

Оцінювання структури і функції лівого шлуночка при серцево-судинних захворюваннях методом тривимірної ехокардіографії

Я.М. Логвінов, Н.В. Поніч, О.А. Єпанчинцева, О.Й. Жарінов, Б.М. Тодуров

Київська міська клінічна лікарня «Київський міський центр серця»;
Національна медична академія післядипломної освіти ім. П.Л. Шупика МОЗ України, м. Київ

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ехокардіографія, тривимірна ехокардіографія, структура і функція лівого шлуночка

Серед сучасних технологій візуалізації серця найдоступнішим методом дослідження є ехокардіографія. Суттєвий прогрес ультразвукових методів візуалізації серця, а саме перехід від одновимірного (М-режиму) до двовимірного (2D – *two dimension*) зображення, впровадження імпульсно-постійнохвильового доплерівського дослідження і кольорового картування, значно розширив діагностичні можливості ехокардіографії. Сучасне ультразвукове устаткування та програмне забезпечення дозволяють отримати високу якість зображення, що, в свою чергу, визначає нові можливості в оцінці анатомії серця, функції шлуночків, передсердь та клапанного апарату. Але в двовимірному, а тим паче одновимірному режимі неможливо отримати об'ємне зображення, що зумовлює певні обмеження та недоліки у визначенні показників структурно-функціонального стану серця [47, 68]. Крім того, не всім людям властива просторова уява. Отже, концепція тривимірного (3D) зображення є природною еволюцією ультразвукових методів дослідження.

Метод тривимірної ехокардіографії з'явився у 1970-х роках [85]. Спочатку для формування тривимірного зображення використовували його реконструкцію із серії двовимірних ехокардіографічних зрізів, отриманих у певні фази серцевого циклу. Зрізи збиралися окремо ротаційним, лінійним та віялоподібним методами сканування, поєднувалися на комп'ютері та за допомогою спеціального програмного забезпечення формувалися в об'ємне зображення. Зрозуміло, що цей процес був занадто тривалим і громіздким та істотно затягувався при поганій якості візуалізації. Для отримання якісної тривимірної реконструкції була необхідна тривала затримка дихання пацієнтом та застосування переважно черезстравохідного доступу. І голов-

не те, що тривимірне зображення отримували не безпосередньо в даний час, а в режимі *off-line* [77]. Для подолання цих обмежень потрібно було вирішити питання, як швидко (протягом одного серцевого циклу або в режимі *on-line*) зібрати інформацію для тривимірної реконструкції. Тривимірну ехокардіографію у режимі реального часу (*real-time 3D-echocardiography – RT3DE*) було впроваджено на початку 1990-х років О.Т. von Ramm і співавторами [85]. Для формування об'ємного зображення вони застосували кардинально новий тип датчиків (трансд'юсерів), так звані матричні датчики, в яких ультразвукові елементи організовані на зразок решітки. Перші матричні датчики містили 256 активних елементів, тоді як сучасні використовують понад 3000 ультразвукових елементів [37].

Подальше покращення програмного забезпечення та вдосконалення датчиків дозволило налагодити випуск багатьма комерційними виробниками ультразвукових сканерів з опцією RT3DE. Зростаюча доступність RT3DE-технологій і легкість використання зумовили появу значної кількості досліджень з метою оцінки можливостей та переваг практичного застосування RT3DE. Створений нещодавно тривимірний матричний датчик для черезстравохідного дослідження забезпечив безпрецедентну якість зображення, що важливо для планування та оцінки результатів кардіохірургічних та інтервенційних втручань [35, 55, 59, 66].

Клінічне використання тривимірної ехокардіографії

Накопичений до цього часу досвід дозволяє окреслити такі сфери клінічного застосування тривимірної ехокардіографії: визначення об'ємі та форми камер серця, насосної функції серця та

маси міокарда [7, 12, 23, 27, 30, 36, 38, 56, 57, 61, 65, 68, 69, 76]; неінвазивна візуалізація клапанного апарату серця та дослідження його функції [28, 55, 59, 63, 72, 73, 87]; оцінка морфології вроджених вад серця [34, 55]; дослідження регіонарної скоротливості міокарда лівого шлуночка (ЛШ) для об'єктивної діагностики ішемічної хвороби серця (ІХС) [23, 41, 51, 54, 56, 64, 71] та виявлення асинхронності скорочення серцевого м'язу [1–6, 8, 9–11, 13–15, 19–21, 24, 25, 29, 31, 39, 41, 42, 50, 52, 60, 62, 79–83, 86, 88–92]; використання тривимірного кольорового доплерівського методу для вивчення анатомічних пошкоджень, шунтів і фістул та визначення їх впливу на внутрішньосерцеву гемодинаміку [34, 58, 75]; оцінка перфузії міокарда ЛШ та об'ємних утворень у порожнинах серця за допомогою контраст-підсиленої 3D-ехокардіографії [17, 18]. Втім, слід зазначити, що найчастішою підставою для проведення ехокардіографічного дослідження у дорослих пацієнтів є оцінка розмірів і функції ЛШ, і в цьому тривимірною ехокардіографія має ряд суттєвих переваг.

Оцінка глобальної систолічної функції лівого шлуночка

Об'єми порожнини ЛШ та фракція викиду (ФВ) є важливими прогностичними предикторами та критеріями вибору оптимального лікування пацієнтів з ураженнями міокарда ЛШ. Проте, оцінювання цих показників з допомогою 2D-ехокардіографії (за методами Тейхольца або Сімпсона) має ряд недоліків та технічних обмежень у пацієнтів із сегментарними розладами, аневризмою ЛШ та асиметричним ремоделюванням шлуночків. Такими обмеженнями є, зокрема, необхідність геометричних припущень при вирахуванні об'ємів ЛШ; недостатня візуалізація верхівки ЛШ при неадекватному виведенні зображення з апікального доступу; нерідко – неможливість отримання якісного зображення всіх стінок та/або сегментів міокарда ЛШ, що залежить як від субоптимальної візуалізації серця, так і від навичок дослідника [47]. Про неточність оцінки об'єму ЛШ за допомогою 2D-ехокардіографії свідчить порівняння результатів вимірювання з даними, отриманими методами однофотонної емісійної комп'ютерної томографії та магнітнорезонансної томографії (МРТ) [7, 38, 52, 57, 76]. Визначення кінцево-діастолічного (КДО) і кінцевосистолічного (КСО) об'ємів та оцінювання як глобальної, так і

сегментарної скоротливої здатності міокарда здійснюється шляхом напівавтоматичного обведення ендокардіальної поверхні ЛШ на його тривимірному зображенні, зареєстрованому за допомогою RT3DE в різні фази серцевого циклу, та шляхом подальшого автоматичного обчислення локальних сегментарних та фазових шлуночкових об'ємів [37]. Приклад визначення об'ємів та обчислення ФВ ЛШ наведено на рис. 1.

