

Tomografia impedancyjna w diagnostyce i monitorowaniu zaburzeń funkcji płuc na oddziale intensywnej terapii — opis przypadku i przegląd piśmiennictwa

Electrical impedance tomography for diagnosis and monitoring of pulmonary function disorders in the intensive care unit — case report and review of literature

Szymon Białka¹, Maja Copik¹, Katarzyna Rybczyk², Hanna Misiólek¹

¹Klinika Anestezjologii i Intensywnej Terapii, Wydział Lekarski z Oddziałem Lekarsko-Dentystycznym w Zabrze, Śląski Uniwersytet Medyczny w Katowicach

²Klinika Anestezjologii i Intensywnej Terapii w Zabrze, Śląski Uniwersytet Medyczny w Katowicach (Studenckie Koło Naukowe)

Abstract

The aim of this paper is to describe the possibility of using Electrical Impedance Tomography (EIT) as a treatment monitoring tool in the ICU. It was based on case report and literature review. A 19-year-old female was admitted to ICU due to severe acute respiratory distress syndrome. Despite aggressive treatment there was no improvement. We decided to use EIT in the monitoring of treatment because of difficulties in transporting the patient to the radiology department in order to perform a control CT scan. After identifying the causing factor (*Pneumocystis jiroveci*), EIT monitoring was maintained to assess the effectiveness of targeted microbial treatment. In the following days, we observed an improvement of regional ventilation of the upper and middle segments of the left lung that corresponded well with laboratory test results, especially arterial blood gas analysis. The use of Electrical Impedance Tomography enables non-invasive, bedside, continuous assessment of regional lung ventilation. It is possible to use it in both mechanically ventilated and spontaneously breathing patients. It allows efficient and dynamic monitoring of the course of the therapeutic process. Interpretation of the results is relatively easy to learn and does not require specialist knowledge. Moreover, it is possible to use EIT in those cases where other methods are of high risk or contraindicated.

Anestezjologia Intensywna Terapia 2017, tom 49, nr 3, 228–233

Key words: intensive care, monitoring, electrical impedance tomography

Słowa kluczowe: intensywne terapię, monitorowanie; elektryczna tomografia impedancyjna

Ostra niewydolność oddechowa (ARDS, *acute respiratory distress syndrome*) jest jedną z głównych przyczyn hospitalizacji na oddziałach anestezjologii i intensywnej terapii. Mięszc płuc w ARDS charakteryzuje się znaczną heterogenicznością, co sprzyja nierównomiernej regionalnej dystrybucji wentylacji [1]. Obok obszarów niedodmowych, które nie biorą udziału

w procesie wymiany gazowej, współistnieją miejsca prawidłowej wentylacji. Obszary niedodmowe płuc lokalizują się głównie w częściach grzbietowych [2–4]. Ta niehomogenna struktura płuc jest w głównej mierze odpowiedzialna za pogłębienie ich uszkodzenia podczas wentylacji mechanicznej [4]. Równocześnie na skutek zwiększenia oporu naczyniowego

Należy cytować wersję anglojęzyczną: Białka S, Copik M, Rybczyk K, Misiólek H. Electrical impedance tomography for diagnosis and monitoring of pulmonary function disorders in the intensive care unit — case report and review of literature. *Anaesthesiol Intensive Ther* 2017, vol. 49, no 3, 222–226, doi 10.5603/AIT.2017.0040.

kapilar płucnych dochodzi do zwiększenia obciążenia następczego prawej komory serca. Wzrost ten może w konsekwencji prowadzić do ostrej niewydolności prawokomorowej znacznie pogarszającej rokowanie pacjentów z ARDS [5, 6].

Większość chorych z ARDS wymaga zastosowania inwazyjnej wentylacji mechanicznej. Tylko u niewielkiej części chorych można zastosować wentylację nieinwazyjną (NIV, *non-invasive ventilation*) [7]. Niezależnie od rodzaju wspomaganego oddechu, u wszystkich chorych konieczna jest ciągła kontrola skuteczności stosowanej terapii oddechowej. W tym celu, w codziennej praktyce klinicznej dokonuje się między innymi pomiarów gazometrii krwi tętniczej, mieszanej krwi żyłnej, kapnometrii oraz analizy parametrów mechaniki wentylacji. Wszystkie powyższe parametry odzwierciedlają funkcjonowanie płuc jako całości, nie różnicując efektywności ich poszczególnych obszarów. Do badań umożliwiających ocenę regionalnej wentylacji płuc, dostępnych i przydatnych klinicznie można zaliczyć tomografię komputerową (CT, *computed tomography*), rezonans magnetyczny (MRI, *magnetic resonance imaging*) oraz badania ultrasonograficzne. Powyższe badania mają jednak charakter statyczny. W 2011 roku wprowadzono do użytku nowoczesną metodę ciągłego obrazowania regionalnej wentylacji płuc w postaci elektrycznej tomografii impedancyjnej (EIT, *electrical impedance tomography*).

