



Przegląd wybranych metod obrazowych stosowanych w trakcie realizacji teleradioterapii

Dawid Bodusz

Zakład Radioterapii, Narodowy Instytut Onkologii PIB Oddział Gliwice, ul. Wybrzeże Armii Krajowej 15, 44-101 Gliwice, tel. +48 32 278 80 54,

e-mail: dawid.bodusz@io.Gliwice.pl

Wyższa Szkoła Humanitas w Sosnowcu, ul. Jana Kilińskiego 43, 41-200 Sosnowiec

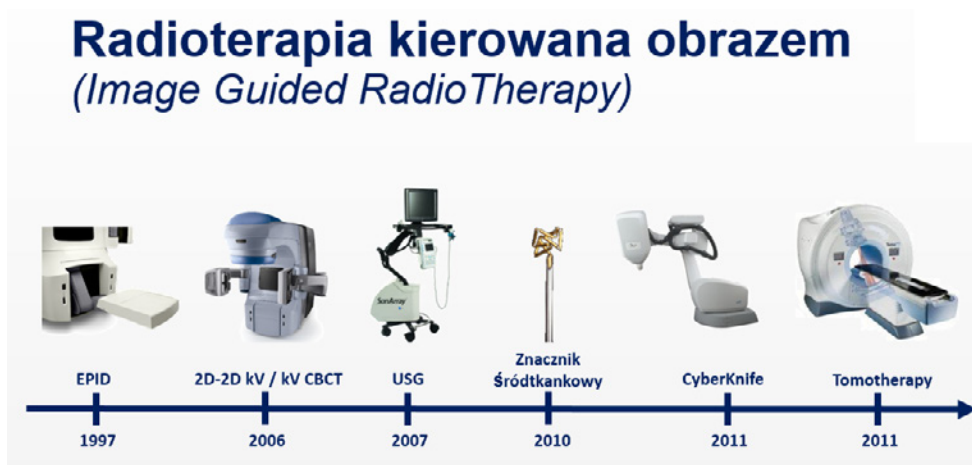
Polskie Towarzystwo Elekroradiologii

Wprowadzenie i krótka historia

Metody obrazowe dostępne w trakcie realizacji teleradioterapii są współcześnie nieodzownym elementem prowadzonej terapii z zastosowaniem promieniowania jonizującego. Tego typu obrazowanie i pozycjonowanie chorych nazwane zostało radioterapią kierowaną obrazem (IGRT – *image guided radiation therapy*). Rozwój technik teleradioterapii umożliwiał tworzenie coraz bardziej precyzyjnych i wysublimowanych planów leczenia, lecz wymagał wprowadzenia narzędzi umożliwiających zachowanie precyzji w trakcie realizacji leczenia. Można przyjąć, że pierwsze systemy radioterapii kierowanej obrazem zostały wprowadzone do praktyki klinicznej we wczesnych latach 90., a głównym powodem było wprowadzenie technik dynamicznych, które niejako wymagały przeprowadzania weryfikacji nie tylko potężenia objętości tarczowej, ale również narządów krytycznych w celu prawidłowego odtwarzania planu leczenia. Nie oznacza to, że wcześniej nie zwracano uwagi na prawidłowe pozycjonowanie chorych. Już w latach 1960-1970 zaczęto stosować tzw.

weryfikację portalową, czyli obrazowanie pola napromieniania wiązką terapeutyczną w celu weryfikacji geometrii napromieniania. Warto również wspomnieć, że w latach 1950-1960 w przypadku urządzeń nazywanych bombami kobaltowymi montowano czasem lampy rentgenowskie służące do wykonywania rentgenowskich zdjęć weryfikacyjnych [1].

Na terenie Polski, choć trudno jednoznacznie wskazać konkretne daty wprowadzenia poszczególnych metod obrazowych, za moment wprowadzenia zdjęć portalowych można przyjąć lata 90., a wprowadzenia typowych technik radioterapii kierowanej obrazem – początek XXI wieku (2006). Warto wspomnieć, że przed rokiem 2006 działały systemy ExacTrac X-Ray (Brainlab) umożliwiające weryfikację pozycji chorych z wykorzystaniem obrazowania rentgenowskiego. W metodzie tej możliwe było wykonanie dwóch ortogonalnych zdjęć w projekcji skośnej. Obrazowanie oparte na wykorzystaniu ultradźwięków zostało implementowane w roku 2007, a metody obrazowe dostępne na aparacie CyberKnife oraz Tomotherapy zostały wprowadzone w roku 2011 (Ryc. 1).



