



Praca poglądowa/Review paper

Śledzenie ruchomości guza z wykorzystaniem systemu Radixact.  
Przegląd doniesień zaprezentowanych podczas konferencji ESTRO 38  
w Mediolanie.

*Tumor tracking using the Radixact system. Review of reports  
presented at the ESTRO 38 conference in Milan.*

Marta Adamczyk<sup>1,2</sup>, Tomasz Piotrowski<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Pracownia Planowania Teloradioterapii, Wielkopolskie Centrum Onkologii, Poznań, Polska

<sup>2</sup>Zakład Fizyki Medycznej, Wielkopolskie Centrum Onkologii, Poznań, Polska

---

**Streszczenie**

Celem artykułu jest podkreślenie najważniejszych aspektów technik śledzenia nowotworów, ze szczególnym naciskiem na przedstawienie możliwości technicznych systemu Radixact w kontekście śledzenia zmian pozycji nowotworu. Opisane zagadnienia zostały przedstawione podczas konferencji ESTRO 38, która odbyła się w Mediolanie, we Włoszech, w dniach 26-30 kwietnia 2019 r.

**Abstract**

The aim of this paper is to underline the most important recently related physical aspects of tumor tracking techniques with special emphasis on presentation of the technical capabilities of the Radixact system in the context of tracking tumor position changes. The described issues were presented during ESTRO 38 Conference which took place in Milan, Italy between 26-30 April 2019.

**Słowa kluczowe:** radioterapia wiązkami zewnętrznymi, ruchomość oddechowa, ruchomość przypadkowa, śledzenie ruchomości guza

**Keywords:** external beam radiation therapy, respiratory motion, aperiodic motion, tumor tracking

---

Adres do korespondencji

Marta Adamczyk

Zakład Fizyki Medycznej,

Wielkopolskie Centrum Onkologii, ul. Garbary 15, 61-866 Poznań, Polska

Telefon. +48 61 8850-553

e-mail: [marta.mocna@gmail.com](mailto:marta.mocna@gmail.com)

## Wstęp

Jednym z głównych wyzwań współczesnej radioterapii wiązkami zewnętrznymi jest możliwość kompensowania ruchomości oddechowej oraz wszelkich aperiodycznych (niewystępujących okresowo) ruchomości mimowolnych guza nowotworowego w tych wszystkich przypadkach klinicznych dla których ruchomość ta ma duże znaczenie. Stąd omawiane zagadnienie ruchomości guza i kompensacji jego ruchu, nie będzie dotyczyć wyłącznie nowotworów zlokalizowanych w obrębie klatki piersiowej (nowotwory płuc, piersi), ale również guzów wątroby, trzustki, prostaty czy na przykład zmian przerzutowych do nadnerczy [1]. W związku z tym problematyka kompensacji ruchomości mimowolnych guza u pacjentów leczonych radioterapią wiązkami zewnętrznymi to jeden z głównych nurtów tematycznych prezentowanych podczas konferencji organizowanej przez Europejskie Towarzystwo Radioterapii i Onkologii (European Society for Radiotherapy and Oncology, ESTRO) w Mediolanie w dniach 26-30.04.2019. Od strony aparaturowej, niewątpliwie największym zainteresowaniem cieszyły się pokazy i doniesienia ustne dotyczące możliwości technicznych nowego urządzenia mającego swoją premierę na konferencji, czyli Radixact™ Treatment Delivery System (Accuray Incorporated, Sunnyvale, CA, USA). W konsekwencji celem tego opracowania jest przedstawienie możliwości technicznych systemu Radixact w kontekście śledzenia zmian położenia guza.

## Metody kompensacji ruchomości guza – informacje ogólne

Najogólniej, metody kompensacji ruchomości mimowolnych (oddechowych, czyli periodycznych oraz przypadkowych, czyli aperiodycznych) można podzielić na dwie podstawowe grupy. Pierwsza z nich związana jest z rekonstrukcją obrazów zebranych podczas wykonywania tomografii komputerowej przed rozpoczęciem radioterapii. Druga grupa rozwiązań technologicznych dotyczy wszystkich metod kompensacji, które realizowane są w trakcie każdej kolejnej frakcji napromieniania w bunkrze terapeutycznym. Dodatkowo w grupie procedur kompensacji ruchomości mimowolnych, realizowanych w trakcie napromieniania pacjenta, należy wyróżnić dwie główne podgrupy:

- bramkowanie oddechowe (respiratory gating),
- oraz śledzenie zmian położenia guza (tumor tracking) [1,2].