Technologia elektrycznej tomografii impedancyjnej umożliwia szybką wizualizację regionalnej wentylacji płuc. Jest oparta ona na pomiarach ich oporu elektrycznego. Metoda ta wykorzystuje zjawisko oporu wobec impulsu elektrycznego, jaki stawia miąższ płuca, który zwiększa się wraz z jej upowietrzeniem [8, 9]. Wokół klatki piersiowej chorego owija się elastyczny pas elektrod, z których jedna para wytwarza prąd o niewielkim, niewyczuwalnym natężeniu (około 5 mA). Pozostałe elektrody rejestrują potencjał elektryczny. Ze stosunku natężenia i napięcia wyliczony zostaje opór tkanek [10]. Dzięki tej metodzie uzyskuje się informację o oporności klatki piersiowej na jej przekroju, a tym samym o stopniu upowietrzenia poszczególnych partii płuc. Obraz jest następnie analizowany poprzez podzielenie obszaru płuc na 4 warstwy w układzie grzbietowo-brzusznym lub sektorach, oznaczone kolejno od ROI (*regions of interest*) 1 do ROI 4. Nasilenie powietrzności danego obszaru w określonej fazie cyklu oddechowego jest wyrażane na ekranie monitora w postaci kolorowego obrazu. Kolor biały oznacza obszary największego upowietrzenia, natomiast czarny to obszar niewentylowany. Widoczne wartości liczbowe oznaczają procentową część całkowitego zwiększania się oporu (całkowitej wentylacji), przypadającą na poszczególne warstwy lub sektory.

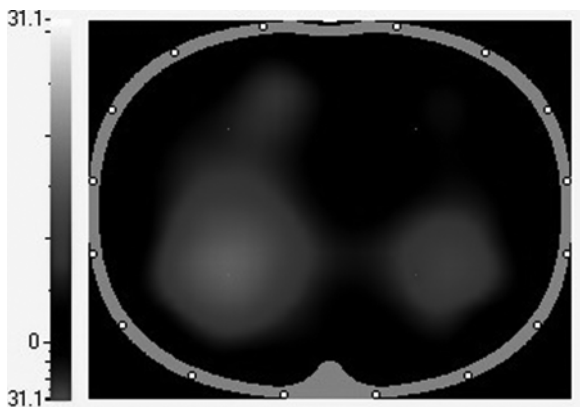
OPIS PRZYPADKU

Na oddział anestezjologii i intensywnej terapii (OAIiT) przyjęto 19-latkę z objawami ostrej niewydolności odde-

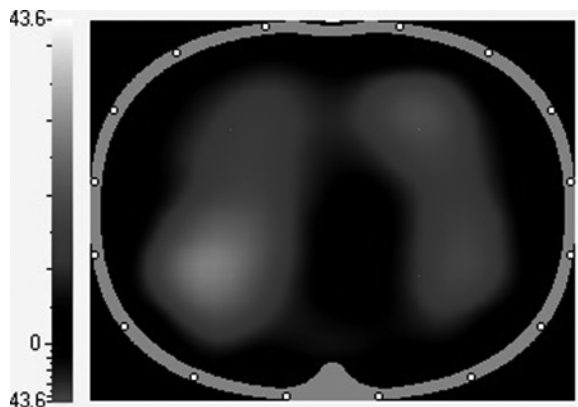
chowej w przebiegu śródmiąższowego zapalenia płuc o nieznannej etiologii. Początek objawów wystąpił około dwa tygodnie przed przyjęciem, w postaci złego samopoczucia, bólu gardła i wzrostu temperatury ciała do 38°C. Lekarz rodzinny początkowo w terapii zastosował leczenie objawowe, przeciwgorączkowe (paracetamol 500 mg co 12 h, inozyna 1 g co 8 h). Wobec braku poprawy, nasilających się objawów zakażenia, gorączki oraz znacznego pogorszenia samopoczucia, zastosował empiryczną antybiotykoterapię (amoksylicyna 875 mg + kwas klawulanowy 125 mg co 12 h) oraz przeciwzapalnie i przeciwgorączkowo (ibuprofen 200 mg co 6 h). Mimo zastosowanej terapii nasilały się objawy duszności, a w wykonanym zdjęciu płuc stwierdzono w polu środkowym i dolnym płuca lewego drobnoplamiste zagęszczenia o typie zmian śródmiąższowych. Po uzyskaniu powyższych wyników oraz przy uwzględnieniu pogarszającego się stanu klinicznego chora została skierowana na oddział chorób płuc. W pierwszej dobie pobytu na oddziale wystąpiły objawy ostrej niewydolności oddechowej z hipoksją i narastającą kwasicą oddechową. W związku z powyższym pacjentka została przekazana na OAIiT. W chwili przyjęcia chora była przytomna, z nasiloną dusznością spoczynkową, *tachypnoe* ze znacznym wysiłkiem oddechowym oraz sinicą. Osłuchowo nad polami płucnymi słyszalne były trzeszczenia i rżnięcia bardziej nasilone po stronie lewej.

