

Submitted: 01.09.2014

Accepted: 05.09.2014

Ocena funkcji prawej komory serca za pomocą dopplera tkankowego oraz metody śledzenia markerów akustycznych

Right ventricular function assessment using tissue Doppler imaging and speckle tracking echocardiography

Radosław Pietrzak, Bożena Werner

Department of Pediatric Cardiology and General Pediatrics, Medical University of Warsaw, Warsaw, Poland

Correspondence: Professor Bożena Werner, MD, PHD, Department of Pediatric Cardiology and General Pediatrics, Medical University of Warsaw, Marszałkowska 24, 00-576 Warsaw, e-mail: bozena.werner@wum.edu.pl

DOI: 10.15557/JoU.2014.0033

Słowa kluczowe

doppler tkankowy,
metoda śledzenia
markerów
akustycznych,
prawa komora

Streszczenie

Nowoczesne techniki obrazowania echokardiograficznego – tkankowa echokardiografia dopplerowska i metoda śledzenia markerów akustycznych – umożliwiają ocenę globalnej i regionalnej funkcji mięśnia prawej komory serca. Do oceny globalnej funkcji prawej komory serca wykorzystuje się: wskaźnik funkcji prawej komory oraz ruch pierścienia zastawki trójdzielnej, a do oceny funkcji regionalnej: pomiary czasów trwania faz cyklu pracy serca i prędkości miokardialnych. Określenie odkształcenia i szybkości odkształcenia umożliwia ocenę zarówno czynności regionalnej, jak i globalnej miokardium. W piśmiennictwie istnieją doniesienia o przydatności tych metod u pacjentów z przeciążeniem ciśnieniowym i objętościowym, jak i bezpośrednim uszkodzeniem miokardium prawej komory serca. W nadciśnieniu płucnym ocena fali S' może służyć monitorowaniu skuteczności terapii. Obniżenie odkształcenia podłużnego wskazuje na zwiększone ryzyko zdarzeń naczyniowych, natomiast wzrost wartości wskaźnika funkcji prawej komory jest czynnikiem predykcyjnym przeżywalności w nadciśnieniu płucnym. U pacjentów z zatorowością płucną spadek prędkości fali S' ma związek z ograniczeniem przepływu przez łożysko płucne. W przypadku osób po chirurgicznej korekcji czynnościowej przełożenia wielkich pni tętniczych obniżenie odkształcenia podłużnego było niezależnym czynnikiem rokowniczym wystąpienia niewydolności serca. W arytmogenicznej kardiomiopatii prawej komory stwierdzano statystycznie istotne zmniejszenie wartości fali S' i przyspieszenia w fazie izowolumetrycznego skurczu. W okresie ostrym zawału obejmującego prawą komorę wartości fali S' i globalnej wielkości odkształcenia podłużnego prawej komory były niższe w porównaniu do analogicznych parametrów u osób zdrowych. Po operacji tetralogii Fallota ocena prędkości fali S' może być przydatna w identyfikacji pacjentów z obniżoną rezerwą skurczową; stwierdzono też dobrą korelację pomiędzy globalną wielkością odkształcenia podłużnego prawej komory serca a jej frakcją wyrzutową ocenianą rezonansem magnetycznym.

Key words

tissue Doppler imaging,
speckle tracking
echocardiography,
right ventricle

Abstract

Modern echocardiographic techniques, i.e. tissue Doppler imaging and speckle tracking echocardiography, allow for an assessment of global and regional right ventricular function. The right ventricular myocardial performance index and tricuspid annulus motion are used in the assessment of global right ventricular function, whereas duration of the cardiac cycle phases and myocardial velocities are used in the assessment of regional function. Strain and strain rate allow for an evaluation of both regional and global myocardial function. Literature reports provide data on the usefulness of these methods in patients with pressure and volume overload as well as with direct myocardial damage involving the right ventricle. In pulmonary hypertension, S' wave assessment may be used for therapeutic efficacy evaluation. Longitudinal strain reduction indicates an increased risk of vascular events, while an increased value of myocardial performance index is a predictor for a survival in pulmonary hypertension. A decreased S' wave velocity is associated with limited pulmonary vascular flow in patients with pulmonary embolism. In patients after atrial baffle repair for transposition of the great arteries, decreased longitudinal strain was an independent predictor for heart failure. A statistically significant decrease in both the S' wave as well as acceleration during isovolumic contraction were observed in arrhythmogenic right ventricular cardiomyopathy. S' wave and global right ventricular longitudinal strain values were lower in patients in the acute phase of myocardial infarction involving the right ventricle compared to the corresponding parameters in healthy individuals. In the case of tetralogy of Fallot correction, the evaluation of S' wave velocity may prove useful in identifying patients with reduced cardiac systolic reserve; a good correlation was also found between the global right ventricular longitudinal strain and right ventricular ejection fraction in MRI.

W ciągu ostatnich 40 lat nastąpił intensywny rozwój echokardiografii, która stała się podstawową metodą obrazowania serca. W ostatnim okresie wynaleziono nowe techniki umożliwiające ilościową ocenę funkcji mięśnia sercowego: tkankową echokardiografię dopplerowską (*tissue Doppler imaging*, TDI) oraz metodę śledzenia markerów akustycznych (*speckle tracking echocardiography*, STE)⁽¹⁻⁴⁾. Zaowocowało to zastosowaniem ich do oceny czynności prawej komory serca, pomimo iż jej złożona anatomia i kształt oraz zamostkowe położenie ograniczają znacznie okno obrazowania diagnostycznego i utrudniają analizę⁽¹⁾.

Zarówno tkankowa echokardiografia dopplerowska, jak i śledzenie markerów akustycznych umożliwiają ocenę globalnej czynności skurczowej i rozkurczowej oraz regionalnej funkcji miokardium. Metody te znajdują coraz szersze zastosowanie w diagnostyce wielu chorób serca⁽⁵⁻⁷⁾.

W tkankowej echokardiografii dopplerowskiej wykorzystuje się technikę:

- dopplera spektralnego (ryc. 1), który umożliwia analizę krzywych zmian prędkości miokardium w czasie rzeczywistym – rejestracji dokonuje się poprzez wstawienie próbki objętości pomiarowej dopplera pulsacyjnego w odpowiednim regionie zainteresowania (*region of interest*, ROI)⁽⁵⁾;
- dopplera kolorowego (ryc. 2), który umożliwia pomiar prędkości ruchu tkanki i jej odkształcenia poprzez analizę wcześniej zarejestrowanych obrazów segmentów mięśnia sercowego kodowanych kolorem w prezentacji jedno- i dwuwymiarowej – pozwala to na ocenę kilku segmentów jednocześnie z użyciem tej samej projekcji⁽⁵⁾.

