

**ІНТЕГРАЦІЯ ХМАРНИХ СЕРВІСІВ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ ТА ОБРОБКИ
КРІОМІКРОСКОПІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ:
ПРАКТИЧНИЙ ДОСВІД ВИКОРИСТАННЯ MINIO ТА CVAT**

Вступ

Кріомікроскопічні зображення є важливим ресурсом для сучасних наукових досліджень у галузі біомедицини, клітинної біології та аграрних технологій. Завдяки високій роздільній здатності такі зображення дозволяють детально вивчати морфологію клітин, відстежувати внутрішньоклітинні процеси та виявляти патологічні зміни з високою точністю [1, 2]. Проте обробка подібних даних супроводжується низкою серйозних викликів – від зберігання великих обсягів зображень до забезпечення зручного доступу, організації та підготовки даних до машинного аналізу.

У традиційному підході дослідники змушені витратити значну кількість часу на ручне сортування та анотування зображень, що може знижувати ефективність наукової роботи та підвищувати ймовірність помилок [3, 4]. Крім того, стандартні файлові сховища погано масштабуються при роботі з тисячами зображень великого розміру, що є особливо актуальним для завдань, пов'язаних з кріомікроскопією.

Інтеграція сучасних цифрових інструментів, таких як хмарне об'єктне сховище MinIO та система анотування зображень CVAT, відкриває нові можливості для побудови зручного, масштабованого й автоматизованого пайплайна обробки кріомікроскопічних зображень [5]. MinIO забезпечує надійне та швидке зберігання даних із можливістю гнучкої організації доступу, тоді як CVAT дозволяє точно розмічати зображення, створюючи навчальні вибірки для нейромережових моделей і систем комп'ютерного зору.

Практичне об'єднання цих інструментів у межах єдиного робочого процесу дозволяє оптимізувати всі етапи – від зберігання до анотування — що сприяє прискоренню досліджень, покращенню якості розмітки та спрощенню подальшої автоматизованої обробки даних [6]. Такий підхід є особливо актуальним в умовах постійного зростання обсягів візуальної інформації та необхідності швидкої підготовки даних для аналізу з використанням штучного інтелекту.

Архітектура інтеграції MinIO та CVAT для обробки кріомікроскопічних зображень

Розробка ефективної системи обробки та зберігання кріомікроскопічних зображень потребує врахування величезних обсягів даних та високих вимог до швидкості їх обробки. Традиційні підходи до зберігання та обробки зображень часто не відповідають вимогам масштабних проєктів, де важливо забезпечити швидкий доступ до даних та точне анотування [7].

Для вирішення цих проблем ми пропонуємо інтеграцію двох ключових інструментів: хмарного сховища MinIO та платформи для анотування CVAT. MinIO забезпечує високу швидкість доступу до даних у хмарі, що дозволяє ефективно масштабувати систему зберігання для великих обсягів зображень [8]. Водночас CVAT є потужним інструментом для створення точних та якісних розміток зображень, що є необхідним для створення навчальних вибірок для нейромереж.

Запропонована модель передбачає використання MinIO для надійного зберігання кріомікроскопічних зображень з можливістю гнучкого доступу для користувачів. CVAT, в свою чергу, дозволяє автоматизувати процес анотації, що є важливим кроком у створенні навчаль-

них даних для подальшого використання в алгоритмах машинного навчання. Це дозволяє значно пришвидшити підготовку даних до аналізу.

Для покращення процесу обробки та зменшення потреби в ручній праці, система також включає інструменти автоматизації анотації. Така організація процесу дозволяє значно скоротити час на підготовку зображень та забезпечити високу точність при розпізнаванні клітинних структур. Завдяки інтеграції обох інструментів, стає можливим створення ефективного і масштабованого рішення для обробки та аналізу зображень.

Таким чином, запропонована інтеграція MinIO і CVAT створює умови для високопродуктивної роботи з великими обсягами кріомікроскопічних зображень. Це рішення не тільки покращує точність обробки, але й значно спрощує процеси анотування та підготовки даних, що в свою чергу, прискорює наукові дослідження в різних галузях [9].