Pomimo zastosowania tlenoterapii biernej przez maskę twarzową (z przepływem O_2 10 l min⁻¹), objawy niewydolności oddechowej potwierdzono w badaniu równowagi kwasowo-zasadowej krwi tętniczej: SpO₂ 88–90%, PaO₂ 53 mm Hg, PaCO₂ 29 mm Hg, pH 7,51. Zastosowano wentylację mechaniczną (FiO₂ 0,5, PIP 25 cm H₂O, PEEP 8 cm H₂O) techniką nieinwazyjną (NIV, *non invasive*) przez maskę twarzową w trybie CPAP (CPAP, *continuous positive airway pressure*). Równocześnie zostało rozpoczęte monitorowanie regionalnej wentylacji płuc techniką EIT z wykorzystaniem urządzenia PulmoVista 500 (Dräger, Medical GmbH, Niemcy).

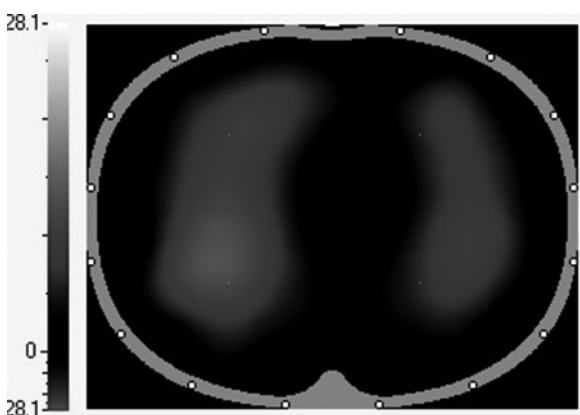
W pierwszym obrazowaniu metodą EIT można było zaobserwować znaczne ograniczenie wentylacji miąższu płucnego dotyczącego głównie pola górnego i środkowego, a w mniejszym stopniu pola dolnego płuca lewego (ryc. 1). Ten obraz był spójny z wykonanym wcześniej zdjęciem rentgenowskim. Na jego podstawie, biorąc pod uwagę pogarszający się stan kliniczny oraz podwyższone parametry zapalne (białko C-reaktywne [CRP, *C-reactive protein*] 22,11 mg l⁻¹, prokalcytonina (PCT) 0,071 ng l⁻¹, WBC (*white blood cells*) 18,13 G l⁻¹, neutrofile 12,68 G l⁻¹ [84,5%]) po wcześniejszym zabezpieczeniu materiału do badania bakteriologicznego, do terapii dołączono szerokospektralną antybiotykoterapię empiryczną (ceftriakson 2 g co 12 h, klarytromycyna 500 mg co 12 h), leczenie antywirusowe (oseltamiwir 75 mg co 12 h) oraz przeciwgrzybicze (fluko-



Rycina 1. Obraz elektrycznej tomografii impedancyjnej w chwili rozpoczęcia wentylacji techniką nieinwazyjną przez maskę twarzową w trybie ciągłego dodatniego ciśnienia w drogach oddechowych



Rycina 3. Obraz elektrycznej tomografii impedancyjnej w chwili wypisu chorej z oddziału anestezjologii i intensywnej terapii



Rycina 2. Obraz elektrycznej tomografii impedancyjnej po 48 godzinach od wdrożenia leczenia celowanego

nazol 400 mg w pierwszej dobie, następnie 200 mg co 24 h). Równocześnie wykonano test przesiewowy w kierunku obecności wirusa HIV (przeciwciała anti-HIV, wynik ujemny).

W kolejnych godzinach terapii wykluczono obecność wirusa grypy A (w tym podtypu AH1N1) oraz B. Uzyskano również ujemne wyniki badania bakteriologicznego posiewów krwi oraz płwociny. Ze względu na podwyższone wyniki oraz wobec braku poprawy stanu klinicznego, odzwierciedlanego również w monitorowaniu EIT, pobrano płwocinę na posiew oraz w kierunku antygenów bakterii atypowych (*Mycoplasma pneumoniae*, *Legionella pneumophila*, *Chlamydia sp.*, *Pneumocystis jiroveci*). W wykonanych badaniach potwierdzono obecność w płwocinie antygeny *Pneumocystis jiroveci*, jak również obecność cyst. Wdrożono terapię trimetoprimem/sulfametoksazolem w dawce 960 mg co 4 godz. Po pięciu dniach leczenia uzyskano znaczną poprawę kliniczną i gazometryczną (PaO_2 63 mm Hg, PaCO_2 34 mm Hg, pH 7,46). Zaobserwowano również normalizację parametrów zapalnych (CRP 1,9 mg l⁻¹, WBC 7,14 G l⁻¹, neu-

trofile 3,99 G l⁻¹ [55,9 %]). Powyższe zmiany ściśle współistniały z wynikiem obrazowania techniką EIT (ryc. 2, 3), gdzie obserwowano stopniową poprawę powietrzności poszczególnych partii pól płucnych. Wpłynęło to na stopniową redukcję parametrów wentylacji NIV-CPAP (FiO_2 0,21, PIP 12 cm H₂O, PEEP 4 cm H₂O), aż do całkowitego zaprzestania wentylacji z następczą, okresową tlenoterapią bierną.

Chora w dziewiątej dobie leczenia została przekazana na oddział pulmonologiczny w celu kontynuacji leczenia i diagnostyki przyczyn infekcji bakteriami atypowymi. W chwili wypisu chora wydolna oddechowemu (SpO_2 94–96%), wyrównana gazometrycznie (PaO_2 85 mm Hg, PaCO_2 36 mm Hg, pH 7,43), z ujemnymi parametrami stanu zapalnego oraz wynikami badań bakteriologicznych.