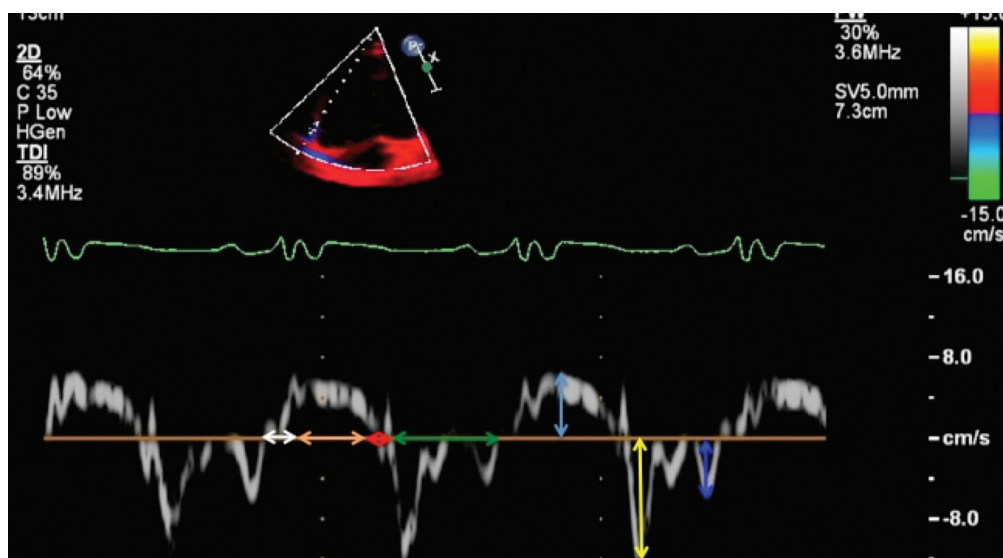
In the last 40 years there has been an intensive development of echocardiography, which has become the primary cardiac imaging technique. Recently, novel methods for quantitative assessment of myocardial function have been developed: tissue Doppler imaging (TDI) and speckle tracking echocardiography (STE)⁽¹⁻⁴⁾. This has resulted in their application for the assessment of right ventricular function, although the complex anatomy and shape as well as the retrosternal position of the right ventricle significantly reduce the acoustic window and hinder the analysis⁽¹⁾.

Both, tissue Doppler imaging and speckle tracking echocardiography allow for an assessment of global systolic and diastolic function as well as regional myocardial function. These methods are increasingly used in the diagnostics of many heart diseases⁽⁵⁻⁷⁾.

Tissue Doppler echocardiography uses the technique of:

- spectral Doppler (fig. 1), which allows for an analysis of real-time myocardial velocity change curves – recordings are performed by inserting a sample of pulsed Doppler measurement volume in the region of interest (ROI)⁽⁵⁾;
- color Doppler (fig. 2), which allows for a measurement of myocardial velocities and strain by analyzing previously recorded images of one- or two-dimensional color-coded myocardial segments – this allows for a simultaneous assessment of several segments using the same view⁽⁵⁾.

The STE is the innovative method for the assessment of myocardial strain. It uses the presence of numerous spots (speckles) in the myocardium, which reflect ultrasonic

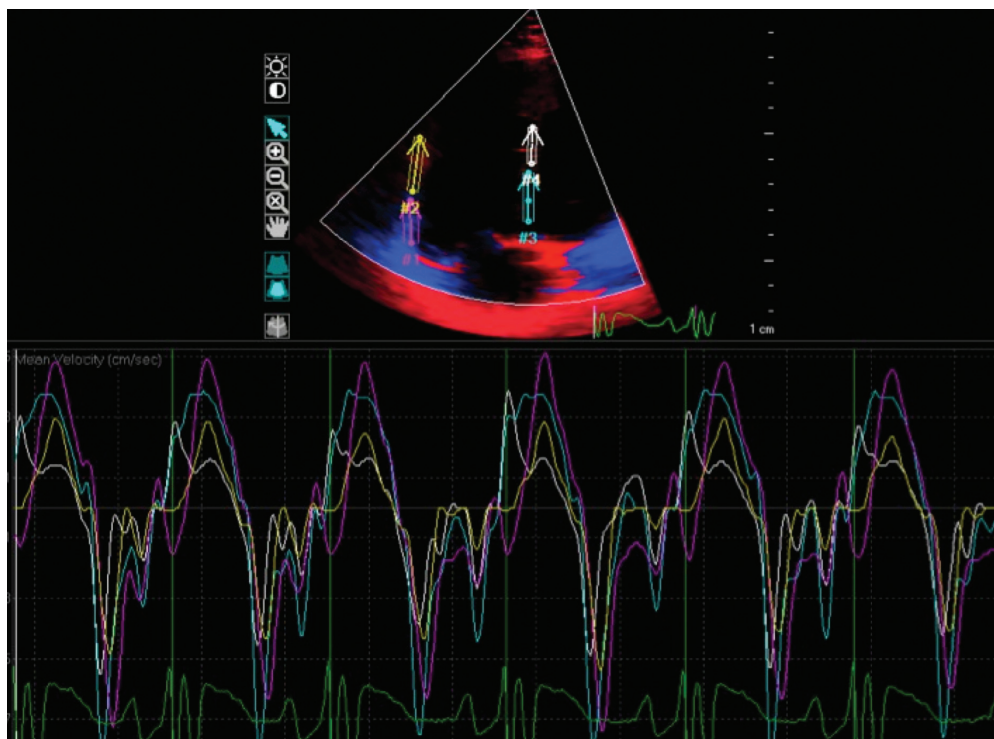


Ryc. 1. Doppler spektralny. Krzywa prędkości miokardialnych pierścienia trójdzielnego i fazy cyklu pracy serca

Legenda: strzałka niebieska – miokardialna prędkość skurczowa (S'); strzałka żółta – miokardialna prędkość wczesnorozkurczowa (E'); strzałka granatowa – miokardialna prędkość późnorozkurczowa (A'); strzałka pomarańczowa – czas trwania fali skurczowej (CT); strzałka zielona – czas trwania miokardialnych fal rozkurczowych; strzałka biała – czas trwania skurczu izowolumetrycznego (ICT); strzałka czerwona – czas trwania rozkurczu izowolumetrycznego (IRT)

Fig. 1. Spectral tissue Doppler. Myocardial velocity curve of the tricuspid annulus and cardiac cycle phases

Legend: blue arrow – myocardial systolic velocity (S'); yellow arrow – early diastolic myocardial velocity (E'); dark blue arrow – late diastolic myocardial velocity (A'); orange arrow – contraction time (CT); green arrow – myocardial diastolic wave time; white arrow – isovolumetric contraction time (ICT); red arrow – isovolumetric relaxation time (IRT)

