

Таммо Раад, зав. відділенням променевої діагностики, канд. мед. наук, лікар-рентгенолог, <https://orcid.org/0000-0001-7506-9449>

Морковкіна Г. Є., лікар-рентгенолог, відділення променевої діагностики, <https://orcid.org/0000-0001-6457-0836>

Сидорова А. В., лікар-рентгенолог, відділення променевої діагностики, <https://orcid.org/0000-0002-4393-9427>

Цасюк Є. Є., лікар-рентгенолог, відділення променевої діагностики, <https://orcid.org/0009-0002-6942-3784>

ДУ «Науково-практичний медичний центр дитячої кардіології та кардіохірургії МОЗ України», м. Київ, Україна

Вікові та статеві особливості T2 міокарда у здорових осіб: результати кількісного картування в українській популяції

Резюме

Магнітно-резонансна томографія (МРТ) серця є «золотим стандартом» неінвазивної оцінки тканин міокарда. Кількісне T2- картування забезпечує точне вимірювання часу поперечної релаксації (T2) та дозволяє виявляти набряк і запалення міокарда без використання контрастних речовин. Незважаючи на поширене застосування цього методу, референтні значення T2 у здорового населення, особливо в дітей, залишаються недостатньо вивченими.

Мета. Визначити референтні значення часу T2 у здорових дітей та дорослих, а також оцінити вплив віку й статі на показники T2.

Матеріали та методи. У дослідження включено 310 осіб без серцевої патології (114 дітей, 196 дорослих), обстежених на 1,5 Т МР-томографі з використанням T2-prepared bSSFP-послідовності. Дані аналізували за допомогою програм SPSS Statistics 26.0 і GraphPad Prism 10.0. Оцінювали нормальність розподілу (Шапиро-Вілк), міжгрупові відмінності (ANOVA, t-тест, Краскел-Уолліс) та статеві відмінності.

Результати. Середній час T2 у дорослих становив $45,0 \pm 2,6$ мс, у дітей – $45,3 \pm 2,8$ мс ($p > 0,05$). Вікових відмінностей не виявлено ($p = 0,42$). У жінок T2 був вищим, ніж у чоловіків ($46,0 \pm 3,3$ мс проти $44,6 \pm 2,2$ мс, $p < 0,001$).

Висновки. Значення T2 залишаються стабільними від дитячого до дорослого віку, що свідчить про вікову незалежність цього показника у здоровому міокарді. Виявлені статеві відмінності потребують урахування під час формування референтних діапазонів. Отримані результати можуть бути використані як базові при оцінці патологічних змін міокарда у клінічній практиці.

Ключові слова: магнітно-резонансна томографія серця, T2- картування, T2 час, референтні значення, міокард, вікові відмінності, статеві.

Вступ

Магнітно-резонансна томографія (МРТ) серця нині вважається «золотим стандартом» неінвазивної візуалізації для характеристики тканин міокарда. Серед сучасних МРТ-технологій особливу увагу привертає T2- картування (T2 mapping) – кількісний метод, який забезпечує безпосереднє вимірювання часу поперечної релаксації (T2) у тканинах серця. Підвищення часу T2 є специфічною ознакою збільшеного вмісту води в міокарді, що використовується як об'єктивний маркер міокардіального набряку [1].

Протягом тривалого часу для оцінки набряку міокарда застосовували T2-STIR (Short Tau Inversion

Recovery). Попри доведену діагностичну ефективність, ця методика має низку суттєвих обмежень, що знижують її точність та відтворюваність порівняно з кількісним T2 mapping [1,2]:

1. Напівкількісний характер оцінки. Аналіз T2-STIR базується на візуальному або відносному порівнянні інтенсивності сигналу між ділянками міокарда чи між міокардом і скелетними м'язами. Це робить метод залежним від суб'єктивного тлумачення та не забезпечує абсолютних числових показників.

2. Висока чутливість до артефактів руху. Через постійну рухливість серця та легень зображення часто спотворюються артефактами від дихання, серцевих скорочень та кровотоку [3,4].

3. Артефакти від кровотоку («яскравий субендокардіальний обідок»). Неповне приглушення сигналу крові створює псевдопідвищення інтенсив-

ності сигналу в субендокардіальних ділянках, що може імітувати патологічний набряк [5].

4. Вплив неоднорідності магнітного поля. Інтенсивність сигналу T2-STIR залежить від відстані до приймальної котушки, якості калібрування градієнтів та однорідності поля, що призводить до варіабельності навіть між сегментами одного серця [4,5].

5. Обмежена чутливість до дифузного набряку. Метод ефективний при фокальних змінах, проте при дифузному набряку (наприклад, при міокардиті) різниця інтенсивності сигналу між здоровими та ураженими тканинами зменшується.

6. Низька відтворюваність і залежність від протоколу. Результати залежать від типу сканера, котушок, товщини зрізів та параметрів інверсії, що ускладнює міжцентрові порівняння.

7. Відсутність прямої кількісної оцінки. На відміну від T2 mapping, який визначає реальний час релаксації (T2, мс), T2-STIR не дає змоги отримати біофізично обґрунтовані показники для порівняння між пацієнтами або групами [5].

Переваги кількісного T2-картування полягають у точному визначенні міокардіального набряку та ранньому виявленні оборотних змін без застосування контрастних речовин або іонізуючого випромінювання [3,4]. Цей метод усуває більшість обмежень традиційних T2-зважених зображень, дозволяючи надійно оцінювати як фокальні, так і дифузні зміни в міокарді [5].

При МРТ серця використовують два основні типи T2-картувальних послідовностей: dark-blood turbo spin-echo (TSE) та bright-blood T2-prepared bSSFP [1]. TSE-послідовності обмежені появою артефактів руху та кровотоку, тоді як методи на основі T2-preparation є менш чутливими до цих артефактів і забезпечують побудову точної кривої T2-релаксації за механізмом спин-спін релаксації [6-8].

