

С. В. Скоробогатько, Г. В. Фесенко

Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна

## ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ЛІТАЮЧИХ ХМАРНИХ, ГРАНИЧНИХ ТА ТУМАННИХ ОБЧИСЛЕНЬ КОМПОНЕНТАМИ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ПОТЕНЦІЙНО НЕБЕЗПЕЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

**Анотація.** У статті проведено порівняльний аналіз технологій літаючих хмарних (ЛХО), граничних (ЛГО) та туманних (ЛТО) обчислень. Показані особливості систем, побудованих з використанням цих технологій, визначені їх переваги та недоліки. Розглянуто варіанти схем організації ЛХО, ЛГО та ЛТО. Обґрунтовано доцільність та запропоновано варіант застосування ЛХО, ЛГО та ЛТО компонентами системи моніторингу (СМ) потенційно небезпечного об'єкту (ПНО) з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Оцінено перспективи використання методів штучного інтелекту (ШІ) підсистемами компонентів СМ ПНО. Запропоновано варіант використання методів ШІ для розширення можливостей ЛХО, ЛГО та ЛТО під час виконання СМ ПНО завдань з розвантаження обчислень, розподілу ресурсів, підтримки прийняття рішень, забезпечення безпеки та планування маршрутів руху БПЛА.

**Ключові слова:** хмарні обчислення, граничні обчислення, туманні обчислення, безпілотний літаючий апарат, хмарні технології, штучний інтелект, система моніторингу, потенційно небезпечний об'єкт.

### Мотивація

Літаючі граничні обчислення (ЛГО) на основі БПЛА наразі розглядаються у якості життєво важливої технології для впровадження багатьох методів для IoT-застосунків перспективних систем моніторингу (СМ) потенційно небезпечних об'єктів (ПНО) наступного покоління. Безумовно, для того, щоб архітектура СМ ПНО було більш гнучкою, ресурсно- та енергоефективною, ця технологія може реалізовуватися у поєднанні з технологіями літаючих хмарних (ЛХО) та туманних (ЛТО) обчислень, а також наземних граничних (НГО), хмарних (НХО) та туманних (НТО) обчислень. При цьому можливості цих технологій можуть бути значно розширені за рахунок використання ними для вирішення певних завдань методів штучного інтелекту (ШІ). Завдяки своїй універсальності та простоті розгортання, БПЛА у такій архітектурі можуть відігравати різні ролі:

- виступати у ролі мобільних пристроїв, які переважують свої обчислення на наземний сервер;
- діяти як багатоцільова підсистема ЛГО (ЛХО, ЛТО), що відповідає за моніторинг групи мобільних кінцевих вузлів та може одночасно служити ретранслятором або шлюзом між мобільними кінцевими вузлами та наземним сервером. Тому, актуальними є питання дослідження особливостей ЛГО, ЛХО та ЛТО в контексті їх застосування в інтесакх СМ ПНО.

**Метою статті** є дослідити особливості застосування літаючих хмарних, граничних та туманних обчислень та запропонувати рекомендації щодо їх використання компонентами системи моніторингу потенційно небезпечних об'єктів.

**Задачі дослідження** полягають у наступному:

- провести порівняльний аналіз технологій ЛХО, ЛГО та ЛТО з визначенням особливостей систем, побудованих на їх основі, а також основних переваг та недоліків таких технологій;
- обґрунтувати доцільність та запропонувати варіант застосування ЛХО, ЛГО та ЛТО компонентами СМ ПНО;

– оцінити перспективи використання методів ШІ підсистемами компонентів СМ ПНО для розширення можливостей ЛХО, ЛГО та ЛТО.

### Аналіз основних публікацій та досліджень

У [1] ЛХО, ЛГО та ЛТО розглядаються як складові технології Інтернету літаючих речей (Internet of Flying Things (IoFT)), відомої також під назвою «Інтернет дронів» (Internet of drones (IoD)). IoFT (IoD) – це багатошарова архітектура, яка акумулює переваги бездротових динамічних (самоорганізованих) літаючих мереж (Flying Ad hoc Networks (FANET)) та Інтернету речей (Internet of Things (IoT)) і призначена для управління літаючою мережею і надання швидкого доступу БПЛА до контрольованого простору, інтернет-ресурсів і хмарного середовища. Далі ми проведемо аналіз основних публікацій з питань використання ЛХО, ЛГО, ЛТО у різних доменах.

*Аналіз публікацій, присвячених ЛХО.* Автори статті [2] запропонували ресурсно-орієнтовану архітектуру, яка призначена для полегшення моделювання ресурсів і послуг, що надаються БПЛА. БПЛА при цьому оснащені платою Arduino, бортовим Wi-Fi обладнанням та виступають у ролі серверів, доступ до хмарних ресурсів яких можна отримати за допомогою інтерфейсів прикладного програмування.

У [3] автори розширили можливості свого прототипу, представленого у [2] за рахунок інтеграції плати Arduino з датчиками вимірювання вологості й температури повітря, а також створення можливості керування цими датчиками через інтерфейс за допомогою веб-служб RESTful.

Автори [4] представили хмарну архітектуру, яка призначена для забезпечення ефективної взаємодії БПЛА та бездротових сенсорних мереж. У цій архітектурі рівень фізичних ресурсів БПЛА є відокремленим від рівня керування і включає програмне забезпечення, програмно визначені мережі й мережеву функціональну віртуалізацію.