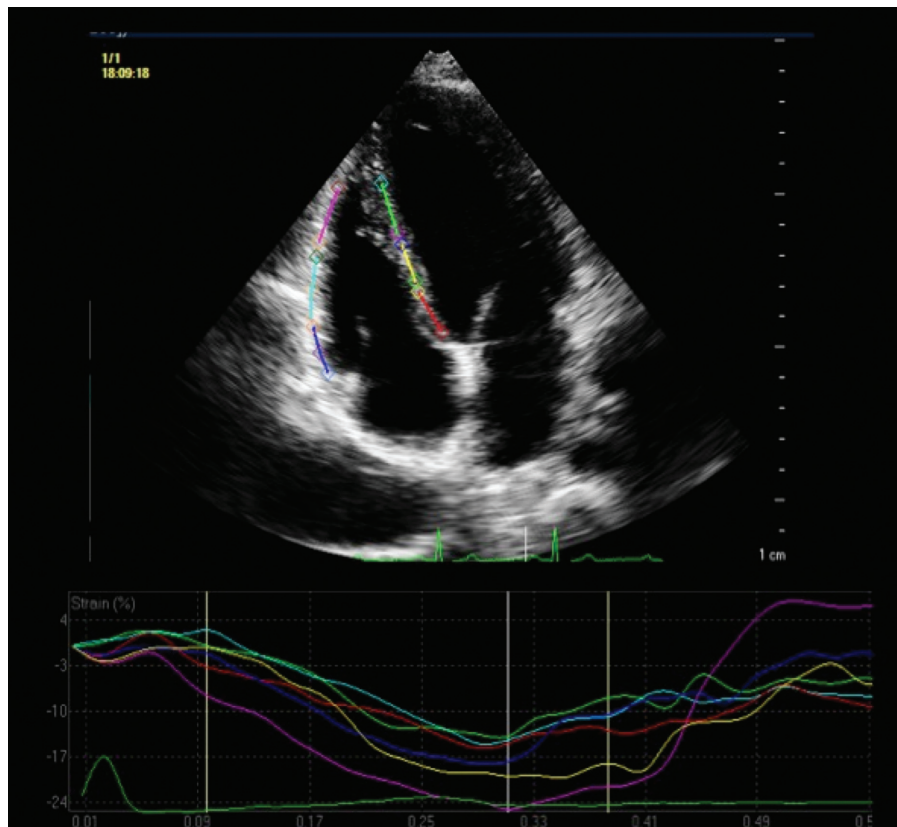


Ryc. 2. Badanie echokardiograficzne, projekcja koniuszkowa 4-jamowa. Tkankowy doppler kolorowy. Krzywe prędkości miokardialnych analizowane w czterech segmentach jednocześnie

Fig. 2. Echocardiography, apical 4-chamber view. Color tissue Doppler. Myocardial velocity curves analyzed simultaneously in four segments

Najnowszą techniką do oceny odkształcenia mięśnia sercowego jest STE. Wykorzystuje ona obecność w mięśniu sercowym licznych plamek (*speckles*), które w sposób niezmienny odbijają fale ultradźwiękowe w czasie całego cyklu pracy serca. Śledzenie ruchu poszczególnych markerów akustycznych w obrębie mięśnia i zmiany ich wzajemnego położenia umożliwiają ocenę odkształcenia w czasie cyklu pracy serca. Ocenę techniką STE przeprowadza się również na podstawie obrazów wcześniej zarejestrowanych. Najbardziej pracochłonną częścią badania jest dokładne wyznaczenie granicy ROI, czyli segmentów mięśnia sercowego, które będą analizowane w kolejnych etapach (ryc. 3). Dla uzyskania wiarygodnych wyników kluczowe znaczenie ma właściwe dobranie częstości odświeżania, w granicach 50–110 Hz. Umożliwia to precyzyjne wytyczenie granicy pomiędzy miokardium i endokardium. Zbyt niska, jak i zbyt wysoka częstość powodują nieprecyzyjne śledzenie wybranych markerów akustycznych. Należy pamiętać, że po automatycznej analizie konieczne są poprawki manualne, gdyż nawet niewielkie wykroczenie poza granicę mięśnia może

waves in a constant manner throughout the cardiac cycle. Tracking the movement of individual acoustic markers within the myocardium as well as changes in their relative position allow for an assessment of strain during the cardiac cycle. STE-based assessment is also performed on the basis of previously recorded images. Accurate determination of the ROI border, i.e. myocardial segments for an analysis in the subsequent stages (fig. 3) is the most laborious part of assessment. Appropriately selected refresh rate, i.e. between 50 and 110 Hz, is of key importance for reliable results. This allows for a precise demarcation of the boundary between the myocardium and the endocardium. Too low or too high frequency results in imprecise tracking of the selected acoustic markers. It ought to be noted that manual correction is necessary following automatic analysis as even slightly crossed myocardial border may alter the obtained results. In the case of suboptimal quality imaging, maximum magnification of individual myocardial wall fragments followed by “segment by segment” parameter analysis is useful. However, this method



Ryc. 3. Badanie echokardiograficzne, projekcja koniuszkowa 4-jamowa. Metoda śledzenia markerów akustycznych. Regiony zainteresowania. Poniżej krzywe odkształcenia podłużnego miokardium wyznaczone metodą śledzenia markerów akustycznych

Legenda: segmenty (regiony zainteresowania) miokardium: linia granatowa – podstawny ściany bocznej; linia czerwona – podstawny przegrody; linia niebieska – środkowy ściany bocznej; linia żółta – środkowy przegrody; linia fioletowa – koniuszkowy ściany bocznej; linia zielona – koniuszkowy przegrody

Fig. 3. Echocardiography, apical 4-chamber view. Speckle tracking. Regions of interest. Below myocardial longitudinal strain curves determined by speckle tracking imaging

Legend: myocardial segments (regions of interest): dark blue line – basal segment of the lateral wall; red line – basal segment of the septum; blue line – middle segment of the lateral wall; yellow line – middle segment of the septum; purple line – apical segment of the lateral wall; green line – apical segment of the septum

zmieniać uzyskiwane wyniki. Czasem w przypadkach obrazowania o suboptymalnej jakości pomocne jest maksymalne powiększenie poszczególnych fragmentów ściany mięśnia sercowego i analiza parametrów „segment po segmencie”. Jest to jednak metoda żmudna i bardzo czasochłonna, co ogranicza jej przydatność w praktyce klinicznej. Uzyskane wyniki są uśredniane automatycznie z zarejestrowanych trzech następujących po sobie cykli pracy serca i mogą być wyrażone globalnie lub oddzielnie dla poszczególnych segmentów mięśnia sercowego. Metoda śledzenia markerów akustycznych pozwala na uniknięcie podstawowego ograniczenia tkankowej echokardiografii dopplerowskiej, jakim jest zależność pomiaru od kąta przemieszczania wiązki dopplerowskiej w stosunku do ruchu miokardium^(7,8).

W celu oceny funkcji mięśnia sercowego za pomocą TDI przeprowadza się pomiary czasów trwania faz cyklu pracy serca i prędkości miokardialnych (ryc. 4)⁽⁶⁾.

W fazie skurczu:

- czas trwania skurczu izowolumetrycznego (*isovolumic contraction time, ICT*);
- czas trwania fazy skurczowej (*contraction time, CT*);
- skurczowa prędkość miokardialna (*S'*).

is laborious and time-consuming, therefore its usefulness in clinical practice is limited. The obtained results are automatically averaged based on three recorded consecutive cardiac cycles and may be expressed globally or separately for individual myocardial segments. Speckle tracking method avoids the primary limitation of tissue Doppler echocardiography, i.e. measurement dependence on the angle of Doppler beam movement relative to myocardial motion^(7,8).