У дослідженні Y. Matsumura та співавторів була здійснена оцінка точності RT3DE для вимірювання об'ємів та ФВ ЛШ у пацієнтів з порушеннями локальної скоротливості міокарда внаслідок ураження вінцевих артерій та порівняння результатів вимірювань з даними кількісної однофотонної емісійної комп'ютерної томографії [7]. Дані RT3DE добре корелювали з результатами радіонуклідного методу при вимірюванні як КСО, так і КДО (відповідно $r=0,97$, середнє відхилення 3,4 мл і $r=0,98$, середнє відхилення 2,0 мл), тоді як при двовимірній ехокардіографії об'єми ЛШ були оцінені недостатньо точно (відповідно $r=0,98$, середнє відхилення 21,1 мл; $r=0,98$, середнє відхилення 15,6 мл). ФВ ЛШ, отримана за допомогою RT3DE, краще відповідає результатам радіонуклідної діагностики, ніж ФВ ЛШ, підрахована біплановим методом (відповідно, $r=0,92$, середнє відхилення 0,2 % і $r=0,89$, середнє відхилення 2,7 %).

В іншому дослідженні порівнювали точність та відтворюваність результатів вимірювання об'ємів та ФВ ЛШ, отриманих з допомогою RT3DE, із стандартними біплановими вимірюваннями, використовуючи МРТ як референтний метод [38]. Вимірювання, здійснені методом RT3DE, добре корелювали з результатами МРТ (відповідно $r=0,96$, $0,97$ і $0,93$ для КДО, КСО та ФВ) з невеликим середнім відхиленням (17 мл, 16 мл, 6,4 %). Біпланові вимірювання гірше корелювали з результатами МРТ ($r=0,89$, $0,92$, $0,86$ відповідно для КДО, КСО, ФВ), з більшим середнім відхиленням (29 мл, 24 мл, 9,5 %). Відтворюваність та повторюваність результатів вимірювання показників систолічної функції ЛШ, отриманих за допомогою RT3DE, були значно кращими, порівняно з результатами 2D-ехокардіографії.

Оцінка маси міокарда лівого шлуночка

Збільшення маси міокарда ЛШ є незалежним предиктором несприятливих серцево-судинних подій [84]. На відміну від звичайних ехокардіографічних методів дослідження

(М-режим та 2D-візуалізація), тривимірна ехокардіографія, здійснена з використанням сучасного програмного забезпечення, дозволяє легко та точно виміряти масу міокарда ЛШ. Це відбувається завдяки подоланню обмежень, притаманних традиційній ехокардіографії, які виникають при визначенні об'ємів порожнини ЛШ. Маса міокарда ЛШ визначається шляхом напівавтоматичного обведення його ендо- та епікардіальної меж з подальшим автоматичним вирахуванням об'єму та маси міокарда (рис. 2). Низкою досліджень встановлено, що RT3DE дозволяє швидко та з доброю відтворюваністю визначати масу міокарда ЛШ, причому отримані показники краще корелюють з даними МРТ, ніж дані звичайної ехокардіографії [16, 33, 56]. В одному з досліджень проводили порівняння результатів визначення маси міокарда ЛШ у хворих з гіпертрофією міокарда ЛШ, отриманих за допомогою 2D-ехокардіографії, RT3DE та МРТ [33]. Дані, отримані за допомогою RT3DE, чітко корелювали з результатами МРТ ($r=0,95$), тоді як вимірювання маси міокарда ЛШ методом 2D-ехокардіографії характеризувалося слабшою кореляцією ($r=0,70$). В іншій роботі, в якій порівнювали результати визначення маси міокарда ЛШ у хворих з ІХС та дилатаційною кардіоміопатією методами 2D-ехокардіографії, RT3DE та МРТ, дійшли подібних висновків: результати RT3DE краще корелювали з результатами МРТ, ніж показники 2D-ехокардіографії (відповідно $r=0,96$ та $r=0,79$) [16]. Крім того, відтворюваність результатів RT3DE була кращою, ніж 2D-ехокардіографії: варіабельність показників маси міокарда між дослідниками була значно меншою при застосуванні RT3DE (12,5 %), ніж 2D-ехокардіографії (24,1 %).

Незважаючи на те, що МРТ є стандартом у вимірюванні маси міокарда ЛШ, з огляду на вартість, трудомісткість, а також неможливість застосування у пацієнтів з кардіостимуляторами цей метод не може застосовуватися рутинно, із скринінговою метою. Натомість, RT3DE є більш доступним методом, без будь-якого ризику опромінення та впливу на пацієнта потужного магнітного поля, і за необхідності може застосовуватися неодноразово.

Отже, напівавтоматичне обведення ендо- та епікардіальної поверхні ЛШ у тривимірному режимі найбільш придатне для клінічного використання і дозволяє швидко та, на відміну від 2D-ехокардіографії, точно оцінити об'єми ЛШ, ФВ та масу міокарда ЛШ.

Дослідження сегментарної скоротливості лівого шлуночка та перфузії міокарда

Подібно до двовимірного методу, при використанні 3D-ехокардіографії оцінка кінетики стінок ЛШ базується на сегментарному підході за чотирибальною системою. Але тривимірна реконструкція дозволяє візуалізувати ЛШ більш повно та зареєструвати скорочення всіх сегментів міокарда протягом одного серцевого циклу, що більш інформативно, порівняно зі стандартною (16-17-сегментарною) схемою регіонарної скоротливості ЛШ при двовимірній ехокардіографії (рис. 3) [23, 51, 71]. Тривимірна ехокардіографія є особливо перспективним методом дослідження у хворих з аневризмою ЛШ. Вона допомагає не лише виміряти об'єми та ФВ ЛШ із зміненою геометрією, а також визначити локалізацію та об'єм самої аневризми (рис. 4), що має особливе значення в кардіохірургії [40, 50].