У [5] було розглянуто хмарну платформу для керування БПЛА, яка дозволяє користувачам і

хмарній платформі одночасно взаємодіяти з БПЛА. Користувачі вводять необхідні параметри, а хмарна платформа, яка має інтернет-зв'язок з наземною станцією управління (НСУ), бере на себе функції контролю БПЛА відповідно до вимог користувача.

Автори [6] запропонували структуру, що дозволяє користувачам за допомогою хмарного середовища отримати доступ до БПЛА, який виступає у ролі постачальника комерційних послуг. За оптимальним використанням ресурсів БПЛА й забезпеченням встановлених безпекових вимог у цій структурі слідкує хмарний координатор. Він забезпечує зв'язок між користувачами та БПЛА, керує розподілом завдань і забезпечує доступ до БПЛА користувачів різних категорій.

У роботі [7] розглядається трирівнева хмарна архітектура, перший рівень якої представлено наземними бездротовими датчиками, другий рівень формують БПЛА з бортовою хмарною платформою, які отримують дані від датчиків і спрямовують їх до НСУ, а третій рівень — це центр керування хмарою, який відповідає за оброблення та аналізування зібраних даних для прийняття рішення.

У роботі [8] за допомогою мови Python реалізовано хмарний сервер, здатний аналізувати дані польоту БПЛА, а також дозволяє користувачам дистанційно керувати та візуалізувати БПЛА.

Автори [9] запропонували хмарну систему, яка дозволяє одночасно керувати декількома БПЛА та використовувати їх у процесі збирання й оброблення даних від наземних датчиків за допомогою хмарного середовища.

Стаття [10] розглядає можливості використання БПЛА разом з наземними серверами для реалізації хмарних обчислень під час функціонування еластичної мережі, що відповідає за збирання, оброблення й доставляння кінцевим користувачам мультимедійних файлів.

У [11] авторами запропоновано базову й загальну концептуальну модель хмарної платформи Cloud-SPHERE, яка здатна забезпечити безпечний канал зв'язку між БПЛА у складі флоту та між БПЛА та наземною інфраструктурою за рахунок реалізації механізмів ідентифікації, автентифікації й захисту даних.

*Аналіз публікацій, присвячених ЛГО.* Робота [12] була присвячена описанню особливостей функціонування архітектури ЛГО, де БПЛА забезпечують надання необхідних послуг користувачам у зонах стихійних лих з пошкодженою наземною інфраструктурою зв'язку.

Також у цій роботі надано рекомендації щодо оптимізації кількості й місць розміщення БПЛА для більш ефективної реалізації граничних обчислень в інтересах користувачів.

У роботі [13] запропоновано архітектуру для наземно-повітряної інтегрованої мобільної периферійної мережі з назвою AG630 MEN, у складі якої розгортаються БПЛА, які відіграють роль граничних мережевих контролерів для ефективного розподілу обчислювальних ресурсів і ресурсів зберігання даних.

Автори статті [14] демонструють можливості розробленого ними фреймворку, який поєднує в собі можливості наземних транспортних засобів і БПЛА щодо розгортання граничних серверів для організації зв'язку, проведення необхідних обчислень і забезпечення зберігання необхідної інформації. Результати проведених авторами цієї статті експериментів підтвердили, що застосування розробленого фреймворку забезпечує високу мобільність і пропускну здатність, а також низьку затримку.

Для гарантування високої якості обслуговування для ресурсомістких та он-лайн застосунків у статті [15] запропонована гібридна модель хмарних і граничних обчислень для роїв БПЛА. Ця модель розширює ємність ресурсів БПЛА за рахунок використання граничних серверів, які здатні обробляти дані з низькою затримкою. Також ця стаття описує алгоритм взаємодії граничних та хмарних обчислень для оброблення та зберігання великих даних у хмарі.

Представлена у [16] бездротова мобільна система використовує БПЛА для розвантаження обчислювальних завдань, вирішуваних мобільними наземними користувачами, а також дозволяє мінімізувати енергоспоживання БПЛА шляхом спільної оптимізації розвантаження обчислень та побудови траєкторії польоту БПЛА. Результати моделювання показали, що запропонована система перевершує інші еталонні схеми з точки зору конвергенції.

У [17] ті ж автори розглянули можливість застосування розробленої у [16] системи для максимізації швидкості обчислень шляхом реалізації двох алгоритмів оптимізації граничних обчислень на борту БПЛА, його енергетичних ресурсів та траєкторії польоту.

Алгоритм розвантаження завдань користувачів шляхом застосування граничних обчислень на БПЛА-серверах з подальшим обробленням результатів на визначених точках доступу представлено у [18]. Цей алгоритм також дозволяє оптимізувати розподіл обчислювальних ресурсів між БПЛА й користувачами, а також оптимізувати розподіл смуги пропускання та траєкторію польоту БПЛА.

У [19] було продемонстровано можливості використання технологій напівмарківського процесу прийняття рішень і глибокого навчання з підкріпленням для максимізації пропускну здатності БПЛА-сервера, що виконує граничні обчислення в режимі реального часу в інтересах наземних користувачів.

У [20] автори застосували методи теорії ігор для вирішення проблеми розвантаження обчислень в літаючих бездротових мережах з одночасним зменшенням витрат енергетичних ресурсів БПЛА та затримки виконання завдань. Відповідно до запропонованого підходу у якості гравців, що взаємодіють між собою під час виконання обчислювальних завдань, розглядаються БПЛА, НСУ та граничний сервер. Завдання обробляється на борту БПЛА, після чого розвантажується на найближчу НСУ або на граничний сервер.

