


Zapalenie mięśnia sercowego po zastosowaniu trzeciej dawki szczepionki przeciwko COVID-19 u nastolatka. Analiza przypadku i dalsza obserwacja

COVID-19 vaccine-associated myocarditis in an adolescent after the third vaccine dose.

Case report with follow-up

Klinika Kardiologii Wieku Dziecięcego i Pediatrii Ogólnej, Warszawski Uniwersytet Medyczny, Warszawa, Polska

Adres do korespondencji: Bożena Werner, Klinika Kardiologii Wieku Dziecięcego i Pediatrii Ogólnej, Warszawski Uniwersytet Medyczny, ul. Żwirki i Wigury 63A, 02-091 Warszawa, e-mail: bozena.werner@wum.edu.pl

 <https://doi.org/10.15557/PIMR.2023.0066>

ORCID iDs

1. Mateusz Puchalski <https://orcid.org/0009-0009-1072-7602>

2. Marzena Barczuk-Fałęcka <https://orcid.org/0000-0003-3772-7302>

3. Bożena Werner <https://orcid.org/0000-0002-6416-4106>

Streszczenie

W pracy przedstawiono przypadek nastolatka z zapaleniem mięśnia sercowego po otrzymaniu trzeciej dawki szczepionki mRNA przeciwko COVID-19. Chłopiec zgłosił się do szpitala z powodu gorączki i zamostkowego bólu w klatce piersiowej, które wystąpiły 2 dni po szczepieniu. Przy przyjęciu stan chorego był dobry, parametry życiowe – w normie. Stwierdzono wzrost stężenia troponiny i zaburzenia repolaryzacji w badaniu elektrokardiograficznym, bez zaburzeń kurczliwości w badaniu echokardiograficznym. Rezonans magnetyczny serca ujawnił cechy aktywnego stanu zapalnego pod postacią obrzęku z towarzyszącymi obszarami późnego wzmocnienia pokontrastowego w pięciu segmentach mięśnia lewej komory. Podczas hospitalizacji obserwowano poprawę stanu ogólnego, normalizację stężenia troponiny i regresję nieprawidłowości w badaniu elektrokardiograficznym. W ramach badań kontrolnych po 3 i 9 miesiącach w badaniu rezonansu magnetycznego serca opisywano zejsściowe zmiany pozapalne. Nie obserwowano niepokojących objawów ani nieprawidłowości w pozostałych badaniach dodatkowych. W przypadku bólu w klatce piersiowej po szczepieniu przeciwko COVID-19 zawsze należy wykluczyć zapalenie mięśnia sercowego, nawet jeśli po poprzednich dawkach nie notowano niepokojących objawów.

Słowa kluczowe: zapalenie mięśnia sercowego, szczepienie, COVID-19, dzieci

Abstract

We report on the case of a 16-year-old boy with myocarditis developing after the third dose of COVID-19 mRNA vaccine. The patient presented with fever and retrosternal chest pain two days after immunisation. On admission, the boy was in good condition, with stable vitals. Elevated serum troponins and electrocardiographic repolarisation abnormalities with normal echocardiographic contractility were noted. Cardiac magnetic resonance imaging revealed active myocarditis in form of oedema with late gadolinium enhancement in five segments of the left ventricle myocardium. During further hospitalisation, rapid improvement in the patient's general condition with normalisation of troponin level, and regression of electrocardiographic abnormalities were observed. In follow-up reassessments at three and nine months, cardiac magnetic resonance revealed residual myocardial lesions. No symptoms and abnormalities in laboratory tests, electrocardiography, or echocardiography were found. It is imperative to exercise full vigilance for COVID-19 vaccine-associated myocarditis when chest pain appears following vaccination, even in the absence of alarming symptoms after previous vaccine doses.