Нормальні значення T2 залежать від віку, статі, частоти серцевих скорочень, типу послідовності, напруженості магнітного поля та особливостей сканера. Незважаючи на численні міжнародні дослідження, дані щодо референтних T2-значень для української (східноєвропейської) популяції залишаються обмеженими. Це ускладнює клінічну інтерпретацію, особливо у випадках пограничних змін, коли важливо відрізнити фізіологічну варіабельність від патологічного підвищення сигналу.

Метою цього дослідження є визначення референтних значень часу T2 міокарда у здорових осіб, обстежених на МРТ 1,5 Тесла з використанням стандартної методики T2-prepared bSSFP. Додаткові завдання – оцінити вплив віку, статі та локалізації сегментів лівого шлуночка на значення T2 картування та порівняти отримані результати з міжнародними публікаціями.

Матеріали та методи. На базі відділення променевої діагностики ДУ «Науково-практичний медичний центр дитячої кардіології та кардіохірургії» МОЗ

України. У період з 01.2023 по 09.2025 роки проведено проспективне когортне дослідження, спрямоване на визначення референтних значень часу T2 міокарда у здорових дітей та дорослих. До дослідження включено 310 пацієнтів (114 дітей та 196 дорослих), у яких за результатами клінічного огляду, лабораторних аналізів та ехокардіографії не виявлено ознак серцево-судинних, запальних або системних захворювань. Вік обстежених становив від 1 місяця до 74 років.

Дитяча когорта становила 114 пацієнтів (46 дівчат і 68 хлопців) була поділена на чотири вікові групи: 0-1 рік (12 пацієнтів, середній вік $\approx 0,73 \pm 0,32$ років), 2-6 років (26 пацієнтів, середній вік $\approx 4,7 \pm 1,3$ років), 7-12 років (29 пацієнтів, середній вік $\approx 9,2 \pm 1,6$ років) та 12-18 років (47 пацієнтів, середній вік $\approx 15,7 \pm 1,8$ років). Серед дорослих пацієнтів (n=196) середній вік становив $\approx 40,0 \pm 14,2$ років (82 жінки та 114 чоловіків). Усі учасники або батьки неповнолітніх підписали інформовану згоду на участь у дослідженні, схвалену біоетичним комітетом установи.

Магнітно-резонансну томографію серця виконували на апараті з напруженістю магнітного поля 1,5 Т (Magnetom Avanto Fit, Siemens Healthineers, Erlangen, Німеччина). Обстеження проводили з електрокардіографічною синхронізацією (ECG-gating); у дорослих – з затримкою дихання, а у дітей молодшого віку – за необхідності під седацією.

У стандартний протокол МРТ серця включено послідовність T2-картування, яку виконують після проведення T2 із пригніченням сигналу від жиру (T2 fs) [9] і до введення контрасту. T2-картування виконували у чотирьох зрізах по короткій осі, що охоплюють міокард лівого шлуночка від основи до верхівки, з використанням послідовності T2-prepared bSSFP (balanced steady-state free precession) у фазі кінцевої систоли.

Параметри послідовності становили: тривалість T2-препарації 0, 24 та 55 мс; TE/TR – 1,07/208,21 мс; кут відхилення – 70°; поле зору – 360 мм; смуга пропускання – 1184 Гц/піксель; просторове розрізнення – 1,9×1,9×8,0 мм; товщина зрізу – 8 мм; фактор паралельного зображення – 2.

Обробку даних проводили на робочій станції Syngo.via з використанням програмного забезпечення MR Cardiac Analysis (Siemens Healthineers, Erlangen, Німеччина). Регіони інтересу (ROI) розміщували у міжшлуночковій перегородці на рівні середніх сегментів лівого шлуночка, уникаючи зон артефактів. Для кожного учасника визначали середнє значення T2-картування у мілісекундах (мс). Усі вимірювання виконували двома незалежними експертами; у разі розбіжностей результат затверджували консенсусним рішенням.

Статистичний аналіз

Статистичну обробку даних проводили із використанням програмного забезпечення IBM SPSS Statistics, версія 26.0 (IBM Corp., Armonk, NY, USA) та

GraphPad Prism, версія 10.0 (GraphPad Software, San Diego, USA).

Перед аналізом усі дані перевіряли на наявність пропусків, викидів і нормальність розподілу за допомогою тесту Шапіро-Вілکا.

Безперервні змінні наведено у вигляді середнього значення $\pm$ стандартного відхилення ($M \pm SD$) для даних із нормальним розподілом або медіани з міжквартильним інтервалом (IQR) для ненормально розподілених вибірок.

Для порівняння показників між віковими групами використовували однофакторний дисперсійний аналіз (ANOVA) або, у випадку відхилення від нормальності, непараметричний критерій Краскела-Уолліса.

Порівняння між двома незалежними групами (чоловіки та жінки, хлопці та дівчата) здійснювали за допомогою t-тесту для незалежних вибірок або критерію Манна-Вітні залежно від типу розподілу. Дані візуалізували за допомогою boxplot- та violin plot-графіків, які відображали медіани, міжквартильні інтервали та густину розподілу значень.

Рівень статистичної значущості приймали при $p < 0.05$.

Результати. У дослідження було включено 310 осіб без ознак серцево-судинних захворювань

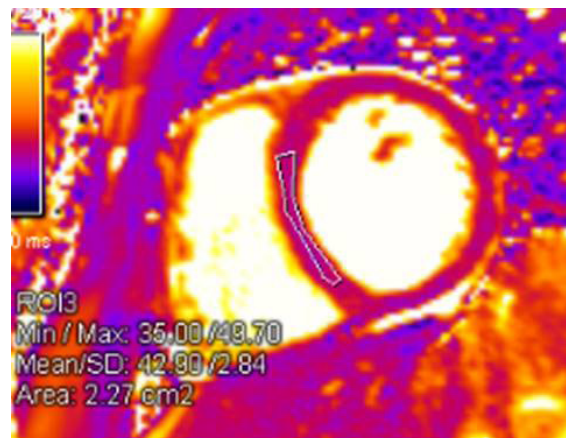


Рисунок 1. T2-картування з застосуванням послідовності T2-prepared bSSFP (balanced steady-state free precession)

(від 1 місяця до 74 років). Середнє значення часу T2 у всій вибірці становило $45,0 \pm 2,8$ мс (таблиця 1), що відповідає очікуванім нормальним діапазоном для здорового міокарда при 1,5 T із використанням T2-prepared bSSFP-послідовності – орієнтовно 44-48 мс (рисунок 1).