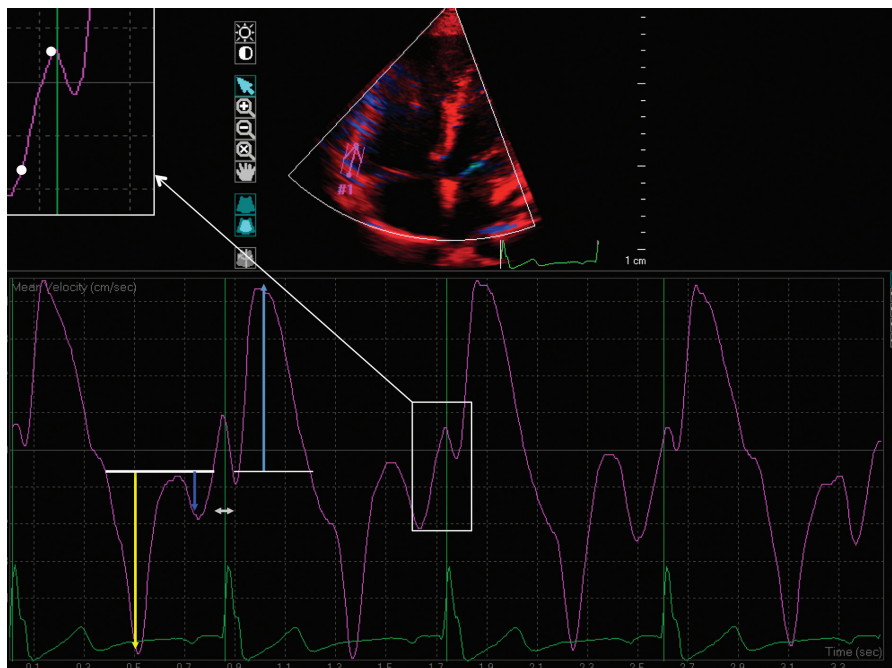
Cardiac cycle phases and myocardial velocities (fig. 4) are made in order to assess the myocardial function using TDI⁽⁶⁾.

Systolic:

- isovolumic contraction time (*ICT*);
- contraction time (*CT*);
- systolic myocardial velocity (*S'*).

Diastolic:

- isovolumetric relaxation time (*IRT*);
- relaxation time;
- early diastolic myocardial velocity (*E'*);
- late diastolic myocardial velocity (*A'*).



Ryc. 4. Badanie echokardiograficzne, projekcja koniuszkowa 4-jamowa. Tkankowy doppler kolorowy. Krzywa prędkości miokardialnych i okresów cyklu pracy serca – części podstawnej ściany bocznej

Legenda: strzałka niebieska – maksymalna prędkość skurczowa (*S'*); strzałka żółta – maksymalna prędkość wczesnorozkurczowa (*E'*); strzałka granatowa – maksymalna prędkość późnorozkurczowa (*A'*); strzałka szara – czas trwania skurczu izowolumetrycznego; białe punkty wyznaczają ramie wstępujące krzywej skurczu izowolumetrycznego – na podstawie jego nachylenia wyznaczana jest automatycznie wartość przyspieszenia w czasie skurczu izowolumetrycznego (*IVA*)

Fig. 4. Echocardiography, apical 4-chamber view. Tissue color Doppler. Myocardial velocity and cardiac cycle phase curve – the basal part of the lateral wall

Legend: blue arrow – maximum systolic velocity (*S'*); yellow arrow – maximum early diastolic velocity (*E'*); dark blue arrow – maximum late diastolic velocity (*A'*); grey arrow – isovolumetric contraction time; white dots designate the ascending part of isovolumetric contraction curve – acceleration during isovolumetric contraction (*IVA*) is automatically calculated based on its inclination

W fazie rozkurczu:

- czas trwania rozkurczu izowolumetrycznego (*isovolumetric relaxation time*, IRT);
- czas trwania fazy rozkurczowej;
- wczesnorozkurczowa prędkość miokardialna (E');
- późnorozkurczowa prędkość miokardialna (A').

Ponadto w fazie skurczowej w czasie trwania skurczu izowolumetrycznego można oszacować przyspieszenie fali miokardialnej (IVA). Uważa się, że IVA jest wskaźnikiem związanym z bezpośrednim uszkodzeniem miokardium i nie zależy od zmian kształtu RV⁽⁹⁾.

Do oceny globalnej funkcji prawej komory wykorzystuje się wskaźnik funkcji prawej komory (*Tei index*, RVMPI). RVMPI definiuje się według wzoru:

$$\text{RVMPI} = \frac{(\text{IRT} + \text{ICT})}{\text{CT}}$$

RVMPI – wskaźnik funkcji prawej komory
CT – czas trwania fali skurczowej
ICT – czas skurczu izowolumetrycznego
IRT – czas rozkurczu izowolumetrycznego

Dane z piśmiennictwa wskazują na jego dobrą korelację z wskaźnikami funkcji skurczowej^(10,11).

W celu oceny funkcji rozkurczowej prawej komory wyznacza się wskaźniki E'/A' i E/E'. Wskaźnik E oznacza wczesnorozkurczowy napływ przez zastawkę trójdzielną ocenianą za pomocą klasycznej echokardiografii. W badaniach u dorosłych wykazano, że podwyższenie wskaźnika E/E' ma ścisły związek z ciśnieniem napełniania prawej komory⁽¹²⁾, jednak u dzieci po korekcji tetralogii Fallota zależność ta nie została potwierdzona⁽¹³⁾.

Do oceny globalnej czynności skurczowej prawej komory serca wykorzystuje się analizę ruchu pierścienia zastawki trójdzielnej (TV) za pomocą STE. Pozwala to na ilościową ocenę skracania komór podczas skurczu (ryc. 2). Parametr ten wykazuje podobieństwo do ruchu pierścienia zastawki trójdzielnej rejestrowanego w projekcji M-mode (TAPSE), jednak w przeciwieństwie do niego jest niezależny od kąta obrazowania. Amplituda ruchu pierścienia zastawki trójdzielnej wyliczana jest automatycznie i przedstawiana w liczbach bezwzględnych oraz w postaci wskaźnika podłużnego skracania prawej komory (RVSF), wyrażonego w procentach zgodnie ze wzorem:

$$\text{RVSF}\% = \frac{\text{RVEDL} - \text{RVESL}}{\text{RVEDL}} \times 100\%$$

RVEDL – długość końcoworozkurczowa prawej komory
RVESL – długość końcowoskurczowa prawej komory

W dotychczasowych badaniach wykazano bardzo dobrą korelację RVSF z frakcją wyrzutową RV ocenianą rezonansem magnetycznym. Wartość tego parametru przewyższała TAPSE, która korelowała gorzej z frakcją wyrzutową

Furthermore, myocardial acceleration during isovolumic contraction (IVA) may be calculated. The IVA is considered to be associated with direct myocardial damage and is independent of alterations in RV shape⁽⁹⁾.

Right ventricular myocardial performance index (Tei index, RVMPI) is used for the assessment of global right ventricular function. RVMPI is defined by the formula:

$$\text{RVMPI} = \frac{(\text{IRT} + \text{ICT})}{\text{CT}}$$

RVMPI – right ventricular myocardial performance index
CT – contraction time
ICT – isovolumic contraction time
IRT – isovolumic relaxation time

Literature data indicate its good correlation with systolic function markers^(10,11).

E'/A' and E/E' ratios are measured for an assessment of right ventricular diastolic function. An early diastolic tricuspid inflow assessed using standard echocardiography technique is designated as E. Studies in adults have shown that increased E/E' ratio is closely associated with right ventricular filling pressure⁽¹²⁾, however, this relationship has not been confirmed in pediatric patients after teratology of Fallot repair⁽¹³⁾.