Z uwagi na możliwość realizacji dziennej frakcji napromieniania podczas swobodnego oddechu pacjenta (bez konieczności przerywania dostarczania dziennej frakcji promieniowania), śledzenie ruchomości mimowolnej guza (tumor tracking) w czasie rzeczywistym było jednym z dominujących tematycznie aspektów raportowanych naukowo podczas konferencji ESTRO 38 w Mediolanie [3-11]. Należy tu podkreślić, że podążanie wiązki terapeutycznej za poruszającym się guzem rozpatrywane jest nie tylko w kontekście nowotworów płuc, ale również innych lokalizacji nowotworów, których położenie może znacząco zmieniać się w trakcie realizacji napromieniania. Najogólniej, poruszające się guzy można podzielić na takie, których pozycja:

- stopniowo dryfuje (dot. to np. guzów w obrębie lub bliskości kręgosłupa),
- nieprzewidywalnie przesuwa się (typowa cecha nowotworów prostaty oraz nowotworów ginekologicznych),
- lub porusza się w korelacji z torem oddechowym pacjenta (typowe dla nowotworów zlokalizowanych w obrębie jamy brzusznej i oczywiście klatki piersiowej) [12].

Od strony technicznej realizacja procedury śledzenia ruchomości guza (tumor tracking) jest możliwa poprzez zbudowanie modelu korelacji położenia guza nowotworowego z czasoprzestrzennymi koordynatami wykorzystywanej wiązki promieniowania jonizującego. Na podstawie wyników badań przedstawionych podczas prezentacji ustnych na konferencji ESTRO 38 w Mediolanie, zastosowanie metod śledzenia ruchomości guza pozwala na uzyskanie wysokiej dokładności dostarczania dawki do objętości guza przez cały czas realizacji leczenia wiązkami zewnętrznymi [3-12]. Dzięki temu zastosowanie procedury śledzenia umożliwia przygotowanie planów leczenia z minimalnym marginesem dla tzw. zaplanowanej objętości do napromieniania, czyli PTV (Planning Target Volume).

Pod tym kątem pojawiły się nawet wyniki badań, które dla guzów poruszających się w korelacji z kolejnymi fazami cyklu oddechowego raportują podobne objętości guza wyznaczone dla leczenia ze śledzeniem zmian położenia guza (tumor tracking) z jego objętościami leczonymi z bramkowaniem oddechowym (respiratory gating) przy zastosowaniu bardzo krótkiego okna czasowego [12]. Należy w tym miejscu wspomnieć, że pod pojęciem okna czasowego zasyta jest informacja o przedziale czasowym, w którym pacjent będzie napromieniany, czyli w jakim procencie cyklu oddechowego, z jego całości, promieniowanie będzie dostarczane zgodnie z parametrami przygotowanego wcześniej planu leczenia [2].

## **Śledzenie ruchomości guza z wykorzystaniem systemu Radixact**

Do tej pory dominującym, komercyjnie dostępnym, systemem terapeutycznym umożliwiającym leczenie wiązkami zewnętrznymi, który oferuje możliwość śledzenia zmian położenia guza i ich kompensowanie w trakcie leczenia, był CyberKnife (Accuray Incorporated, Sunnyvale, CA, USA). W praktyce klinicznej leczenie z wykorzystaniem systemu CyberKnife wiąże się z koniecznością zbudowania tzw. modelu korelacyjnego pomiędzy ruchem guza i pozycją ramienia aparatu terapeutycznego przed rozpoczęciem dziennej frakcji napromieniania. Weryfikacja poprawności zbudowanego modelu odbywa się w trakcie realizacji napromieniania pacjenta czyli w tzw. czasie rzeczywistym, a samo śledzenie może odbywać się dwutorowo, tak jak ma to miejsce podczas leczenia nowotworów zlokalizowanych w obrębie płuc. Wówczas ocenie podlega ruchomość ściany klatki piersiowej, na podstawie informacji zebranej przez zewnętrzne znaczniki odbijające promieniowanie podczerwone umieszczone na kamizelce opinającej klatkę piersiową pacjenta. Równoległe system obrazowy (dwie lampy rentgenowskie przytwierdzone do sufitu bunkra terapeutycznego oraz detektory promieniowania rentgenowskiego umieszczone w podłodze) umożliwiają wykonanie i zebranie serii zdjęć rentgenowskich.