DYSKUSJA

Współczesne metody obrazowania płuc umożliwiają diagnozowanie oraz weryfikują postępowanie lecznicze w wielu schorzeniach układu oddechowego. Zarówno CT, jak i MRI stały się powszechną metodą badań, dostarczając obrazy o bardzo dobrej jakości i wysokiej rozdzielczości. Badania te pozwalają w wielu przypadkach określić przyczyny zachorowania, umożliwiają szybkie postawienie poprawnej diagnozy i wdrożenie odpowiedniego leczenia. Mimo wielu zalet mają jednak również swoje ograniczenia. Wykorzystanie promieniowania rentgenowskiego bądź pola elektromagnetycznego sprawia, że mogą być bezpiecznie stosowane nie w każdej grupie chorych.

Przeciwwskazania do przeprowadzania badań metodą CT wynikają ściśle z Ustawy Prawo Atomowe oraz rozporządzenia Ministra Zdrowia. Zalicza się do nich przede wszystkim ciążę lub jej podejrzenie oraz uczulenie na środki kontrastowe (przeciwwskazanie w przypadku ich stosowania). Z kolei bezwzględny przeciwwskazaniem do wykonywania badania rezonansu magnetycznego są wszczepione u pacjenta urządzenia

elektryczne i elektroniczne, w szczególności: rozruszniki serca, pompy insulinowe, aparaty słuchowe, neurostymulatory, klipsy metalowe wewnątrzczaszkowe czy metaliczne ciała w oku.

Istotnym problemem, w szczególności na OAiIT, jest sama procedura i technika wykonania badania. Transport chorego w stanie krytycznym zwiększa ryzyko wystąpienia ciężkich powikłań. Z badań wynika, że ich częstość podczas wewnątrzszpitalnego transportu waha się od 5,9 do 66% [11–13]. Główne zagrożenia dotyczą ośrodkowego układu nerwowego, układu sercowo-naczyniowego oraz oddechowego. Zaburzenia związane z tymi układami mogą wystąpić szybko, bez objawów wstępnych i prowadzić do nagłego zatrzymania krążenia. Co więcej, w większości transportów mają miejsce krótkie okresy, w których mimo nawet optymalnego wyposażenia sprzętowego, nadzór nad stanem pacjenta jest jedynie kliniczny, na przykład podczas przekładania chorego z łóżka na wózek transportowy. Szczególnym problemem podczas transportu wewnątrzszpitalnego z OAiIT jest wentylacja mechaniczna — prowadzona zwykle według innych zasad niż na oddziale (zwykle inny jest tryb wentylacji mechanicznej respiratora transportowego bądź wentylacja prowadzona jest za pomocą worka samorozprężalnego). Już sama zmiana sposobu wentylacji i sprzętu do jej prowadzenia może wywołać zaburzenia utlenowania krwi [14, 15]. Waydhas [16] wykazał, że u około połowy chorych dochodzi do znacznego pogorszenia utlenowania krwi po zmianie sprzętu i sposobu wentylacji, a u 20% chorych wymiana gazowa powracała do parametrów wyjściowych dopiero po 24 godzinach. Co więcej, sam transport chorych wentylowanych mechanicznie jest uznawany za niezależny czynnik ryzyka rozwoju respiratorowego zapalenia płuc [17].

Opisane powyżej przeciwwskazania do stosowania MRI/CT oraz trudności związane z transportem chorego sprawiają, że należy rozważyć korzyści i zagrożenia wynikające z rutynowego przeprowadzania powyższych badań. Poza tym w trakcie leczenia, czy to zapalenia płuc czy ARDS, należałoby weryfikować poprawność postępowania leczniczego, poprzez powtarzanie badania, co znacznie ogranicza wykorzystanie MRI/CT jako metod przyłóżkowych, bezpiecznych dla pacjenta. Z tego powodu rzadko stosuje się je do oceny i monitorowania regionalnej dystrybucji wentylacji płuc w przebiegu leczenia schorzeń układu oddechowego. Z kolei wykorzystanie ultrasonograficznej metody obrazowania układu oddechowego wymaga dużego doświadczenia i jest metodą wysoce subiektywną [18, 19].

Tomografia elektroimpedancyjna jest najnowszą technologią stosowaną w obrazowaniu płuc. Metoda ta, oparta na pomiarze oporu elektrycznego płuc, cechuje się dużą rozdzielczością czasową, pozwalającą na śledzenie zmian w czasie rzeczywistym [20]. Jako metoda nieinwazyjna i praktycznie pozbawiona skutków ubocznych (brak

promieniowania, brak konieczności transportu chorego) stała się atrakcyjną alternatywą dla CT, MRI czy ultrasonografii. Wiele wyników klinicznych badań porównawczych dowiodło prawidłowości i powtarzalności wyników badania EIT [21–29].

