

УДК 502.51:504.5

Serhii Fadeichev, postgraduate

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-1594-9683> **e-mail:** serhii.fadeichev@itgip.org

Oleksandr Trofymchuk, Corresponding Member of the NASU, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Institute of Telecommunications and Global Information Space

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3358-6274> **e-mail:** trofymchuk@nas.gov.ua

Vasyl Trysnyuk, Doctor of Technical Sciences, Professor

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9920-4879> **e-mail:** trysnyuk@ukr.net

Institute of Telecommunications and Global Information Space of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

SYNERGY OF QUANTUM COMPUTING AND FEDERATED LEARNING IN INFORMATION TECHNOLOGY DETECTION OF HIDDEN TARGET GROUPS

Abstract. *The article considers the information technology of detecting hidden target groups in large distributed data sets based on the synergy of quantum computing and federated learning. It is shown that in modern information systems for analyzing big data, traditional methods of machine learning and intelligent analysis demonstrate limited effectiveness in identifying poorly represented or hidden structures, especially under conditions of statistical imbalance of samples, high dimensionality of the feature space and distributed storage of information. The proposed approach combines federated learning as an information technology of distributed model formation without data centralization with quantum algorithms of amplitude amplification, which allows to increase sensitivity to weak signals in subspaces with increased information significance. The paper considers the architecture of a hybrid information technology, which includes classical computing nodes, a level of federated aggregation and a quantum computing module, as well as a structural and algorithmic scheme of interaction of classical and quantum components. The algorithmic aspects of the implementation of the proposed approach are analyzed, taking into account the limitations of modern quantum computing platforms of the NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) class, in particular the limited number of qubits and the influence of noise. It is shown that the use of selective quantum processing and iterative interaction between classical and quantum circuits allows to ensure the reproducibility of the results and the possibility of practical implementation of the proposed information technology. The proposed approach is a promising direction in the development of information technologies for analyzing large distributed data and can be used as a theoretical and applied basis for further research in the field of hybrid classical-quantum computing systems.*

Keywords: *information technologies, federated learning, quantum computing, hybrid algorithms, big data analysis, hidden target groups.*

С.В. Фадейчев, О.М. Трофимчук, В.М. Триснюк

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України,
м. Київ, Україна

СИНЕРГІЯ КВАНТОВИХ ОБЧИСЛЕНЬ ТА ФЕДЕРАТИВНОГО НАВЧАННЯ В ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ ВИЯВЛЕННЯ ПРИХОВАНИХ ЦІЛЬОВИХ ГРУП

***Анотація.** У статті розглянуто інформаційну технологію виявлення прихованих цільових груп у великих розподілених масивах даних на основі синергії квантових обчислень та федеративного навчання. Показано, що у сучасних інформаційних системах аналізу великих даних традиційні методи машинного навчання та інтелектуального аналізу демонструють обмежену ефективність у задачах ідентифікації слабко представлених або прихованих структур, особливо за умов статистичної незбалансованості вибірок, високої розмірності простору ознак та розподіленого зберігання інформації. Запропонований підхід поєднує федеративне навчання як інформаційну технологію розподіленого формування моделей без централізації даних із квантовими алгоритмами амплітудного підсилення, що дозволяє підвищити чутливість до слабких сигналів у підпросторах із підвищеною інформаційною значущістю. У роботі розглянуто архітектуру гібридної інформаційної технології, що включає класичні обчислювальні вузли, рівень федеративної агрегації та квантовий обчислювальний модуль, а також структурно-алгоритмічну схему взаємодії класичних і квантових компонентів. Проаналізовано алгоритмічні аспекти реалізації запропонованого підходу з урахуванням обмежень сучасних квантових обчислювальних платформ класу NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum), зокрема обмеженої кількості кубітів і впливу шумів. Показано, що використання вибіркової квантової обробки та ітераційної взаємодії між класичним і квантовим контурами дозволяє забезпечити відтворюваність результатів і можливість практичного впровадження запропонованої інформаційної технології. Отримані результати підтверджують перспективність запропонованого підходу для розвитку сучасних інформаційних технологій аналізу великих розподілених даних.*