Keywords: myocarditis, vaccination, COVID-19, children

WSTĘP

Szczepienia przeciwko COVID-19 (*coronavirus disease 2019*) przyczyniły się do znacznego spadku zachorowalności i śmiertelności związanych z pandemią COVID-19 na całym świecie, zarówno wśród dorosłych, jak i wśród dzieci⁽¹⁾. Zgodnie z najnowszymi wytycznymi Centers for Disease Control and Prevention (CDC) w populacji pacjentów poniżej 18. roku życia szczepienie przeciwko COVID-19 jest zalecane u wszystkich dzieci w wieku od 6 miesięcy, jeśli nie ma przeciwwskazań do szczepienia. W rzadkich przypadkach obserwuje się poważne działania niepożądane, między innymi pod postacią zapalenia mięśnia sercowego związanego ze szczepieniem przeciwko COVID-19 (*COVID-19 vaccine-associated myocarditis, C-VAM*)⁽²⁾. C-VAM najczęściej dotyczy młodych mężczyzn i występuje po podaniu drugiej dawki szczepionki⁽³⁾. W ostatnich miesiącach ukazały się pojedyncze doniesienia opisujące C-VAM po zastosowaniu trzeciej dawki szczepionki przeciwko COVID-19 u osób dorosłych⁽⁴⁾. Zgodnie z naszą wiedzą do chwili obecnej w odniesieniu do populacji pediatrycznej opublikowano tylko dwa pełne opisy przebiegu izolowanego C-VAM i jeden przedstawiający zapalenie mięśnia sercowego ze współistniejącym zapaleniem osierdzia^(5,6). Poniżej omawiamy przebieg zapalenia mięśnia sercowego u 16-letniego chłopca po zastosowaniu trzeciej dawki szczepionki przeciwko COVID-19. Na podkreślenie zasługuje fakt, że jest to

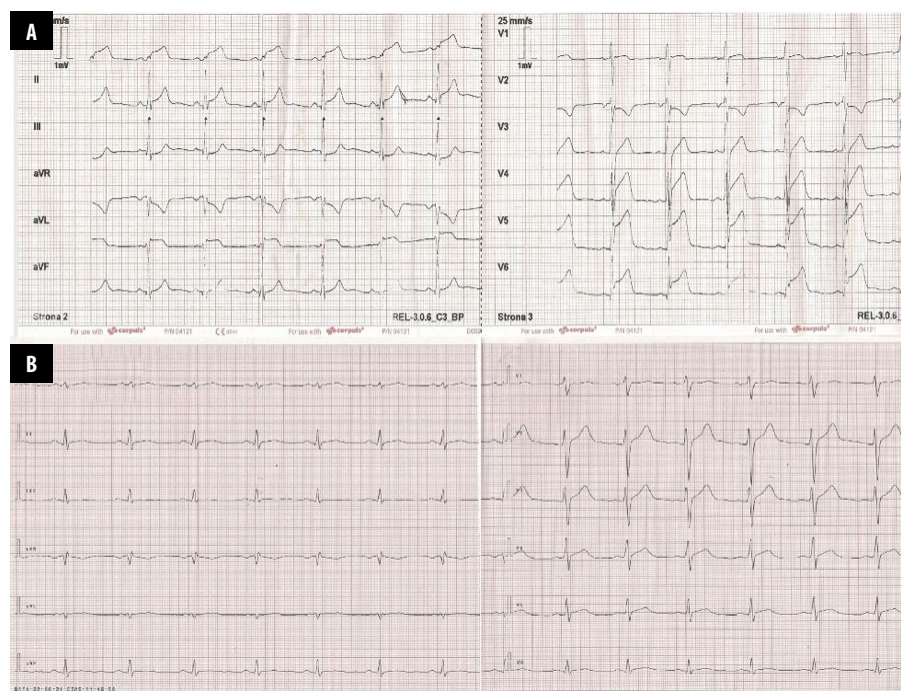
pierwszy opis przypadku z dalszą obserwacją i kontrolnymi badaniami rezonansu magnetycznego serca (*cardiac magnetic resonance, CMR*) po 3 i 9 miesiącach od rozpoznania.