Tricuspid valve annulus (TV) motion analysis using STE is used for the assessment of global systolic right ventricular function. This allows for a quantitative evaluation of ventricular systolic shortening (fig. 2). Although this parameter bears similarity to tricuspid annular plane systolic excursion (TAPSE) registered in the M-mode, it is by contrast independent of the imaging angle. The amplitude of tricuspid valve annulus motion is calculated automatically and presented as integers as well as in the form of right ventricular longitudinal shortening fraction (RVSF), expressed in percentage, according to the following formula:

$$\text{RVSF}\% = \frac{\text{RVEDL} - \text{RVESL}}{\text{RVEDL}} \times 100\%$$

RVEDL – right ventricular end-diastolic length
RVESL – right ventricular end-systolic length

Previous studies demonstrated a very good correlation between RVSF and RV ejection fraction assessed by magnetic resonance imaging. The value of this parameter was higher than TAPSE, which showed poorer correlation with ejection fraction compared to RVSF. RVSF is likely to be associated with preload, and is less dependent on the direct myocardial damage^(14,15).

TDI and STE are also used for the assessment of the relative systolic myocardial strain (ϵ) and strain rate. Myocardial strain is defined as a deformation of the myocardium relative to its baseline state, i.e. a change in the size of a selected myocardial fragment in a specific

niż wskaźnik RVSF. Prawdopodobnie RVSF związany jest z obciążeniem wstępnym, natomiast w mniejszym stopniu zależy od bezpośredniego uszkodzenia miokardium^(14,15).

Za pomocą TDI i STE oceniana jest także wielkość względnego odkształcania miokardium (*strain*, ϵ) podczas skurczu oraz szybkość odkształcania (*strain rate*). Mianem odkształcania mięśnia sercowego określa się jego deformację względem stanu wyjściowego, czyli zmianę rozmiaru wybranego fragmentu mięśnia w określonym kierunku w czasie jednego cyklu pracy serca. Jest ono wyrażane w procentach w stosunku do rozmiaru wyjściowego^(2,3,7).

Szybkość odkształcania ocenia się w fazach:

- skurczowej (SSR);
- wczesnorozkurczowej (DSRE);
- późnorozkurczowej (DSRA) (ryc. 5).

W TDI do pomiarów odkształcania wykorzystuje się zjawisko gradientu prędkości, polegające na tym, że mięsień sercowy kurczy się z różną prędkością od koniuszka do pierścieni przedsionkowo-komorowych. Różnica prędkości dwóch skrajnych punktów wybranego do analizy regionu zainteresowania pozwala na obliczenie szybkości odkształcania, a następnie odkształcania (ϵ)⁽⁶⁾.

W STE wykorzystuje się analizę skali odcieni szarości w obrazach dwuwymiarowych i w pierwszej kolejności jest

direction during one cardiac cycle. It is expressed in percentage relative to the initial size^(2,3,7).

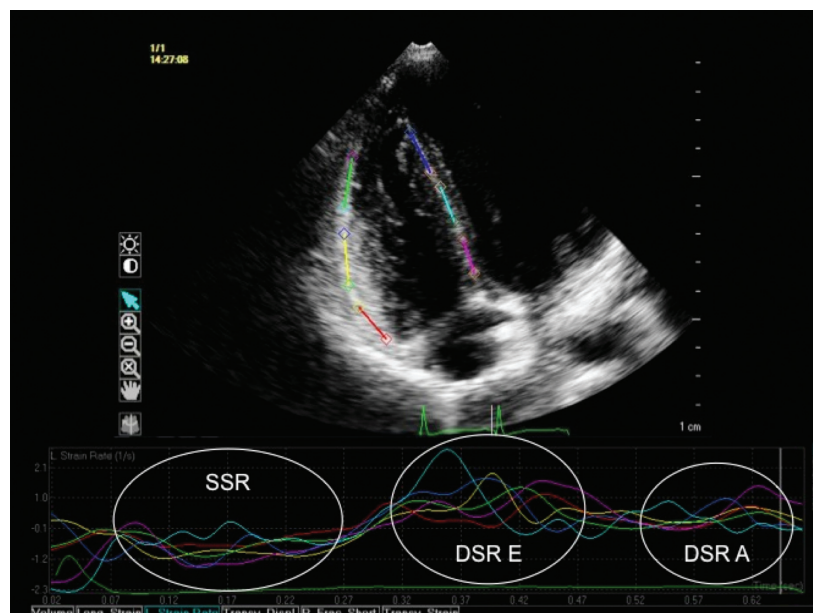
Strain rate assessment involves the following phases:

- systolic (SSR);
- early diastolic (DSRE);
- late diastolic (DSRA) (fig. 5).

TDI strain measurements use the phenomenon of velocity gradient, which consists in the fact that cardiac muscle contracts at different velocities from the apex to the atrio-ventricular annuli. The difference in the velocity between two endpoints of a selected region of interest allows to calculate strain rate, and then the strain itself (ϵ)⁽⁶⁾.

Grayscale analysis in two-dimensional images is used in the STE with ϵ calculated in the first place, followed by strain rate as its derivative. Negative strain value indicates myocardial shortening or thinning, whereas lengthening or thickening is indicated by a positive value. Strain is assessed in the longitudinal, transverse and circular directions^(7,8).

RV transverse strain assessment is of minor use due to the specific structure of the right ventricular wall, i.e. a very thin circular layer, and also because the contraction of the free wall is phasic primarily in the longitudinal direction. Therefore, only longitudinal strain and



Ryc. 5. Badanie echokardiograficzne, projekcja koniuszkowa 4-jamowa. Metoda śledzenia markerów akustycznych. Ocena szybkości odkształcania podłużnego

Legenda: SSR – szybkość odkształcania podłużnego w fazie skurczowej cyklu pracy serca; DSRE – szybkość odkształcania podłużnego w fazie wczesnorozkurczowej cyklu pracy serca; DSRA – szybkość odkształcania podłużnego w fazie późnorozkurczowej cyklu pracy serca

Fig. 5. Echocardiography, apical 4-chamber view. Speckle tracking. Longitudinal strain rate assessment

Legend – SSR – longitudinal strain rate in the systolic phase of the cardiac cycle; DSRE – longitudinal strain rate in early diastolic phase of the cardiac cycle; DSRA – longitudinal strain rate in late diastolic phase of the cardiac cycle

wyliczane ϵ , a szybkość odkształcenia to jego pochodna. Ujemna wartość odkształcenia oznacza skrócenie lub ścięczenie mięśnia sercowego, dodatnia – wydłużenie albo pogrubienie. Odkształcenie ocenia się w kierunku podłużnym, poprzecznym i okrężnym^(7,8).

Ocena odkształcenia poprzecznego dla RV jest mało przydatna, z powodu specyficznej budowy ściany prawej komory – bardzo cienkiej warstwy okrężnej, a także dlatego, że skurcz wolnej ściany odbywa się fazowo przede wszystkim w kierunku podłużnym. W związku z tym dla RV wyznacza się tylko wielkość i szybkość odkształcenia podłużnego. Pomiar ϵ umożliwia analizę fazowości skurczu RV. Wykonując pomiar czasu od początku skurczu do szczytu odkształcenia (*time to peak*) w poszczególnych segmentach, można ocenić jego synchronię. Gdy maksymalne wartości odnotowuje się po zamknięciu zastawek naczyniowych, mówimy o zjawisku *post-systolic shortening*⁽¹⁶⁾.