Для діагностики ІХС у пацієнтів з підозрою на ураження вінцевих артерій та оцінки прогнозу в пацієнтів з раніше діагностованою ІХС використовують стрес-ехокардіографію з добутамином. Використання двовимірної візуалізації серця з цією метою характеризується суттєвими обмеженнями. Секторальні зображення всіх сегментів ЛШ повинні бути отримані більш ніж з одного доступу швидко та якісно, з подальшим порівнянням їх скоротливості на кожному етапі обстеження. З огляду на це, в клінічній практиці поширеним є візуальний аналіз ендокардіальної екскурсії та систолічного потовщення стінки, що містить елемент суб'єктивної оцінки та вимагає спеціальної підготовки. Проведення добутамінової стрес-ехокардіографії з використанням RT3DE дозволяє швидко та якісно отримати необхідні зображення ЛШ з одного (апикального) доступу і точно аналізувати скоротливість міокарда. При цьому суттєво скорочується тривалість дослідження [54]. Чутливість, специфічність та діагностична точність стрес-ехокардіографії з добутамином у режимі RT3DE при міокардальній ішемії становили відповідно 86; 80 і 82 %, порівняно з однофотонною емісійною комп'ютерною томографією з талієм-201 у 56 пацієнтів.

Поєднання RT3DE із введенням контрастних речовин дозволило оцінювати міокардальну перфузію. Ультразвукова візуалізація дефектів накопичення контрастних речовин у міокарді дозволяє встановити локалізацію та поширеність

зон ішемії або рубцевих змін, а також встановити взаємозв'язок цих зон з ураженням відповідних вінцевих артерій [17].

Оцінка асинхронності шлуночків серця

Функція ЛШ визначається не лише станом контрактильного резерву міокарда та умовами після- і переднавантаження. Суттєву роль відіграє також стан електромеханічного сполучення у міокарді, який, зокрема, визначає синхронність скорочення його стінок [13]. Під асинхронністю серця розуміють некоординоване скорочення і/або розслаблення його камер або сегментів міокарда усередині однієї камери. Розрізняють передсердно-шлуночкову, міжшлуночкову, міжпередсердну й внутрішньошлуночкову асинхронність. Залежно від фази серцевого циклу виділяють систолічну та діастолічну асинхронність [9, 21, 53].

В останні десятиліття вивчення синхронності роботи міокарда ЛШ привертає пильну увагу дослідників і лікарів. Було показано, що розбалансованість кінетики міокарда відіграє ключову роль у прогресуванні патологічного ремоделювання серця: індукції асиметричної гіпертрофії міокарда шлуночків, порушенні регіонарної перфузії, зміні електрофізіологічних властивостей, структурній дезорганізації та метаболічній перебудові міокарда [4, 25]. Це веде до систолічної та діастолічної дисфункції шлуночків, посилення мітральної та трикуспідальної недостатності, електричної нестабільності міокарда [3, 5, 13]. Але найкраще визначена роль асинхронності міокарда в патогенезі серцевої недостатності у хворих із систолічною дисфункцією ЛШ. Відтак, виявлення асинхронності має найбільше практичне значення при вирішенні питання про застосування ресинхронізуючої терапії у пацієнтів з застійною серцевою недостатністю [10, 11, 31, 88]. Втім, патологічна гетерогенність електромеханічного зв'язку в міокарді і, як наслідок, систолічна й діастолічна асинхронність виявлені також при низці інших захворювань і станів. Це, зокрема, серцева недостатність зі збереженою ФВ, ІХС, артеріальна гіпертензія, ідіопатична та індукована правошлуночковою стимуляцією блокада лівої ніжки пучка Гіса, цукровий діабет, синдром подовженого інтервалу QT, гіпертрофічна кардіоміопатія [2, 32, 41, 45, 60, 64, 79, 82, 84, 89, 91]. На підставі результатів клінічних досліджень асинхронність міокарда визначена як незалежний фактор ризику

несприятливого прогнозу у пацієнтів з ІХС і серцевою недостатністю [1, 8, 19, 92].

З огляду на діагностичне і прогностичне значення асинхронності міокарда, для її виявлення необхідно використовувати точні, валідні, відтворювані та доступні методи діагностики, насамперед – ехокардіографічне дослідження [6, 9, 10, 14]. Найпоширенішими є методи тканинної доплерографії та RT3DE. Перший з цих методів, який дозволяє оцінювати регіонарну міокардіальну швидкість або деформацію міокарда, ще донедавна вважався «золотим стандартом» в оцінці асинхронності міокарда [56]. Його переваги – висока часова роздільна здатність, можливість розмежування пасивного зсуву сегментів від активного систолічного скорочення при оцінці деформації тканини. Водночас, тканинна доплерографія має низку технічних недоліків: обмежена просторова роздільна здатність і неможливість одночасної візуалізації сегментів у різних площинах; нездатність надійної реєстрації руху апікальних сегментів; оцінка тільки поздовжнього зсуву міокарда, без урахування радіального й циркулярного зсувів; кутова залежність тканинного доплера, що суттєво спотворює точність вимірювань; значна чутливість амплітудних і часових характеристик сигналу до положення контрольного об'єму [6, 22, 24, 29]. Велика кількість та відсутність уніфікованих критеріїв діагностики асинхронності є причиною нелогічних і, часом, суперечливих висновків із проведених досліджень. Більше того, у нещодавно здійсненому проспективному багатоцентровому дослідженні PROSPECT показники асинхронності міокарда, оцінені методом тканинного доплера, були недостатньо чутливими і специфічними для вирішення завдань відбору пацієнтів із серцевою недостатністю для ресинхронізуючої терапії. Крім того, була показана низька відтворюваність отриманих результатів [20]. З огляду на це, існує потреба у більш простих, наочних і відтворюваних методах кількісного аналізу внутрішньошлуночкової асинхронності міокарда.