OPIS PRZYPADKU

Szesnastoletni pacjent zgłosił się do szpitalnego oddziału ratunkowego z powodu gorączki do 38,9°C i dreszczy, a także okresowo ustępującego bólu w klatce piersiowej o charakterze gniotącym. Dwa dni przed przyjęciem do szpitala chłopiec został zaszczepiony przeciwko COVID-19 trzecią dawką szczepionki BNT162b2. W wywiadzie brak cech infekcji w ciągu ostatniego miesiąca oraz brak niepokojących objawów po zastosowaniu pierwszej i drugiej dawki szczepionki przeciwko COVID-19.

Przy przyjęciu chłopiec był w stanie ogólnym dobrym, parametry życiowe pozostawały w normie. W badaniu przedmiotowym stwierdzono nieznacznie ściszone tony serca, bez tachykardii. Nie obserwowano objawów niewydolności serca. W badaniach laboratoryjnych uwagę zwracały istotnie podwyższone stężenie troponiny I (31 447,3 ng/l, norma <19 ng/l) oraz umiarkowanie podwyższone stężenie N-końcowego fragmentu propeptydu natriuretycznego typu B (*N-terminal prohormone of brain natriuretic peptide, NT-proBNP*) (692 pg/ml, norma <125 pg/ml) i białka C-reaktywnego (*C-reactive protein, CRP*) (6,65 mg/dl, norma <0,5 mg/dl) (tab. 1). W badaniu elektrokardiograficznym

Badania laboratoryjne	
Troponina [ng/l]:	
• przyjęcie	31 447,3
• dzień 3.	6692
• dzień 5.	216,1
• dzień 7.	18
NT-proBNP [pg/ml]:	
• przyjęcie	692
• wypis	54
CRP [mg/dl]:	
• przyjęcie	6,65
• wypis	0,16
Badania dodatkowe	
EKG	Uniesienie ST w odprowadzeniach I, II, aVL, V4–V6. Obniżenie ST w odprowadzeniach III, aVR i V2
Badanie echokardiograficzne:	
• % EF	62
• wymiar późnorozkurczowy lewej komory [mm]	48,6
• regionalne zaburzenia kurczliwości, płyn w worku osierdziowym	Brak
CMR:	
• obrzęk (obrazowanie T2), segment lewej komory	Podstawny dolno-boczny
• późne wzmocnienie pokontrastowe, segment lewej komory	Podstawny, środkowy dolno-boczny i koniuszkowy boczny
Badania kontrolne (CMR)	
Po 3 miesiącach:	
• obrzęk (obrazowanie T2), segment lewej komory	Brak
• późne wzmocnienie pokontrastowe, segment lewej komory	Podstawny dolno-boczny
Po 9 miesiącach:	
• obrzęk (obrazowanie T2), segment lewej komory	Brak
• późne wzmocnienie pokontrastowe, segment lewej komory	Podstawny dolno-boczny
CMR – <i>cardiac magnetic resonance</i> , rezonans magnetyczny serca; CRP – <i>C-reactive protein</i> , białko C-reaktywne; EF – <i>ejection fraction</i> , frakcja wyrzutowa; EKG – badanie elektrokardiograficzne; NT-proBNP – <i>N-terminal prohormone of brain natriuretic peptide</i> , N-końcowy fragment propeptydu natriuretycznego typu B.	



Ryc. 1. A. EKG przy przyjęciu: uniesienie ST w odprowadzeniach I, II, aVL, V4–V6, obniżenie ST w odprowadzeniach III, aVR i V2. B. EKG w 7. dobie po przyjęciu: regresja zmian pod postacią uniesienia i obniżenia ST, zaburzenia repolaryzacji pod postacią płaskich załameków T w odprowadzeniach I, II, III, aVL

