.colors(10), main = "Виявлені кургани гризунів")
```

Додаток 4.

Виявлення кластерів курганів

Можна використати кластеризацію DBSCAN для групування курганів.

```
library(dbSCAN)
```

```
# Отримуємо координати точок
xyz <- as.data.frame(las@data[, c("X", "Y", "Z")])
# Запускаємо DBSCAN
clustering <- dbscan(xyz, eps = 0.5, minPts = 5)
# Додаємо результати в наш набір
xyz$cluster <- clustering$cluster
# Візуалізація знайдених кластерів
library(ggplot2)
ggplot(xyz, aes(x = X, y = Y, color = as.factor(cluster))) +
  geom_point() +
  theme_minimal() +
  labs(title = "Виявлення курганів за допомогою DBSCAN", color =
"Кластер")
```