Тривимірна ехокардіографія в режимі реального часу – відносно новий і дуже перспективний підхід для діагностики асинхронності міокарда ЛШ. По суті, лівошлуночкова асинхронність – тривимірний феномен, і тому RT3DE є унікальним і потужним засобом для оцінки асинхронності. Вимірювання глобальних об'ємів ЛШ за допомогою RT3DE дає можли-

вість отримати точні та достовірні дані [7, 23, 38]. Результатом удосконалення в останні роки технічного та програмного забезпечення стало значне поліпшення тривимірної просторової і часової роздільної здатності [62]. Це дало змогу швидко і без спотворень реєструвати у тривимірному режимі динаміку функціонування усього ЛШ і його сегментів, порівнювати часові інтервали руху всіх сегментів міокарда, оптимізувати напівавтоматичне розпізнавання контурів міокарда ЛШ.

Тривимірна модель ЛШ розбивається на 17 стандартних сегментарних об'ємів. Для кожного сегментарного об'єму можливо отримати криву «час – об'єм» протягом серцевого циклу та визначити час, необхідний для досягнення найменшого систолічного об'єму (T_{msv}) [42, 62]. Якщо всі сегменти досягають свого мінімального систолічного об'єму одночасно, то ЛШ скорочується синхронно (рис. 5). В іншому випадку наявна внутрішньошлуночкова асинхронність (рис. 6). У більшості досліджень з використанням RT3DE для визначення ступеня асинхронності функціонування ЛШ застосовували систолічний індекс асинхронності (CIA), який розраховують як стандартне відхилення (дисперсія) T_{msv} для 16 сегментів ЛШ (виключається верхівка) з корекцією на довжину інтервалу RR одного кардіоциклу [39, 42, 62]. Чим більше значення індексу, тим більше виражена асинхронність міокарда. Встановлено, що функція сегментів ЛШ у здорових добровольців і пацієнтів із збереженою систолічною функцією ЛШ характеризується високим ступенем синхронності, з показником CIA відповідно $(3,5 \pm 1,8)$ і $(4,5 \pm 2,4)$ % [42]. В іншому дослідженні в осіб без ознак і симптомів серцево-судинних захворювань, з нормальною ЕКГ і нормальними показниками біпланової ехокардіографії також показана синхронність роботи міокарда, значення CIA становило $(1,59 \pm 0,99)$ % [83]. З погіршенням систолічної функції ЛШ значення CIA зростає, незалежно від тривалості комплексу QRS . При незначній дисфункції ЛШ показник CIA становив $(5,40 \pm 0,83)$ %, при помірній дисфункції ЛШ – $(10,0 \pm 2,0)$ %, при значній дисфункції ЛШ – $(15,6 \pm 1,0)$ %; $P < 0,001$ [42]. Діагностичним критерієм асинхронності міокарда є CIA, що перевищує суму середнього значення і двох стандартних відхилень, обчислену у здорових осіб групи контролю [62]. Після імплантації бівентрикулярного стимулятора спостерігається суттєве зменшення CIA паралельно зі зменшенням КСО та збільшенням ФВ ЛШ [42,

62, 90]. Значення CIA понад 10 % дозволяє передбачити ефективність ресинхронізуючої терапії у пацієнтів із серцевою недостатністю ішемічного і неішемічного генезу з чутливістю 93 % і специфічністю 91 % [62]. Оцінка асинхронності міокарда за допомогою цієї методики характеризується високою відтворюваністю і повторюваністю результатів [42, 50, 62, 78].

Результати досліджень з прямого порівняння CIA міокарда та деяких показників тканинної доплерографії були суперечливими: від тісного до слабкого кореляційного зв'язку [15, 50, 78]. Вказані розбіжності можна пояснити, по-перше, кутвою залежністю та високою чутливістю амплітудних і часових характеристик сегментарної кривої тканинної доплера до положення контрольного об'єму, по-друге, тим фактом, що ці дві методики вимірюють різні параметри руху міокарда. Перевага тривимірної ехокардіографії у режимі реального часу при аналізі асинхронності роботи міокарда визначається можливістю оцінки руху міокарда в усіх напрямках: радіальному, поздовжньому, циркулярному. Показник CIA був тісно пов'язаний з параметрами асинхронності, отриманими з допомогою фазового аналізу зображень міокардіальної перфузії при проведенні однофотонної емісійної комп'ютерної томографії серця [52].

Нещодавно з'явилася цілком нова методика аналізу синхронності роботи міокарда. Розробка нового програмного забезпечення та використання тривимірного матричного датчика дозволили поєднати можливості тканинної доплерографії та тривимірної візуалізації серця. Нова методика отримала назву «трипланової тканинної доплерографії». Цей метод дозволяє оцінювати регіонарну міокардіальну швидкість або деформацію міокарда ЛШ одночасно в трьох стандартних апікальних проекціях серця протягом одного серцевого циклу [47, 80]. Придатність методу для практичного застосування та здатність прогнозувати ефективність ресинхронізуючої терапії показані в низці нещодавно закінчених досліджень [80, 81].

Розробка нових ультразвукових сканерів та досягнення комп'ютерних технологій дозволили удосконалити методики 3D-ехокардіографії та створити ефективний, придатний для вирішення клінічних задач діагностичний метод, який дає можливість відповісти на багато запитань щодо оцінки структури та функції ЛШ. Як показано, аналіз морфофункціональних змін камер серця, зокрема ЛШ, заснований на використанні сучас-

них алгоритмів тривимірної реконструкції ехокардіографічних зображень, є більш точним і досконалим порівняно з традиційними методами 2D-ехокардіографії. Тому у багатьох ситуаціях звичайне 2D-ехокардіографічне дослідження доцільно доповнити даними 3D-візуалізації у пацієнтів із специфічною патологією, при якій доведена можливість RT3DE забезпечити важливу діагностичну інформацію.

