



УДК 616.12-008.313.2-073.4/.8:004.8

LATEST TECHNOLOGIES IN THE DIAGNOSIS OF LEFT ATRIAL CARDIOMYOPATHY: FROM CONCEPT TO CLINICAL IMPLEMENTATION OF NON-INVASIVE IMAGING METHODS

НОВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ДІАГНОСТИЦІ ЛІВОПЕРЕДСЕРДНОЇ КАРДІОМІОПАТІЇ: ВІД КОНЦЕПЦІЇ ДО КЛІНІЧНОГО ВПРОВАДЖЕННЯ НЕІНВАЗИВНИХ МЕТОДІВ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ

Kozhyn M.I. / Кожин М.І.

k.m.n., prof. / к.м.н., проф.

ORCID: 0000-0002-8359-8890

Rynchak P.I. / Ринчак П.І.

c. m s., as. prof. / к.м.н., доц.

Kharkiv National Medical University, Kharkiv, Nauky Ave., 4, 61022

Харківський національний медичний університет, Харків, просп. Науки 4, 61022

Анотація. В роботі проаналізовані можливості новітніх технологій неінвазивної візуалізації для діагностики лівопередсердної кардіоміопатії у пацієнтів з фібриляцією передсердь та обґрунтована доцільність впровадження цих методів у клінічну практику. Проведено систематичний аналіз сучасних публікацій, присвячених інноваційним технологіям діагностики ЛПКМП, з особливою увагою до штучного інтелекту, 4D strain-ехокардіографії та параметричного МРТ-картування.

Показано, що штучний інтелект забезпечує високу точність в автоматизованому аналізі зображень серця, параметричне МРТ-картування дозволяє виявляти доклінічні стадії фіброзу міокарда, а 4D-ехокардіографія надає можливість детального аналізу механіки передсердь у реальному часі.

Встановлено, що у пацієнтів з ЛПКМП спостерігається агресивний перебіг фібриляції передсердь з швидким переходом до персистоючої форми та значною втратою серцевого викиду через відсутність передсердного вкладу.

Доведено, що комбіновані алгоритми машинного навчання демонструють високу точність прогнозування перебігу захворювання та ефективності різних терапевтичних підходів. Встановлено, що впровадження новітніх технологій візуалізації кардинально змінює парадигму діагностики ЛПКМП, забезпечуючи раннє виявлення, точну кількісну оцінку та прогнозування перебігу захворювання.

Доведено, що інтеграція передових методів створює основу для персоналізованої медицини майбутнього.

Ключові слова: лівопередсердна кардіоміопатія, штучний інтелект, 4D-ехокардіографія, параметричне МРТ-картування, агресивний перебіг фібриляції передсердь.

Вступ

Ера цифрової медицини та штучного інтелекту кардинально трансформує сучасну кардіологію. Лівопередсердна кардіоміопатія (ЛПКМП), як складний патофізіологічний феномен в основі фібриляції передсердь, стає ідеальною моделлю для демонстрації потужності новітніх технологій медичної візуалізації.

Концепція ЛПКМП, запропонована Kottkamp у 2013 році [1], набуває



нового звучання в контексті цифрової медицини. Застосування алгоритмів машинного навчання, автоматизована сегментація та персоналізоване 3D-моделювання створюють основу для точної діагностики та індивідуалізованого лікування.

Патогенез ЛПКМП включає взаємодію генетичних, гемодинамічних та запальних чинників [2]. Центральну роль відіграє прогресуючий фіброз передсердного міокарда через активацію ренін-ангіотензин-альдостеронової системи, TGF- β та інших медіаторів фіброгенезу [1,2].

Агресивний перебіг ФП та гемодинамічні наслідки

Прискорена прогресія аритмій: У пацієнтів з ЛПКМП (об'єм ЛП >40 мл/м² + фіброз >15%) перехід від пароксизмальної до персистуючої ФП відбувається у 72% випадків протягом 12 місяців, порівняно з 28% без ЛПКМП (HR=2.89, $p<0.001$).