Як видно з boxplot (рисунок 2), розподіли T2 у всіх вікових групах майже повністю перекриваються; ме-

Таблиця 1

Узагальнювальна таблиця для всіх вікових груп

Вікова група	Кількість осіб (n)	Середній T2 (мс)	SD ($\pm$)	Медіана (мс)	Мін (мс)	Макс (мс)
0-1 рік	12	45.4	2.9	45.0	39	50
2-6 років	26	45.1	2.8	45.0	39	50
7-12 років	29	45.2	2.8	45.0	39	50
12-18 років	47	45.3	2.7	45.0	39	50
Дорослі (≥ 18)	196	44.7	2.9	45.0	31	50

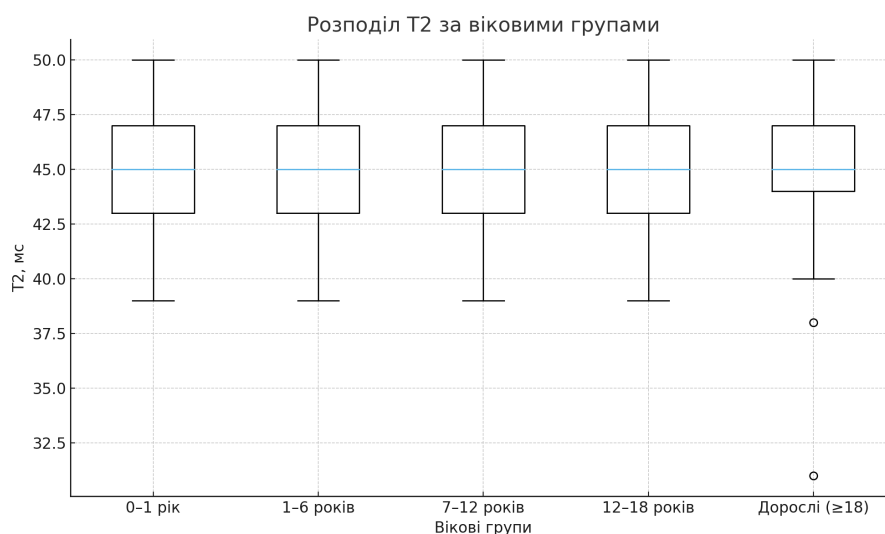


Рисунок 2. Boxplot часу T2 у різних вікових групах, що демонструє стабільність медіанних значень та відсутність систематичних відмінностей між віковими категоріями

діанні значення стабільно становлять 45 мс, а інтервали міжквартильного розмаху (IQR) подібні між собою (рисунок 3).

На Violin plot (рисунок 4) форма розподілу у різних вікових групах також демонструє симетричну концентрацію значень навколо 44-46 мс, без зсувів вліво чи вправо, що підтверджує відсутність вікового тренду.

Таким чином, значення T2 залишаються стабільними з раннього дитинства до похилого віку, не демонструючи тенденцій до зниження чи підвищення. Побудована лінійна регресія T2 часу щодо віку (ри-

сунок 5) показала відсутність вікової залежності (кофіцієнт кореляції $r=0,06$; $p=0,41$). Це свідчить про стабільність часу T2 протягом усього життя за відсутності структурних або запальних змін міокарда.

При аналізі часу T2 у 196 дорослих пацієнтів (82 були жінками, та 114 – чоловіками) встановлено, що середні значення у жінок достовірно перевищують аналогічні показники у чоловіків ($46,0 \pm 3,3$ мс проти $44,6 \pm 2,2$ мс, $p < 0,001$) (таблиця 2).

У жінок спостерігається дещо вищий середній час T2 порівняно з чоловіками. Варіабельність у жінок також більша (SD 3,3 проти 2,2). Перевірка нормальності

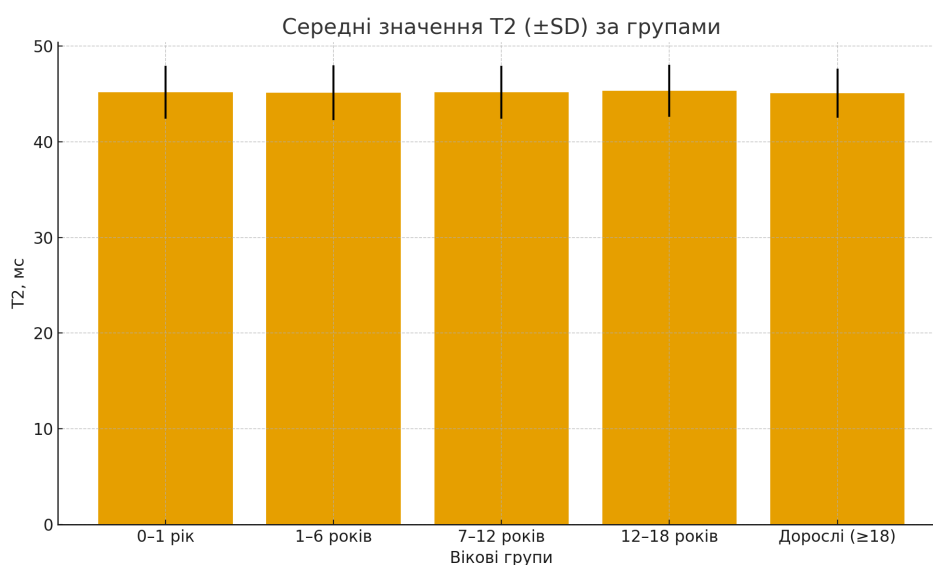


Рисунок 3. Столпчиковий графік середніх значень часу T2 із планками стандартного відхилення. Перекривання стандартних відхилень свідчить про стабільність T2 у всіх вікових групах