Elektryczna tomografia impedancyjna została do tychczas zastosowana do oceny wentylacji mechanicznej u pacjentów z zespołem ostrej niewydolności oddechowej [30–32]. Parametry uzyskane w EIT posłużyły obserwacji regionalnej reakcji płuc na manewr rekrutacji [33], regulację PEEP [34, 35], VT [36] oraz FiO_2 [37]. Pozwala to na dostosowanie optymalnych parametrów wentylacji w ciężkich postaciach ARDS, w celu uzyskania odpowiedniego utlenowania krwi. Badanie to dostarcza informacji na temat skutków ubocznych wentylacji mechanicznej spotęgowanych przez niektóre choroby, tj. ARDS, przewlekła obturacyjna choroba płuc, nowotwór płuc, mukowiscydoza oraz procesy związane ze starzeniem [38–40]. Ponadto przeprowadzono kilka badań z zastosowaniem tomografii impedancyjnej w celu wykrycia odmy opłucnowej [41, 42], zmian parametrów oddechowych po odsysaniu [43] i oceny wentylacji jednego płuca [44]. Tomografię impedancyjną wykorzystano nie tylko do oceny dystrybucji wentylacji, ale również regionalnej perfuzji tkanki płuc, objętości wyrzutowej serca oraz interakcji między tymi parametrami [45–47]. Bezpieczeństwo tego przyłóżkowego badania pozwala na jego przeprowadzenie w podatnej na urazy populacji dzieci i noworodków. Udowodniono wzrost i stabilizację objętości końcowo-wydechowej u noworodków poddanych terapii surfaktantem [48]. Tomografia impedancyjna pozwala także na monitorowanie zmian objętości płuc w trakcie wentylacji oscylacyjnej u wcześniaków [49, 50].

Jak każda metoda, również EIT ma swoje ograniczenia. Jej zastosowanie jest przeciwwskazane lub obarczone dużym ryzykiem u otyłych chorych (BMI [*body mass index*] $> 50 \text{ kg m}^{-2}$), z obrzękami tkankowymi, nadmiernie pobudzonych ruchowo, z ranami lub zmianami skórными w okolicy przylegania pasa elektrod, z wszczepionymi aktywnymi implantami serca (rozrusznik, kardiowerter-defibrylator), podczas elektroterapii, gdzie założenie pasa elektrod obarczone jest ryzykiem (np. u chorych z urazem rdzenia kręgowego), przy monitorowaniu trwającym powyżej 24 godzin, jak również podczas drenażu jam opłucnowych.

PODSUMOWANIE

Wykorzystanie EIT daje możliwość nieinwazyjnego, przyłóżkowego, ciągłego monitorowania powietrzności poszczególnych partii pól płucnych. Jest to możliwe zarówno u pacjentów wentylowanych mechanicznie, jak i oddychających spontanicznie. Metoda ta nie służy do obrazowania zmian strukturalnych z zakresu schorzeń układu oddechowego (rozedma płuc, rozstrzeń oskrzeli, guzy itp.).

Ze względu na mniejszą szkodliwość oraz łatwość wykonania pozwala jednak na skuteczniejsze, dynamiczne monitorowanie przebiegu procesu terapeutycznego. Równocześnie interpretacja wyników jest stosunkowo łatwa do nauczenia i nie wymaga specjalistycznej wiedzy. Co więcej, wykorzystanie technologii EIT jest możliwe w tych przypadkach, w których inne metody stanowią duże ryzyko lub wręcz są przeciwwskazane, na przykład u kobiet ciężarnych.

Zastosowanie w opisanym przypadku elektrycznej EIT przyczyniło się do szybkiego postawienia poprawnej diagnozy. Największą zaletą było jednak wykorzystanie EIT jako bezpiecznej, mało inwazyjnej metody służącej do monitorowania skuteczności wdrożonej terapii.

PODZIĘKOWANIA

1. Źródło finansowania — brak.
2. Konflikt interesów — brak.

Piśmiennictwo:

1. Puybasset L, Gusman P, Muller JC, et al. Regional distribution of gas and tissue in acute respiratory distress syndrome. III. Consequences for the effects of positive end-expiratory pressure. CT Scan ARDS Study Group. *Adult Respiratory Distress Syndrome. Intensive Care Med.* 2000; 26(9): 1215–1227, indexed in Pubmed: [11089745](#).
2. Gattinoni L, Pesenti A, Bombino M, et al. Relationships between lung computed tomographic density, gas exchange, and PEEP in acute respiratory failure. *Anesthesiology.* 1988; 69(6): 824–832, indexed in Pubmed: [3057937](#).
3. Maunder RJ, Shuman WP, McHugh JW, et al. Preservation of normal lung regions in the adult respiratory distress syndrome. Analysis by computed tomography. *JAMA.* 1986; 255(18): 2463–2465, indexed in Pubmed: [3701964](#).
4. Terragni PP, Rosboch G, Tealdi A, et al. Tidal hyperinflation during low tidal volume ventilation in acute respiratory distress syndrome. *Am J Respir Crit Care Med.* 2007; 175(2): 160–166, doi: [10.1164/rccm.200607-915OC](#), indexed in Pubmed: [17038660](#).
5. Boissier F, Katsahian S, Razazi K, et al. Prevalence and prognosis of cor pulmonale during protective ventilation for acute respiratory distress syndrome. *Intensive Care Med.* 2013; 39(10): 1725–1733, doi: [10.1007/s00134-013-2941-9](#), indexed in Pubmed: [23673401](#).
6. Lhéritier G, Legras A, Caille A, et al. Prevalence and prognostic value of acute cor pulmonale and patent foramen ovale in ventilated patients with early acute respiratory distress syndrome: a multicenter study. *Intensive Care Med.* 2013; 39(10): 1734–1742, doi: [10.1007/s00134-013-3017-6](#), indexed in Pubmed: [23860806](#).
7. Keenan SP, Sinuff T, Burns KEA, et al. Canadian Critical Care Trials Group/Canadian Critical Care Society Noninvasive Ventilation Guidelines Group. Clinical practice guidelines for the use of noninvasive positive-pressure ventilation and noninvasive continuous positive airway pressure in the acute care setting. *CMAJ.* 2011; 183(3): E195–E214, doi: [10.1503/cmaj.100071](#), indexed in Pubmed: [21324867](#).
8. Harris ND, Suggett AJ, Barber DC, et al. Applications of applied potential tomography (APT) in respiratory medicine. *Clin Phys Physiol Meas.* 1987; 8 Suppl A: 155–165, indexed in Pubmed: [3568565](#).
9. Nebuya S, Mills GH, Milnes P, et al. Indirect measurement of lung density and air volume from electrical impedance tomography (EIT) data. *Physiol Meas.* 2011; 32(12): 1953–1967, doi: [10.1088/0967-3334/32/12/006](#), indexed in Pubmed: [22048128](#).
10. Stankiewicz-Rudnicki M, Gaszyński T, Gaszyński W. Assessment of regional ventilation in acute respiratory distress syndrome by electrical impedance tomography. *Anaesthesiol Intensive Ther.* 2015; 47(1): 77–81, doi: [10.5603/AIT.2015.0007](#), indexed in Pubmed: [25751294](#).
11. Hurst JM, Davis K, Johnson DJ, et al. Cost and complications during in-hospital transport of critically ill patients: a prospective cohort study. *J Trauma.* 1992; 33(4): 582–585, indexed in Pubmed: [1433406](#).
12. Szem JW, Hydo LJ, Fischer E, et al. High-risk intrahospital transport of critically ill patients: safety and outcome of the necessary „road trip”. *Crit Care Med.* 1995; 23(10): 1660–1666, indexed in Pubmed: [7587230](#).
13. Indeck M, Peterson S, Smith J, et al. Risk, cost, and benefit of transporting ICU patients for special studies. *J Trauma.* 1988; 28(7): 1020–1025, indexed in Pubmed: [3135417](#).
14. Zanetta G, Robert D, Guérin C. Evaluation of ventilators used during transport of ICU patients — a bench study. *Intensive Care Med.* 2002; 28(4): 443–451, doi: [10.1007/s00134-002-1242-5](#), indexed in Pubmed: [11967599](#).
15. Evans A, Winslow EH. Oxygen saturation and hemodynamic response in critically ill, mechanically ventilated adults during intrahospital transport. *Am J Crit Care.* 1995; 4(2): 106–111, indexed in Pubmed: [7749441](#).
16. Waydhas C, Schneck G, Duswald KH. Deterioration of respiratory function after intra-hospital transport of critically ill surgical patients. *Intensive Care Med.* 1995; 21(10): 784–789, indexed in Pubmed: [8557864](#).