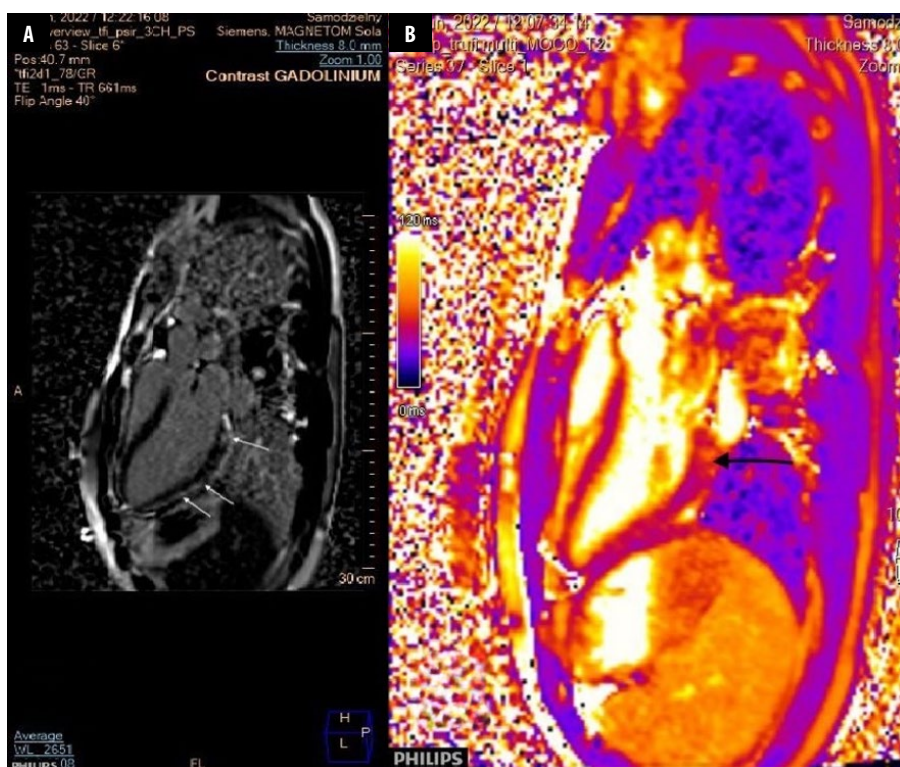
(EKG) opisano uniesienie odcinka ST w odprowadzeniach I, II, aVL, V4–V6 i obniżenie odcinka ST w odprowadzeniach III, aVR, V2 (ryc. 1 A). Badanie radiologiczne klatki piersiowej nie wykazało żadnych nieprawidłowości. W przezklatkowym badaniu echokardiograficznym z obrazowaniem metodą 3D wielkość i kurczliwość jam serca były prawidłowe. Nie stwierdzono regionalnych zaburzeń kurczliwości ani płynu w worku osierdziowym. W monitorowaniu EKG metodą Holtera nie wykryto arytmii. Na podstawie wywiadu, badania fizykalnego, EKG, danych laboratoryjnych i korelacji czasowej między szczepieniem a objawami wysunięto podejrzenie C-VAM. Obrazowanie CMR wykonane w 2. dobie hospitalizacji (4 dni po szczepieniu) umożliwiło rozpoznanie zapalenia mięśnia sercowego zgodnie z kryteriami Lake Louise z 2018 roku, potwierdzono więc rozpoznanie zgodnie z kryteriami CDC dla C-VAM^(2,7,8). W badaniu CMR wielkość i kurczliwość lewej komory były zachowane. Uwidoczniono ogniska obrzęku mięśnia sercowego w pięciu segmentach ściany lewej komory, odpowiadające lokalizacji późnego wzmocnienia pokontrastowego (ryc. 2 A, 2 B). Testy serologiczne w kierunku wirusa *Coxsackie*, parwowirusa B19, SARS-CoV-2, HSV1, HSV2, HHV6, HHV7 i enterowirusa wykluczyły inne potencjalne czynniki etiologiczne zapalenia mięśnia sercowego.