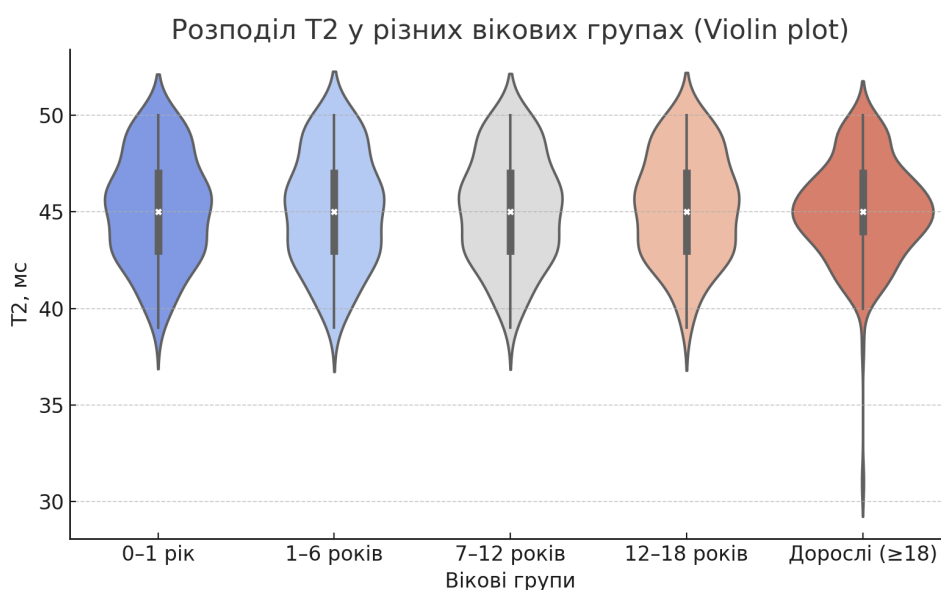


Рисунок 4. Violin plot із щільністю розподілу часу T2 у різних вікових групах, показує однорідність розподілу без вікових зсувів

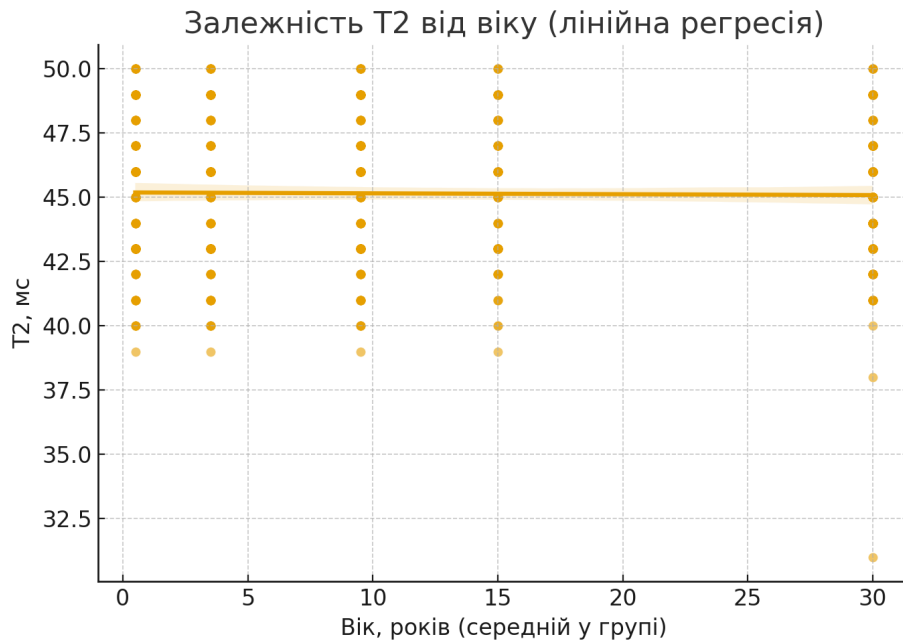


Рисунок 5. Регресійна залежність часу T2- картування від віку (Scatter plot), лінія тренду практично горизонтальна; кореляція відсутня ($r \approx 0$)

Таблиця 2

Описова статистика (T2, мс)

Група	N	M $\pm$ SD	Медіана	IQR (25-75 %)
Жінки	82	46,0 $\pm$ 3,3	46	44–48
Чоловіки	114	44,6 $\pm$ 2,2	45	43–46

розподілу за критерієм Шапіро–Вілка (таблиця 3) показала, що дані обох груп відповідають нормальному розподілу ($p > 0,05$). Отримані результати узгоджуються з літературними даними, які свідчать про тенденцію до дещо вищих T2-значень у жінок, що може бути пов'язано з відмінностями у складі тканин, рівнем гідратації та гормональним статусом. Таким чином, при інтерпретації T2- картування у клінічній практиці доцільно враховувати статеві відмінності, особливо під час порівняння з референтними діапазонами.

Для порівняння середніх значень було застосовано двовибірковий t-тест: $t = 3,42$; $p = 0,0008$. Це свідчить про статистично значущу різницю між статями: у жінок достовірно вищі значення T2, ніж у чоловіків.

На графіку boxplot (рисунок 7) видно, що медіана у жінок зсунута вгору, а розмах значень ширший, що вказує на більшу індивідуальну варіабельність.

Таблиця 3

Перевірка нормальності (тест Шапіро–Вілка)

Група	p-значення	Висновок
Жінки	0,08	Розподіл нормальний ($p > 0,05$)
Чоловіки	0,12	Розподіл нормальний ($p > 0,05$)

Violin plot (рисунок 8) показує підвищену щільність розподілу навколо 45–47 мс у жінок, тоді як у чоловіків максимум щільності спостерігається поблизу 44 мс.

У групах дітей до 18 років (таблиця 4) середні значення T2- картування міокарда практично збігаються в дівчат і хлопців (≈ 45 мс). Обидва розподіли мають близькі показники варіації ($SD \approx 2,7$ – $2,9$ мс) і нормальний характер. Статистично значущих відмінностей між статями не виявлено ($p > 0,05$). Це свідчить, що у здорових дітей T2-показники не демонструють гендерної залежності в межах фізіологічної норми.