17. Kollef MH, Von Harz B, Prentice D, et al. Patient transport from intensive care increases the risk of developing ventilator-associated pneumonia. *Chest.* 1997; 112(3): 765–773, indexed in Pubmed: [9315813](#).
18. Yang Jx, Zhang M, Liu Zh, et al. Detection of lung atelectasis/consolidation by ultrasound in multiple trauma patients with mechanical ventilation. *Critical Ultrasound Journal.* 2009; 1(1): 13–16, doi: [10.1007/s13089-009-0003-x](#).
19. Stefanidis K, Dimopoulos S, Tripodaki ES, et al. Lung sonography and recruitment in patients with early acute respiratory distress syndrome: a pilot study. *Crit Care.* 2011; 15(4): R185, doi: [10.1186/cc10338](#), indexed in Pubmed: [21816054](#).
20. Frerichs I, Amato MBP, van Kaam AH, et al. TREND study group. Chest electrical impedance tomography examination, data analysis, terminology, clinical use and recommendations: consensus statement of the TRanslational EIT developmeNt stuDY group. *Thorax.* 2017; 72(1): 83–93, doi: [10.1136/thoraxjnl-2016-208357](#), indexed in Pubmed: [27596161](#).
21. Wrigge H, Zinserling J, Muders T, et al. Electrical impedance tomography compared with thoracic computed tomography during a slow inflation maneuver in experimental models of lung injury. *Crit Care Med.* 2008; 36(3): 903–909, doi: [10.1097/CCM.0B013E3181652EDD](#), indexed in Pubmed: [18431279](#).
22. Frerichs I, Hinz J, Herrmann P, et al. Detection of local lung air content by electrical impedance tomography compared with electron beam CT. *J Appl Physiol* (1985). 2002; 93(2): 660–666, doi: [10.1152/japplphysiol.00081.2002](#), indexed in Pubmed: [12133877](#).
23. Elke G, Fuld MK, Halaweish AF, et al. Quantification of ventilation distribution in regional lung injury by electrical impedance tomography and xenon computed tomography. *Physiol Meas.* 2013; 34(10): 1303–1318, doi: [10.1088/0967-3334/34/10/1303](#), indexed in Pubmed: [24021927](#).
24. Victorino JA, Borges JB, Okamoto VN, et al. Imbalances in regional lung ventilation: a validation study on electrical impedance tomography. *Am J Respir Crit Care Med.* 2004; 169(7): 791–800, doi: [10.1164/rccm.200301-133OC](#), indexed in Pubmed: [14693669](#).
25. Hinz J, Neumann P, Dudykevych T, et al. Regional ventilation by electrical impedance tomography: a comparison with ventilation scintigraphy in pigs. *Chest.* 2003; 124(1): 314–322, indexed in Pubmed: [12853539](#).
26. Richard JC, Pouzot C, Gros A, et al. Electrical impedance tomography compared to positron emission tomography for the measurement of regional lung ventilation: an experimental study. *Crit Care.* 2009; 13(3): R82, doi: [10.1186/cc7900](#), indexed in Pubmed: [19480694](#).
27. Shi C, Boehme S, Bentley AH, et al. Assessment of regional ventilation distribution: comparison of vibration response imaging (VRI) with electrical impedance tomography (EIT). *PLoS One.* 2014; 9(1): e86638, doi: [10.1371/journal.pone.0086638](#), indexed in Pubmed: [24475160](#).
28. Hinz J, Moerer O, Neumann P, et al. Effect of positive end-expiratory-pressure on regional ventilation in patients with acute lung injury evaluated by electrical impedance tomography. *Eur J Anaesthesiol.* 2005; 22(11): 817–825, doi: [10.1017/S0265021505001377](#), indexed in Pubmed: [16225714](#).
29. Coulombe N, Gagnon H, Marquis F, et al. A parametric model of the relationship between EIT and total lung volume. *Physiol Meas.* 2005; 26(4): 401–411, doi: [10.1088/0967-3334/26/4/006](#), indexed in Pubmed: [15886435](#).
30. Costa ELV, Borges JB, Melo A, et al. Bedside estimation of recruitable alveolar collapse and hyperdistension by electrical impedance tomography. *Intensive Care Med.* 2009; 35(6): 1132–1137, doi: [10.1007/s00134-009-1447-y](#), indexed in Pubmed: [19255741](#).
31. Karsten J, Grusnick C, Paarmann H, et al. Positive end-expiratory pressure titration at bedside using electrical impedance tomography in post-operative cardiac surgery patients. *Acta Anaesthesiol Scand.* 2015; 59(6): 723–732, doi: [10.1111/aas.12518](#), indexed in Pubmed: [25867049](#).