Ryc. 1 Moment implementacji nowych metod IGRT w Polsce

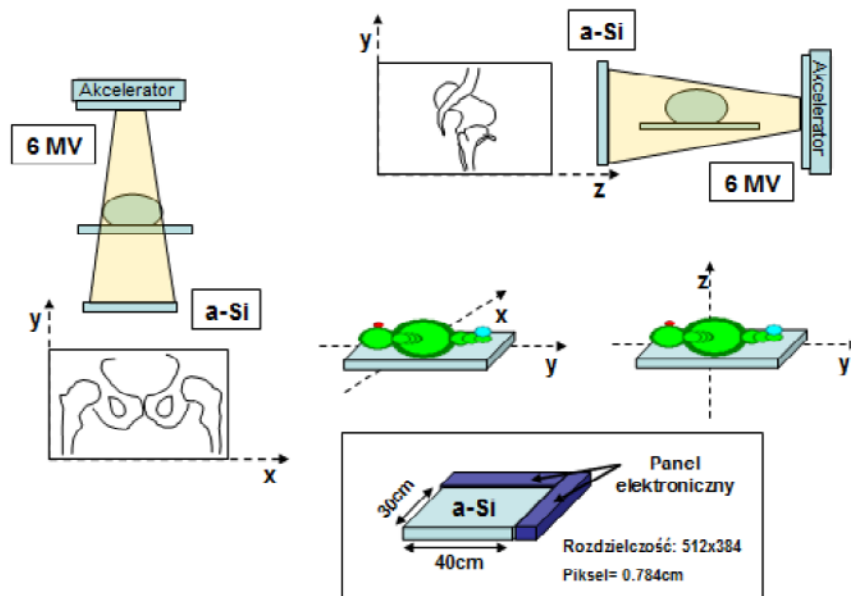
Źródło: Własne.

Na przestrzeni lat zmieniało się również podejście do sposobu prowadzenia weryfikacji czy też pozycjonowania chorych z zastosowaniem technik radioterapii kierowanej obrazem. Na początku nie było konsensusu, czy weryfikacja z wykorzystaniem obrazowania powinna się odbywać przed każdym seansem radioterapii czy też z jakąś określoną częstotliwością. W związku z tym stosowano różne protokoły w zależności od ośrodka radioterapii. Jednym z przykładów może być protokół NAL (*no-action level*), który polegał na wykonywaniu obrazowania przy pierwszych trzech lub pięciu frakcjach leczenia, a następnie weryfikacja była powtarzana raz w tygodniu [2, 3]. Protokół podlegał modyfikacji w zależności od wyników weryfikacji (innymi słowy od niezgodności geometrycznych pozycjonowania). Powodem, dla którego część ośrodków unikała wykonywania obrazowania przed każdym seansem radioterapii, była dodatkowa dawka promieniowania, którą otrzymywał chory. Ostatecznie zysk terapeutyczny wynikający z codziennej weryfikacji spowodował, że obrazowanie przed każdym seansem radioterapii jest standardowym schematem postępowania. Ponadto obrazowanie często wykorzystywane jest również w trakcie trwania seansu radioterapii, jeżeli monitorowanie położenia objętości tarczowej jest klinicznie wskazane.

Zdjęcia portalowe (EPID – *electronic portal imaging device*)