Analiza odkształceń miokardialnych jest szczególnie przydatna w sytuacjach, gdy rozwijająca się choroba serca w swej początkowej fazie nie doprowadziła do upośledzenia globalnej funkcji hemodynamicznej⁽⁵⁾.

W 2010 roku ukazały się zalecenia Amerykańskiego Towarzystwa Echokardiograficznego, aprobowane przez Sekcję Echokardiografii Europejskiego Towarzystwa Kardiologicznego, dotyczące oceny anatomii i funkcji RV u dorosłych. Według nich ocena RV za pomocą TDI może być przydatna w różnych sytuacjach klinicznych. STE pozostaje nadal techniką wykorzystywaną głównie w badaniach naukowych⁽⁵⁾.

W piśmiennictwie istnieją doniesienia co do przydatności opisanych metod oceny funkcji prawej komory w schorzeniach przebiegających z:

- przeciążeniem ciśnieniowym RV – nadciśnienie płucne (*pulmonary hypertension*, HP), zatorowość płucna, zespół bezdechu sennego⁽¹⁷⁻²¹⁾;
- przeciążeniem objętościowym RV – ubytek przegrody międzyprzedsionkowej (*atrial septal defect*, ASD), niedomykalność zastawki pnia płucnego^(22,23);
- przeciążeniem ciśnieniowym i objętościowym RV – przełożenie wielkich pni tętniczych po operacji czynnościowej⁽²⁴⁾;
- bezpośrednim uszkodzeniem miokardium RV – arytmogenna kardiomiopatia prawej komory (*arrhythmogenic right ventricular cardiomyopathy*, ARVC), zawał prawej komory serca^(25,26);
- przeciążeniem ciśnieniowym oraz objętościowym, jak i bezpośrednim uszkodzeniem miokardium RV – tetralogia Fallota po korekcji (F4)⁽²⁷⁻²⁸⁾;
- obciążeniem lewej komory – niewydolność serca⁽²⁹⁾.

U pacjentów z nadciśnieniem płucnym stwierdzono, że obniżone wartości ϵ wolnej ściany RV stwierdzane za pomocą STE wskazują na zwiększone ryzyko zdarzeń naczyniowych w czasie 4-letniej obserwacji⁽¹⁹⁾. U chorych leczonych z powodu HP stwierdzono zwiększenie aktywności skurczowej mięśnia sercowego RV, wyrażone wyższymi wartościami skurczowych prędkości miokardialnych, w porównaniu do

strain rate are determined for the RV. The measurement of ϵ allows for an analysis of RV phasic character. Its synchrony may be assessed by measuring time to peak strain in subsequent segments. Post-systolic shortening occurs when maximum values are recorded following vascular valve closure⁽¹⁶⁾.

Myocardial strain analysis is particularly useful in a situation when the global hemodynamic function has not been impaired by the developing heart disease at its initial stage⁽⁵⁾.

Recommendations of the American Society of Echocardiography for the assessment of RV structure and function in adults, endorsed by the European Association of Echocardiography, a registered branch of the European Society of Cardiology, were published in 2010. According to these recommendations, TDI-based RV assessment may be useful in a variety of clinical situations. The STE method is still used mainly in research⁽⁵⁾.

There are literature reports concerning the utility of the described methods for the assessment of RV function in conditions involving:

- RV pressure overload – pulmonary hypertension (PH), pulmonary embolism, sleep apnea syndrome⁽¹⁷⁻²¹⁾;
- RV volume overload – atrial septal defect (ASD), pulmonary valve regurgitation^(22,23);
- RV pressure and volume overload – transposition of the great arteries following an atrial baffle repair⁽²⁴⁾;
- direct RV myocardial damage – arrhythmogenic right ventricular cardiomyopathy (ARVC), infarction of the right ventricle^(25,26);
- pressure and volume overload as well as direct RV myocardial damage – after tetralogy of Fallot repair (F4)⁽²⁷⁻²⁸⁾;
- left ventricular load – heart failure⁽²⁹⁾.

It was found that STE-based decreased ϵ values for the free RV wall in patients with pulmonary hypertension indicate an increased risk of vascular events during a 4-year follow up period⁽¹⁹⁾. Patients receiving treatment due to PH were shown to have increased RV myocardial contractile activity expressed in higher systolic myocardial velocity values compared to pre-treatment measurements. According to the authors, S' wave assessment may be used for therapeutic efficacy monitoring in PH patients⁽²⁰⁾. In this group of patients, RVMPI analysis is also of high clinical value. An increase in this ratio is considered to be a predictor of survival in pulmonary hypertension^(10,21).

It was found, based on a study by Kjaergaard *et al.*⁽¹⁷⁾, that S' wave assessment may find use in patients with pulmonary embolism. The authors claim that a decrease in S' wave velocity is associated with limited pulmonary vascular flow, assessed by perfusion scintigraphy.

Abnormal myocardial velocity ratio, i.e. low E' wave and high A' wave, was found in patients with sleep apnea syndrome⁽¹⁸⁾.



Ryc. 6. Badanie echokardiograficzne, projekcja koniuszkowa 4-jamowa. Metoda śledzenia markerów akustycznych. Analiza wskaźnika skracania prawej komory. Po wyznaczeniu manualnie trzech punktów w obrazie zatrzymanym w fazie końcoworozkurczowej RV (dwóch w obrębie TV w miejscu przyczepu płatków przedniego i przegrodowego, trzeciego w obrębie szczytu części koniuszkowej RV) następuje automatyczne śledzenie przemieszczenia TV i zmiany długości RV w cyklu pracy serca

Legenda: strzałka żółta – długość końcoworozkurczowa prawej komory; strzałka czerwona – długość końcowoskurczowa prawej komory

Fig. 6. Echocardiography, apical 4-chamber view. Speckle tracking. Right ventricular shortening fraction analysis. Once three points have been manually marked on an image stopped in RV end-diastolic phase (two within the TV at the site of attachment of anterior and septal leaflet, and a third one within the apex of the apical portion of the RV), automatic tracking of TV motion and a change in the RV length during cardiac cycle proceeds

Legend: yellow arrow – right ventricular end-diastolic length; red arrow – right ventricular end-systolic length

pomiarów uzyskanych przed włączeniem leczenia. Według autorów wspomnianej pracy ocena fali S' może służyć monitorowaniu skuteczności terapii u pacjentów z HP⁽²⁰⁾. W tej grupie chorych uznana wartość kliniczną ma także analiza RVMPI. Uważa się, że wzrost tego wskaźnika jest czynnikiem predykcyjnym przeżywalności w HP^(10,21).

Na podstawie badań Kjaergaarda i wsp.⁽¹⁷⁾ stwierdzono, że u osób z zatorowością płucną przydatna może być ocena prędkości fali S'. Według wymienionych autorów spadek prędkości fali S' ma związek z ograniczeniem przepływu przez łożysko płucne, ocenianym za pomocą scyntygrafii perfuzyjnej.