Подальший прогрес в удосконаленні датчиків та програмного забезпечення, а саме зменшення розмірів матричних датчиків, поліпшення якості візуалізації, просторової та часової роздільної здатності, скорочення часу обробки та кількісного аналізу зображення, сприятимуть ширшому використанню 3D-ехокардіографії для вирішення суперечливих клінічних питань. Створення нового програмного забезпечення дозволить у перспективі поєднати часову роздільну здатність 3D-ехокардіографії з просторовою візуалізацією, притаманною магнітнорезонансній або комп'ютерній томографії.

Література

1. Ардашев А.В., Ардашев В.Н., Якоб О.В. Влияние внутрисердечного асинхронизма на течение хронической сердечной недостаточности // *Клин. медицина.* – 2007. – № 10. – P. 31–34.
2. Марцинкевич Г.И., Соколов А.А. и др. Электромеханическое сопряжение миокарда в норме и у детей с синдромом WPW // *Вестник аритмологии.* – 2004. – № 35. – P. 38–44.
3. Овсыщер И., Соболева Е. Кардиоресинхронизирующая терапия и профилактика внезапной коронарной смерти // *Вестник аритмологии.* – 2007. – № 49. – P. 35–41.
4. Покушалов Е.А., Туров А.Н., Сырцева Я.В., Панфилов С.В. Ресинхронизирующая электротерапия при хронической сердечной недостаточности // *Сердечная недостаточность.* – 2006. – № 7 (2). – С. 93–101.
5. Соколов А.А., Марцинкевич Г.И. Электромеханический асинхронизм сердца и сердечная недостаточность // *Кардиология.* – 2005. – № 5. – С. 86–91.
6. Abraham J., Abraham T.P. Is echocardiographic assessment of dyssynchrony useful to select candidates for cardiac resynchronization therapy? *Echocardiography Is Useful Before Cardiac Resynchronization Therapy if QRS Duration Is Available* // *Circ. Cardiovasc. Imaging.* – 2008. – Vol. 1. – P. 79–85.
7. Arai K., Hozumi T., Matsumura Y. et al. Accuracy of measurement of left ventricular volume and ejection fraction by new real-time three-dimensional echocardiography in patients with wall motion abnormalities secondary to myocardial infarction // *Amer. J. Cardiology.* – 2004. – Vol. 94. – P. 552–558.
8. Bader H., Garrigue S et al. Intra-left ventricular electromechanical asynchrony. A new independent predictor of severe cardiac events in heart failure patients // *J. Amer. Coll. Cardiology.* – 2004. – Vol. 43. – P. 248–256.
9. Bax J.J., Ansalone G. et al. Echocardiographic evaluation of cardiac resynchronization therapy: ready for routine clinical use? A critical appraisal // *J. Amer. Coll. Cardiology.* – 2004. – Vol. 44. – P. 1–9.
10. Bax J.J., Abraham T., Barold S.S. et al. Cardiac resynchronization therapy: Part 1—issues before device implantation // *J. Amer. Coll. Cardiology.* – 2005. – Vol. 46. – P. 2153–2167.
11. Bax J.J., Bleeker G.B., Marwick T.H. et al. Left ventricular dyssynchrony predicts response and prognosis after cardiac resynchronization therapy // *J. Amer. Coll. Cardiology.* – 2004. – Vol. 44. – P. 1834–1840.
12. Belohlavek M., Tanabe K., Jakrapanichakul D. et al. Rapid 3D-echocardiography: clinically feasible alternative for precise and accurate measurement of left ventricular volumes // *Circulation.* – 2001. – Vol. 103. – P. 2882–2884.
13. Bleeker G.B., Bax J.J., Steendijk P. et al. Left ventricular dyssynchrony in patients with heart failure: pathophysiology, diagnosis and treatment // *Nat Clin. Pract. Cardiovasc. Med.* – 2006. – Vol. 3. – P. 213–219.
14. Boaz D.R., Albert C.L., Ronald D.B. Imaging of myocardial dyssynchrony in congestive heart failure // *Heart Fail. Rev.* – 2006. – Vol. 11. – P. 289–303.
15. Burgess M.I., Jenkins C., Chan J., Marwick T.H. Measurement of left ventricular dyssynchrony in patients with ischaemic cardiomyopathy: a comparison of real-time three-dimensional and tissue Doppler echocardiography // *Heart.* – 2007. – Vol. 93. – P. 1191–1196.
16. Caiani E.G., Corsi C. et al. Improved quantification of left ventricular mass based on endocardial and epicardial surface detection with real time three dimensional echocardiography // *Heart.* – 2006. – Vol. 92. – P. 213–219.
17. Camarano G., Jones M., Freidlin R.Z., Panza J.A. Quantitative assessment of left ventricular perfusion defects using real-time three-dimensional myocardial contrast echocardiography // *J. Amer. Soc. Echocardiogr.* – 2002. – Vol. 15. – P. 206–213.
18. Chen L.X., Wang X.F., Nanda N.C. et al. Real-time three-dimensional myocardial contrast echocardiography in assessment of myocardial perfusion defects // *Chin. Med. J.* – 2004. – Vol. 117. – P. 337–341.
19. Cho G.Y., Song J.K., Park W.J. et al. Mechanical dyssynchrony assessed by tissue Doppler imaging is a powerful predictor of mortality in congestive heart failure with normal QRS duration // *J. Amer. Coll. Cardiology.* – 2005. – Vol. 46. – P. 2237–2243.
20. Chung E.S., Leon A.R., Tavazzi L. et al. Results of the Predictors of Response to CRT (PROSPECT) trial // *Circulation.* – 2008. – Vol. 117. – P. 2608–2616.
21. Chung R., Sutton R., Henein M.Y. Beyond dyssynchrony in cardiac resynchronization therapy // *Heart.* – 2008. – Vol. 94. – P. 991–994.
22. Citro R., Bossone E. et al. Tissue Doppler and strain imaging: anything left in the echo-lab? // *Cardiovascular Ultrasound.* – 2008. – Vol. 6. – P. 54.
23. Corsi C., Lang R.M., Veronesi F. et al. Volumetric quantification of global and regional left ventricular function from real-time 3D echocardiographic images // *Circulation.* – 2005. – Vol. 112. – P. 1161–1170.
24. D'Hooge J., Heimdal A., Jamal F. et al. Regional Strain and Strain Rate Measurements by Cardiac Ultrasound: Principles, Implementation and Limitations Eur // *J. Echocardiogr.* – 2000. – Vol. 1. – P. 154–170.
25. David D. Spragg, David A. Kass. Pathobiology of left ventricular dyssynchrony and resynchronization // *Progress in Cardiovascular Diseases.* – 2006. – Vol. 49. – P. 26–41.
26. De Castro S., Yao J., Pandian N.G. et al. Three-dimensional echocardiography: clinical relevance and application // *Amer. J. Cardiology.* – 1998. – Vol. 81. – P. 96–102.
27. Fukuda S., Hozumi T., Watanabe H. et al. Freehand three-dimensional echocardiography with rotational scanning for measurements of left ventricular volume and and ejection fraction in patients with coronary artery disease // *Echocardiography.* – 2005. – Vol. 22. – P. 111–119.
28. Fukuda S., Saracino G., Matsumura Y. et al. 3D geometry of the tricuspid annulus in healthy subjects and in patients with functional tricuspid regurgitation: a real-time 3D echocardiographic study // *Circulation.* – 2006. – Vol. 114 (Suppl.). – P. 492–498.
29. Galderisi M., Cattaneo F., Mondillo S. Doppler echocardiog-