Weryfikacja portalowa obecnie nie jest podstawową metodą pozycjonowania chorych na aparacie terapeutycznym. Niemniej wciąż jest wartościowym narzędziem służącym chociażby do oceny geometrii pól terapeutycznych w technikach statycznych. Należy zwrócić uwagę na fakt, że akty wykonawcze do ustawy Prawo atomowe utrzymują obowiązek wykonywania

zdjęć portalowych w technikach statycznych niezależnie od stosowania innych technik z zakresu radioterapii kierowanej obrazem. Zdjęcia portalowe to technika, w której możliwe jest wykonanie cyfrowych zdjęć radiologicznych przed, w trakcie (z wiązki promieniowania będącej składową planu leczenia) oraz po zakończeniu seansu radioterapii z wykorzystaniem wiązki terapeutycznej (technika megawoltowa). Źródło promieniowania stanowi głowica aparatu terapeutycznego usytuowana równolegle do detektora promieniowania (kasyety portalowej). Obrazy radiologiczne można uzyskać z pola terapeutycznego lub z wykorzystaniem specjalnie utworzonych pól weryfikacyjnych w systemie planowania leczenia. Kaseeta portalowa zbudowana jest z krzemu amorficznego i stanowi zewnętrzny detektor obrazu (IDU – *image detection unit*). Zebrana informacja przekazywana jest następnie do jednostki cyfrującej (DU – *digitization unit*), w której następuje przetworzenie sygnału analogowego na sygnał cyfrowy z zastosowaniem konwertera analogowo-cyfrowego (ADC – *analog-to-digital converter*), który kodowany jest w jednostce elektronicznej (UCB – *universal control board*) znajdującej się w sterowni pracowni akceleratorowej. Zakodowany obraz przekazywany jest do kolejnej karty rozszerzeń (FPB – *frame processing board*) w magistrali komunikacyjnej (PCI – *peripheral component interconnect*), gdzie ulega dalszemu przetworzeniu i odtworzeniu z zastosowaniem karty graficznej na monitorze stacji sterującej bądź też zapisaniu na dysku twardym. Ze względu na dwuwymiarowość uzyskanych obrazów weryfikacja możliwa jest jedynie w dwóch kierunkach. Dopiero zastosowanie dwóch prostopadłych do siebie zdjęć umożliwia uzyskanie wartości niezgodności w trzech kierunkach (a przez to weryfikację w trzech wymiarach) [4, 5]. Zasadę działania weryfikacji portalowej na przykładzie PortalVision™ przedstawia rycina 2.



Ryc. 2 Schemat działania systemu portalowego (EPID)
Źródło: Własne.



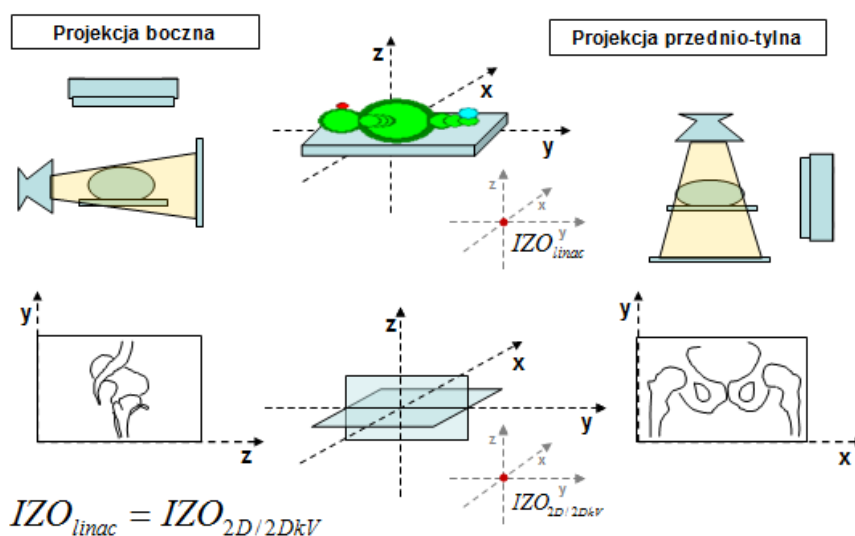
Obrazowanie rentgenowskie 2D

Wprowadzenie tej metody obrazowej umożliwiło uzyskiwanie – lepszych od zdjęć portalowych – rentgenowskich zdjęć weryfikacyjnych. System ten niezależnie od komercyjnego rozwiązania składa się zasadniczo z dwóch podstawowych elementów: lampy rentgenowskiej oraz detektora promieniowania (krzem amorficzny) umieszczonych na dwóch niezależnych ramionach zainstalowanych do akceleratora medycznego. Cały system weryfikacyjny sprzężony jest z aparatem terapeutycznym. Ze względów klinicznych rzadko wykorzystuje się pojedyncze zdjęcie rentgenowskie; najczęściej są to dwie prostopadłe do siebie projekcje. Wykorzystanie dwóch ortogonalnych zdjęć rentgenowskich umożliwia weryfikację pozycji w przestrzeni, a technikę tę nazywa się 2D/2D kV (oznacza dwa dwuwymiarowe zdjęcia rentgenowskie).