Spełnienie wspomnianych wyżej kryteriów zobowiązuje do postawienia diagnozy C-VAM, wdrożenia odpowiednich procedur diagnostyczno-terapeutycznych i zgłoszenia przypadku odpowiednim służbom monitorującym działania niepożądane szczepień. Wszystkie powyższe działania zostały natychmiast podjęte u naszego pacjenta.

W trakcie pobytu w szpitalu nastąpiła szybka poprawa stanu ogólnego z całkowitym ustąpieniem objawów w ciągu 4 dni od początku choroby. Obserwowano ewolucję zaburzeń okresu repolaryzacji w EKG z towarzyszącym gwałtownym spadkiem stężenia troponiny (ryc. 1 B). W 5. dobie stężenie troponiny wynosiło 216,1 ng/l, a normalizację stwierdzono w 7. dobie hospitalizacji (tab. 1). W leczeniu zastosowano lisinopril, chory nie wymagał dodatkowego postępowania terapeutycznego.

Po 3 miesiącach od wypisu ze szpitala ponownie oceniono stan ogólny pacjenta i wykonano kontrolne badania dodatkowe. Chłopiec nie prezentował żadnych objawów opisanych w trakcie hospitalizacji, w tym bólu w klatce piersiowej. Stężenia troponiny I i NT-proBNP pozostawały w normie. W zapisie EKG i w 24-godzinny monitorowaniu EKG metodą Holtera nie odnotowano nieprawidłowości. W badaniu CMR opisano niewielkie podnasierdziowe obszary późnego wzmocnienia pokontrastowego w obrębie mięśnia lewej komory w odcinku podstawnym dolno-bocznym o etiologii innej niż niedokrwienne. Nie stwierdzono cech obrzęku mięśnia sercowego. Wyniki rezonansu magnetycznego nie spełniały zatem kryteriów aktywnego zapalenia i odzwierciedlały zmniejszające się zmiany ześciowe stanu zapalnego mięśnia sercowego lewej komory (tab. 1).

Podczas kolejnej wizyty kontrolnej, po 9 miesiącach od rozpoznania, pacjent ponownie nie prezentował niepokojących objawów, nie stwierdzono też odchyłań w badaniach laboratoryjnych, EKG i badaniu echokardiograficznym. Kontrolne obrazowanie mięśnia sercowego metodą



Ryc. 2. A. Rezonans magnetyczny serca, obrazowanie T2-zależne. Cechy obrzęku w obrębie segmentu podstawnego dolno-bocznego mięśnia lewej komory (strzałki). B. Rezonans magnetyczny serca, obrazowanie metodą PSIR (phase-sensitive inversion recovery). Cechy późnego wzmocnienia pokontrastowego w segmentach podstawnych, środkowym dolno-bocznym i koniuszkowym bocznym mięśnia lewej komory (strzałki)

rezonansu magnetycznego wykazało niewielkie obszary późnego wzmocnienia pokontrastowego w obrębie – jak wcześniej – segmentu podstawnego dolno-bocznego ściany lewej komory (tab. 1).

OMÓWIENIE

Szczepienia typu mRNA charakteryzują się bezpieczeństwem i wysoką skutecznością w walce z pandemią COVID-19, także w populacji pediatrycznej. Pomimo wysokiego poziomu ochrony przed COVID-19 zawsze należy brać pod uwagę możliwość wystąpienia działań niepożądanych. Najczęściej opisywane objawy – ból i zaczerwienienie w miejscu wkłucia – są łagodne i przemijające. Stosunkowo często obserwuje się też niespecyficzne reakcje ogólnoustrojowe, takie jak ból głowy, zmęczenie, dreszcze i bóle mięśniowe. W rzadkich przypadkach mogą wystąpić ciężkie reakcje poszczepienne: powiększenie węzłów chłonnych, incydenty zakrzepowe, wstrząs anafilaktyczny i powikłania sercowo-naczyniowe^(1,2).

Należy zaznaczyć, że zapalenie mięśnia sercowego może być powikłaniem również innych szczepień ochronnych szeroko stosowanych w populacji pediatrycznej. Związek czasowy między szczepieniem a objawami zapalenia mięśnia sercowego opisywano dotąd w odniesieniu do szczepień między innymi przeciwko grypie, ospie i tężcowi⁽⁹⁾.

