

2. Кластеризація даних для розподілу ресурсів. Алгоритми кластеризації (наприклад, k-means) забезпечують ефективне групування споживачів зі схожими профілями використання. Це дозволяє оптимізувати розподіл ресурсів, зменшуючи витрати та покращуючи стійкість системи.

3. Адаптивні нейронні мережі. Використання рекурентних нейронних мереж (RNN) із можливістю самонавчання дозволяє системам адаптуватися до змінного навантаження в режимі реального часу.

4. Інтеграція з кібербезпекою. Виявлення аномалій у поведінці системи за допомогою алгоритмів машинного навчання забезпечує раннє попередження про потенційні загрози.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на:

1. Інтеграція з IoT та edge computing. Забезпечення обробки даних безпосередньо на пристроях IoT для зменшення навантаження на центральні вузли системи.

2. Моделювання сценаріїв. Створення цифрових двійників для моделювання роботи систем у різних умовах допоможе передбачати збої та тестувати нові рішення.

3. Розвиток інтелектуальних систем захисту. Використання штучного інтелекту для розробки автономних кіберзахисних рішень, які поєднують аналіз даних та автоматичну реакцію на загрози.

4. Оптимізація енергоспоживання. Розробка енергоефективних алгоритмів з мінімальними витратами на виконання операцій.

Оптимізація управління ресурсами в динамічних смарт-об'єктах критичної інфраструктури є ключовим завданням, що вимагає впровадження новітніх технологій машинного навчання. Застосування прогнозування навантажень, кластеризації та адаптивних систем управління дозволяє значно підвищити ефективність, надійність та безпеку цих систем. Особливу увагу слід приділити засобам кіберзахисту, які забезпечують стійкість до зовнішніх загроз. Впровадження таких технологій дозволить підвищити ефективність функціонування критичної інфраструктури, зменшити витрати ресурсів і забезпечити високу адаптивність у кризових ситуаціях. Це особливо важливо для забезпечення енергетичної безпеки, логістики та безперервного постачання основних послуг. Подальші дослідження мають бути спрямовані на інтеграцію IoT, розробку автоматизованих систем прийняття рішень, покращення енергоефективності та створення комплексних рішень, здатних забезпечити стабільність функціонування критичної інфраструктури навіть в умовах змінних навантажень та високої динамічності середовища.

#### Список джерел

1. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning. Nature. 2015, 521(7553), 436–444.
2. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep learning. MIT Press, 2016.
3. Zhang X., Zhou J., Lin M., Sun Y. AI in smart city management: A comprehensive review. IEEE Access. 2019, 7, 110749–110765.
4. Papageorgiou A. Security and privacy issues in machine learning: The blockchain solution. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. 2019, 30(10), 3078–3093.
5. Silver D. et al. Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search. Nature. 2016, 529(7587), 484–489.

Modern Geographic Information Systems (GIS) are widely used across various fields, including natural resource management, urban planning, and environmental monitoring. These applications' critical aspects are analyzing and interpreting geospatial rasters, which provide data on terrain types, vegetation, and elevation changes. The proposed hexagonal segmentation method leverages a topologically regular hexagonal grid, offering advantages such as an optimal perimeter-to-area ratio and improved data representation. Implemented in the Feature Manipulation Engine (FME), the approach consists of generating uniform hexagonal grids and transferring raster attributes through spatial intersection. This method supports scalability and parallel processing, enabling the efficient handling of large data sets.

Використання правильних шестикутників для побудови регулярної сітки замість квадратів чи трикутників мають деякі переваги. Насамперед - це невелике співвідношення периметра до площі, що впливає на точність геопросторової вибірки. На відміну від кіл із найнижчим співвідношенням, які не можуть бути мозаїками, шестикутники можуть утворювати безперервну сітку, будучи багатокутником найбільш круглої форми. Це дозволяє гексагональним сіткам природніше відображати криві у шаблонах даних порівняно з квадратними сітками. Крім того, точки всередині шестикутників розташовані ближче до центроїда, ніж точки в межах квадратів або трикутників рівної площі, що робить шестикутники більш прийнятними для просторового аналізу.

Запропонований метод сегментації гексагонами розроблений на Feature Manipulation Engine (FME) та складається з 2 етапів: створення сітки однорідних шестикутників та перенесення окремих ознак з растру у вектор.

### **Створення сітки з однорідних шестикутників.**

Для отримання гексагональної сітки був використаний алгоритм П'єра Готьє [1]. Основою цього алгоритму є генерація сітки точок, які є центрами шестикутників, побудова кіл навколо точок і подальше їх спрощення до шестикутників. Основним параметром є SIDE\_LENGTH - довжина сторони шестикутника.