***Ключові слова:** інформаційні технології, федеративне навчання, квантові обчислення, гібридні алгоритми, аналіз великих даних, приховані цільові групи.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.4.114-122>

Вступ

Сучасні інформаційні системи функціонують в умовах стрімкого зростання обсягів даних, що формуються у розподілених середовищах, включаючи хмарні платформи, периферійні обчислювальні вузли, телекомунікаційні мережі та кіберфізичні системи. Значна частина прикладних задач аналізу таких даних пов'язана з необхідністю виявлення прихованих або слабко представлених цільових груп, які мають високу практичну цінність, але не домінують у загальному масиві інформації.

Класичні методи машинного навчання та інтелектуального аналізу даних, як правило, орієнтовані на оптимізацію середніх характеристик і демонструють знижену чутливість до рідкісних або прихованих структур.

Додаткові ускладнення створюють вимоги до конфіденційності, обмеження на централізацію даних та висока обчислювальна складність алгоритмів при зростанні розмірності простору ознак.

У цьому контексті перспективним напрямом є поєднання федеративного навчання та квантових обчислень, що дозволяє одночасно вирішувати задачі розподіленої обробки даних і підвищення ефективності пошуку у великих просторах станів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика виявлення прихованих або слабко представлених цільових груп у великих розподілених масивах даних широко представлена в сучасних дослідженнях з інформаційних технологій, машинного навчання та високопродуктивних обчислень. Існуючі підходи умовно поділяються на централізовані, розподілені та гібридні, кожен з яких має власні переваги й обмеження.

У роботах зарубіжних дослідників, зокрема Aledhari M., Razzak R., Parizi R.M., Saeed F. та інших, розглядаються інформаційні моделі аналізу великих даних у розподілених середовищах, орієнтовані на оптимізацію ресурсів і підвищення ефективності виявлення цільових структур [1]. Запропоновані ними підходи базуються на класичних алгоритмах машинного навчання та статистичного аналізу, що забезпечують хороші результати за умов відносно збалансованих вибірок, але втрачають ефективність при роботі з рідкісними або прихованими групами.

Значний пласт досліджень присвячений використанню розподілених обчислювальних платформ та програмно-визначених середовищ для аналізу великих даних. Так, у роботах Shor P.W., Li Q., Wen Z., Wu Z., Yang Q., Liu Y., Chen T., Tong Y., Mohamed H. Elsayed, та Ahmed Mohamed розглядаються інформаційні технології, що поєднують розподілену обробку даних із динамічними механізмами адаптації моделей [2, 3, 4]. Ці підходи дозволяють масштабувати обчислення, однак потребують централізованого доступу до параметрів моделей, що ускладнює застосування в умовах підвищених вимог до конфіденційності.

Окрему групу становлять дослідження, присвячені побудові когнітивних і самоадаптивних інформаційних систем. У працях Schuld M., Petruccione F., Havlíček V., Córcoles A.D., Temme K., Kandala A., Mezzacapo A., Bonawitz K., Ivanov V., Kreuter B. запропоновано інформаційні підходи, що використовують адаптивні алгоритми аналізу середовища для виявлення оптимальних стратегій обробки даних [5, 6, 7, 8]. Хоча ці методи демонструють високу адаптивність, вони орієнтовані переважно на локальні оптимізації та не забезпечують ефективного пошуку прихованих глобальних структур у великих розподілених датасетах.

Важливим напрямом є застосування федеративного навчання як інформаційної технології розподіленого аналізу даних. У низці робіт показано, що федеративні підходи дозволяють здійснювати навчання моделей без централізації даних, що суттєво знижує ризики витоку інформації. Водночас агреговані моделі часто втрачають чутливість до слабких сигналів, оскільки оптимізація здійснюється з урахуванням домінуючих патернів.