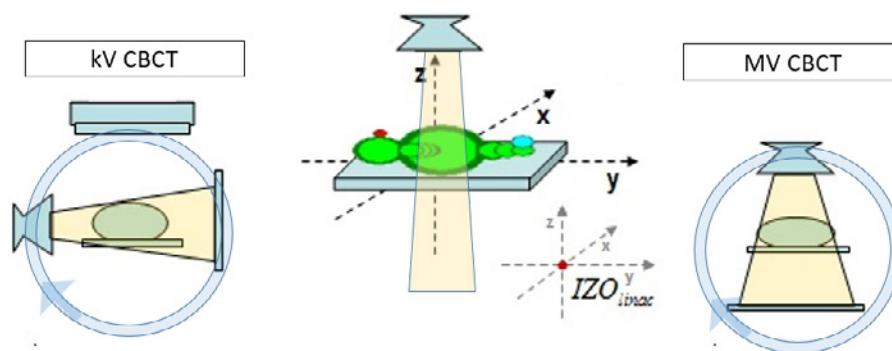
Technika 2D/2D kV polega na wykonaniu dwóch zdjęć ortogonalnych w projekcji przednio-tylnej (kąt lampy rentgenowskiej 0° , kąt głowicy przyspieszacza liniowego 90°) lub tylno-przedniej (kąt lampy rentgenowskiej 180° , kąt głowicy przyspieszacza liniowego 0°) oraz bocznej (kąt lampy rentgenowskiej 90° lub 270° , kąt głowicy przyspieszacza liniowego 0° lub 180°). Zdjęcia te wykonane są z zastosowaniem wiązki kilowoltowej emitowanej przez lampę rentgenowską. Dane odczytane na detektorze promieniowania zostają przesłane w postaci cyfrowej do jednostki centralnej (komputer), gdzie podlegają przetworzeniu z wykorzystaniem dedykowanych im algorytmów na obraz radiologiczny (Ryc. 3). Weryfikacja ułożenia chorego względem pozycji zaplanowanej odbywa się poprzez dopasowanie uzyskanych obrazów z odpowiadającymi im cyfrowymi obrazami zrekonstruowanymi na podstawie obrazów tomografii komputerowej (DRR – *Digitally reconstructed radiograph*) z systemu

planowania leczenia (TPS – *treatment planning system*). Niezgodność pomiędzy pozycją zaplanowaną a rzeczywistą określana jest na podstawie wartości przesunięcia izocentrum, zdefiniowanego w oparciu o uzyskane obrazy, względem izocentrum wyznaczonym w TPS. Izocentrum definiowane jest na wykonywanych zdjęciach radiologicznych zgodnie z rzeczywistym położeniem izocentrum aparatu terapeutycznego [6]. Niezgodność pomiędzy izocentrum aparatu a izocentrum obrazowania czyni ten system nieprecyzyjnym narzędziem weryfikacji. Proces pozycjonowania z zastosowaniem systemu 2D/2D kV jest w pełni zautomatyzowany. Dopasowanie zdjęć może odbywać się automatycznie (z wykorzystaniem dostępnych algorytmów) bądź też może być wykonywane samodzielnie przez operatora. Zmiana pozycji stołu oraz wysunięcie ramion ze źródłem i detektorem promieniowania odbywa się poprzez panel sterujący zainstalowany w sterowni aparatu terapeutycznego. Zasada działania systemu przedstawiona jest w postaci graficznej na rycinie 3.