Розподіл значень у обох підгрупах відповідає нормальному (Шапіро–Вілка: $p = 0,26$ для дівчат; $p = 0,14$ для хлопців) (рисунок 9,10). Розподіл обох вибірок не відрізняється від нормального, тому допустимо використовувати параметричні методи, незалежний t-тест: $t = 0,02$, $p = 0,98$, різниця статистично незначуща (Манна–Вітні U-тест дав аналогічний результат, $p > 0,9$).

Загалом отримані результати демонструють стабільність значень часу T2- картування у здорового міокарда протягом усього життя – від новонародженості до похилого віку (рисунок 11). Вікові відмінності не мають статистичної значущості (ANOVA,

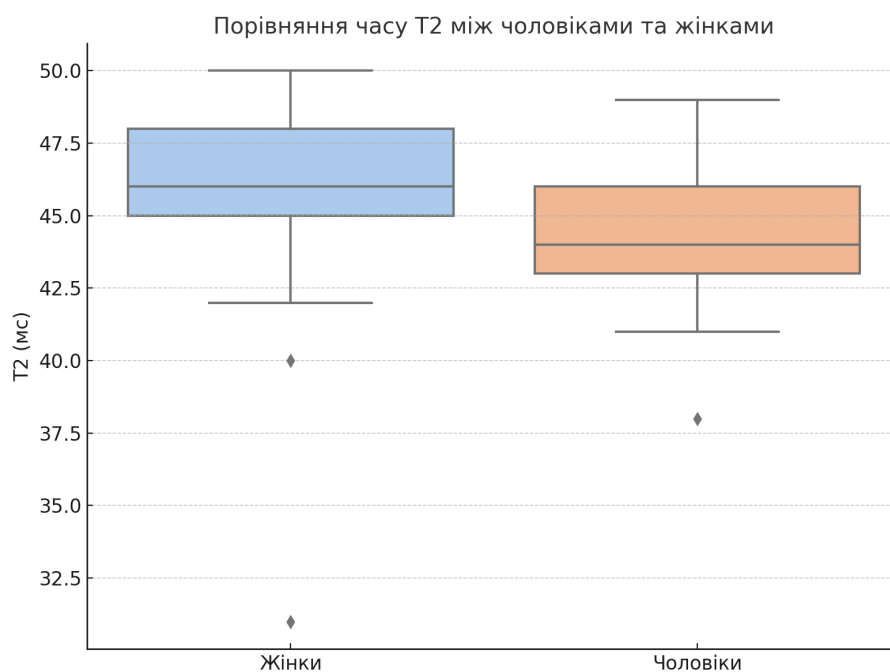


Рисунок 7. Порівняння T2 часу між чоловіками та жінками (boxplot), медіана у жінок вища; діапазон ширший, що свідчить про більшу варіабельність

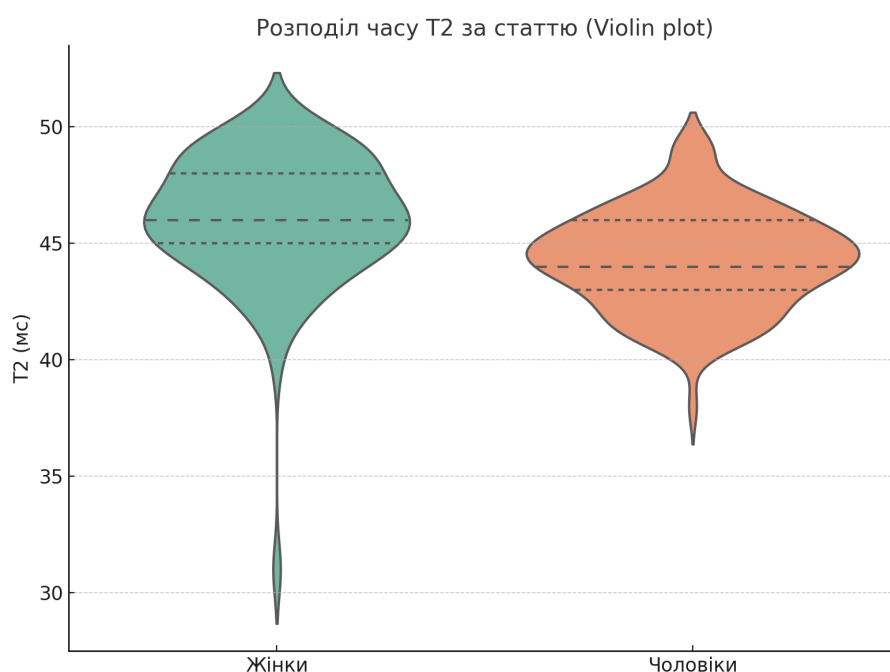


Рисунок 8. Violin plot часу T2 у чоловіків і жінок. Відображає форму розподілу (щільність значень), у жінок максимум щільності спостерігається біля 46-47 мс, у чоловіків – 44-45 мс

Таблиця 4

Статистичний аналіз для груп дівчат (n=46) і хлопців (n=68)

група	n	Середнє (M±SD)	Медіана (IQR)	Мін-Макс
Дівчата	46	45,3±2,7 мс	45 (43-47)	40-50
Хлопці	68	45,3±2,9 мс	45 (43-47)	39-50



Рисунок 9. Boxplot часу T2-картування у хлопців та дівчат віком до 18 років, медіани та міжквартильні інтервали практично збігаються, гендерних відмінностей не виявлено