Суттєвий внесок у розвиток розподілених інформаційних систем та телекомунікаційних підходів до аналізу даних зроблено українськими науковцями. Зокрема, у працях професора В. Устименка розглядаються принципи побудови складних інформаційних середовищ, інтеграції

різнорідних джерел даних та підвищення достовірності інформаційних процесів у багаторівневих системах. Запропоновані підходи створюють методологічну основу для розвитку розподілених інформаційних технологій, проте не орієнтовані безпосередньо на задачі підсилення слабких або прихованих сигналів [9, 10].

Окремо слід відзначити дослідження, присвячені застосуванню квантових обчислень в інформаційних технологіях аналізу даних. У сучасних роботах квантові алгоритми розглядаються як інструмент прискорення пошуку та оптимізації у просторах великої розмірності. Проте більшість таких досліджень мають теоретичний характер або не враховують обмеження квантових процесорів класу NISQ, що ускладнює їх практичне впровадження.

Таким чином, аналіз існуючих інформаційних підходів, представлених у сучасних наукових публікаціях і джерелах, свідчить про відсутність універсального рішення для виявлення прихованих цільових груп у великих розподілених масивах даних. Це обґрунтовує доцільність розробки гібридної інформаційної технології, що поєднує федеративне навчання як механізм розподіленої побудови моделей із квантовими обчисленнями для підсилення слабких сигналів, що й реалізовано в межах даної роботи.

Метою цієї роботи є вдосконалення інформаційної технології виявлення прихованих цільових груп у великих розподілених масивах даних на основі синергії квантових обчислень та федеративного навчання з метою підвищення чутливості до слабо представлених структур і зниження обчислювальної складності аналізу даних у розподілених середовищах.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно розв'язати такі завдання:

- проаналізувати сучасні інформаційні підходи та алгоритми виявлення прихованих і слабо представлених цільових груп у великих масивах даних;
- дослідити можливості федеративного навчання як інформаційної технології розподіленої побудови моделей без централізації даних;
- проаналізувати застосування квантових алгоритмів амплітудного підсилення для підвищення ефективності пошуку у просторах великої розмірності;
- розробити концепцію синергії квантових обчислень і федеративного навчання для виявлення прихованих цільових груп;
- сформувати архітектуру інформаційної технології, що поєднує класичні та квантові обчислювальні компоненти;
- дослідити алгоритмічні аспекти реалізації запропонованої інформаційної технології з урахуванням обмежень сучасних квантових обчислювальних платформ;
- оцінити перспективи практичного застосування запропонованого підходу в інтелектуальних системах аналізу даних.

Об'єктом дослідження є процеси інформаційних технологій аналізу великих розподілених масивів даних із використанням федеративного навчання та квантових обчислювальних методів.

Виклад основного матеріалу дослідження

Архітектура запропонованої інформаційної технології побудована за багаторівневим принципом і включає локальні обчислювальні вузли, рівень федеративної агрегації та квантовий обчислювальний модуль. Така архітектурна організація забезпечує масштабованість системи, адаптивність до розподілених середовищ і можливість поетапного впровадження без повної перебудови існуючої інфраструктури.

На локальному рівні здійснюється попередня обробка даних і навчання моделей машинного навчання на приватних або територіально розподілених наборах даних. Локальні моделі відображають специфіку окремих джерел інформації та дозволяють враховувати локальні особливості розподілу ознак. На рівень федеративної агрегації передаються лише параметри моделей або узагальнені статистичні характеристики, що мінімізує ризики витоку даних і зменшує навантаження на телекомунікаційні канали [5].

Федеративний сервер виконує агрегацію параметрів і формує глобальну модель, яка відображає узагальнену структуру даних у розподіленому середовищі. Результати агрегації використовуються для оцінювання імовірності належності об'єктів до прихованих цільових груп. На основі цієї оцінки формується набір кандидатів для подальшої обробки квантовим модулем.