Warto zaznaczyć, że współcześnie możliwe jest wykonywanie zdjęć ortogonalnych nie tylko w podanych powyżej kątach obrazowania, ale w zasadzie z dowolnego kąta wokół chorego. Dostępne narzędzia umożliwiają również tworzenie obrazów referencyjnych bezpośrednio na aparacie terapeutycznym, co przy pierwszych systemach IGRT możliwe było tylko w TPS. Ponadto obrazowanie można wykonywać z uwzględnieniem ruchomości oddechowej chorego, co jest istotne w przypadku realizacji leczenia z bramkowaniem oddechowym. Dodatkową opcją jest łączenie obrazów wykonanych w dwóch różnych technikach – z wykorzystaniem wiązki rentgenowskiej i terapeutycznej. Istnieje również opcja tzw. obrazowania wyzwalanego, czyli wykonywania pojedynczych projekcji rentgenowskich z zadaną częstotliwością w celu monitorowania pozycji chorego w trakcie realizacji wiązki terapeutycznej.



Ryc. 3 Schemat działania obrazowania rentgenowskiego w technice 2D/2D kV
Źródło: Własne.



Ryc. 4 Schemat działania CBCT w teleradioterapii
Źródło: Własne.

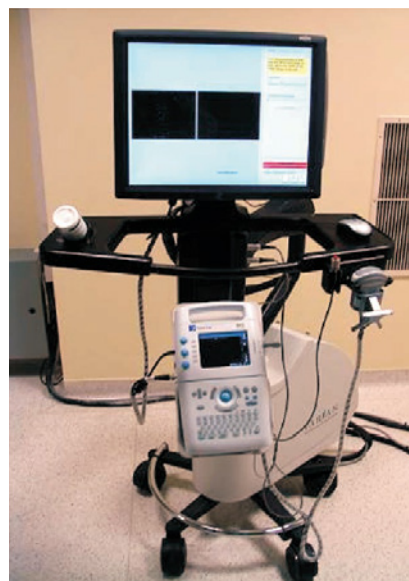
Stożkowa tomografia komputerowa (CBCT)

To technika opierająca się na wykorzystaniu źródła promieniowania i detektora promieniowania podobnie jak w przypadku obrazowania rentgenowskiego czy portalowego opisanych powyżej. Zasadniczo obrazowanie może odbywać się z wykorzystaniem wiązki megawoltowej lub kilowoltowej, co ze względu na charakterystykę obu energii ma swoje implikacje w uzyskanych obrazach [7]. Obie metody mają swoje zalety, jak i wady. Za moment wdrożenia CBCT do praktyki klinicznej w radioterapii kierowanej obrazem przyjmuje się rok 2001 (w Polsce rok 2006).

W celu wykonania obrazowania układ źródło-detektor wykonuje obrót wokół pacjenta, zapisując serię obrazów dwuwymiarowych (Ryc. 4). Zakres obrotu zależy od obszaru obrazowania oraz wybranej opcji. Możliwy jest zarówno pełny obrót, jak i częściowy. Obszar obrazowania może być modyfikowany w zależności od potrzeb, przy czym jego maksymalny rozmiar limitowany jest ograniczeniami technicznymi i wynosi maksymalnie 30-40 cm. Obecnie możliwe jest obrazowanie tą metodą dłuższych obszarów poprzez wykorzystanie tzw. obrazowania łączonego. Zebrane obrazy podlegają w dalszym etapie rekonstrukcji do obrazów trójwymiarowych z wykorzystaniem podobnych algorytmów jak w tomografii komputerowej. Należy zauważyć, że obecnie uzyskiwane w tej metodzie obrazy, choć nie mają wartości diagnostycznej, to pozwalają na precyzyjną weryfikację na podstawie tkanek miękkich. Co ważne, współcześnie możliwe jest wykonywanie obrazowania CBCT z uwzględnieniem ruchomości oddechowej chorego, co ma istotne znaczenie przy radioterapii z brankowaniem oddechowym lub na tzw. głębokim wdechu.