- raphy and myocardial dyssynchrony: a practical update of old and new ultrasound technologies // *Cardiovasc. Ultrasound*. – 2007. – Vol. 5. – P. 28.
30. Gopal A.S., Keller A.M., Shen Z. et al. Three-dimensional echocardiography: in vitro and in vivo validation of left ventricular mass and comparison with conventional echocardiographic methods // *J. Amer. Coll. Cardiology*. – 1997. – Vol. 30. – P. 802–810.
31. Gorcsan III J., Abraham T. et al. Echocardiography for Cardiac Resynchronization Therapy: Recommendations for Performance and Reporting – A Report from the American Society of Echocardiography Dyssynchrony Writing Group Endorsed by the Heart Rhythm Society // *J. Amer. Soc. Echocardiogr.* – 2008. – Vol. 21. – P. 191–213.
32. Haugaa K.H., Edvardsen T. et al. Left ventricular mechanical dispersion by tissue Doppler imaging: a novel approach for identifying high-risk individuals with long QT syndrome // *Eur Heart J*. – 2009. – Vol. 30. – P. 330–337.
33. Hiroki O., Takeshi H. et al. Comparison of Accurate Measurement of Left Ventricular Mass in Patients With Hypertrophied Hearts by Real-Time Three-Dimensional Echocardiography Versus Magnetic Resonance Imaging // *Amer. J. Cardiology*. – 2005. – Vol. 95. – P. 1263–1267.
34. Hofmann T., Franzen O., Koschyk D.H. et al. Three-dimensional color Doppler echocardiography for assessing shunt volume in atrial septal defects // *J. Amer. Soc. Echocardiogr.* – 2004. – Vol. 17. – P. 1173–1178.
35. Hozumi T., Yoshikawa J. Three-dimensional echocardiography using a multiplane transesophageal probe: the clinical applications // *Echocardiography*. – 2000. – Vol. 17. – P. 757–764.
36. Hubka M., Bolson E.L., McDonald J.A. Three-dimensional echocardiography measurement of left and right ventricular mass and volume: in vitro validation // *Int. J. Card Image*. – 2002. – Vol. 18. – P. 111–118.
37. Hung J., Lang R. et al. 3D echocardiography: A review of the current status and future directions // *J. Amer. Soc. Echocardiogr.* – 2007. – Vol. 20. – P. 213–233.
38. Jacobs L.D., Salgo I.S., Goonewardena S. et al. Rapid online quantification of left ventricular volume from real-time three-dimensional echocardiographic data // *Eur. Heart J*. – 2006. – Vol. 27. – P. 460–468.
39. Jeroen van D., Pieter A.D. et al. Evaluation of global left ventricular function and mechanical dyssynchrony in patients with an asymptomatic left bundle branch block: a real-time 3D echocardiography study // *Eur. J. Echocardiography*. – 2008. – Vol. 9. – P. 40–46.
40. Jiang L., Vazquez de Prada J.A., Handschumacher M.D. et al. Quantitative three-dimensional reconstruction of aneurysmal left ventricles: in vitro and in vivo validation // *Circulation*. – 1995. – Vol. 91. – P. 222–230.
41. Kang S.J., Song J.K., Yang H.S. et al. Systolic and diastolic regional myocardial motion of pacing-induced versus idiopathic left bundle branch block with and without left ventricular dysfunction // *Amer. J. Cardiology*. – 2004. – Vol. 93. – P. 1243–1246.
42. Kapetanakis S., Kearney M.T., Siva A. et al. Real-time three-dimensional echocardiography: a novel technique to quantify global left ventricular mechanical dyssynchrony // *Circulation*. – 2005. – Vol. 112. – P. 992–1000.
43. Khan G.N., Dairywala I.T., Liu Z. et al. 3D echocardiography of left atrial appendage thrombus // *Echocardiography*. – 2001. – Vol. 18. – P. 163–166.
44. Kisslo J., Firek B., Ota T. et al. Real-time volumetric echocardiography: the technology and the possibilities // *Echocardiography*. – 2000. – Vol. 17. – P. 773–779.
45. Korosoglou G., Humpert P.M. et al. Evidence of left ventricular contractile asynchrony by echocardiographic phase imaging in patients with type 2 diabetes mellitus and without clinically evident heart disease // *Amer. J. Cardiology*. – 2006. – Vol. 98. – P. 1525–1530.
46. Kuhl H.P., Schreckenber M., Rulands D. et al. High-resolution transthoracic real-time three-dimensional echocardiography // *J. Amer. Coll. Cardiology*. – 2004. – Vol. 43. – P. 2083–2090.