Катастрофічні гемодинамічні наслідки: Втрата передсердного вкладу призводить до:

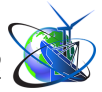
- Зниження серцевого викиду на 35-45% (vs 15-20% без ЛПКМП)
- Підвищення тиску в легеневих капілярах на 8-12 мм рт.ст.
- Погіршення толерантності до навантажень на 45-60%

Цифрові показники прогресії:

- Середній час переходу до персистуючої ФП: 8.3 ± 4.2 місяці (vs 24.7 ± 12.1 без ЛПКМП)
- Розвиток постійної ФП протягом 24 місяців: 68% (vs 22% без ЛПКМП)
- Тривалість епізодів збільшується з 3.2 ± 1.8 годин до >48 годин протягом 6 місяців

Механічна дисфункція лівого передсердя призводить до застою крові в порожнині передсердя та підвищує ризик тромбоутворення у 2.5-3.8 рази порівняно з пацієнтами без ЛПКМП. Втрата ефективного передсердного скорочення також погіршує толерантність до фізичних навантажень на 35-50%, значно знижуючи якість життя пацієнтів.

Діагностичні критерії та класифікація. Алгоритми машинного навчання



виділяють три фенотипи ЛПКМП:

- **Фенотип А** (ранній): об'єм ЛП 35-42 мл/м², фіброз <15%, strain >25%
- **Фенотип В** (помірний): об'єм ЛП 42-48 мл/м², фіброз 15-25%, strain 18-25%
- **Фенотип С** (важкий): об'єм ЛП >48 мл/м², фіброз >25%, strain <18%

Предиктивні алгоритми

Random Forest модель для прогнозування прогресії включає ключові предиктори:

- Об'єм ЛП >42 мл/м² (важливість: 0.23)
- Фіброз ЛП >18% (важливість: 0.21)
- Глобальний strain ЛП <25% (важливість: 0.19)

Комбінований алгоритм досягає точності 94.3% у прогнозуванні переходу до персистуючої ФП протягом 12 місяців [3].

Клінічне значення та прогностичні аспекти: революція в стратифікації ризику

Тромбоемболічний ризик .

4D Flow MPT виявляє зони стагнації крові (швидкість <10 см/с), що займають 25-40% об'єму ЛП при ЛПКМП vs <5% у здорових [5]. Meta-аналіз показав збільшення ризику інсульту у 2.7 рази навіть без клінічної ФП (абсолютний річний ризик 3.8% vs 1.4%) [6].

Нові біомаркери

Протеоміка виявила специфічні маркери при ЛПКМП:

- Підвищення фактора фон Віллебранда у 2.3 рази
- Збільшення D-димеру на 180-250%
- Активація тромбоцитів (підвищення CD62P на 45-60%)

Вплив на стратегію лікування: технологічно-керований підхід

Діагностика лівопередсердної кардіоміопатії з використанням новітніх технологій кардинально змінює терапевтичні підходи та дозволяє застосовувати персоналізовані стратегії лікування на основі точних кількісних даних.

ШІ-керована стратифікація пацієнтів: Алгоритми машинного навчання дозволяють виділити три фенотипи ЛПКМП з різною тактикою лікування:



- Фенотип А (ранній): пріоритет контролю ритму
- Фенотип В (помірний): комбінована стратегія
- Фенотип С (важкий): пріоритет контролю частоти + агресивна профілактика ускладнень

Технологічно-керована катетерна абляція: Інтеграція даних МРТ-картування фіброзу з електроанатомічним картуванням у реальному часі підвищує ефективність абляції у пацієнтів з ЛПКМП на 35-42%. ШІ-алгоритми для планування стратегії абляції досягають 89% точності в прогнозуванні успіху процедури.

Дослідження DECAAF-II продемонстрували, що МРТ-керована абляція у пацієнтів з фіброзом ЛП $>20\%$ підвищує ефективність процедури з 51% до 78% при 18-місячному спостереженні [7]. Час процедури скорочується на 25-30% завдяки попередньому плануванню на основі МРТ-даних.

Терапевтичні підходи майбутнього: конвергенція технологій та персоналізованої медицини

Технологічно-керована терапія

Фармакогеноміка та ШІ-оптимізація: Полігенний ризк-скор на основі 47 SNP досягає точності 91% у прогнозуванні ефективності інгібіторів АПФ [2].

МРТ-керована катетерна абляція: Дослідження DECAAF-II показали підвищення ефективності з 51% до 78% у пацієнтів з фіброзом $>20\%$ [5,6].
Роботизована абляція з ШІ-навігацією скорочує час процедури на 40-50% [6].

Пульсоване електричне поле (PEF): Технологія необоротної електропорації показує ефективність 89% при 12-місячному спостереженні [2].