Obrazowanie oparte na ultradźwiękach

To metoda obrazowania, którą można uznać za najmniej używaną we współczesnej teleradioterapii. Związane jest to z rozwojem technik wykorzystujących promieniowanie rentgenowskie – głównie obrazowania tomografii komputerowej wiązką stożkową (CBCT – z ang. *Cone beam computed tomography*). Na świecie dostępnych jest kilka komercyjnych rozwiązań, z których najpowszechniej przyjętą się system BAT oraz SonArray. Największa



Ryc. 5 System SonArray
Źródło: Własne.

różnica pomiędzy tymi systemami polegała na tym, że system BAT wykorzystywał dwuwymiarowe obrazy ultrasonograficzne, natomiast system SonArray (Ryc. 5) pozwalał na zapis serii obrazów i umożliwiał rekonstrukcję w trzech płaszczyznach. Podobne rozwiązanie dotyczące trójwymiarowej rekonstrukcji wykorzystywane było w systemie Restitu. Ta metoda obrazowania obarczona jest jednak wadami, takimi jak: subiektywność oceny obrazu ultrasonograficznego czy przesunięcie objętości tarczowej w wyniku ucisku głowicy ultrasonograficznej. Niewątpliwą zaletą jest natomiast brak dodatkowej dawki promieniowania pochodzącej z metod obrazowych. W związku z tym metoda ta umożliwia wielokrotne obrazowanie. Współcześnie ultrasonografia może znajdować swoje zastosowanie jako dodatkowa metoda obrazowa w trakcie terapii z wykorzystaniem promieniowania jonizującego. Proste ultrasonograficzne skanery pęcherza moczowego pozwalają na szybką weryfikację objętości pęcherza moczowego przed wykonaniem obrazowania rentgenowskiego. Tym samym w sytuacji nieprawidłowego przygotowania do seansu radioterapii unikamy niepotrzebnej dawki promieniowania. Takie rozwiązanie jest również interesujące w przypadku teleradioterapii z wykorzystaniem aparatu CyberKnife, gdzie nie ma możliwości wykonania objętościowego



obrazowania. Zastosowanie prostego skanera ultrasonograficznego pozwala na ocenę prawidłowości wypełnienia pęcherza moczowego, co może przyczynić się do zapewnienia precyzji w odtwarzalności planu leczenia [8-11].

Spiralna tomografia komputerowa (MVCT, kVCT)

Spiralna tomografia komputerowa to rozwiązanie charakterystyczne dla tomoterapii. Implementacja tej metody obrazowania była możliwa ze względu na budowę i zasadę działania aparatu terapeutycznego. Pierwotnie dostępna była tylko metoda wykorzystująca promieniowanie megawoltowe, ale obecnie możliwe jest również stosowanie obrazowania kilowoltowego. Sama zasada obrazowania jest podobna do standardowej tomografii komputerowej. W przypadku MVCT energia emitowanej wiązki obniżana jest ze standardowych 6 MV do 3,5 MV. Detektor obrazowania zbudowany jest z gazu ksenonowego oddzielonego od siebie wąskimi przegrodami wolframowymi. Wśród parametrów obrazowania, które można wybrać, jest m.in. grubość warstwy skanowania, co ma istotne znaczenie pod względem czasu wykonania obrazowania, ale i zakresu uzyskanych informacji (jakości obrazu). Metoda ta jest dobrym rozwiązaniem w przypadku obrazowania chorych z wszczepionymi protezami, ponieważ w porównaniu do kVCBCT obrazy MVCT nie mają tylu artefaktów od protezy. Sam zakres obszaru obrazowania to aż 160 cm długości, co jest istotne w przypadku napromieniania długich obszarów (np. w radioterapii osi mózgowo-rdzeniowej) [1].

Obrazowanie w mikroradiokirurgii CyberKnife


W zasadzie system obrazowania w tym urządzeniu jest prosty i oparty na dwóch lampach rentgenowskich zamontowanych do sufitu oraz dwóch detektorach montowanych w podłodze. Cały układ pozwala na wykonywanie zdjęć ortogonalnych w projekcji skośnej, co umożliwi weryfikację w trzech osiach współrzędnych. Warto jednak wspomnieć, że system ten został przygotowany do automatycznej weryfikacji względem struktur kostnych, znaczników śródtkankowych lub nawet samego guza nowotworowego, jeśli widoczny jest na obrazach rentgenowskich. Ideą tego systemu było ciągłe monitorowanie pozycji chorego lub guzem nowotworowym w przypadku ruchomości oddechowej. Niewątpliwie wadą tego systemu jest brak możliwości obrazowania objętościowego, przez co tracone są informacje dotyczące tkanek miękkich, w tym istotnych narządów krytycznych [1].