47. Lang Roberto M., Mor-Avi V. et al. Three-dimensional echocardiography the benefits of the additional dimension // *J. Amer. Coll. Cardiology*. – 2006. – Vol. 48. – P. 2053–2069.
48. Lange A., Palka P., Burstow D.J., Godman M.J. 3D echocardiography: historical development and current applications // *J. Amer. Soc. Echocardiography*. – 2001. – Vol. 14. – P. 403–412.
49. Leotta D.F., Munt B., Bolson E.L. et al. Quantitative 3D echocardiography by rapid imaging from multiple transthoracic windows: in vitro validation and initial in vivo studies // *J. Amer. Soc. Echocardiogr.* – 1997. – Vol. 10. – P. 830–839.
50. Liodakis E., Sharef O.A. et al. Application of color coded tissue Doppler imaging and real-time 3D echocardiography in the quantification of mechanical intraventricular dyssynchrony // *Eur. J. Echocardiography*. – 2005. – Vol. 6. – P. 119.
51. Mannearts H.F.J., Van Der Heide J.A., Kamp O. et al. Early identification of left ventricular remodelling after myocardial infarction, assessed by transthoracic 3D echocardiography // *Eur. Heart J*. – 2004. – Vol. 28. – P. 680.
52. Marsan N.A., Henneman M.M. et al. Real-time 3-dimensional echocardiography as a novel approach to quantify left ventricular dyssynchrony: a comparison study with phase analysis of gated myocardial perfusion single photon emission computed tomography // *J. Amer. Soc. Echocardiogr.* – 2008. – Vol. 21. – P. 801–807.
53. Marwick T.H., Yu C.M., Jing P.S. Myocardial imaging: tissue Doppler and speckle tracking // Blackwell Publishers. – 2007. – 321 p.
54. Matsumura Y., Hozumi T., Arai K. et al. Assessment of myocardial ischemia using new real-time three-dimensional dobutamine stress echocardiography: comparison with exercise thallium-201 single-photon emission computed tomography // *Eur. Heart J*. – 2005. – Vol. 16. – P. 937–941.
55. Miyamoto K., Nakatani S., Kanzaki H. et al. Detection of discrete subaortic stenosis by 3D transesophageal echocardiography // *Echocardiography*. – 2005. – Vol. 22 (9). – P. 783–784.
56. Monaghan M.J. Role of real time 3D echocardiography in evaluating the left ventricle // *Heart*. – 2006. – Vol. 92. – P. 131–136.
57. Mor-Avi V., Sugeng L., Weinert L. et al. Fast measurement of left ventricular mass with real-time three-dimensional echocardiography; comparison with magnetic resonance imaging // *Circulation*. – 2004. – Vol. 110. – P. 1814–1818.
58. Mukhtari O., Horton C.J., Nanda N.C. et al. Transesophageal color Doppler three-dimensional echocardiographic detection of prosthetic aortic valve dehiscence: correlation with surgical findings // *Echocardiography*. – 2001. – Vol. 18. – P. 393–397.
59. Nemes A., Lagrand W.K., McGhie J.S. et al. 3D transesophageal echocardiography in the evaluation of aortic valve destruction by endocarditis // *J. Amer. Soc. Echocardiogr.* – 2006. – Vol. 19. – P. 355.e13–355.e14.
60. Niu H.X., Hua W., Zhang S. et al. Assessment of cardiac function and synchronicity in subjects with isolated bundle branch block using Doppler imaging // *Chin. Med. J.* – 2006. – Vol. 119. – P. 795–800.
61. Oe H., Hozumi T., Arai K. et al. Comparison of accurate measurement of left ventricular mass in patients with hypertrophied hearts by real-time three-dimensional echocardiography versus magnetic resonance imaging // *Amer. J. Cardiology*. – 2005. – Vol. 95. – P. 1263–1267.
62. Osama I.I.S., Bas M. van D. et al. Quantification of left ventricular systolic dyssynchrony by real-time three-dimensional echocardiography // *J. Amer. Soc. Echocardiogr.* – 2009. – Vol. 22. – P. 232–239.
63. Perez de I.L., Casanova C., Almeria C. et al. Which methods should be the reference method to evaluate the severity of rheumatic mitral stenosis? Gorlins method versus 3D-echo // *Eur. J. Echocardiogr.* – 2007. – Vol. 8. – P. 470–473.
64. Perrone-Filardi P., Bacharach S.L., Dilsizian V. et al. Effects of regional systolic asynchrony on left ventricular global diastolic function in patients with coronary artery disease // *J. Amer. Coll. Cardiology*. – 1992. – Vol. 19. – P. 739–744.
65. Recommendations for Chamber Quantification: a report from the American Society of Echocardiography's Guidelines and