Podczas konferencji ESTRO w Mediolanie w 2019 roku, przedstawiono najmłodsze urządzenie z rodziny tomoterapii tj. Radixact™ Treatment Delivery System (Accuray Incorporated, Sunnyvale, CA, USA). Tym samym obok CyberKnife jest to drugie komercyjnie dostępne urządzenie pozwalające na wykorzystywanie opcji śledzenia ruchomości guza podczas napromieniania wiązkami zewnętrznymi. Na pierwszy rzut oka, metody spiralnego dostarczania dawki nie pozwalają na pełną kontrolę tzw. zarządzania ruchem, która jest niezbędna podczas realizacji metod kompensacji ruchomości guza podczas napromieniania. Ciągły ruch szczęk oraz binarnego kolimatora wielolistkowego (MLC, multileaf collimator) oraz stołu terapeutycznego utrudniają przerwanie i wznowienie dostarczania promieniowania w sytuacji napromieniania w danej fazie cyklu oddechowego (np. tak jak ma to miejsce podczas leczeniem na zatrzymanym, głębokim wdechu – deep inspiration breath hold). Mimo to korekta ruchu aparatury tomoterapeutycznej w czasie rzeczywistym okazała się funkcjonalnością kompatybilną z opcją spiralnego dostarczania dawki w oparciu o obrazowanie i metody korekty ruchu zaadoptowane z systemu CyberKnife [12]. Oznacza to, że synchronizacja pozycji emitowanej wiązki promieniowania z poruszającym się obszarem napromienianym jest w systemie Radixact co do idei jest analogiczna jak w CyberKnife. Stąd urządzenie Radixact wyposażone jest w taką samą kamerę pozwalającą na śledzenie ruchomości oddechowej leczonego pacjenta. Analogiczne jest również budowanie tzw. modelu korelacyjnego pomiędzy ruchem guza i pozycją kompensujących ten ruch elementów składowych aparatu (w przypadku Radixact tymi elementami są szczęki oraz listki MLC). Oczywiście budowanie modelu jest możliwe z wykorzystaniem odpowiednich algorytmów, które umożliwiają również przewidywanie i analizę aktualnej pozycji guza. Pod kątem wykorzystywanego systemu rentgenowskiego do weryfikacji obrazowej również istnieje pełna analogia. Informacja o potrzebie wprowadzenia modyfikacji otwarcia szczęk oraz położenia listków MLC z uwagi na śledzenie ruchomości guza, zarówno na etapie weryfikacji zbudowanego modelu, jak również na etapie jego wykorzystywania podczas napromieniania pacjenta wykorzystuje tzw. algorytm przewidujący. Ta składowa zbudowanego modelu rekompensuje potencjalne opóźnienia systemowe wynikające z konieczności zebrania i analizy danych dotyczących pozycji guza [2,12-14].

Od strony technicznej przedstawiona wersja urządzenia Radixact, pozwala na uzyskanie latencji kompensacji ruchomości oddechowej wynoszącej ok. 70 ms. Wartość ta to składowa 10-ms latencji wynikającej z opóźnień generowanych przez kamerę śledzącą ruch oddechowy (pracującą z częstotliwością 100Hz). Kolejne 10 ms jest związane z obliczeniem aktualnej pozycji napromienianego guza i przesłaniem tej informacji do kontrolera wbudowanego w gantry aparatu. Pozostałe 50 ms to czas niezbędny na fizyczne