У статті [21] обговорені проблеми застосування багаторівневої архітектури мережі 5G, у якій

БПЛА виступають у ролі літаючих вузлів граничних обчислень.

Робота [22] пропонує ітераційний алгоритм кластеризації з ефективним покриттям, який передбачає застосування методів координатного та блочного спуску для вирішення задачі максимізації покриття сенсорів БПЛА, що виконують граничні обчислення, при обмеженнях на час затримки.

*Аналіз публікацій, присвячених ЛТО.* Представлені у [23] дослідження стосувалися проблеми застосування ЛТО в інтересах Індустрії 4.0. У цій статті була детально описана структура, у якій БПЛА, що реалізують ЛТО, розвантажують завдання, виконувани наземними датчиками, а також за допомогою жадібного алгоритму оптимізують розподіл таких завдань з метою максимізації їх виконаної кількості за визначений проміжок часу.

Представлена авторами [24] система ЛТО під назвою UAVFog, використовуючи туманні обчислення та мобільність БПЛА, дозволяє забезпечити зберігання необхідної кількості даних, гнучкий зв'язок, низьку затримку для IoT-застосунків, а також постачає послуги Інтернету речей: брокерські послуги й послуги на основі місцезнаходження.

У роботі [25] досліджувалися аспекти розвантаження завдань за допомогою БПЛА у ієрархічній системі туманних обчислень. Для ефективної взаємодії БПЛА, де реалізуються ЛТО, і наземного хмарного середовища, де здійснюються основні обчислення та зберігаються їх результати, використовувалася технологія множинних входів і множинних виходів (Multiple Input Multiple Output (MIMO)).

У [26] авторами запропоновано підхід щодо інтеграції туманних обчислень із ройовою системою БПЛА для виконання обчислень на борту БПЛА з низькою затримкою й високим рівнем надійності. Крім того, автори продемонстрували можливості розробленого ними генетичного евристичного алгоритму для оптимізації розподілу завдань з метою максимально зменшення енергетичних ресурсів БПЛА.

У роботі [27] детально розглянуто особливості реалізації ЛТО у FANET, а також описані послуги на основі ЛТО, що можуть постачатися такими мережами.

Таким чином, основними проблемними питаннями, які підіймаються у літературних джерелах, присвячених застосуванню ЛХО, ЛГО та ЛТО, є наступні:

- масштабованість, надійність, усталеність та безпека запропонованих архітектур;
- розвантаження завдань;
- мінімізація енергоспоживання;
- розподіл ресурсів;
- організація зв'язку та покриття;
- затримки під час роботи в реальному часі;
- особливості управління БПЛА, їх взаємодія, траєкторії руху та оптимізація маршрутів;
- обробка та зберігання інформації у хмарному середовищі.

Варто також відзначити, що у представлених джерелах дуже часто говорять про літаючі обчис-

лення лише у зв'язку з наявністю БПЛА у складі запропонованих архітектур, хоча дуже часто ці архітектури передбачають наявність компонентів, відповідальних за проведення аналогічних наземних обчислень (НХО, НГО, НТО).

Саме поєднання наземної та літаючої обчислювальної складової робить більшість таких архітектур більш ефективними.

### Порівняльний аналіз технологій ЛХО, ЛГО та ЛТО

На основі розглянутих вище основних публікацій за цією тематикою авторами було проведено порівняльний аналіз технологій ЛХО, ЛГО та ЛТО з визначенням особливостей архітектури рішень на їх основі, а також основних переваг та недоліків. Результати аналізу подані у табл. 1.

Як ми можемо бачити з табл. 1, архітектури ЛГО та ЛТО мають переваги над архітектурами ЛХО у гнучкості та енергоефективності, однак поступаються їм у потужності засобів оброблення та зберігання інформації.

### Варіанти схем організації літаючих хмарних, граничних та туманних обчислень

Враховуючи підходи щодо організації ЛХО, ЛГО та ЛТО, розглянуті у проаналізованих джерелах і варіанти архітектур з реалізацією таких обчислень, поданих у [28], розглянемо приклади різних варіантів схем організації ЛХО, ЛГО та ЛТО (рис. 1-3).

Запропонований на рис. 1 варіант схеми організації ЛХО може бути застосований у сценарії підтримки прийняття рішень під час ліквідації надзвичайних ситуацій, коли всі кінцеві пристрої (КП) КП-1, КП-2, ... КП-*m* можуть обмінюватися інформацією один з одним, але не мають доступу до зовнішнього світу (немає Інтернету). Локальні послуги (наприклад, розвантаження завдань) надаються на рівні наземних граничних обчислень (шляхом застосування наземних вузлів граничних обчислень НВГО-1, НВГО-2, ... НВГО-*k*) або на рівні наземних туманних граничних обчислень (шляхом застосування наземних вузлів туманних обчислень НВТО-1, НВТО-2, ... НВТО-*r*).

Глобальні ж послуги (наприклад, збирання даних, забезпечення безпекових функцій, застосування обчислювальних ресурсів, підтримка прийняття рішень) надаються флотом БПЛА, який виступає у ролі підсистеми літаючих хмарних обчислень (ПсЛХО), а БПЛА флоту – у ролі літаючих вузлів хмарних обчислень ЛВХО-1, ЛВХО-2, ... ЛВХО-*s*.