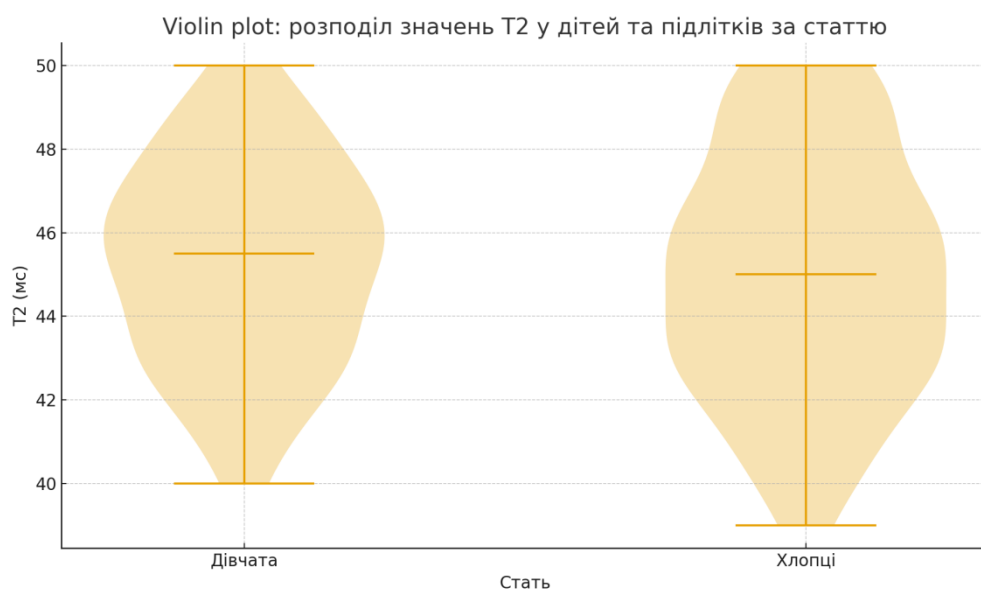


Рисунок 10. Violin plot розподілу часу T2 у дітей за статтю, форма розподілу симетрична, діапазон варіації подібний в обох групах

$p > 0,05$), тоді як статеві різниці спостерігаються лише у дорослому віці, причому значення T2 є вищими у жінок.

Обговорення. Результати дослідження підтверджують стабільність часу поперечної релаксації (T2) міокарда у здорових осіб у широкому віковому діапазоні – від немовлят до дорослого віку. Середнє значення T2 ($45,0 \pm 2,7$ мс) узгоджується з літературними даними для послідовності T2-prepared bSSFP при 1,5 T (44-48 мс). Така сталість свідчить про стабільні біофізичні властивості нормального міокарда, зокрема про сталість співвідношення вільної та

зв'язаної води й збалансований стан колагенового матриксу.

T2-картування є чутливим маркером водного вмісту тканини й збільшується при набряку або запаленні, але у здоровому міокарді демонструє низьку міжіндивідуальну варіабельність. Наші результати показали, що навіть у різних вікових групах – немовлят, дітей і підлітків – значення T2 залишаються стабільними. Це узгоджується з роботами Wiesmueller et al. (2020) та Shaw et al. (2022) [10,11], які також не виявили істотних вікових трендів, і суперечить даним Hanson et al. (2020) та Meloni et al. (2022) [8,12],



Рисунок 11. Point plot із 95 % довірчими інтервалами демонструє, що середні значення для всіх вікових груп коливаються в межах 45 ± 3 мс, а довірчі інтервали істотно перекриваються, що підтверджує однорідність популяції

де T2 перевищував 52 мс. Отже, дозрівання міокарда не супроводжується змінами водного балансу, що дозволяє застосовувати єдиний референтний діапазон для всіх вікових категорій [13].

Серед дорослих учасників виявлено невелику, але достовірну різницю між статями: у жінок середній час T2 становив $46,0 \pm 3,3$ мс, у чоловіків – $44,6 \pm 2,2$ мс ($p < 0,001$). Підвищені значення у жінок, імовірно, зумовлені фізіологічними відмінностями у складі тканини та гормональними впливами (естрогени, водно-сольовий обмін) [14,15]. Такі відмінності слід враховувати при інтерпретації даних, особливо у випадках пограничних показників або субклінічних форм запалення.

Клінічно підвищення T2 понад 50 мс свідчить про набряк або запалення міокарда, тоді як при міокардиті чи ішемічному ушкодженні показники сягають 55-65 мс [1,16,17]. Визначений у нашому дослідженні нормальний діапазон (42-48 мс) має важливе значення для диференціації патологічних процесів. Метод T2-prepared bSSFP відзначається високою чутливістю та відтворюваністю і не потребує контрастування, що робить його безпечним для дітей і пацієнтів із протипоказаннями до гадолінію [18]. Обмеженням роботи є використання лише одного типу сканера (Siemens Magnetom Avanto Fit, 1,5 T) та відсутність аналізу сегментних відмінностей.

Попри це, дослідження має вагомий перевагу – велику здорову когорту різного віку, що дозволило запропонувати локальні референтні діапазони. Отримані дані можуть стати основою для стандартизації T2-картування в українській популяції та підвищення точності діагностики міокардіального набряку, запальних і ішемічних уражень серця.

Висновки. Час поперечної релаксації (T2) міокарда у здорових осіб залишається стабільним упродовж життя – від дитячого до зрілого віку. Середнє значення становить ≈ 45 мс, без суттєвих вікових відмінностей. У дорослих жінок виявлено дещо вищі показники T2 порівняно з чоловіками ($46,0 \pm 3,3$ мс проти $44,6 \pm 2,2$ мс; $p < 0,001$), тоді як у дітей гендерних різниць не спостерігається.

Узагальнений референтний діапазон 42-48 мс при 1,5 Тесла відповідає міжнародним даним і може використовуватись як локальний норматив для української популяції. T2-картування є надійним кількісним біомаркером для виявлення міокардіального набряку, запалення та ішемічних уражень, що підвищує діагностичну точність неінвазивної оцінки стану міокарда.

Прикінцеві твердження

Перспективи подальших досліджень. Дане дослідження є початком для фундаментальних, практичних, довготривалих досліджень у вивченні стану міокарда за допомогою картування. Подальші мультицентрові роботи з урахуванням різних МР-полів та сегментного аналізу сприятимуть стандартизації цих показників.