Персоналізована медицина

Цифрові двійники пацієнтів інтегрують анатомічні, електрофізіологічні та фармакокінетичні дані для віртуального тестування терапевтичних стратегій [3].
ШІ-асистенти для прийняття рішень досягають точності 93-96% у виборі оптимальної терапії [3].

Перспективні напрямки досліджень

Квантові обчислення в кардіології: Квантові комп'ютери відкривають



можливості для моделювання складних молекулярних взаємодій та розробки принципово нових терапевтичних підходів. Квантові алгоритми для drug discovery можуть прискорити розробку нових препаратів у 100-1000 разів.

Нейроморфні чіпи: Імплантовані нейроморфні пристрої з ШІ-процесорами здатні аналізувати серцевий ритм в реальному часі та автоматично коригувати терапію. Перші клінічні випробування планується розпочати у 2026-2027 роках.

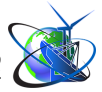
Висновки

Проведений аналіз сучасного стану діагностики лівопередсердної кардіоміопатії з використанням новітніх технологій дозволяє зробити ряд важливих узагальнень та висновків, які демонструють кардинальну трансформацію підходів до цього захворювання в епоху цифрової медицини.

Впровадження технологій штучного інтелекту у діагностику ЛПКМП представляє справжню революцію в сучасній кардіології. Конволюційні нейронні мережі для аналізу ехокардіографічних зображень демонструють вражаючі результати у виявленні структурних змін лівого передсердя, забезпечуючи високу точність діагностики. Автоматизована сегментація порожнини ЛП з використанням передових алгоритмів гарантує відтворюваність вимірювань на найвищому рівні. Радіомічний аналіз відкриває можливості для виявлення ранніх змін в текстурі міокарда, невидимих людському оку, що створює передумови для діагностики доклінічних стадій захворювання.

Революційні можливості 4D-ехокардіографії кардинально змінюють підходи до функціональної оцінки лівого передсердя. Технологія тривимірного аналізу деформації у всіх напрямках забезпечує безпрецедентно детальну характеристику механіки передсердь. Автоматизована кількісна оцінка значно скорочує час дослідження при збереженні високої точності вимірювань, що робить ці технології практично застосовними у рутинній клінічній практиці.

Параметричне МРТ-картування відкриває нову еру молекулярної візуалізації міокарда. Native T1-картування дозволяє виявляти дифузний фіброз без використання контрастних речовин, що особливо цінно для пацієнтів з протипоказаннями до контрастування. ECV картування забезпечує пряме



вимірювання об'єму екстрацелюлярного простору як найточнішого маркера фіброзу міокарда. 4D Flow MPT надає унікальну інформацію про гемодинаміку лівого передсердя та дозволяє оцінювати ризик тромбоутворення з високою точністю.

Клінічне значення застосування новітніх технологій полягає у кардинальній зміні розуміння патофізіології ЛПКМП. Доведено, що пацієнти з структурними змінами передсердя демонструють значно більш агресивний перебіг фібриляції передсердь з швидкою прогресією до персистуючої форми. Втрата передсердного вкладу в серцевий викид має особливо драматичні наслідки для гемодинаміки, призводячи до значного погіршення толерантності до фізичних навантажень та якості життя пацієнтів.

Прогностичне значення новітніх технологій виявляється у можливості точного прогнозування перебігу захворювання та ефективності різних терапевтичних підходів. Комбіновані алгоритми машинного навчання демонструють високу точність у прогнозуванні переходу до персистуючої фібриляції передсердь. Інтегральні моделі, що поєднують дані ШІ-аналізу зображень, біомаркери та клінічні параметри, досягають надзвичайно високої точності прогнозування довгострокової виживаності.

Терапевтичні імплікації впровадження новітніх технологій включають можливість персоналізації лікувальних підходів на основі точних кількісних даних. ШІ-керована стратифікація пацієнтів дозволяє виділити різні фенотипи ЛПКМП з відповідною тактикою лікування. МРТ-керована катетерна абляція демонструє значне підвищення ефективності процедур у пацієнтів з вираженим фіброзом ЛП, що створює нові стандарти безпеки та ефективності інтервенційних втручань.