У варіанті схеми ЛГО (рис. 2) флот БПЛА, який виступає у якості підсистеми літаючих граничних обчислень (ПсЛГО), перебуває поблизу джерел даних (кінцевих пристроїв КП-1, КП-2, ... КП-*m*), надає їм необхідні послуги та здійснює необхідні для них обчислення на літаючих вузлах граничних обчислень ЛВГО-1, ЛВГО-2, ... ЛВГО-*n*. Близькість зазначених вузлів до джерел даних дозволяє зменшити час затримки, покращити пропускну здатність, а також збільшити термін служби мережі за рахунок більш ефективного використання ресурсу батареї кінцевих пристроїв.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз технологій літаючих хмарних, граничних та туманних обчислень

Вид	Особливості архітектури	Основні переваги	Основні недоліки
Літаючі хмарні обчислення	Централізована обробка. Швидкий доступ через Інтернет до великої кількості даних.	Масштабованість. Економічна ефективність. Використання надійного TCP/IP протоколу.	Великий час затримки. Обмежена пропускна здатність. Вразливості системи безпеки. Відсутність автономного режиму. Проблема обробки інформації у разі, якщо багато пристроїв надсилають дані одночасно. Обмежений ресурс батареї. Єдина точка відмови.
Літаючі граничні обчислення	Немає потреби у стаціонарній комунікаційній інфраструктурі. Літаючий вузол діє як підсистема комунікації та зв'язку. Літаючий вузол знаходиться ближче до кінцевих пристроїв.	Гнучкість. Масштабованість. Енергоефективність. Здатність працювати з мобільними кінцевими пристроями. Можливість автономного виконання процесів, правил та алгоритмів.	Обмежений ресурс батареї літаючого вузла. Єдина точка відмови.
Літаючі туманні обчислення	Децентралізована обробка. Поширює можливості хмарного середовища до границі мережі.	Гнучкість. Масштабованість. Енергоефективність. Низька затримка передачі даних та кращий взаємозв'язок з кінцевими пристроями. Поліпшені можливості використання технологій бездротового доступу. Розширені можливості для застосунків, що працюють у реальному часі.	Обмежений ресурс батареї літаючого вузла. Єдина точка відмови. Дані можуть надсилатися до літаючого вузла складними маршрутами, що збільшує імовірність їхньої часткової або повної втрати.

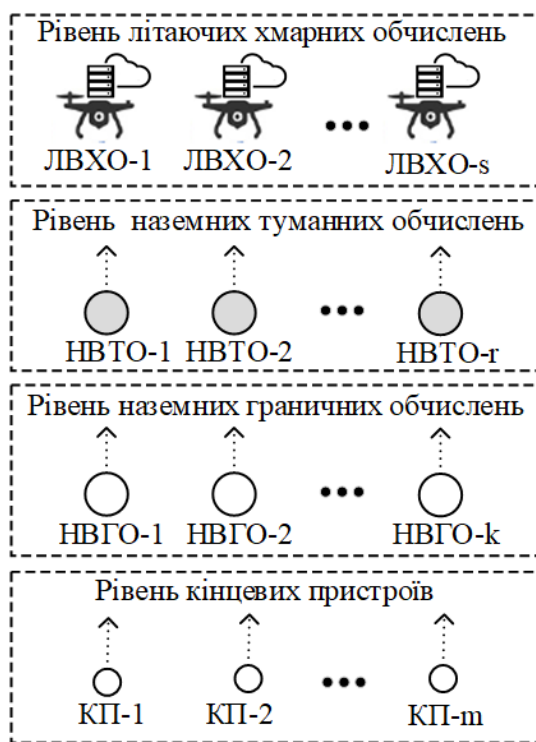


Рис. 1. Варіант схеми організації літаючих хмарних обчислень

Якщо ж підсистема літаючих граничних обчислень не може надати необхідну послугу, вона

створює можливість надання цієї послуги за допомогою НХО.

У варіанті схеми ЛТО (рис. 3) флот БПЛА, який виступає у ролі підсистеми літаючих туманних обчислень (ПсЛТО), а БПЛА флоту – у ролі літаючих вузлів туманних обчислень ЛВТО-1, ЛВТО-2, ... ЛВТО-r, поєднує за допомогою бездротових каналів наземні хмарні сервери та кінцеві пристрої КП-1, КП-2, ... КП-m з метою забезпечення більш високої ємності зберігання, швидкості обчислень, а також невеликого часу затримки для кінцевих пристроїв КП-1, КП-2, ... КП-m.