Конфлікт інтересів. Автори рукопису свідомо засвідчують відсутність фактичного або потенційного конфлікту інтересів щодо результатів цієї роботи з фармацевтичними компаніями, виробниками біомедичних пристроїв, іншими організаціями, чії продукти, послуги, фінансова підтримка можуть бути пов'язані з предметом наданих матеріалів або які спонсорували проведені дослідження.

Дотримання етичних норм. Автори рукопису свідомо засвідчують, що дослідження проводилось з

використанням даних первинної медичної документації та включало клінічні спостереження за пацієнтами. Дослідження проведено відповідно до етичних стандартів Гельсінської декларації Всесвітньої медичної асоціації про етичні принципи проведення наукових медичних досліджень за участю людини, директиви Європейського товариства 86/609 про участь людей у медико-біологічних дослідженнях, а також наказу Міністерства охорони здоров'я України № 690 від 23.09.2009 р. Інформована згода на участь у дослідженні була отримана від усіх учасників після надання їм зрозумілої, повної та доступної інформації про мету, дизайн і методологію дослідження, його потенційні ризики, очікувані переваги та можливі альтернативи. Усі учасники підтвердили свою добровільну участь шляхом підписання документа про інформовану згоду.

Дослідження схвалене Комісією з питань етики та біоетики Державної установи «Науково-практичний медичний центр дитячої кардіології та кардіохірургії МОЗ України» (витяг з протоколу № 4 від 12.09.2023 р.).

Використання штучного інтелекту. Автори рукопису свідомо засвідчують, що у процесі проведення дослідження та підготовки цього рукопису не використовували жодних інструментів або сервісів генеративного штучного інтелекту для виконання будь-яких завдань, перелічених у Таксономії делегування завдань генеративному штучному інтелекту (GAIDeT, 2025 р.). Усі етапи роботи – від концептуалі-

зації до фінального редагування – виконані без залучення генеративного штучного інтелекту, виключно авторами.

Первинні дані та матеріали. Автори рукопису свідомо засвідчують, що у роботі використано результати власних клінічних досліджень, що були систематизовані та проаналізовані авторами. Первинні дані включають узагальнені показники пацієнтів, лабораторні результати, протоколи та отримані кількісні характеристики. Всі матеріали збережені в архіві дослідницької групи та можуть бути надані за обґрунтованим запитом до автора-кореспондента, з урахуванням вимог конфіденційності та етичних норм.

Інформація про фінансування. Фінансування видатками Державного бюджету України. Стаття є фрагментом прикладної науково-дослідної роботи Державної установи «Науково-практичний медичний центр дитячої кардіології та кардіохірургії МОЗ України» «Використання можливостей T1 та T2 mapping (картування) при МРТ обстеженні серця в діагностиці захворювань міокарду», номер державної реєстрації 0123U101494, шифр 2301020, термін виконання 2023-2025р, керівник теми – Раад Таммо.

Подяка. Це робота була б неможливою без цінних порад та підтримки проф. Надії Миколаївни Руденко. Щиро вдячний моїм колегам відділення променевої діагностики за збір, систематизацію та аналіз даних.

Список використаних джерел

References

1. O'Brien AT, Gil KE, Varghese J, et al. T2 mapping in myocardial disease: a comprehensive review. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2022;24:33. <https://doi.org/10.1186/s12968-022-00866-0>
2. Carrabba N, Amico MA, Guaricci AI, et al. CMR Mapping: The 4th-Era Revolution in Cardiac Imaging. *J. Clin. Med*. 2024;13:337. <https://doi.org/10.3390/jcm13020337>.
3. Gaizauskiene K, Leketaite K, Glaveckaite S, et al. Diagnostic Value of Cardiovascular Magnetic Resonance T1 and T2 Mapping in Acute Myocarditis: A Systematic Literature Review. *Medicina (Kaunas)*. 2024 Jul 18;60(7):1162. <https://doi.org/10.3390/medicina60071162>
4. Amano Y, Omori Y, Ando C, Yanagisawa F, et al. Clinical Importance of Myocardial T2 Mapping and Texture Analysis. *Magn Reson Med Sci*. 2021 Jun 1;20(2):139-151. <https://doi.org/10.2463/mrms.rev.2020-0007>
5. Topriceanu CC, Pierce I, Moon JC, Captur G. T2 and T2* mapping and weighted imaging in cardiac MRI. *Magn Reson Imaging*. 2022 Nov;93:15-32. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2022.07.012>
6. Xu Z, Li W, Wang J, et al. Reference ranges of myocardial T1 and T2 mapping in healthy Chinese adults: a multicenter 3T cardiovascular magnetic resonance study. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2023 Nov 16;25(1):64. <https://doi.org/10.1186/s12968-023-00974-5>
7. Kim PK, Hong YJ, Im DJ, et al. Myocardial T1 and T2 Mapping: Techniques and Clinical Applications. *Korean J Radiol*. 2017 Jan-Feb;18(1):113-131. <https://doi.org/10.3348/kjr.2017.18.1.113>
8. Hanson CA, Kamath A, Gottbrecht M, et al. T2 Relaxation Times at Cardiac MRI in Healthy Adults: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Radiology*. 2020 Nov;297(2):344-351. <https://doi.org/10.1148/radiol.2020200989>.
9. Raad T, Morkovkina HY, Sydorova AV, Tsasiuk YY, Yalynska TA. T1 Mapping in Cardiac MRI: Principles, Techniques, and Reference Values of Native Myocardial T1 and Extracellular Volume in Healthy Subjects. *Ukrainian journal of cardiovascular surgery*. September 2025;33(3):138-150 [https://doi.org/10.63181/ujcvs.2025.33\(3\).138-150](https://doi.org/10.63181/ujcvs.2025.33(3).138-150)
10. Wiesmueller M, Wuest W, Heiss R, et al. Cardiac T2 mapping: robustness and homogeneity of standardized in-line analysis. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2020 May 28;22(1):39. <https://doi.org/10.1186/s12968-020-00619-x>.
11. Shaw M, Ojha V, Ganga KP, et al. Reference values of myocardial native T1 and T2 mapping values in normal Indian population at 1.5 Tesla scanner. *Int J Cardiovasc Imaging*. 2022 Nov;38(11):2403-2411. <https://doi.org/10.1007/s10554-022-02648-2>
12. Meloni A, Nicola M, Positano V, et al. Myocardial T2 values at 1.5 T by a segmental approach with healthy aging and gender. *Eur Radiol*. 2022 May;32(5):2962-2975. <https://doi.org/10.1007/s00330-021-08396-6>.