Принципи роботи MinIO та CVAT в інтегрованому рішенні для обробки кріомікроскопічних зображень

MinIO та CVAT – це дві ключові технології, кожна з яких виконує свою роль у створенні ефективної системи для роботи з великими обсягами даних, таких як кріомікроскопічні зображення. Їхнє поєднання дозволяє значно покращити якість і продуктивність обробки зображень, хоча ці інструменти мають різні підходи до зберігання та анотування даних.

MinIO є системою об'єктного зберігання, оптимізованою для роботи з великими даними. Цей інструмент забезпечує надійне та швидке зберігання кріомікроскопічних зображень, що є критично важливим для наукових досліджень, де дані можуть бути об'ємними та високоякісними [10]. Алгоритм роботи MinIO орієнтований на управління об'єктами даних, що дає можливість масштабувати сховище та забезпечувати доступ до даних з різних платформ та пристроїв, що особливо важливо при роботі з великими зображеннями, які потребують постійного доступу і оновлень.

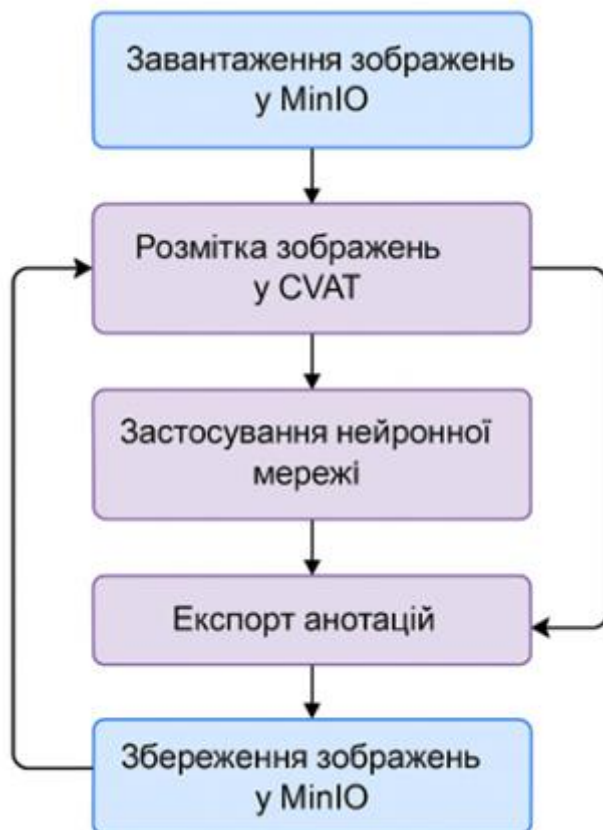


Рис. 1. Етапи роботи системи

Основний етап роботи з MinIO – це завантаження зображень у хмарне сховище, де вони потім стають доступними для обробки. Різноманітність функцій, таких як управління версія-

ми і швидкий доступ до даних, дозволяє інтегрувати MinIO з іншими системами, створюючи гнучке і масштабоване рішення для аналізу зображень.

CVAT, у свою чергу, є платформою для анотування даних, що забезпечує високу точність розмітки зображень[11]. У контексті роботи з кріомікроскопічними зображеннями важливим аспектом є використання автоматичних методів анотації за допомогою нейронних мереж, що пришвидшує процес і підвищує точність розмітки.

Процес роботи з CVAT включає: завантаження зображень, анотування ключових об'єктів на зображенні і використання нейросетевих алгоритмів для автоматизації розмітки. Після анотації дані можна експортувати для подальшого аналізу чи навчання машинних моделей.

Процес анотації в CVAT складається з таких основних етапів:

1. Завантаження зображень у систему.
2. Розмітка та виділення ключових об'єктів на зображенні.
3. Автоматизація розмітки за допомогою нейронних мереж для підвищення швидкості та точності.
4. Збереження та експорт анотованих даних для подальшого використання.

Разом MinIO та CVAT створюють потужну та ефективну систему для обробки кріомікроскопічних зображень. У цьому інтегрованому рішенні MinIO забезпечує високошвидкісне та надійне зберігання даних, тоді як CVAT допомагає швидко та точно анотувати зображення, що значно пришвидшує підготовку даних для подальшого аналізу.

Таким чином, використання MinIO та CVAT в одній системі дає можливість не лише ефективно керувати даними, а й суттєво підвищити продуктивність та точність обробки кріомікроскопічних зображень, що є важливим кроком у прискоренні наукових досліджень.