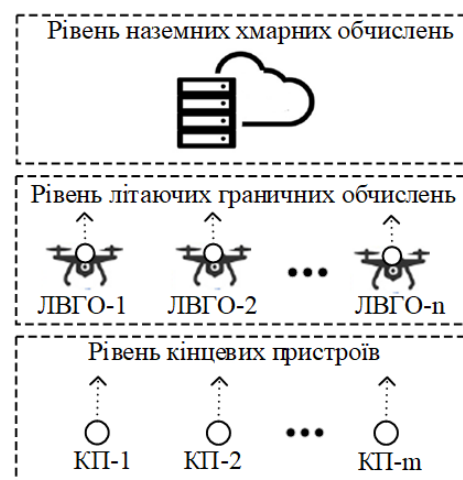


Рис. 2. Варіант схеми організації літаючих граничних обчислень

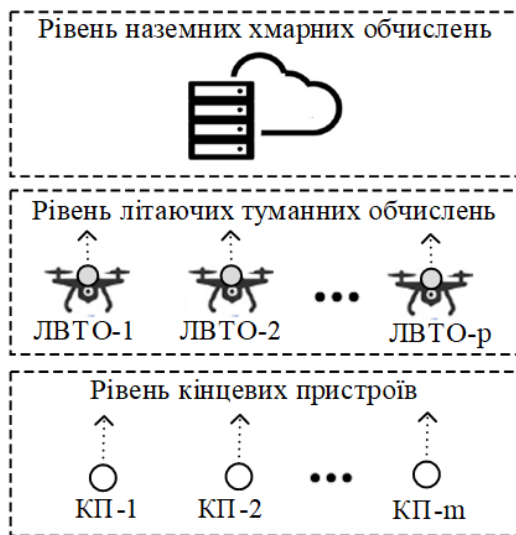


Рис. 3. Варіант схеми організації літаючих туманних обчислень

### Компоненти перспективної системи моніторингу потенційно небезпечних об'єктів та доцільність використання ними хмарних, граничних та туманних обчислень

На думку авторів, ЛХО, ЛГО та ЛТО разом з наземними видами таких обчислень можуть бути затребувані під час розробки перспективних СМ ПНО.

Таблиця 2 – Варіант застосування хмарних, граничних та туманних обчислень компонентами СМ ПНО

Види обчислень		Компоненти СМ ПНО				
		ПНО	Флот БПЛА	ПДП	КЦ	ГЗЕ
Хмарні обчислення	літаючі	–	+	–	–	–
	наземні	–	–	+	+	+
Граничні обчислення	літаючі	–	+	–	–	–
	наземні	+	–	–	–	–
Туманні обчислення	літаючі	–	+	–	–	–
	наземні	–	–	–	–	–

З табл. 2 видно, що найбільш затребуваними є хмарні обчислення, які реалізуються як літаючим компонентом (флотом БПЛА), так і трьома наземними компонентами (ПДП, КЦ, ГЗЕ), а найменш затребуваними – туманні обчислення, які реалізуються тільки літаючим компонентом (флотом БПЛА).

Табл. 3 показує, що найбільша кількість підсистем може бути розгорнута у складі флоту БПЛА, оскільки на нього можуть бути покладені завдання з проведення одразу трьох видів обчислень – ЛХО, ЛГО та ЛТО.

### Перспективи використання методів штучного інтелекту підсистемами СМ ПНО, що використовує ЛХО, ЛГО та ЛТО

Застосування методів штучного інтелекту для мережних завдань набуло популярності протягом останніх кількох десятиліть. Наприклад, штучний інтелект широко використовується в мережній сфері

Розглянемо перспективну СМ ПНО, до якої входять такі основні компоненти:

– ПНО, який містить об'єкти контролю, до яких, як правило, належать критичні з точки зору безпеки технологічні установки;

– кризовий центр (КЦ), призначений для відпрацювання рішень, спрямованих на попередження та ліквідацію наслідків аварій на ПНО, а також прогнозування виникнення таких аварій і оцінки їх наслідків;

– флот БПЛА, який здійснює функції збору, часткової обробки та передачі моніторингової інформації до КЦ;

– пункт дистанційного пілотування (ПДП), який забезпечує здійснення зовнішнім пілотом (оператором) керування та контроль БПЛА на землі та в повітрі;

– група зовнішніх експертів (ГЗЕ), які дистанційно беруть участь разом з відповідним персоналом КЦ у відпрацювання рішень, спрямованих на попередження та ліквідацію наслідків аварій на ПНО.

Зважаючи на виконувани СМ ПНО завдання, автори пропонують використовувати компонентами СМ ПНО ті чи інші види літаючих та наземних обчислень відповідно до таблиці 2. Для реалізації цих видів обчислень у складі компонентів СМ ПНО можуть розгортатися одна або декілька підсистем (табл. 3).

завдяки своїй здатності взаємодіяти зі складним середовищем для інтелектуалізації процесу прийняття рішень.

Таблиця 3 – Підсистеми у складі компонентів СМ ПНО, створювані для реалізації хмарних, граничних та туманних обчислень

Компонент СМ ПНО	Назва підсистеми
ПНО	ПсНГО-ПНО
Флот БПЛА	ПсЛХО-Ф
	ПсЛГО-Ф
	ПсЛТО-Ф
ПДП	ПсНХО-ПДП
КЦ	ПсНХО-КЦ
ГЗЕ	ПсНХО-ГЗЕ

Використання методів ШІ може покращувати продуктивність мережі в багатьох субдоменах, таких як розподіл ресурсів, прогнозування й класифікація мережевого трафіку, контроль перевантаження та маршрутизація. Підсистеми СМ ПНО, які формують як наземні, так і літаючі мережі на основі БПЛА, а також використовують ЛХО, ЛГО та ЛТО для розширення своїх можливостей, повинні забезпечувати безперебійне з'єднання, відповідати вимогам якості обслуговування для багатьох кінцевих пристроїв, обробляти величезний обсяг даних, створених фізичним середовищем. Методи ШІ, які пропонують надійний аналіз, навчання, оптимізацію та можливості інтелектуального розпізнавання, можуть бути інтегровані в підсистеми СМ ПНО для інтелектуальної оптимізації продуктивності, виявлення необхідної моніторингової інформації, розширеного навчання, організації структури та підтримки прийняття складних рішень щодо прогнозування наслідків аварій на ПНО та реагування на такі аварії.