„przejście” pomiędzy stanem otwarcia i zamknięcia listków MLC. Należy tu podkreślić, że czas reakcji szczęk jest zdecydowanie krótszy (ograniczony do 10 ms). W związku z tym korekta ruchomości mimowolnej w osi poprzecznej (głowa-nogi) charakteryzuje się wartością latencji zredukowaną do 30 ms. Ponieważ wyżej zaprezentowane wartości latencji są niskie, dla celów kompensacji detektowanych ruchomości guza, wartości przesunięcia szczęk oraz listków MLC wyznaczane są głównie z wykorzystaniem metod ekstrapolacji liniowej [12]. **Modelowanie ruchomości oddechowej** Model ruchomości oddechowej jest funkcją następujących zmiennych: -amplitudy ruchomości oddechowej w momencie wykonywania obrazowania weryfikacyjnego (rentgenowskiego), -rzeczywistej pozycji znaczników (ocenianej na zdjęciach weryfikacyjnych) w odniesieniu do ich przewidywanej przez algorytm lokalizacji. Dzięki tym danym możliwe jest obliczenie korygujących ruchomość oddechową pozycji szczęk i MLC. Oczywiście algorytm bierze pod uwagę pozycję lampy rentgenowskiej oraz pozycję stołu terapeutycznego podczas wykonywania zdjęcia weryfikacyjnego. Należy w tym miejscu podkreślić, że zbudowany przed rozpoczęciem napromieniania model ruchomości oddechowej pacjenta może po kilkunastu lub kilkudziesięciu minutach leczenia wiązkami zewnętrznymi ulec zmianie. System dostosowuje się do tej zmiany poprzez ponowną optymalizację zbudowanego modelu za każdym razem, gdy wykonany jest nowy obraz weryfikacyjny. W praktyce klinicznej (bazując głównie na danych zebranych podczas leczenia z wykorzystaniem śledzenia ruchomości oddechowej guza dostępnego na aparacie CyberKnife), przetworzenie obrazu i aktualizacja modelu trwa około 1 sekundy. Dodatkowo algorytm modelujący ruchomość oddechową nadaje większą wagę najnowszym zdjęciom i w konsekwencji informacji o położeniu guza uzyskanej na ich podstawie [12,13].

### **Modelowanie ruchomości innej niż ruchomość oddechowa**

Tak jak wspomniano wcześniej, nie w każdym obszarze ruchomość mimowolna koreluje z ruchomością oddechową pacjenta. W odpowiedzi na ten aspekt leczenia system Radixact (podobnie jak CyberKnife) pozwala na optymalizację modelu przewidywania ruchomości, uniezależniając stosowaną do modelowania funkcję od amplitudy oddechu. Podczas prezentacji systemu Radixact podkreślano, że w tym przypadku zastosowany algorytm bierze pod uwagę statyczne przesunięcia w stosunku do tzw. pozycji odniesienia. W systemie CyberKnife taka pozycja może być ustalona z procesie bezpośredniego śledzenia (direct tracking). W ten sposób zdefiniowana jest opcja śledzenia w oparciu o pozycję guza. Jest ona możliwa do zastosowania tylko w przypadku, gdy guz charakteryzuje się odpowiednim wysyceniem na tle obrazowanych rentgenowsko tkanek sąsiadujących lub gdy pozycja guza (i jej zmiany) są wizualizowane z wykorzystaniem markerów wszczepionych w jego objętość (fiducial tracking). Ponadto w tych wszystkich przypadkach, w których guz położony jest w bezpośrednim sąsiedztwie kręgosłupa, a więc jego widoczność na tle kręgosłupa nie jest wystarczająca, aby móc wykorzystać opcje śledzenia bezpośredniego, stosuje się tzw. śledzenie pośrednie w oparciu o śledzenie zmian pozycji kręgosłupa (spine tracking). Zgodnie z rekomendacją Accuray Inc. odległość obrazowanej zmiany od kręgosłupa powinna być w takich przypadkach ograniczona do 6 cm. Dla omawianego podczas konferencji ESTRO prototypowego systemu Radixact prezentowano możliwość śledzenia z wykorzystaniem markerów wszczepionych w objętość guza. W tym przypadku algorytm modelujący kompensowanie ruchomości innej niż oddechowa bierze pod uwagę jedynie informacje o pozycji wizualizowanych znaczników z najnowszych zdjęć weryfikacyjnych. Po drugie, podczas leczenia model jest nieustannie optymalizowany, wykorzystując tylko kilka ostatnich obrazów weryfikacyjnych. Dzięki temu zapewnione jest jego ciągle aktualizowanie i korygowanie. W każdym przypadku śledzenia guza poruszającego się w sposób aperiodyczny należy świadomie wybrać tzw. parametr starzenia (maximum image age) wyrażony w sekundach. W praktyce wybór ten rzutuje na częstość wykonywania weryfikacyjnych zdjęć rentgenowskich podczas napromieniania pacjenta, a świadomy wybór w tym przypadku oznacza zgodność z przewidywaną częstością poruszania się leczonego guza.