Obrazowanie z wykorzystaniem tomografii rezonansu magnetycznego

To najnowsza metoda obrazowania w radioterapii kierowanej obrazem, wymagająca zainstalowania przyspieszacza liniowego

wraz z opcją tomografii rezonansu magnetycznego. Ze względu na występowanie pola magnetycznego aparat terapeutyczny wymagał takiej modyfikacji, aby pole magnetyczne nie wpływało na wiązkę terapeutyczną. Obecnie dostępnych jest kilka rozwiązań komercyjnych, które umożliwiają różne metody obrazowania i wykorzystują różne natężenia pola magnetycznego (0,35-3 T). W Polsce, na ten moment, nie został wdrożony żaden z tych aparatów.

Podsumowanie

Przedstawione metody nie obejmują wszystkich możliwości obrazowania na aparatach terapeutycznych, ani nie wyczerpują problematyki radioterapii kierowanej obrazem. Wprowadzenie do praktyki klinicznej różnych metod obrazowych w ramach radioterapii kierowanej obrazem wiąże się z nowymi wyzwaniami dotyczącymi kontroli jakości metod obrazowych, protokołów obrazowania czy samej weryfikacji obrazów, która ma przełożenie na efekt kliniczny zarówno w kontekście skuteczności terapii, jak i występowania powikłań. Niewątpliwie systemy IGRT są współcześnie niezbędne w teleradioterapii i ciągle podlegają modyfikacji i ulepszaniu. Tym bardziej, że stanowią podstawę radioterapii adaptacyjnej. Wydaje się, że teraźniejszość, ale i najbliższa przyszłość będą w tym zakresie pełne wyzwań zarówno dla radioterapeutów, jak i elektroradiologów czy fizyków medycznych. 

Piśmiennictwo

1. J.D. Bourland: *Image-Guided Radiation Therapy*, 2020, CRC Press.
2. H.C. de Boer, B.J. Heijmen: *eNAL: an extension of the NAL setup correction protocol for effective use of weekly follow-up measurements*, Int J Radiat Oncol Biol Phys., 67(5), 2007, 1586-1595.
3. H.C. de Boer, M.J. van Os, P.P. Jansen, B.J. Heijmen: *Application of the No Action Level (NAL) protocol to correct for prostate motion based on electronic portal imaging of implanted markers*, Int J Radiat Oncol Biol Phys., 61(4), 2005, 969-983.
4. Varian Medical Systems. Image acquisition system. Document Library.
5. M.C. Kirby, B. Kane, P.C. Williams: *Clinical applications of composite and realtime megavoltage imaging*, Clin Oncol (R Coll Radiol), 7(5), 1995, 308-316.
6. L. Miszczyk, W. Leszczyński, K. Szczepanik, W. Majewski: *Comparison of two image guided radiation therapy (IGRT) methods used for prostate cancer patients-CBCT and 2D-2D kV*, Przegl Lek., 65(7-8), 2008, 315-320.
7. M.F. Steinke, E. Bezak: *Technological approaches to in-room CBCT imaging*, Australas Phys Eng Sci Med., 31(3), 2008, 167-179.
8. P. Chinnaiyan, W. Tomée, R. Patel, R. Chappell, M. Ritter: *3D-ultrasound guided radiation therapy in the post-prostatectomy setting*, Technol Cancer Res Treat., 2(5), 2003, 455-458.
9. D. Bodusz, L. Miszczyk: *Weryfikacja położenia gruczołu krokowego przy użyciu ultrasonografii 3D (SonArray) u chorych na raka stercza poddanych radioterapii – prezentacja metody*, Onkologia Info, 5(1), 2008, 15-20.
10. D. Bodusz, L. Miszczyk: *Porównanie weryfikacji portalowej i ultrasonograficznej z zastosowaniem systemu PortalVision i SonArray u chorych na raka stercza poddanych radioterapii*, Współczesna Onkologia, 14(5), 2010, 297-301.
11. M. Fargier-Voiron, B. Presles, P. Pommier, A. Munoz, S. Rit, D. Sarrut, M.C. Biston: *Ultrasound versus Cone-beam CT image-guided radiotherapy for prostate and post-prostatectomy pretreatment localization*, Phys Med., 31(8), 2015, 997-1004.