Алгоритм виділення клітин на зображеннях за допомогою CVAT

Для виділення клітин на кріомікроскопічних зображеннях у межах даного дослідження використовується інструмент анотування CVAT (Computer Vision Annotation Tool), який забезпечує зручну платформу для ручної та напівавтоматичної розмітки зображень. Метою анотування є створення набору даних, що містить точні контури клітин, які згодом будуть використані для навчання та валідації моделей машинного навчання.

Етапи алгоритму виділення клітин.

Попередня обробка зображень. Зображення попередньо нормалізуються та масштабуються до заданого розміру:

$$I_{norm}(x, y) = \frac{I(x, y) - \mu}{\sigma}, \quad (1)$$

де $I(x, y)$ – вихідне зображення; μ – середнє значення інтенсивності пікселів; σ – стандартне відхилення.

Далі зображення завантажуються в проєкт CVAT, де створюється задача анотування. Користувач може обрати один із форматів розмітки: полігон, bounding box, точка або трасування контуру.

Для анотування використовується режим полігональної розмітки, за якого користувач вручну окреслює межу кожної клітини на зображенні. Результатом є набір координат вершин полігона:

$$P = \{ (x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n) \}, \quad (2)$$

де P – контур однієї клітини; n – кількість точок, що визначають межу.

Отримані полігони перетворюються на бінарні маски:

$$M(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } (x, y) \in P \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}, \quad (3)$$

де $M(x, y)$ – бінарна маска відповідної клітини.

CVAT підтримує експорт анотацій у різних форматах, зокрема COCO, Pascal VOC, YOLO тощо. Для задач сегментації та навчання нейронних мереж найзручнішим є формат COCO, оскільки він містить як координати контурів, так і відповідні категорії.

Обчислення площі клітин Для аналізу анотованих клітин може бути корисним обчислення їхньої площі:

$$A = \frac{1}{2} \left| \sum_{i=1}^n (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \right|, \quad (4)$$

де координати $M(x, y)$. Формула базується на методі Гаусса для обчислення площі багатокутника.

Переваги використання CVAT:

- підтримка напівавтоматичного анотування на основі попередньо навчених моделей;
- можливість багатокористувацької роботи та розподілу задач;
- гнучкий експорт та інтеграція з пайплайнами глибокого навчання [12].

Візуалізація та аналіз отриманих даних

У цьому дослідженні реалізовано процес зберігання та анотування кріомікроскопічних зображень із використанням хмарного сховища MinIO та інструменту CVAT для анотацій. Після завантаження зображень в хмару та їх анотації за допомогою CVAT, дані обробляються для візуалізації анотацій та подальшого аналізу. Це включає такі основні етапи: відображення анотацій на зображеннях, інтеграція з MinIO для зручного централізованого зберігання даних і проведення оцінки якості анотацій.

Після того як зображення анотовано, вони експортуються та обробляються для нанесення контурів клітин. Це дає можливість наочно оцінити точність розмітки, що є важливим, оскільки саме від якості анотацій залежить ефективність подальших кроків, зокрема навчання моделей для сегментації клітин рис. 2.