### **Podsumowanie**

Przedstawiony system Radixact pozwala na korzystanie z jednego z trzech dostępnych opcji śledzenia guza:

1. Śledzenie ruchomości innej niż ruchomość o charakterze periodycznym z wykorzystaniem



wszczepionych markerów

2. Śledzenie ruchomości oddechowej w oparciu o zmianę pozycji wszczepionych do objętości guza markerów
3. Śledzenie ruchomości oddechowej w oparciu o wizualizację zmian położenia wysyconego guza

Wszelkie wyżej wymienione opcje śledzenia dostępne są podczas realizacji leczenia z wykorzystaniem systemu Radixact dla zaplanowanej szerokości pola (field width) wynoszącej 1.0 cm lub 2.5 cm. Niezależnie od wybranej szerokości pola możliwe jest wybranie opcji dostarczania promieniowania ograniczonego przez nieruchome szczęki o ustalonej szerokości napromienianego pola (fixed jaws) lub szczęk zmieniających swoje położenie w sposób dynamiczny w takcie napromieniania pacjenta (dynamic jaws).

Niewątpliwą zaletą systemu Radixact jest to, że jego zastosowania nie wydłuża czasu leczenia wiązkami zewnętrznymi, gdyż obrazy rentgenowskie są rejestrowane, gdy promieniowanie jest włączone, a zatem ich akwizycja nie powoduje przerwania leczenia. Co więcej, śledzenie ruchu napromienianej zmiany nowotworowej w czasie rzeczywistym (za pomocą szczęk i MLC) oznacza, że czas naświetlania nie jest wydłużany podczas wykonywania korekcji ruchu napromienianego guza. Stąd podczas prezentacji możliwości systemu Radixact bardzo często podkreśla się, że w porównaniu z bramkowaniem oddechowym, system ten może mieć tzw. 100% cykl pracy [12-14].

Na koniec warto wspomnieć o zgodności dostarczania zaplanowanych rozkładów dawek z danymi pomiarowymi uzyskanymi poprzez odtworzenie ruchomości na fantomie [12-14].

Podsumowując, przedstawione urządzenie Radixact™ Treatment Delivery System (Accuray Incorporated, Sunnyvale, CA, USA) pozwala w pełni śledzić zarówno ruchomość oddechową, jak również ruchomości przypadkowe leczonego nowotworu. Kompensacja ruchomości wykorzystująca zmianę pozycji szczęk oraz binarnego kolimatora wielolistkowego jest metodą pozwalającą na uzyskanie dużej dokładności napromieniania pacjentów z ruchomymi guzami.

### **Konflikt interesu / Conflict of interest**

Nie występuje. / None.

### **Finansowanie / Financial support**

Artykuł został sfinansowany z grantu Wielkopolskiego Centrum Onkologii w Poznaniu, nr 4/2019(208) [projekt badawczy nr 11/01/2019/FIZ/WCO/004]. / This work was supported by the Greater Poland Cancer Centre in Poznan, grant no 4/2019(208) [research project no 11/01/2019/FIZ/WCO/004].

### **Etyka / Ethics**

Treści zaprezentowane w artykule są zgodne z zasadami Deklaracji Helsińskiej, dyrektywami EU oraz ujednoliconymi wymaganiami dla czasopism biomedycznych.