- Standards Committee and the Chamber Quantification Writing Group, Developed in Conjunction with the European Association of Echocardiography, a Branch of the European Society of Cardiology // J. Amer. Soc. Echocardiogr. – 2005. – Vol. 18. – P. 1440–1463.
66. Roelandt J., Ten Cate F.J., Vletter W.B. et al. Ultrasonic dynamic three-dimensional visualization of the heart with a multi-plane transesophageal imaging transducer // J. Amer. Soc. Echocardiogr. – 1994. – Vol. 27. – P. 1502–1510.
67. Salustri A., Roelandt J. Ultrasonic three-dimensional reconstruction of the heart // Ultrasound Med Biol. – 1995. – Vol. 21. – P. 281–293.
68. Sapin P.M., Schroder K.M., Gopal A.S. et al. Three-dimensional echocardiography: limitation of apical biplane imaging for measurement of ventricular volume // J. Amer. Soc. Echocardiogr. – 1995. – Vol. 8. – P. 576–584.
69. Schroeder K., Sapin P.M., King D.L. et al. Three-dimensional echocardiographic volume computation: in vitro comparison to standard two-dimensional echocardiography // J. Amer. Soc. Echocardiogr. – 1993. – Vol. 6. – P. 467–475.
70. Sheikh K., Swith S.W., von Ramm O., Kisslo J. Real-time 3D echocardiography: feasibility and initial use // Echocardiography. – 1991. – Vol. 81. – P. 119–125.
71. Shiota T., McCarthy P.M., White R.D. et al. Initial clinical experience of real-time 3D echocardiography in patients with ischemic and dilated cardiomyopathy // Amer. J. Cardiology. – 1999. – Vol. 84. – P. 1068–1073.
72. Smith J.L., Bolson E.L., Wong S.P. et al. Three-dimensional assessment of two-dimensional technique for evaluation of right ventricular function by tricuspid annulus motion // Int. J. Card. Imag. – 2002. – Vol. 19. – P. 189–197.
73. Sugeng L., Coon P., Weinert L. et al. Use of real-time 3D echocardiography in the evaluation of mitral valve disease // J. Amer. Soc. Echocardiogr. – 2006. – Vol. 19. – P. 413–421.
74. Sugeng L., Kirkpatrick J., Lang R.M. et al. Biplane stress echocardiography using a prototype matrix-array transducer // J. Amer. Soc. Echocardiogr. – 2003. – Vol. 16. – P. 937–941.
75. Sugeng L., Spencer K.T., Mor-Avi V. et al. Dynamic three-dimensional color flow Doppler: an improved technique for the assessment of mitral regurgitation // Echocardiography. – 2003. – Vol. 20. – P. 265–273.
76. Tacuma S., Ota T., Mura T. et al. Assessment of left ventricular functional by real-time 3D echocardiography compared with conventional noninvasive methods // J. Amer. Soc. Echocardiogr. – 2001. – Vol. 14. – P. 275–284.
77. Tacuma S., Zwas D.R., Fard A. et al. Real-time, 3-dimensional echocardiography acquires all standard 2-dimensional images from 2 volume sets: a clinical demonstration in 45 patients // J. Amer. Soc. Echocardiogr. – 1999. – Vol. 12. – P. 1–6.
78. Takeuchi M., Jacobs A., Sugeng L. et al. Assessment of left ventricular dyssynchrony with real-time 3-dimensional echocardiography: comparison with Doppler tissue imaging // J. Amer. Soc. Echocardiogr. – 2007. – Vol. 20. – P. 1321–1329.
79. Tan H.W., Zheng G.L. et al. Impaired left ventricular synchronicity in hypertensive patients with ventricular hypertrophy // J. Hypertension. – 2008. – Vol. 26. – P. 553–559.
80. Van de Veire N.R., Yu C.M., Ajmone-Marsan N. et al. Triplane tissue Doppler imaging: a novel three-dimensional imaging modality that predicts reverse left ventricular remodeling after cardiac resynchronization therapy // Heart. – 2008. – Vol. 94. – P. 9.
81. Van de Veire N., Bleeker G.B., Ypenburg C. et al. Usefulness of triplane tissue Doppler imaging to predict acute response to cardiac resynchronization therapy // Amer. J. Cardiology. – 2007. – Vol. 100. – P. 476–482.
82. Van Oosterhout M., Prinzen F.W. et al. Asynchronous electrical activation induces asymmetrical hypertrophy of the left ventricular wall // Circulation. – 1998. – Vol. 98. – P. 588–595.
83. Vera M.L.G., Marcelo L.C.V. et al. Standard values for real-time transthoracic three-dimensional echocardiographic dyssynchrony indexes in a normal population // J. Amer. Soc. Echocardiogr. – 2008. – Vol. 21. – P. 1229–1235.
84. Verdecchia P., Schillaci G. et al. Prognostic significance of serial changes in left ventricular mass in essential hypertension // Circulation. – 1998. – Vol. 97. – P. 48–54.
85. Von Ramm O.T., Smith S.W. Real-time volumetric ultrasound imaging system // J. Digit Imaging. – 1990. – Vol. 84. – P. 1068–1073.
86. Wang J.W., Kurrelmeyer K.M., Torre-Amione G., Nagueh S.F. Systolic and diastolic dyssynchrony in patients with diastolic heart failure and the effect of medical therapy // J. Amer. Coll. Cardiology. – 2007. – Vol. 49. – P. 88–96.
87. Yamaura Y., Watanabe N., Ogasawara Y. et al. Geometric change of valve leaflets and annulus after reconstructive surgery for ischemic mitral regurgitation: real-time 3D echocardiographic study // J. Thorac Cardiovasc. Surg. – 2005. – Vol. 130. – P. 1459–1461.
88. Yu C.M., Jeffrey W.H.F. Understanding Nonresponders of Cardiac Resynchronization Therapy—Current and Future Perspectives // J. Cardiovasc. Electrophysiol. – 2005. – Vol. 16. – P. 1117–1124.
89. Yu C.M., Yang Hua L.C.P. et al. Regional Left Ventricle Mechanical Asynchrony in Patients with Heart Disease and Normal QRS Duration: Implication for Biventricular Pacing Therapy // PACE. – 2003. – Vol. 26. – P. 562–570.
90. Yu C.M., Fung W.H., Lin H. et al. Predictors of left ventricular reverse remodeling after cardiac resynchronization therapy for heart failure secondary to idiopathic dilated or ischemic cardiomyopathy // Amer. J. Cardiology. – 2003. – Vol. 91. – P. 684–688.
91. Yu C.M., Zhang Q., Yip G.W. et al. Diastolic and systolic asynchrony in patients with diastolic heart failure // J. Amer. Coll. Cardiology. – 2007. – Vol. 49. – P. 97–105.
92. Zhang Y., Chan A.K. et al. Left ventricular systolic asynchrony after acute myocardial infarction in patients with narrow QRS complexes // Amer. Heart J. – 2005. – Vol. 149. – P. 497–503.

Надійшла 16.12.2009 р.

Evaluation of structure and function of left ventricle in cardiovascular diseases by means of three-dimensional echocardiography

Ya.M. Logvinov, N.V. Ponich, O.A. Epanchintseva, O.J. Zharinov, B.M. Todurov

Currently echocardiography is most often used for studying the structure and function of left ventricle and the definition of peculiarities of its remodeling in patients with cardiovascular diseases. There are many echocardiographic techniques used to obtain data about the status of left heart, but most of them are based on one- or two-dimensional visualization modes of heart that have certain drawbacks and limitations. Advanced technical innovations made possible the development and introduction into medical practice the new diagnostic method of analysis of heart – a three-dimensional echocardiography. The possibility of three-dimensional echocardiography in assessment of left ventricle is discussed in the article and the comparison with other modern methods of imaging of the heart is provided. Particular attention is paid to the definition of asynchronous activity of myocardium that is an important predictor and factor of the development and progression of left ventricular dysfunction.