Квантовий обчислювальний модуль інтегрується в архітектуру як допоміжний компонент і застосовується вибірково. Його функцією є реалізація квантових алгоритмів підсилення амплітуд для прискореного виявлення прихованих структур у відібраних підпросторах. Такий підхід дозволяє ефективно використовувати обмежені квантові ресурси та уникати необхідності повномасштабної квантової обробки всього датасету.

Алгоритмічна реалізація запропонованої інформаційної технології враховує обмеження сучасних обчислювальних платформ, зокрема квантових процесорів класу NISQ, які характеризуються обмеженою кількістю кубітів, наявністю шумів і нестабільністю результатів. У зв'язку з цим у роботі використовується підхід батчевої обробки, за якого квантові алгоритми застосовуються до обмежених підмножин даних.

Алгоритмічна взаємодія між федеративним і квантовим компонентами реалізується у вигляді ітераційного процесу [6]. На кожній ітерації результати федеративного навчання використовуються для уточнення параметрів квантового алгоритму, після чого результати квантового підсилення можуть бути повернуті у класичний контур для подальшого донавчання моделей. Така зворотна взаємодія забезпечує адаптивність і підвищує стійкість алгоритмів до шумів і похибок.

Важливим аспектом є забезпечення відтворюваності результатів. Для цього використовуються фіксовані параметри батчування, контроль випадкових ініціалізацій і стандартизовані процедури агрегації. Це дозволяє інтегрувати запропоновану технологію у промислові інформаційні системи, де вимоги до стабільності та повторюваності є критичними.

Алгоритмічна реалізація запропонованої інформаційної технології базується на поєднанні класичних методів федеративного навчання та квантових алгоритмів амплітудного підсилення, структурна взаємодія яких представлена на рис. 1 та рис. 2. Класичний контур системи забезпечує

попередню обробку даних, навчання локальних моделей і формування узагальнених імовірнісних оцінок, тоді як квантовий контур використовується для підвищення ефективності пошуку прихованих цільових груп у підпросторах із підвищеною інформаційною значущістю.

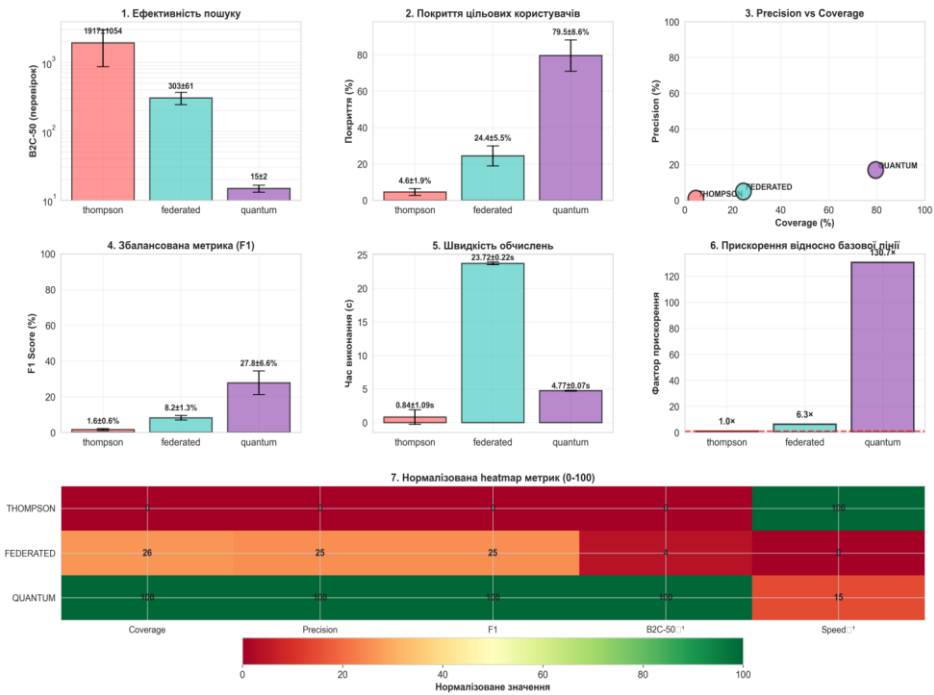


Рис. 1. Архітектура інформаційної технології на основі синергії квантових обчислень і федеративного навчання

На першому етапі локальні обчислювальні вузли виконують навчання моделей машинного навчання на власних розподілених наборах даних. Результатом цього етапу є множина параметрів моделей або імовірнісних оцінок, які характеризують належність об'єктів до потенційно цільових груп. Передавання первинних даних не здійснюється, що відповідає принципам федеративного навчання та знижує вимоги до пропускну здатності мережі.