W zespole bezdechu sennego zaobserwowano zaburzony stosunek wartości prędkości miokardialnych – niską falę E' i wysoką falę A'⁽¹⁸⁾.

U chorych z ASD wartości fali S' oraz ϵ były wyższe niż u osób zdrowych, co może wynikać z podwyższonego obciążenia wstępnego. Wykazano także, że sposób leczenia ASD ma wpływ na te wartości. U pacjentów operowanych metodą chirurgiczną były one mniejsze w porównaniu do wyników uzyskiwanych u osób leczonych za pomocą kardiologii interwencyjnej⁽²²⁾.

S' wave and ϵ values are higher in ASD patients compared to healthy individuals, which may result from an increased preload. It was further shown that the method of ASD treatment has an effect on these values. They were lower in patients receiving surgical treatment compared to those treated with interventional cardiology⁽²²⁾.

On the other hand, a decrease in free wall and septum ϵ value as well as SR, both in systolic and diastolic phase of the cardiac cycle was found in patients after atrial baffle repair for transposition of the great arteries, with RV as a systemic ventricle. Based on the above mentioned studies, RV systolic dysfunction was an independent predictor for heart failure during a two-year follow-up period⁽²⁴⁾.

Reduced systolic myocardial velocity and longitudinal strain values were shown in arrhythmogenic right ventricular cardiomyopathy. ARVC patients had statistically significantly smaller S' wave and IVA velocity differences compared to healthy individuals⁽²⁵⁾.

Systolic dysfunction: decreased S' and ϵ values within the lateral RV wall as well as diastolic dysfunction: decreased E' wave value and an increased A' wave velocity were

Z kolei u chorych po chirurgicznej korekcji czynnościowej przełożenia wielkich pni tętniczych, z RV jako komorą systemową, stwierdzano obniżenie wartości ϵ ściany wolnej i przegrody, a także SR, zarówno w fazie skurczowej, jak i rozkurczowej cyklu pracy serca. Upośledzenie funkcji skurczowej RV w oparciu o wymienione badania było niezależnym czynnikiem rokowniczym wystąpienia niewydolności serca podczas 2-letniej obserwacji⁽²⁴⁾.

W arytmogenicznej kardiomiopatii prawej komory wykazano obniżone wartości skurczowych prędkości miokardialnych i odkształceń podłużnych. U pacjentów z ARVC różnice prędkości fali S' i IVA były istotnie statystycznie mniejsze niż w populacji ludzi zdrowych⁽²⁵⁾.

U chorych w okresie ostrym zawału obejmującego RV stwierdzano zarówno zaburzenia funkcji skurczowej: obniżone wartości fali S' i ϵ w obrębie ściany bocznej RV, jak i zaburzenia funkcji rozkurczowej: obniżone wartości fali E' i podwyższoną prędkość fali A'⁽²⁶⁾.

W przypadku osób po operacji F4 w badaniach wysiłkowych wykazano zmniejszony przyrost prędkości fali S' w obrębie części bocznej TV w czasie wysiłku. Autorzy doniesienia stwierdzili, że ocena prędkości fali S' może być przydatna w identyfikacji pacjentów z obniżoną rezerwą skurczową⁽²⁷⁾. Bernard i wsp.⁽²⁸⁾ zaobserwowali u chorych po korekcji F4 dobrą korelację pomiędzy globalną wielkością ϵ ściany wolnej RV a jej frakcją wyrzutową ocenianą rezonansem magnetycznym.

Wykonując badania techniką TDI i STE, należy pamiętać, że wymagają one obrazów doskonałej jakości. Dla wiarygodnej oceny odkształcenia w TDI wiązka dopplerowska musi być równoległa lub prawie równoległa do kierunku ruchu miokardium (maksymalny kąt wiązki do kierunku odkształcenia nie powinien przekraczać 15°). STE nie ma zastosowania w sytuacjach braku możliwości wizualizacji całej komory w sektorze badania, co zdarza się w jej rozstrzeni lub w związku z wąskim oknem obrazowania diagnostycznego. Powyższe ograniczenie nie dotyczy oceny RVSF. Ważnym problemem omawianych metod pozostaje brak standaryzacji oprogramowań używanych przez poszczególnych producentów^(5,6,8).

Omawiane metody analizy funkcji RV stanowią dynamicznie rozwijającą się gałąź echokardiografii, która umożliwia precyzyjną lokalizację miejsc zmienionych chorobowo. Dostarczają nowych wartościowych informacji, które optymalizują i indywidualizują dalsze postępowanie diagnostyczne oraz lecznicze. Dynamiczny rozwój technik obrazowania trójwymiarowego i ich wykorzystanie do analizy za pomocą STE jeszcze bardziej poszerza możliwości UKG w aspekcie złożonego kształtu i funkcji RV.

Konflikt interesów

Autorzy nie zgłaszają żadnych finansowych ani osobistych powiązań z innymi osobami lub organizacjami, które mogłyby negatywnie wpłynąć na treść publikacji oraz rościć sobie prawo do tej publikacji.

observed in patients in the acute phase of RV myocardial infarction⁽²⁶⁾.

In the case of F4 patients, exercise stress testing showed a reduced increase in S' wave velocity within the lateral wall at the level of TV during exercise. The authors have found that S' wave assessment may be useful in identifying patients with reduced systolic reserve⁽²⁷⁾. Bernard *et al.*⁽²⁸⁾ observed a good correlation between global ϵ of the RV free wall and its ejection fraction assessed by magnetic resonance imaging in patients after F4 correction.

When using TDI and STE techniques, it should be noted that these methods require images of excellent quality. In order to perform a reliable assessment of TDI-measured strain the Doppler beam must be parallel or nearly parallel to the direction of myocardial motion (the maximum beam angle relative to strain direction should not exceed 15°). The STE technique does not find application in situations where visualization of the whole ventricle is impossible, which occurs in ventricular dilation or in the case of narrow diagnostic imaging window. The above limitation does not apply to RVSF assessment. Lack of standardization of software used by different manufacturers is an important issue in relation to the discussed techniques^(5,6,8).

The discussed methods of RV function analysis are a dynamically developing branch of echocardiography, which allow for an accurate location of affected areas. They provide new, valuable data that optimizes and individualizes further diagnostic and therapeutic management. The dynamic development of three-dimensional imaging techniques and their application in STE analysis further expands the possibilities of echocardiogram in the aspect of both, RV's complex structure and its function.

Conflict of interest

The authors do not report any financial or personal links with other persons or organizations, which might affect negatively the content of this publication or claim authorship rights to this publication.