Najwyższe ryzyko rozwoju C-VAM notowano dotąd w populacji nastolatków i młodych mężczyzn, zwłaszcza

w grupie pacjentów między 16. a 17. rokiem życia po drugiej dawce szczepionki⁽³⁾.

Przebieg choroby prezentowanego tu pacjenta był łagodny i cechował się brakiem poważnych komplikacji. W 2. dobie od podania trzeciej dawki szczepionki pojawił się ból w klatce piersiowej. Ponadto stwierdzono nieprawidłowości typowe dla zapalenia mięśnia sercowego – pod postacią istotnie podwyższonego stężenia troponiny w surowicy i nieprawidłowości w EKG. W CMR uwidoczniono obrzęk mięśnia sercowego odpowiadający obszarom późnego wzmocnienia pokontrastowego w mięśniu lewej komory, przy zachowanej funkcji skurczowej lewej komory w badaniu echokardiograficznym.

W 2021 roku CDC, ze względu na stopniowe narastanie problemu C-VAM, wprowadziło – opierając się na doświadczeniach związanych z epizodami zapalenia mięśnia sercowego po zastosowaniu szczepienia przeciwko ospie wietrznej – kryteria prawdopodobnego i potwierdzonego rozpoznania C-VAM. Do ustalenia rozpoznania niezbędne są: wystąpienie nowych objawów w korelacji czasowej z przyjęciem szczepionki, podwyższony poziom troponin i spełnienie rezonansowych kryteriów zapalenia mięśnia sercowego. Niezwykle ważne jest również wykluczenie pozostałych potencjalnych przyczyn zapalenia mięśnia sercowego, między innymi infekcji wirusowej czy zażywania środków odurzających i niektórych leków^(2,7,8).

W opisanym przypadku spełnione zostały kryteria rozpoznania C-VAM, wdrożono więc odpowiednie procedury

diagnostyczno-terapeutyczne i zgłoszono zachorowanie służbom monitorującym działania niepożądane szczepień. Wszystkie powyższe działania podjęto natychmiast.

W toku hospitalizacji, podobnie jak w przypadkach zapalenia mięśnia sercowego po drugiej dawce szczepionki, obserwowano szybkie ustąpienie objawów klinicznych z poprawą stanu ogólnego i szybką normalizację stężenia troponiny⁽³⁾. Pomimo prawidłowego stężenia troponiny i braku niepokojących objawów podczas kolejnych wizyt kontrolnych (w 3. i 9. miesiącu od rozpoznania) w CMR nadal obserwowano zmiany w postaci późnego wzmocnienia pokontrastowego. Nie spełniały one jednak kryteriów aktywnego zapalenia mięśnia sercowego. Wydaje się więc, że w zapaleniu mięśnia sercowego po zastosowaniu trzeciej dawki szczepionki, podobnie jak w zapaleniu po drugiej dawce, szybkie ustąpienie objawów klinicznych i normalizacja stężenia troponiny nie korespondują z całkowitym ustąpieniem rezonansowych cech uszkodzenia mięśnia sercowego⁽¹⁰⁾.

Należy wspomnieć, że u pacjentów poniżej 40. roku życia (także w populacji pediatrycznej) ryzyko rozwoju zapalenia mięśnia sercowego w przebiegu COVID-19 wydaje się istotnie wyższe od ryzyka towarzyszącego stosowaniu szczepień przeciwko tej chorobie. Udowodniono, że szczepienia zmniejszają ryzyko zapalenia mięśnia sercowego związane z COVID-19 o około połowę⁽¹¹⁾. W związku z powyższym immunizacja czynna bezapelacyjnie niesie za sobą korzyści w postaci zapobiegania odległym skutkom powikłań sercowo-naczyniowych w przebiegu COVID-19 – również w populacji pediatrycznej. Trzeba też podkreślić, że C-VAM charakteryzuje się statystycznie mniejszą częstością występowania objawów niewydolności serca i rozwoju kardiomiopatii rozstrzeniowej oraz niższą śmiertelnością w ciągu 180 dni od rozpoznania w porównaniu z zapaleniem mięśnia sercowego o etiologii wirusowej⁽¹²⁾.