### **Piśmiennictwo / References**

- [1] M. Aznar. Gating and breath-hold techniques in Radiation Therapy. Materiały zjazdowe konferencji ESTRO 38, Mediolan, 26-30.04.2019
- [2] M. Adamczyk, T. Piotrowski, Respiratory motion and its compensation possibilities in the modern external beam radiotherapy of lung cancer, NOWOTWORZY Journal of Oncology 2017;67:292-6.
- [3] M. Glitzner, P. Woodhead, J. Legendijk, B. Raaymakers. MLC-tracking latencies on Elekta Unity. Materiały zjazdowe konferencji ESTRO 38, Mediolan, 26-30.04.2019.
- [4] J. Bertholet, B. Eiben, M.J. Menten, E.H. Tran, D.J. Hawkes, S. Nill, J.R. McClelland, U. Oelfke. Validation of motion-including dose reconstruction on a ground-truth time-resolved moving anatomy. Materiały zjazdowe konferencji ESTRO 38, Mediolan, 26-30.04.2019.
- [5] E. Worm, R. Hansen, M. Høyer, J. Bertholet, B. Weber, A. Dolcet, P.R. Poulsen. Detailed PTV margin

- assessment for liver SBRT with CBCT- guidance or realtime monitoring and gating. Materiały zjazdowe konferencji ESTRO 38, Mediolan, 26-30.04.2019.
- [6] J. Booth, V. Caillet, A. Briggs, N. Hardcastle, D. Jayamanne, K. Szymura, O. Ricky, T. Eade, P. Keall. MLC tracking for lung cancer SABR is clinically feasible: results of first-in-human clinical trial. Materiały zjazdowe konferencji ESTRO 38, Mediolan, 26-30.04.2019.
- [7] S. Pallotta, S. Calusi, L. Masi, L. Marrazzo, C. Talamonti, L. Livi, G. Simontacchi, L. Foggi, R. Lisci. A new tool to test tracking systems based on tumour detection. Materiały zjazdowe konferencji ESTRO 38, Mediolan, 26-30.04.2019.
- [8] P. Keall, D.T. Nguyen, R. O'Brien, E. Hewson, H. Ball, P. Poulsen, J. Booth, P. Greer, P. Hunter, L. Wilton, R. Bromley, J. Kipritidis, T. Eade, A. Kneebone, G. Hruby, T. Moodie, A. Hayden, S. Turner, S. Arumugam, M. Sidhom, N. Hardcastle, S. Siva, K. Tai, V. Gebiski, J. Martin. Real-Time tracking improves treatment: The TROG Stereo Prostate Ablative Radiotherapy with KIM trial. Materiały zjazdowe konferencji ESTRO 38, Mediolan, 26-30.04.2019.
- [9] M. Cardoso, S. Vieira, A. Martins, A. Soares, M. Possanzini, J. Morales, C. Greco. IMRT in breath hold for left breast cancer patients: surface tracking and clinical implementation. Materiały zjazdowe konferencji ESTRO 38, Mediolan, 26-30.04.2019.
- [10] S. Kataria, N. Aghdam, M. Repka, M. Marin, L. Campbell, S. Suy, S. Collins, E. Anderson, J. Lischalk, B. Collins. Robotic SBRT with fiducial tracking for medically inoperable peripheral stage I NSCLC: final report. Materiały zjazdowe konferencji ESTRO 38, Mediolan, 26-30.04.2019.
- [11] N. Scher, G. Bouilhol, R. Tannouri, I. Khemiri, A. Vouillaume, N. Sellami, R. Von Eyben, L. Rotenberg, H. Lamallem, O. Bauduceau, M. Bollet, D. Foster, A. Toledano. Safety and efficacy of fiducial marker implantation for robotic SBRT with fiducial tracking. Materiały zjazdowe konferencji ESTRO 38, Mediolan, 26-30.04.2019.
- [12] E. Schnarr, M. Beneke, D. Casey, E. Chao, J. Chappelow, A. Cox, D. Henderson, P. Jordan, E. Lessard, D. Lucas, A. Myronenko, C. Maurer. Feasibility of real-time motion management with helical tomotherapy. *Med Phys.* 2018;45(4):1329-1337.
- [13] Smilowitz J. Real-time motion synchronization on the Radixact System. Materiały zjazdowe konferencji ESTRO 38, Mediolan, 26-30.04.2019.
- [14] Chao EH, Lucas D, Schnarr E. Evaluation of TomoTherapy dose calculations with intrafractional motion and motion compensation. *Med Phys.* 2018 Jan;45(1):18-28.