На рівні федеративної агрегації виконується узагальнення параметрів локальних моделей із формуванням глобальної імовірнісної моделі [7]. Ця модель інтерпретується як м'яка оракул-функція, яка відображає ступінь відповідності об'єктів ознакам прихованих цільових груп. Саме ця оракул-функція використовується як вхідна інформація для квантового алгоритмічного контуру, що відображено у структурно-алгоритмічній схемі взаємодії компонентів на рис. 2.

Квантовий компонент реалізує алгоритми амплітудного підсилення, які дозволяють збільшити ймовірність виявлення об'єктів із високими значеннями м'якої оракул-функції. Застосування квантових алгоритмів обмежується підмножинами даних, сформованими на основі результатів федеративного навчання, що дозволяє суттєво зменшити розмір квантової задачі та адаптувати її до можливостей сучасних квантових процесорів.

Важливим обмеженням реалізації є використання квантових обчислювальних платформ класу NISQ, які характеризуються обмеженою кількістю кубітів, наявністю шумів і нестабільністю результатів. У запропонованій інформаційній технології ці обмеження враховано шляхом батчевої обробки даних, зменшення розмірності квантових підзадач і повторного виконання квантових алгоритмів із подальшою статистичною обробкою результатів.

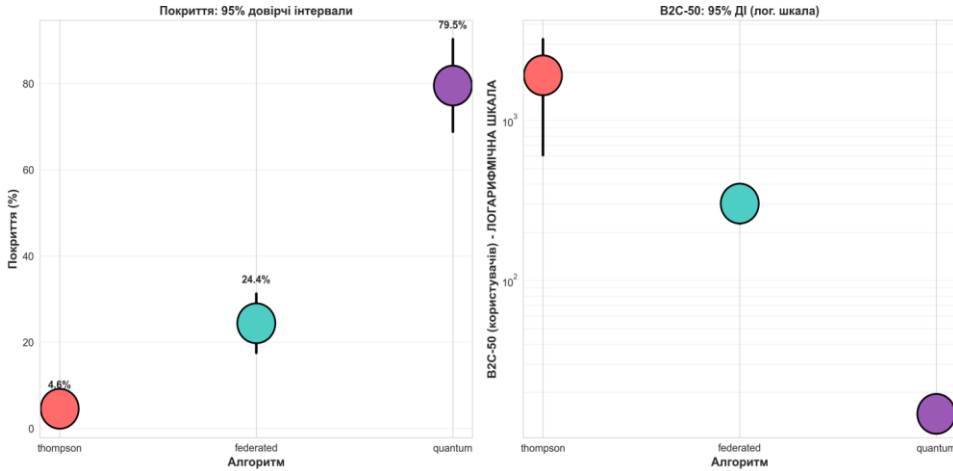


Рис. 2. Структурно-алгоритмічна схема взаємодії класичних і квантових компонентів

Алгоритмічна взаємодія між класичним і квантовим контурами реалізується в ітераційному режимі. Результати квантового підсилення можуть використовуватися для корекції параметрів класичних моделей і уточнення м'якої оракул-функції, що забезпечує адаптивність системи та підвищує її стійкість до шумів і похибок [8]. Така схема взаємодії дозволяє інтегрувати квантові обчислення в класичні інформаційні технології без порушення їхньої цілісності та відтворюваності.