Najnowsze dane wskazują, że największe ryzyko rozwoju zapalenia mięśnia sercowego po trzeciej dawce szczepionki mRNA występuje w populacji męskiej między 16. a 19. rokiem życia. Ryzyko to wydaje się znacznie mniejsze po zastosowaniu trzeciej dawki w porównaniu z dawką drugą (odpowiednio 6,44 i 14,89 na 100 000 osób)^(13–15).

Grupą szczególnego zainteresowania w kontekście szczepienia przeciwko COVID-19 są pacjenci z wywiadem wieloukładowego zespołu zapalnego związanego z COVID-19 (*paediatric inflammatory multisystem syndrome temporally associated with SARS-CoV-2*, PIMS). Dysregulacja funkcjonowania układu immunologicznego w przebiegu PIMS budzi obawy co do potencjalnie zwiększonego ryzyka rozwoju zapalenia mięśnia sercowego po szczepieniu przeciwko COVID-19. Zgodnie z najnowszymi zaleceniami CDC

w celu ograniczenia działań niepożądanych, wśród nich – zapalenia mięśnia sercowego, rekomenduje się odroczenie szczepienia o co najmniej 90 dni od rozpoznania u pacjentów z wywiadem PIMS⁽²⁾. Po upływie 90 dni od rozpoznania szczepienie wydaje się bezpieczne; jak dotąd nie ma silnych dowodów potwierdzających zwiększone ryzyko rozwoju C-VAM u pacjentów z wywiadem PIMS w porównaniu z populacją zdrową⁽¹⁶⁾. Udowodniono natomiast, że u osób zaszczepionych uprzednio przeciwko COVID-19 ryzyko powikłań pod postacią PIMS jest mniejsze⁽¹⁷⁾.

Według najnowszych wytycznych szczepienie przeciwko COVID-19 zalecane jest u wszystkich pacjentów od 6. miesiąca życia – dotyczy to też zastosowania przynajmniej jednej zaktualizowanej biwalentnej dawki przypominającej przeciwko nowym mutacjom wirusa. W związku z powyższym stale rośnie, również w populacji pediatrycznej, liczba osób zaszczepionych przeciwko COVID-19, także dawką trzecią i następnymi.

Do chwili obecnej nie udowodniono jednoznacznie bezpieczeństwa stosowania kolejnych dawek szczepienia przeciwko COVID-19 po epizodzie C-VAM stwierdzonym po przyjęciu którejkolwiek dawki. Zgodnie z rekomendacjami CDC aktualnie zaleca się więc odroczenie kolejnych dawek wszystkich typów szczepionki przeciwko COVID-19, jeśli po którejkolwiek dawce pacjent rozwinął objawy zapalenia mięśnia sercowego.

WNIOSKI

Zapalenie mięśnia sercowego po szczepieniu przeciwko COVID-19 w populacji pediatrycznej jest obecnie rzadkim schorzeniem, ale w przyszłości skala jego występowania może się zwiększać. W przypadku pojawienia się bólu w klatce piersiowej po szczepieniu zawsze należy brać pod uwagę zapalenie mięśnia sercowego. Pomimo łagodnego przebiegu choroby zalecana jest dalsza regularna kontrola pacjenta w związku z możliwością utrzymywania się nieprawidłowości w CMR.

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.

Wkład autorów

Koncepcja i projekt badania: MP, BW. Gromadzenie i/lub zestawianie danych: MP, MBF. Analiza i interpretacja danych: MP, MBF, BW. Napisanie artykułu: MP. Krytyczne zrecenzowanie artykułu: BW. Zatwierdzenie ostatecznej wersji artykułu: BW.