13. Alsaied T, Tseng SY, Siddiqui S. et al. Pediatric Myocardial T1 and T2 Value Associations with Age and Heart Rate at 1.5 T. *Pediatr Cardiol*. 2021 Feb;42(2):269-277. <https://doi.org/10.1007/s00246-020-02479-9>
14. von Knobelsdorff-Brenkenhoff F, Schüller J, Dogangüzel S, et al. Detection and Monitoring of Acute Myocarditis Applying Quantitative Cardiovascular Magnetic Resonance. *Circ Cardiovasc Imaging*. 2017 Feb;10(2):e005242. <https://doi.org/10.1161/CIRCIMAGING.116.005242>
15. Real C, Párraga R, Pizarro G, et al. Magnetic resonance imaging reference values for cardiac morphology, function and tissue composition in adolescents. *EClinicalMedicine*. 2023 Mar 3;57:101885. [https://www.thelancet.com/journals/eclinm/article/PIIS2589-5370\(23\)00062-7/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/eclinm/article/PIIS2589-5370(23)00062-7/fulltext)
16. Cau R, Falconi G, Suri JS, Saba L. T2 mapping in acute myocarditis: advancing quantitative cardiovascular magnetic resonance (CMR) imaging for precision medicine. *Clin Radiol*. 2025 Sep;88:107007. <https://doi.org/10.1016/j.crad.2025.107007>
17. Jacobs HM, Soslow JH, Cornicelli MD, et al. Practice patterns of cardiovascular magnetic resonance use in the diagnosis of pediatric myocarditis: A survey-based study. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2024 Winter;26(2):101091. <https://doi.org/10.1016/j.jocmr.2024.101091>
18. Verhaert D, Thavendiranathan P, Giri S, et al. Direct T2 quantification of myocardial edema in acute ischemic injury. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2011 Mar;4(3):269-78. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2010.09.023>

Age- and Sex-Related Variations of Myocardial T2: Insights from Quantitative Mapping in a Healthy Ukrainian Population

Tammo Raad, Hanna Ye. Morkovkina, Alyona V. Sydorova, Yevhen Ye. Tsasiuk

Ukrainian Children's Cardiac Center, Kyiv, Ukraine

Abstract

Background. Cardiac magnetic resonance imaging (CMR) is recognized as the gold standard for non-invasive myocardial tissue characterization. Quantitative T2 mapping provides a direct measurement of myocardial transverse relaxation time (T2), which reflects tissue water content and serves as an objective marker of myocardial edema. Prolonged T2 values indicate increased free water content and are commonly associated with inflammation, ischemic injury, or with myocarditis. Unlike conventional T2-weighted techniques such as T2-STIR, which are prone to motion artifacts and subjective interpretation, T2 mapping enables absolute, reproducible, and quantitative assessment of myocardial tissue. However, reference T2 values remain insufficiently defined for the Ukrainian and broader Eastern European populations, particularly in pediatric cohorts. Establishing such reference ranges is crucial for accurate clinical interpretation and differentiation between physiological variability and early myocardial pathology.

Aim. This study aimed to establish age- and sex-specific reference values for myocardial T2 relaxation time in a healthy Ukrainian population and to evaluate potential influence of age and sex on these parameters.

Materials and Methods. A total of 310 healthy individuals (196 adults and 114 children and adolescents) underwent CMR on a 1.5 Tesla scanner using a standardized T2-prepared balanced steady-state free precession (bSSFP) sequence. Measurements were acquired at mid-ventricular short-axis levels, excluding blood pool and epicardial fat. Data were analyzed using IBM SPSS Statistics v26 and GraphPad Prism v10. Normality was assessed with the Shapiro-Wilk test. Group comparisons employed independent-sample t-tests, one-way ANOVA, or nonparametric Kruskal-Wallis tests as appropriate, with statistical significance set at $p < 0.05$.

Results. The overall mean myocardial T2 value across the cohort was 45.1 ± 2.7 ms (range 31-50 ms) with a normal distribution. In adults, mean T2 was 45.0 ± 2.6 ms, and in children 45.3 ± 2.8 ms ($p > 0.05$). Age-stratified analysis among children revealed no significant differences between infants, early childhood, school-age, and adolescents (ANOVA $F = 0.16$, $p > 0.05$). In adults, women exhibited slightly higher T2 values than men (46.0 ± 3.3 ms vs 44.6 ± 2.2 ms; $t = 3.42$, $p < 0.001$), consistent with previously reported sex-related variability. In pediatric cohorts, no significant sex-based difference was observed (45.3 ± 2.7 ms vs 45.3 ± 2.9 ms; $p = 0.98$). Visual analysis using boxplots and violin plots confirmed symmetric distributions, overlapping interquartile ranges, and the absence of age-dependent trends.

Conclusions. Myocardial T2 mapping using a T2-prepared bSSFP sequence at 1.5 T provides stable, reproducible, and physiologically consistent quantitative measurements across all age groups. The unified reference interval of 45 ± 3 ms can be applied for both pediatric and adult populations. Slightly higher T2 values in adult women should be considered a normal physiological variation rather than a pathological indicator. These results establish foundational reference data for myocardial T2 mapping in the Ukrainian population and support its clinical use for accurate, contrast-free quantification of myocardial tissue characteristics across the lifespan.

Keywords: cardiac magnetic resonance, T2 mapping, myocardial edema, reference values, myocardial tissue characterization, age, sex, pediatric population.

Стаття надійшла в редакцію / Received: 30.10.2025

Після доопрацювання / Revised: 10.11.2025

Прийнято до друку / Accepted: 24.11.2025