На підставі проведеного аналізу авторами було сформовано перелік завдань, виконуваних підсистемами СМ ПНО з використанням різних методів штучного інтелекту (табл. 4).

Методами, що використовуються, є такі [29]:

- DL – deep learning (глибоке навчання);
- DSL – deep supervised learning (глибоке кероване навчання);
- DRL – deep reinforcement learning (глибоке навчання з підкріпленням);
- FI – fuzzy inference (нечітке виведення);
- FL – federated learning (федеративне навчання);
- GA – genetic algorithm (генетичний алгоритм);
- RL – reinforcement learning (навчання з підкріпленням);
- RL-ACO – reinforcement learning based on ant colony optimization (навчання з підкріпленням на основі алгоритму оптимізації мурашиної колонії).

Таблиця 4 – Завдання, виконувани підсистемами СМ ПНО з використанням різних методів штучного інтелекту

Завдання	Метод ШІ	Підсистеми СМ ПНО						
		ПєЛХО-Ф	ПєЛГО-Ф	ПєЛТО-Ф	ПєНГО-ПНО	ПєНХО-ПДЦ	ПєНХО-КЦ	ПєНХО-ГЗЕ
Розвантаження обчислень	RL	+	+	+	+	+	+	+
	DRL	+	+	+	+	+	+	+
	GA	+	+	+	+	+	+	+
	DL	+	+	+	+	+	+	+
	FI	+	+	+	+	+	+	+
Розподіл ресурсів	RL	+	–	–	+	+	+	+
	DRL	+	–	–	+	+	+	+
	GA	+	–	–	+	+	+	+
	RL-ACO	+	–	–	+	+	+	+
Підтримка прийняття рішень	RL	+	–	–	–	–	+	+
	DRL	+	–	–	–	–	+	+
	GA	+	–	–	–	–	+	+
	DL	+	–	–	–	–	+	+
	FI	+	–	–	–	–	+	+
	FL	+	–	–	–	–	+	+
Забезпечення безпеки	RL	+	+	+	+	+	+	+
	DRL	+	+	+	+	+	+	+
	GA	+	+	+	+	+	+	+
	DL	+	+	+	+	+	+	+
	FL	+	+	+	+	+	+	+
Планування маршрутів руху БПЛА	RL	+	–	+	–	+	–	–

Як ми можемо бачити з табл. 4:

– найбільш затребуваним є метод RL, який використовується для вирішення всього спектру представлених завдань та в інтересах всіх підсистем СМ ПНО;

– найменш затребуваним є метод RL-АСО, який використовується тільки для вирішення завдань розподілу ресурсів в інтересах п'яти із семи підсистем СМ ПНО;

– найбільше методів штучного інтелекту (RL, DRL, GA, DL, FI, FL) використовується під час вирішення завдань, пов'язаних з підтримкою прийняття рішень;

– найменше методів (RL) використовується для вирішення завдань, пов'язаних з плануванням маршрутів руху БПЛА.

### Висновки

Представлено результати порівняльного аналізу технологій ЛХО, ЛГО та ЛТО з визначенням особливостей архітектури рішень на їх основі, а також основних переваг та недоліків. Зазначені результати показали, що архітектури ЛГО та ЛТО мають переваги над архітектурами ЛХО у гнучкості та енергоефективності, однак поступаються їм у потужності засобів оброблення та зберігання інформації.

Розглянуто варіанти багаторівневих схем організації ЛХО, ЛГО та ЛТО й показані особливості взаємодії літаючих вузлів з кінцевими пристроями.

Запропоновано варіант застосування ЛХО, ЛГО та ЛТО компонентами СМ ПНО. У цьому варіанті найбільш затребуваними є хмарні обчислення, які реалізуються як літаючим компонентом (флотом

БПЛА), так і трьома наземними компонентами (ПДП, КЦ, ГЗЕ), а найменш затребуваними – туманні обчислення, які реалізуються тільки літаючим компонентом (флотом БПЛА). Показано, які підсистеми у складі компонентів СМ ПНО повинні бути створені для реалізації вказаних обчислень. Найбільшу кількість підсистем необхідно розгорнути у складі флоту БПЛА, оскільки на нього можуть бути покладені завдання з реалізації одразу трьох видів обчислень – ЛХО, ЛГО та ЛТО.

Запропоновано варіант використання методів ШІ для розширення можливостей ЛХО, ЛГО та ЛТО під час виконання СМ ПНО завдань з розвантаження обчислень, розподілу ресурсів, підтримки прийняття рішень, забезпечення безпеки й планування маршрутів руху БПЛА.