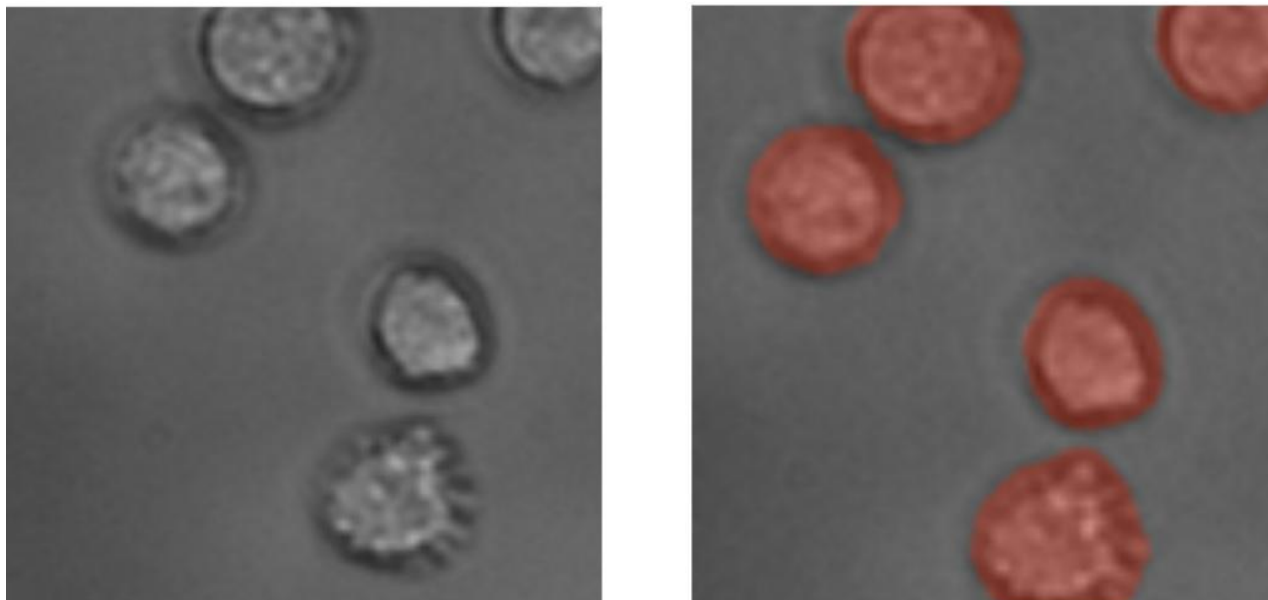


Рис. 2. Приклади нанесення контурів клітин

Всі зображення та їх анотації зберігаються в хмарному сховищі MinIO, яке забезпечує зручний доступ до даних, резервне копіювання, масштабованість і автоматичну синхронізацію при зміні даних. Це дозволяє зберігати всі дані в безпечному та доступному середовищі, що підвищує ефективність роботи з великими наборами зображень.

Для оцінки якості анотацій проводиться аналіз кількості анотованих клітин, щільності об'єктів та їхнього розподілу за розмірами. Такий підхід допомагає виявити можливі перекриття чи скупчення анотацій, що важливо для оптимізації розмітки і покращення якості майбутніх моделей. Під час аналізу було виявлено кілька проблем: дубльовані анотації, низький контраст зображень, що ускладнює точне визначення меж клітин, а також нерівномірний розподіл клітин по датасету. Для вирішення цих проблем пропонується кілька підходів: попередня обробка зображень (покращення контрасту), використання напівавтоматичних моделей для анотацій та введення додаткового етапу валідації даних, що забезпечить більш високу точність та якість розмітки.

У майбутньому планується автоматизація процесу аналізу анотацій шляхом додавання таких можливостей, як обчислення метрик якості розмітки (IoU, precision/recall), побудова теплових карт для візуалізації розподілу клітин і використання інтерактивних дашбордів для візуалізації статистичних даних. Це дозволить значно полегшити процес аналізу, підвищить прозорість роботи з анотаціями та забезпечить кращу відтворюваність результатів, що є важливим для роботи з кріомікроскопічними зображеннями в хмарній інфраструктурі.

Висновки

У рамках дослідження розроблено систему для зберігання та обробки кріомікроскопічних зображень за допомогою хмарного сховища MinIO та інструменту анотування CVAT. Результати роботи продемонстрували ефективність інтеграції цих технологій для вирішення завдань, пов'язаних з аналізом біомедичних зображень.

Інтеграція MinIO та CVAT забезпечила зручний доступ до даних, їх безпеку та масштабованість. Хмарне сховище дозволяє ефективно управляти великими обсягами даних і забезпечує їх доступність для подальшої обробки. Процес анотації за допомогою CVAT показав високу точність у визначенні контурів клітин, що є важливим для створення якісних навчальних даних для моделей сегментації.

Аналіз анотацій виявив кілька проблем, таких як дублювання або низький контраст зображень, але також було запропоновано методи для їх вирішення, зокрема попередню обробку зображень та використання напівавтоматичних методів для підвищення точності. У подальшому планується автоматизація аналізу з додаванням метрик якості анотацій і створення інтерактивних інструментів для візуалізації статистики, що допоможе прискорити процес та підвищити його точність.

Таким чином, розроблена система є ефективним інструментом для обробки кріомікроскопічних зображень, забезпечуючи високу точність анотації, зручне зберігання даних і можливість для подальшого аналізу та навчання моделей машинного навчання.