32. Blankman P, Hasan D, Erik G, et al. Detection of 'best' positive end-expiratory pressure derived from electrical impedance tomography parameters during a decremental positive end-expiratory pressure trial. *Crit Care*. 2014; 18(3): R95, doi: [10.1186/cc13866](https://doi.org/10.1186/cc13866), indexed in Pubmed: [24887391](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24887391/).
33. Odenstedt H, Lindgren S, Olegård C, et al. Slow moderate pressure recruitment maneuver minimizes negative circulatory and lung mechanic side effects: evaluation of recruitment maneuvers using electric impedance tomography. *Intensive Care Med*. 2005; 31(12): 1706–1714, doi: [10.1007/s00134-005-2799-6](https://doi.org/10.1007/s00134-005-2799-6), indexed in Pubmed: [16177920](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16177920/).
34. Frerichs I, Dargaville PA, Dudykevych T, et al. Electrical impedance tomography: a method for monitoring regional lung aeration and tidal volume distribution? *Intensive Care Med*. 2003; 29(12): 2312–2316, doi: [10.1007/s00134-003-0786-9](https://doi.org/10.1007/s00134-003-0786-9), indexed in Pubmed: [14566457](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14566457/).
35. Luepschen H, Meier T, Grossherr M, et al. Assessment of regional lung recruitment and derecruitment during a PEEP trial based on electrical impedance tomography. *Intensive Care Med*. 2008; 34(3): 543–550, doi: [10.1007/s00134-007-0786-9](https://doi.org/10.1007/s00134-007-0786-9), indexed in Pubmed: [17653529](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17653529/).
36. Zick G, Elke G, Becher T, et al. Effect of PEEP and tidal volume on ventilation distribution and end-expiratory lung volume: a prospective experimental animal and pilot clinical study. *PLoS One*. 2013; 8(8): e72675, doi: [10.1371/journal.pone.0072675](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0072675), indexed in Pubmed: [23991138](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23991138/).
37. Grychtol B, Elke G, Meybohm P, et al. Functional validation and comparison framework for EIT lung imaging. *PLoS One*. 2014; 9(8): e103045, doi: [10.1371/journal.pone.0103045](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0103045), indexed in Pubmed: [25110887](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25110887/).
38. Pulletz S, Kott M, Elke G, et al. Dynamics of regional lung aeration determined by electrical impedance tomography in patients with acute respiratory distress syndrome. *Multidiscip Respir Med*. 2012; 7(1): 44, doi: [10.1186/2049-6958-7-44](https://doi.org/10.1186/2049-6958-7-44), indexed in Pubmed: [23153321](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23153321/).
39. Victorino JA, Borges JB, Okamoto VN, et al. Imbalances in regional lung ventilation: a validation study on electrical impedance tomography. *Am J Respir Crit Care Med*. 2004; 169(7): 791–800, doi: [10.1164/rccm.200301-1330C](https://doi.org/10.1164/rccm.200301-1330C), indexed in Pubmed: [14693669](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14693669/).
40. Vogt B, Pulletz S, Elke G, et al. Spatial and temporal heterogeneity of regional lung ventilation determined by electrical impedance tomography during pulmonary function testing. *J Appl Physiol* (1985). 2012; 113(7): 1154–1161, doi: [10.1152/jappphysiol.01630.2011](https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01630.2011), indexed in Pubmed: [22898553](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22898553/).
41. Frerichs I, Dargaville PA, van Genderingen H, et al. Lung volume recruitment after surfactant administration modifies spatial distribution of ventilation. *Am J Respir Crit Care Med*. 2006; 174(7): 772–779, doi: [10.1164/rccm.200512-1942OC](https://doi.org/10.1164/rccm.200512-1942OC), indexed in Pubmed: [16840739](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16840739/).
42. Costa ELV, Chaves CN, Gomes S, et al. Real-time detection of pneumothorax using electrical impedance tomography. *Crit Care Med*. 2008; 36(4): 1230–1238, doi: [10.1097/CCM.0b013e31816a0380](https://doi.org/10.1097/CCM.0b013e31816a0380), indexed in Pubmed: [18379250](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18379250/).
43. Tingay DG, Copnell B, Grant CA, et al. The effect of endotracheal suction on regional tidal ventilation and end-expiratory lung volume. *Intensive Care Med*. 2010; 36(5): 888–896, doi: [10.1007/s00134-010-1849-x](https://doi.org/10.1007/s00134-010-1849-x), indexed in Pubmed: [20232038](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20232038/).
44. Pulletz S, Elke G, Zick G, et al. Performance of electrical impedance tomography in detecting regional tidal volumes during one-lung ventilation. *Acta Anaesthesiol Scand*. 2008; 52(8): 1131–1139, doi: [10.1111/j.1399-6576.2008.01706.x](https://doi.org/10.1111/j.1399-6576.2008.01706.x), indexed in Pubmed: [18840115](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18840115/).
45. Frerichs I, Pulletz S, Elke G, et al. Assessment of changes in distribution of lung perfusion by electrical impedance tomography. *Respiration*. 2009; 77(3): 282–291, doi: [10.1159/000193994](https://doi.org/10.1159/000193994), indexed in Pubmed: [19147986](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19147986/).
46. Vonk Noordegraaf A, Kunst PW, Janse A, et al. Pulmonary perfusion measured by means of electrical impedance tomography. *Physiol Meas*. 1998; 19(2): 263–273, indexed in Pubmed: [9626690](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9626690/).
47. Li Y, Tesselar E, Borges JB, et al. Hyperoxia affects the regional pulmonary ventilation/perfusion ratio: an electrical impedance tomography study. *Acta Anaesthesiol Scand*. 2014; 58(6): 716–725, doi: [10.1111/aas.12323](https://doi.org/10.1111/aas.12323), indexed in Pubmed: [24762189](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24762189/).
48. Miedema M, de Jongh FH, Frerichs I, et al. Changes in lung volume and ventilation during surfactant treatment in ventilated preterm infants. *Am J Respir Crit Care Med*. 2011; 184(1): 100–105, doi: [10.1164/rccm.201103-0375OC](https://doi.org/10.1164/rccm.201103-0375OC), indexed in Pubmed: [21493733](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21493733/).
49. Miedema M, de Jongh FH, Frerichs I, et al. Changes in lung volume and ventilation during lung recruitment in high-frequency ventilated preterm infants with respiratory distress syndrome. *J Pediatr*. 2011; 159(2): 199–205.e2, doi: [10.1016/j.jpeds.2011.01.066](https://doi.org/10.1016/j.jpeds.2011.01.066), indexed in Pubmed: [21414632](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21414632/).
50. van Veenendaal MB, Miedema M, de Jongh FHC, et al. Effect of closed endotracheal suction in high-frequency ventilated premature infants measured with electrical impedance tomography. *Intensive Care Med*. 2009; 35(12): 2130–2134, doi: [10.1007/s00134-009-1663-5](https://doi.org/10.1007/s00134-009-1663-5), indexed in Pubmed: [19774364](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19774364/).

Adres do korespondencji:

dr n. med. Szymon Białka
Klinika Anestezjologii i Intensywnej Terapii
SPSK Nr 1 w Zabrze
ul. 3 Maja 13–15, 41–800 Zabrze
e-mail: szymon.bialka@gmail.com

Otrzymano: 23.12.2016 r.

Zaakceptowano: 18.02.2017 r.