Таким чином, алгоритмічні рішення, реалізовані в межах запропонованої інформаційної технології, забезпечують ефективну взаємодію федеративного навчання та квантових обчислень, що дозволяє підвищити чутливість до прихованих цільових груп за умови дотримання реальних апаратних і програмних обмежень.

Висновки

У статті представлено інформаційну технологію виявлення прихованих цільових груп у великих розподілених масивах даних на основі синергії квантових обчислень та федеративного навчання. Показано, що поєднання розподіленого навчання моделей без централізації даних із квантовими алгоритмами амплітудного підсилення дозволяє подолати обмеження класичних методів аналізу даних, пов'язані зі статистичною незбалансованістю та високою розмірністю простору ознак.

Запропонована архітектура інформаційної технології забезпечує масштабованість, адаптивність і можливість практичного впровадження в сучасні інформаційні системи. Алгоритмічні рішення враховують реальні обмеження квантових обчислювальних платформ і орієнтовані на поступову інтеграцію квантових методів у класичні інформаційні процеси.

Отримані результати свідчать, що запропонований підхід є перспективним напрямом розвитку інформаційних технологій аналізу великих розподілених даних і може бути використаний як теоретична та прикладна основа для подальших досліджень у галузі гібридних класично-квантових обчислювальних систем.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Aledhari, M., Razzak, R., Parizi, R. M., & Saeed, F. (2020). Federated learning: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Access*, 8, 140699–140725. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3013541>
2. Shor, P. W. (1999). Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer. *SIAM Review*, 41(2), 303–332. <https://doi.org/10.1137/S0036144598347011>
3. Li, Q., Wen, Z., Wu, Z., et al. (2021). A survey on federated learning systems: Vision, hype and reality for data privacy and protection. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 35(1), 573–588. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2021.3124599>
4. Yang, Q., Liu, Y., Chen, T., & Tong, Y. (2019). Federated machine learning: Concept and applications. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 10(2), Article 12. <https://doi.org/10.1145/3298981>
5. Schuld, M., & Petruccione, F. (2018). *Supervised learning with quantum computers*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-96424-9>
6. Havlíček, V., Córcoles, A. D., Temme, K., et al. (2019). Supervised learning with quantum-enhanced feature spaces. *Nature*, 567(7747), 209–212. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-0980-2>
7. Kandala, A., Mezzacapo, A., Temme, K., et al. (2017). Hardware-efficient variational quantum eigensolver for small molecules and quantum magnets. *Nature*, 549(7671), 242–246. <https://doi.org/10.1038/nature23879>
8. Bonawitz, K., Ivanov, V., Kreuter, B., et al. (2017). Practical secure aggregation for privacy-preserving machine learning. In *Proceedings of the 2017 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security* (pp. 1175–1191). <https://doi.org/10.1145/3133956.3133982>
9. Ustimenko, V., & Pustovit, O. (2025). On the postquantum protocol-based short digital signatures with multivariate maps over arithmetical rings. In K. Arai (Ed.), *Advances in information and communication* (Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 1285, pp. 688–699). Springer.
10. Ustimenko, V., & Pustovit, O. (2025). On symbolic computations over arbitrary commutative rings via temporal Jordan–Gauss graphs and multivariate cryptosystems. In *Proceedings of the Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems* (pp. 405–424). Kyiv.

Стаття надійшла до редакції 09.09.2025 і прийнята до друку після рецензування 28.11.2025

The article was received 09.09.2025 and was accepted after revision 28.11.2025

Фадейчев Сергій Володимирович

аспірант Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору
Національної академії наук України

Адреса робоча: Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-1594-9683> **e-mail:** serhii.fadeichev@itgip.org

Трофимчук Олександр Миколайович

член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор, директор
Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної
академії наук України

Адреса робоча: 03186, Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3358-6274> **e-mail:** trofymchuk@nas.gov.ua

Триснюк Василь Миколайович

доктор технічних наук, професор, завідувач відділу досліджень навколишнього
середовища Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору
Національної академії наук України

Адреса робоча: Україна, м. Київ, вул. Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9920-4879> **e-mail:** trysnyuk@ukr.net