Відповідно до цього варіанту найбільш затребуваним є метод RL, який використовується для вирішення всього спектру представлених завдань та в інтересах всіх підсистем СМ ПНО, а найменш затребуваним – метод RL-АСО, який використовується тільки для вирішення завдань розподілу ресурсів в інтересах п'яти із семи підсистем СМ ПНО. Найбільше методів штучного інтелекту (RL, DRL, GA, DL, FI, FL) використовується під час вирішення завдань, пов'язаних з підтримкою прийняття рішень, а найменше – під час вирішення завдань, пов'язаних з плануванням маршрутів руху БПЛА.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення моделей оптимізації кількості літаючих вузлів (БПЛА) у складі підсистем ЛХО, ЛГО та ЛТО за критерієм швидкості обробки моніторингової інформації.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Zaidi S., Atiqzaman M., Calafate T. Internet of flying things (IoFT): A survey. *Computer Communications*. 2020. Vol. 165. P. 53–74. DOI: 10.1016/j.comcom.2020.10.023.
- Mahmoud S., Mohamed N. Broker architecture for collaborative UAVs cloud computing. *2015 International Conference on Collaboration Technologies and Systems. CTS'2015* : proceedings, 1–5 June 2015, Atlanta, GA, USA. P. 212–219. DOI: 10.1109/CTS.2015.7210423.
- Mahmoud S., Mohamed N., Al-Jaroodi J. Integrating UAVs into the Cloud Using the Concept of the Web of Things. *Journal of Robotics*. 2015. Vol. 2015. Article ID 631420. DOI: 10.1155/2015/631420.
- Sara M., Jawhar I., Nader M. A softwarization architecture for UAVs and WSNs as Part of the cloud environment. *2016 International Conference on Cloud Engineering Workshops. IC2EW'2016* : proceedings, 4–8 April 2016, Berlin, Germany. P. 13–189. DOI: 10.1109/IC2EW.2016.17.
- Majumder S., Prasad M. S. Cloud based control for unmanned aerial vehicles. *2016 3rd International Conference on Signal Processing and Integrated Networks. SPIN'2016* : proceedings, 11–12 February 2016, Noida, India. P. 421–424. DOI: 10.1109/SPIN.2016.7566731.
- Yapp J., Seker R., Babiceanu R. UAV as a service: Enabling on-demand access and on-the-fly re-tasking of multi-tenant UAVs using cloud services. *2016 IEEE/AIAA 35th Digital Avionics Systems Conference. DASC'2016* : proceedings, 25–29 September 2016, Sacramento, CA, USA. P. 1–8. DOI: 10.1109/DASC.2016.7778007.
- Youssef S. B. H., Rekhis S., Boudriga N., Bagula A. A cloud of UAVs for the delivery of a sink as a service to terrestrial WSNs. *2016 14th International Conference on Advances in Mobile Computing and Multi Media. MoMM'16* : proceedings, 28–30 November 2016, Singapore, Singapore. P. 317–326. DOI: 10.1145/3007120.3007138.
- Zhang Y., Yuan Z. Cloud-based UAV data delivery over 4G network. *2017 10th International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Network. ICMU'2017* : proceedings, 03–05 October 2017, Toyama, Japan. P. 1–2. DOI: 10.23919/ICMU.2017.8330084.
- Hong C., Shi D. A cloud-based control system architecture for multi-UAV. *2018 3rd International Conference on Robotics, Control and Automation. ICRA'2018* : proceedings, 11–13 August 2018, Chengdu, China. P. 25–30. DOI: 10.1145/3265639.3265652.
- Stan R. G., Negru C., Pop F. CloudWave: Content gathering network with flying clouds. *Future Generation Computer Systems*. 2019. Vol. 98. P. 474–486. DOI: 10.1016/j.future.2019.03.033.
- Rodrigues M., Branco K. R. L. J. Cloud-SPHERE: Towards Secure UAV Service Provision. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2020. Vol. 97. P. 249–268. DOI: 10.1007/s10846-019-01046-6.