Piśmiennictwo/References

1. Horton KD, Meece RW, Hill JC: Assessment of the right ventricle by echocardiography: a primer for cardiac sonographers. *J Am Soc Echocardiogr* 2009; 22: 776–792.
2. Isaaq K, Thompson A, Ethevenot G, Cloez JL, Brembilla B, Pernot C: Doppler echocardiographic measurement of low velocity motion of the left ventricular posterior wall. *Am J Cardiol* 1989; 64: 66–75.
3. Reisner SA, Lysyansky P, Agmon Y, Mutlak D, Lessick J, Friedman Z: Global longitudinal strain: a novel index of left ventricular systolic function. *J Am Soc Echocardiogr* 2004; 17: 630–633.
4. Leitman M, Lysyansky P, Sidenko S, Shir V, Peleg E, Binenbaum M *et al.*: Two-dimensional strain—a novel software for real-time quantitative echocardiographic assessment of myocardial function. *J Am Soc Echocardiogr* 2004; 17: 1021–1029.
5. Rudski LG, Lai WW, Afilalo J, Hua L, Handschumacher MD, Chandrasekaran K *et al.*: Guidelines for the echocardiographic assessment of the right heart in adults: a report from the American Society of Echocardiography endorsed by the European Association of Echocardiography, a registered branch of the European Society of Cardiology, and the Canadian Society of Echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 2010; 23: 685–713.
6. Ng AC, Thomas L, Leung DY: Tissue Doppler echocardiography. *Minerva Cardioangiol* 2010; 58: 357–378.
7. Siwińska A, Werner B, Rudziński A, Kawalec W, Moll J, Szydłowski L *et al.*: Echokardiografia dziecięca w praktyce klinicznej. Rekomendacje 2012 Sekcji Echokardiografii Polskiego Towarzystwa Kardiologicznego. *Kardiologia* 2012; 70: 632–640.
8. Biswas M, Sudhakar S, Nanda NC, Buckberg G, Pradhan M, Roomi AU *et al.*: Two- and three-dimensional speckle tracking echocardiography: clinical applications and future directions. *Echocardiography* 2013; 30: 88–105.
9. Frigiola A, Redington AN, Cullen S, Vogel M: Pulmonary regurgitation is an important determinant of right ventricular contractile dysfunction in patients with surgically repaired tetralogy of Fallot. *Circulation* 2004; 110 (Suppl 1): 153–157.
10. Tei C, Dujardin KS, Hodge DO, Bailey KR, McGoon MD, Tajik AJ *et al.*: Doppler echocardiographic index for assessment of global right ventricular function. *J Am Soc Echocardiogr* 1996; 9: 838–847.
11. Abd El Rahman MY, Abdul-Khaliq H, Vogel M, Alexi-Meskischvili V, Gutberlet M, Hetzer R *et al.*: Value of the new Doppler-derived myocardial performance index for the evaluation of right and left ventricular function following repair of tetralogy of fallot. *Pediatr Cardiol* 2002; 23: 502–507.
12. Nageh MF, Kopelen HA, Zoghbi WA, Quiñones MA, Nagueh SF: Estimation of mean right atrial pressure using tissue Doppler imaging. *Am J Cardiol* 1999; 84: 1448–1451.
13. Hayabuchi Y, Sakata M, Ohnishi T, Inoue M, Kagami S: Ratio of early diastolic tricuspid inflow to tricuspid lateral annulus velocity reflects pulmonary regurgitation severity but not right ventricular diastolic function in children with repaired Tetralogy of Fallot. *Pediatr Cardiol* 2013; 34: 1112–1117.
14. Ahmad H, Mor-Avi V, Lang RM, Nesser HJ, Weinert L, Tsang W *et al.*: Assessment of right ventricular function using echocardiographic speckle tracking of the tricuspid annular motion: comparison with cardiac magnetic resonance. *Echocardiography* 2012; 29: 19–24.
15. Buss SJ, Mereles D, Emami M, Korosoglou G, Riffel JH, Bertel D *et al.*: Rapid assessment of longitudinal systolic left ventricular function using speckle tracking of the mitral annulus. *Clin Res Cardiol* 2012; 101: 273–280.
16. Kjærgaard J: Assessment of right ventricular systolic function by tissue Doppler echocardiography. *Dan Med J* 2012; 59: B4409.
17. Kjærgaard J, Schaadt BK, Lund JO, Hassager C: Quantification of right ventricular function in acute pulmonary embolism: relation to extent of pulmonary perfusion defects. *Eur J Echocardiogr* 2008; 9: 641–645.
18. Tugcu A, Guzel D, Yildirimturk O, Aytakin S: Evaluation of right ventricular systolic and diastolic function in patients with newly diagnosed obstructive sleep apnea syndrome without hypertension. *Cardiology* 2009; 113: 184–192.
19. Motoji Y, Tanaka H, Fukuda Y, Ryo K, Emoto N, Kawai H *et al.*: Efficacy of right ventricular free-wall longitudinal speckle tracking strain for predicting long-term outcome in patients with pulmonary hypertension. *Circ J* 2013; 25: 756–763.
20. Ruan Q, Nagueh RF: Clinical application of tissue Doppler imaging in patients with idiopathic pulmonary hypertension. *Chest* 2007; 131: 395–401.
21. Sebbag I, Rudski LG, Therrien J, Hirsch A, Langleben D: Effect of chronic infusion of epoprostenol on echocardiographic right ventricular myocardial performance index and its relation to clinical outcome in patients with primary pulmonary hypertension. *Am J Cardiol* 2001; 88: 1060–1063.
22. Di Salvo G, Drago M, Pacileo G, Carrozza M, Santoro G, Bigazzi MC *et al.*: Comparison of strain rate imaging for quantitative evaluation of regional left and right ventricular function after surgical versus percutaneous closure of atrial septal defect. *Am J Cardiol* 2005; 96: 299–302.
23. Kjærgaard J, Iversen KK, Vejstrup NG, Smith J, Bonhoeffer P, Søndergaard L *et al.*: Effects of chronic severe pulmonary regurgitation and percutaneous valve repair on right ventricular geometry and contractility assessed by tissue Doppler echocardiography. *Echocardiography* 2010; 27: 854–863.
24. Kalogeropoulos AP, Deka A, Border W, Pernetz MA, Georgiopoulou VV, Kiani J *et al.*: Right ventricular function with standard and speckle-tracking echocardiography and clinical events in adults with D-transposition of the great arteries post atrial switch. *J Am Soc Echocardiogr* 2012; 25: 304–312.
25. Kjærgaard J, Hastrup Svendsen J, Sogaard P, Chen X, Bay Nielsen H, Køber L *et al.*: Advanced quantitative echocardiography in arrhythmogenic right ventricular cardiomyopathy. *J Am Soc Echocardiogr* 2007; 20: 27–35.
26. Yilmaz M, Erol MK, Acikel M, Sevimli S, Alp N: Pulsed Doppler tissue imaging can help to identify patients with right ventricular infarction. *Heart Vessels* 2003; 18: 112–116.
27. Harada K, Toyono M, Yamamoto F: Assessment of right ventricular function during exercise with quantitative Doppler tissue imaging in children late after repair of tetralogy of Fallot. *J Am Soc Echocardiogr* 2004; 17: 863–869.
28. Bernard Y, Morel M, Descotes-Genon V, Jehl J, Meneveau N, Schiele F: Value of speckle tracking for the assessment of right ventricular function in patients operated on for tetralogy of Fallot. Comparison with magnetic resonance imaging. *Echocardiography* 2014; 31: 474–482.
29. Dokainish H, Sengupta R, Patel R, Lakkis N: Usefulness of right ventricular tissue Doppler imaging to predict outcome in left ventricular heart failure independent of left ventricular diastolic function. *Am J Cardiol* 2007; 99: 961–965.