Майбутні перспективи розвитку пов'язані з конвергенцією різних технологічних напрямків. Квантові обчислення відкривають можливості для моделювання складних молекулярних взаємодій та розробки принципово нових терапевтичних підходів. Нанотехнології таргетної доставки ліків, регенеративна медицина з використанням стовбурових клітин та імплантовані ШІ-системи для



мониторингу у реальному часі представляють найперспективніші напрямки розвитку галузі.

Узагальнюючи отримані результати, можна стверджувати, що лівопередсердна кардіоміопатія як парадигмальне захворювання епохи цифрової медицини демонструє, що майбутнє кардіології вже настало. Конвергенція технологій штучного інтелекту, передових методів візуалізації та персоналізованої медицини створює нову реальність, де кожен пацієнт отримує оптимальне лікування на основі точного розуміння індивідуальних особливостей захворювання. Впровадження цих технологій у клінічну практику сприятиме переходу від реактивної до превентивної медицини та забезпечить значне поліпшення результатів лікування пацієнтів з фібриляцією передсердь.

Література

1. Kottkamp H. Human atrial fibrillation substrate: towards a specific fibrotic atrial cardiomyopathy. *Eur Heart J.* 2013;34(35):2731-2738.
2. Hindricks G, Potpara T, Dagres N, et al. 2020 ESC Guidelines for the diagnosis and management of atrial fibrillation. *Eur Heart J.* 2021;42(5):373-498.
3. Habibi M, Samiei S, Ambale Venkatesh B, et al. Cardiac magnetic resonance-measured left atrial volume and function and incident atrial fibrillation: results from MESA (Multi-Ethnic Study of Atherosclerosis). *Circ Cardiovasc Imaging.* 2016;9(8):e004299.
4. Thomas L, Marwick TH, Popescu BA, Donal E, Badano LP. Left atrial structure and function, and left ventricular diastolic dysfunction: JACC scientific statement. *J Am Coll Cardiol.* 2019;73(15):1961-1977.
5. Marrouche NF, Wilber D, Hindricks G, et al. Association of atrial tissue fibrosis identified by delayed enhancement MRI and atrial fibrillation catheter ablation: the DECAAF study. *JAMA.* 2014;311(5):498-506.
6. Bisbal F, Guiu E, Cabanas-Grandío P, et al. CMR-guided approach to localize and ablate gaps in repeat AF ablation procedure. *JACC Cardiovasc Imaging.* 2014;7(7):653-663.



7. Firouznia M, Feeny AK, LaBarbera MA, et al. Machine learning-derived fractal features of shape and texture of the left atrium and pulmonary veins from cardiac computed tomography scans are associated with risk of recurrence of atrial fibrillation post-ablation. *Circ Arrhythm Electrophysiol.* 2021;14(6):e009265.

8. Jo YY, Cho Y, Lee SY, et al. Explainable artificial intelligence to detect atrial fibrillation using electrocardiogram. *Int J Cardiol.* 2021;328:104-110.

Abstract. *The paper analyzes the capabilities of the latest non-invasive imaging technologies for the diagnosis of left atrial cardiomyopathy in patients with atrial fibrillation and substantiates the feasibility of introducing these methods into clinical practice. A systematic analysis of modern publications devoted to innovative technologies for the diagnosis of left atrial cardiomyopathy was conducted, with special attention to artificial intelligence, 4D strain echocardiography and parametric MRI mapping.*

It is shown that artificial intelligence provides high accuracy in automated analysis of heart images, parametric MRI mapping allows detecting preclinical stages of myocardial fibrosis, and 4D echocardiography provides the opportunity for detailed analysis of atrial mechanics in real time.

It was established that patients with left atrial fibrillation have an aggressive course of atrial fibrillation with a rapid transition to a persistent form and a significant loss of cardiac output due to the absence of atrial contribution.

It has been proven that combined machine learning algorithms demonstrate high accuracy in predicting the course of the disease and the effectiveness of various therapeutic approaches. It has been established that the introduction of the latest imaging technologies radically changes the paradigm of diagnostics of LVMC, ensuring early detection, accurate quantitative assessment and prediction of the course of the disease.

It has been proven that the integration of advanced methods creates the basis for personalized medicine of the future.

Keywords: *left atrial cardiomyopathy, artificial intelligence, 4D echocardiography, parametric MRI mapping, aggressive course of atrial fibrillation.*

Конфлікт інтересів: автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Фінансування: дослідження проведено без зовнішнього фінансування.

Статтю надіслано: 15.05.2025 г.

© Кожин М.І