Piśmiennictwo

1. Frencik RW Jr, Klein NP, Kitchin N et al.; C4591001 Clinical Trial Group: Safety, immunogenicity, and efficacy of the BNT162b2 COVID-19 vaccine in adolescents. *N Engl J Med* 2021; 385: 239–250.
2. Centers for Disease Control and Prevention: Vaccines for COVID-19. Available from: <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/vaccines/index.html> [cited: 5 November 2023].
3. Oster ME, Shay DK, Su JR et al.: Myocarditis cases reported after mRNA-based COVID-19 vaccination in the US from December 2020 to August 2021. *JAMA* 2022; 327: 331–340.
4. Fosch X, Serra J, Torres PL et al.: Acute myocarditis after a third dose of the BNT162b2 COVID-19 vaccine. *Rev Esp Cardiol (Engl Ed)* 2022; 75: 614–616.
5. Saeed A, Yousaf A, Ahmad M et al.: Myopericarditis following the third dose of COVID-19 mRNA vaccination: a case report. *Cureus* 2023; 15: e37005.
6. Morita Y, Matsubara D, Seki M et al.: Acute perimyocarditis in an adolescent Japanese male after a booster dose of the BNT162b2 COVID-19 vaccine. *Tohoku J Exp Med* 2022; 258: 177–182.
7. Gutberlet M, Lücke C: Original versus 2018 Lake Louise criteria for acute myocarditis diagnosis: old versus new. *Radiol Cardiothorac Imaging* 2019; 1: e190150.
8. Marshall TR, Schrader S, Voss L et al.: A comparison of post-COVID vaccine myocarditis classification using the Brighton Collaboration criteria versus Centre for Disease Control criteria. *Commun Dis Intell* (2018) 2023; 47.
9. Mei R, Raschi E, Forcesi E et al.: Myocarditis and pericarditis after immunization: gaining insights through the Vaccine Adverse Event Reporting System. *Int J Cardiol* 2018; 273: 183–186.
10. Puchalski M, Kamińska H, Bartoszek M et al.: COVID-19-vaccination-induced myocarditis in teenagers: case series with further follow-up. *Int J Environ Res Public Health* 2022; 19: 3456.
11. Patone M, Mei XW, Handunnetthi L et al.: Risk of myocarditis after sequential doses of COVID-19 vaccine and SARS-CoV-2 infection by age and sex. *Circulation* 2022; 146: 743–754.
12. Lai FTT, Chan EWW, Huang L et al.: Prognosis of myocarditis developing after mRNA COVID-19 vaccination compared with viral myocarditis. *J Am Coll Cardiol* 2022; 80: 2255–2265.
13. Mevorach D, Anis E, Cedar N et al.: Myocarditis after BNT162b2 COVID-19 third booster vaccine in Israel. *Circulation* 2022; 146: 802–804.
14. Chen C, Fu F, Ding L et al.: Booster dose of COVID-19 mRNA vaccine does not increase risks of myocarditis and pericarditis compared with primary vaccination: new insights from the vaccine adverse event reporting system. *Front Immunol* 2022; 13: 938322.
15. Walton M, Pletzer V, Teunissen T et al.: Adverse events following the BNT162b2 mRNA COVID-19 vaccine (Pfizer-BioNTech) in Aotearoa New Zealand. *Drug Saf* 2023; 46: 867–879.
16. Elias MD, Truong DT, Oster ME et al.; Pediatric Heart Network MUSIC Study Investigators: Examination of adverse reactions after COVID-19 vaccination among patients with a history of multisystem inflammatory syndrome in children. *JAMA Netw Open* 2023; 6: e2248987.
17. Yousaf AR, Cortese MM, Taylor AW et al.; MIS-C Investigation Authorship Group: Reported cases of multisystem inflammatory syndrome in children aged 12–20 years in the USA who received a COVID-19 vaccine, December, 2020, through August, 2021: a surveillance investigation. *Lancet Child Adolesc Health* 2022; 6: 303–312.