Список літератури:

1. Самохін Ю. В. Алгоритми проходження контуру на кріомікроскопічних зображень // *Радіоелектроніка та молодь у XXI ст. : тези доповідей 27-го Міжнар. молодіж. форуму*, 10–12 травня 2023 р. Харків : ХНУРЕ, 2023. Т. 1. С. 99–100.
2. Самохін Ю. В. Алгоритми проходження контуру на кріомікроскопічних зображень // *Тематична конференція «Актуальні питання біомедичної інженерії» в рамках 26-го Міжнар. молодіж. форуму «Радіоелектроніка та молодь в XXI ст.»*. Зб. мат. конф. Т. 1. Харків : ХНУРЕ, 2022. С. 86–87.
3. Самохін Ю. В. Аспекти сегментації кріомікроскопічних зображень // *Сучасні технології біомедичної інженерії : мат. II міжнар. наук.-техн. конф.* 17–19 травня 2023 р. ; за заг. ред. І. В. Прокоповича, Н. В. Манічевої ; Нац. ун-т «Одеська політехніка». Вінниця : ТОВ «Торговий дім «Альфа і Омега», 2023. С. 110–112.
4. Самохін Ю. В. Виявлення клітин на зображенні за допомогою CVAT AI // *Сучасні технології біомедичної інженерії : мат. III міжнар. наук.-техн. конф.*, 8–10 травня 2024 р. Вінниця : ВНТУ, 2024. С. 24–26.
5. Самохін Ю. В. Знаходження зображень клітин на кріомікроскопічних зображеннях за допомогою згорткових нейронних мереж // *Сучасний стан та перспективи біомедичної інженерії : мат. міжнар. наук.-практ. конф., присвяченої 125-річчю ювілею НТУ України «Київ. політехн. ін-т ім. Ігоря Сікорського»*, 13–14 грудня 2023 р. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. С. 194–195.
6. Tymkovych M., Avrunin O., Gryshkov O., Semenets V. and Glasmacher B. Ice crystals microscopic images segmentation based on active contours // *IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. 2019. P. 493–496.

7. Tymkovych M., Gryshkov O., Avrunin O., Selivanova K., Nosova Y., Mutsenko V., et al. Application of SOFA framework for physics-based simulation of deformable human anatomy of nasal cavity // IFMBE Proceedings. 2021. Vol. 80. P. 112–120.
8. Tymkovych M., Gryshkov O., Avrunin O., Semenets V. and Glasmacher B. Ice crystals microscopic images segmentation based on active contours // IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). 2019. P. 493–496.
9. Samokhin Y., Avrunin O. and Yavtushenko V. Cell Detection Model on Cryomicroscopic Images Using MinIO and CVAT // IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET). Lviv, Ukraine. 2024. P. 514–519. doi: 10.1109/TCSET64720.2024.10755563.
10. Tymkovych M., Gryshkov O., Selivanova K., Mutsenko V., Avrunin O. and Glasmacher B. Application of artificial neural networks for analysis of ice recrystallization process for cryopreservation // 8th European Medical and Biological Engineering Conference (EMBEC 2021). Nov. 29 – Dec. 3, 2021. P. 102–111.
11. Gryshkov O. Advances in cryopreservation of alginate-encapsulated stem cells and analysis of cryopreservation outcome / O. Gryshkov, V. Mutsenko, M. Tymkovych, D. Tarusin, V. Sirovinskaya, I. Braslavsky, O. Avrunin, B. Glasmacher // Cryobiology. Vol. 85. P. 156.
12. Prykhodko M.V. Image processing for automated microscopic analysis of ice recrystallization process during isothermal annealing / M.V. Prykhodko, M.Y. Tymkovych, O.G. Avrunin, V.V. Mutsenko, O. Gryshkov, B. Glasmacher // Bioelectromagnetism. 2018. Vol. 20(1). P. 72–75.

Надійшла до редколегії 10.03.2025

Відомості про авторів:

Самохін Юрій Вікторович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри біомедичної інженерії, Україна, e-mail: yurii.samokhin@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5269-3340>

Аврунін Олег Григорович – д-р техн. наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри біомедичної інженерії, Україна, e-mail: oleh.avrunin@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6312-687X>