12. Narang M., Xiang S., Liu W., Gutierrez J., Chiaraviglio L., Sathiaselan A., Merwaday A. UAV-assisted edge infrastructure for challenged networks. *2017 IEEE Conference on Computer Communications Workshops. INFOCOM WKSHPs '2017*: proceedings, 01–04 May 2017, Atlanta, GA, USA. P. 60–65. DOI: 10.1109/INFCOMW.2017.8116353.
13. Cheng N., Xu W., Shi W., Zhou Y., Lu N., Zhou H., Shen X. Air-Ground Integrated Mobile Edge Networks: Architecture, Challenges, and Opportunities. *IEEE Communications Magazine*. 2018. Vol. 56. P. 26–32. DOI: 10.1109/MCOM.2018.1701092.
14. Zhou Z., Feng J., Tan L., He Y., Gong, J. An Air-Ground Integration Approach for Mobile Edge Computing in IoT. *IEEE Communications Magazine*. 2018. Vol. 56. P. 40–47. DOI: 10.1109/MCOM.2018.1701111.
15. Chen W., Liu B., Huang H., Guo S., Zheng Z. When UAV Swarm Meets Edge-Cloud Computing: The QoS Perspective. *IEEE Network*. 2019. Vol. 33. P. 36–43. DOI: 10.1109/MNET.2019.1800222.
16. Zhou F., Wu Y., Sun H., Chu Z. UAV-Enabled mobile edge computing: Offloading optimization and trajectory design. *2018 IEEE International Conference on Communications. ICC '2018*: proceedings, 20–24 May 2018, Kansas City, MO, USA. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICC.2018.8422277.
17. Zhou F., Wu Y., Hu R. Q., Qian Y. Computation rate maximization in UAV-Enabled wireless-powered mobile-edge computing systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2018. Vol. 36. P. 1927–1941. DOI: 10.1109/JSAC.2018.2864426.
18. Hu X., Wong K.-K., Yang K., Zheng Z. UAV-Assisted Relaying and Edge Computing: Scheduling and Trajectory Optimization. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2019. Vol. 18. P. 4738–4752. DOI: 10.1109/TWC.2019.2928539.
19. Li J., Liu Q., Wu P., Shu F., Jin S. Task Offloading for UAV-based Mobile Edge Computing via Deep Reinforcement Learning. *2018 IEEE/CIC International Conference on Communications in China. ICC'2018*: proceedings, 16–18 August 2018, Beijing, China. P. 798–802. DOI: 10.1109/ICCChina.2018.8641189.
20. Messous M. A., Senouci S. M., Sedjelmaci H., Cherkaoui S. A Game Theory Based Efficient Computation Offloading in an UAV Network. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2019. Vol. 68. P. 4964–4974. DOI: 10.1109/TVT.2019.2902318.
21. Nguyen V. D., Khanh T. T., Van Nam P., Thu N. T., Seon Hong C., Huh E. N. Towards Flying Mobile Edge Computing. *2020 International Conference on Information Networking. ICOIN'2020*: proceedings, 07–10 January 2020, Barcelona, Spain. P. 723–725. DOI: 10.1109/ICOIN48656.2020.9016537.
22. You W., Dong C., Cheng X., Zhu X., Wu Q., Chen G. Joint Optimization of Area Coverage and Mobile-Edge Computing with Clustering for FANETs. *IEEE Internet of Things Journal*. 2021. Vol. 8. P. 695–707. DOI: 10.1109/JIOT.2020.3006891.
23. Lee G., Saad W., Bennis M. Online Optimization for UAV-Assisted Distributed Fog Computing in Smart Factories of Industry 4.0. *2018 IEEE Global Communications Conference. GLOBECOM'2018*: proceedings, 09–13 December 2018, Abu Dhabi, United Arab Emirates. P. 1–3 DOI: 10.1109/GLOCOM.2018.8647441.
24. Mohamed N., Al-Jaroodi J., Jawhar I., Noura H., Mahmoud S. UAVFog: A UAV-based fog computing for Internet of Things. *2017 IEEE SmartWorld Ubiquitous Intelligence and Computing, Advanced and Trusted Computed, Scalable Computing and Communications, Cloud and Big Data Computing, Internet of People and Smart City Innovation, SmartWorld/SCALCOM/UIC/ATC/CBDCOM/IOP/SCI'2017*: proceedings, 04–08 August 2017, San Francisco, CA, USA. P. 1–8. DOI: 10.1109/UIC-ATC.2017.8397657.
25. Ti N. T., Bao Le L. Joint resource allocation, computation offloading, and path planning for UAV based hierarchical fog-cloud mobile systems. *2018 IEEE 7th International Conference on Communications and Electronics. ICCE'2018*: proceedings, 18–20 July 2018, Hue, Vietnam. P. 373–378. DOI: 10.1109/CCE.2018.8465572.
26. Hou X., Ren Z., Cheng W., Chen C., Zhang H. Fog Based Computation Offloading for Swarm of Drones. *2019 IEEE International Conference on Communications. ICC'2019*: proceedings, 20–24 May 2019, Shanghai, China. Vol. 2019. DOI: 10.1109/ICC.2019.8761932.
27. Devraj, Rao R. S., Das S. Fog Computing Environment in Flying Ad-hoc Network. *Cloud Computing Enabled Big-Data Analytics in Wireless Ad-hoc Networks*: collective monograph / ed. by S. Das, R. S. Rao, I. Das, V. Jain, N. Singh. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2022. P. 31–48. DOI: 10.1201/9781003206453-3.
28. Uddin M. A., Ayaz M., Mansour A., Aggoune, el H. M., Sharif Z., Razzak I. Cloud-connected flying edge computing for smart agriculture. *Peer-to-Peer Networking and Applications*. 2021. Vol. 14. P. 3405–3415. DOI: 10.1007/s12083-021-01191-6.
29. Yazid Y., Ez-Zazi I., Guerrero-González A., El Oualkadi A., Arioua M. UAV-enabled mobile edge-computing for IoT based on AI: A comprehensive review. *Drones*. 2021. Vol. 5. Article ID 631420. DOI: 10.3390/drones5040148.

Received (Надійшла) 21.09.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.11.2022

### Prospects for the use of flying cloud, boundary and fog computing by components of monitoring systems of potentially dangerous objects

S. Skorobohatko, H. Fesenko

**Abstract.** The article provides a comparative analysis of the technologies of flying cloud computing (FCC), flying edge computing (FEC), and flying fog computing (FFC). Features of systems built using these technologies are shown and the advantages and disadvantages of the technologies are determined. Variants of FCC, FEC, and FFC organization schemes were considered. The expediency is substantiated and the option of utilizing FCC, FEC, and FFC by components of the monitoring system (MS) for the potentially dangerous object (PDO) with unmanned aerial vehicles (UAVs) is proposed. The prospects for using artificial intelligence (AI) methods by the subsystems of the components of the MS PDO were evaluated. A variant of using AI methods is proposed to expand the capabilities of FCC, FEC, and FFC during the execution of MS PDO tasks on offloading calculations, resource allocation, decision-making support, ensuring safety, and UAV path planning.

**Keywords:** cloud computing, edge computing, fog computing, unmanned aerial vehicles, cloud technologies, artificial intelligence, monitoring system, potentially dangerous object.