Дві точкові сітки генеруються з наступними параметрами: перша сітка визначається параметрами hoffset(1) і voffset(2).

$$\text{hoffset} = \text{SIDE\_LENGTH} * 3 \quad (1)$$

$$\text{voffset} = \cos 30^\circ * \text{SIDE\_LENGTH} * 2 \quad (2)$$

Друга сітка є зміщеною копією першої сітки зі зсувами, застосованими до координат x та y:

$$X\_shift = \text{hoffset}/2$$

$$Y\_shift = \text{voffset}/2$$

Створення кіл по згенерованих точках реалізовано за допомогою 2DArcReplacer(FME), радіус кіл відповідає SIDE\_LENGTH, а шестикутники отримуються при застосуванні ArcStroker(FME) з фіксованою кількістю інтерпольованих граней, яка дорівнює шести.

### **Перенесення окремих ознак з растру у сітку шестикутників.**

Для перенесення окремих ознак з растру у гексагони було обрано просторове перетинання цих двох наборів. Цей спосіб хоч і є не найбільш ефективним з точки зору швидкодії у порівнянні з перенесенням інформації через центроїд гексагону, але від дозволяє отримати різні статистичні дані по окремих ознакам растру: мінімальне, максимальне, середнє, найпоширеніше та інші значення. В залежності від сценарію застосування і поставленої задачі, додатково можна скомбінувати гексагони з однаковими значеннями для зменшення загального об'єму векторного набору.

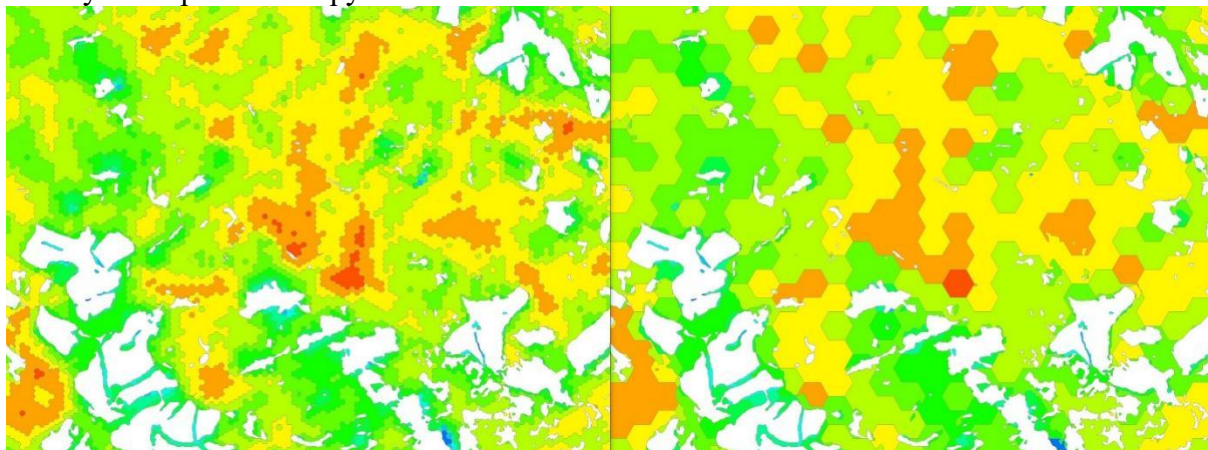


Рисунок 1. Приклад сегментації векторної рослинності за ознакою висоти методом гексагонів з різними параметрами. Довжина сторони гексагону 20м – ліворуч. Довжина сторони гексагону 100м -праворуч.

### **Висновки.**

Серед сценаріїв застосування запропонованого методу можна виділити сегментацію рослинного покриву за ознакою висоти, векторне представлення рельєфу та інші.

Підхід до сегментації за допомогою методу гексагонів має значний потенціал для подальшого вдосконалення. Завдяки можливості змінювати розмір гексагона можна отримувати як високоточні моделі сегментації, так і спрощені варіанти, що дозволяють обробляти великі території на рівні цілих країн.

Регулярна структура гексагональної сітки забезпечує можливість обробляти великі набори даних окремими частинами. За наявності достатніх обчислювальних ресурсів можна реалізувати паралельну обробку для скорочення загального часу виконання або ж обробляти дані послідовно, що дозволяє працювати з великими масивами інформації, які не можуть бути оброблені як єдиний блок на одному комп'ютері.

### **Список джерел**

- [1] FME Hub, <https://hub.safe.com/publishers/larry/transformers/hexagonsampler>
- [2] FME Documentation <https://support.safe.com/hc/en-us/p/documentation>