



Analiza dawki w rdzeniu kręgowym u pacjentów z nowotworami głowy i szyi wykonana na podstawie obrazowania CBCT

Analysis of the dose delivered in the spinal cord for head and neck cancer patients based on CBCT imaging

Dawid Łyko, Maria Piziorska, Beata Czyżew

Zakład Fizyki Medycznej, Centrum Radioterapii, Centralny Szpital Kliniczny Ministerstwa Spraw Wewnętrznych i Administracji w Warszawie, ul. Wołoska 137, 02-507 Warszawa, tel. +48 573 938 522, e-mail: dawidlyko96@gmail.com

Wprowadzenie

Nowotwory w obszarze jamy ustnej, np. nowotwór języka, migdałków, podniebienia, jak również nowotwory gardła, krtani, nosa czy zatok należą do grupy nowotworów głowy i szyi [1]. Ponad 90% przypadków klasyfikuje się jako rak płaskonabłonkowy (SCC, ang. *Squamous Cell Carcinoma*), za którego patogenezę uważa się mutację komórek płaskonabłonkowych

wyścielających wilgotne powierzchnie jamy ustnej, nosowej, części gardła oraz krtani [1, 2].

Ze względu na położenie rdzenia kręgowego, w trakcie leczenia nowotworów głowy i szyi należy być niezwykle czułym na wszelkie zmiany położenia ciała pacjenta w trakcie realizacji radioterapii.

Rdzeń kręgowy jest jednym z najważniejszych narządów ludzkiego ciała, a ponadto należy do grupy narządów szeregowych, w związku z tym dostarczenie do nawet niewielkiej jego

312

Streszczenie

Odtwarzalność pozycji terapeutycznej pacjenta jest niezwykle istotnym punktem leczenia przeciwnowotworowego z wykorzystaniem promieniowania jonizującego. Prawidłowa pozycja terapeutyczna determinuje bowiem prawidłowe zrealizowanie planu leczenia, a co za tym idzie – wpływa na efektywność całej terapii. Celem badania było zweryfikowanie, czy stosowane metody stabilizacji i weryfikacji pozycji pacjenta są wystarczające, by w poprawny sposób zrealizować plan leczenia. Badania dotyczyły nowotworów głowy i szyi, w kierunku dawek zaabsorbowanych w kanale i rdzeniu kręgowym. Dane zostały uzyskane z wykorzystaniem komponentów Systemu Planowania Leczenia Eclipse (TPS, ang. Treatment Planning System): Contouring, Image Registration, External Beam Planning, Offline Review. Dla 30 pacjentów wykonano łącznie 926 obrazów CBCT, które poddano analizie. Największe wartości zmiany ułożenia w badanej grupie zostały uzyskane dla rotacji PITCH i były równe 0,33°. Pozostałe wartości nie były istotne statystycznie, co zostało wykazane testem t-Studenta. U żadnego pacjenta nie doszło do przekroczenia dawki granicznej w rdzeniu kręgowym. Zarówno planowanie leczenia, jak również kontrola ułożenia pacjenta wykonywane były zgodnie z obowiązującymi w Centrum Radioterapii protokołami.

Słowa kluczowe: CBCT, rdzeń kręgowy, błąd systematyczny, nowotwory głowy i szyi

The correct positioning of the cancer patient is extremely important for effectiveness of radiotherapy. The aim of the study was to verify either stabilisation or verification of the patient's position are sufficient for the correct treatment plan realisation. The studies focused on head and neck cancers, in particular the doses absorbed in the canal and spinal cord. The data was obtained with the use of the components of the treatment planning system Eclipse: Contouring, Image Registration, External Beam Planning. A total of 926 CBCT images for 30 patients were analyzed. The highest values of the change in position in the studied group were obtained for the PITCH rotation and were equal to 0.33 degrees. The remaining values were negligible, as shown by the Student's t-test. No patient plan exceeded the dose limit in the spinal cord. Both treatment planning and control of the patient's position were performed correctly

Key words: CBCT, spinal cord, systematic error, head and neck cancers

Abstract

otrzymano / received:

29.08.2021

poprawiono / corrected:

31.08.2021

zaakceptowano / accepted:

09.09.2021

objętości dawki przekraczającej dawkę tolerancji może doprowadzić do nieodwracalnych uszkodzeń i mielopatii [3, 4]. Skutkami mielopatii są między innymi parastezje, deficyty czuciowe, motoryczne czy zespół Browna-Sequarda [4, 5].

Biorąc pod uwagę protokoły sygnalizujące wyższą lokalną promieniowrażliwość odcinka szyjnego rdzenia kręgowego względem np. odcinka piersiowego [3, 4, 6, 7, 8] oraz często obserwowane odkształcenia tego obszaru w trakcie leczenia nowotworów głowy i szyi [9], problem ten staje się jeszcze bardziej istotny. Ponadto zmniejszoną tolerancją rdzenia na dawkę obserwuje się u pacjentów pediatrycznych oraz u pacjentów, u których radioterapia uzupełniona jest o chemioterapię [6, 10, 11].

Cel badania

Celem wykonanych badań było sprawdzenie, czy stosowane metody stabilizacji i weryfikacji ułożenia pacjenta są wystarczające, by zrealizować plan leczenia w sposób poprawny i bezpieczny. Poddano to ocenie poprzez porównanie rozkładu dawki w kanale kręgowym obliczonym w Systemie Planowania Leczenia TPS na podstawie CT

Tabela 1 Wartości dawek frakcyjnych i całkowitych w planach leczenia poszczególnych pacjentów

Nr	Df [Gy]	D [Gy]
1	2,25	67,5
2	2	60
3	2	66
4	2	70
5	2,2	66
6	2	66
7	2	66
8	2	66
9	2	66
10	2,2	66
11	2,14	64,2
12	2,1	63
13	2	66
14	2	72
15	2	70
16	2,12	70
17	2,2	66
18	2,25	67,5
19	2,2	66
20	2,2	66
21	2,12	70
22	2,25	67,5
23	2	70
24	2,25	67,5
25	2,2	66
26	2	70
27	2,2	66
28	2,25	67,5
29	2,12	70
30	2,2	66

Źródło: Materiały własne.

pacjenta, wykorzystanego do stworzenia planu leczenia oraz rozkładu dawki, która została dostarczona w trakcie realizacji leczenia i obliczona na podstawie fuzji CT-CBCT.

Metodyka badań

Baza pacjentów

Spśród grupy pacjentów, którzy byli leczeni na nowotwory głowy i szyi z wykorzystaniem technik IMRT lub VMAT, dawką całkowitą nieprzekraczającą 72 Gy oraz dawką frakcyjną nie większą niż 2,4 Gy, losowo wybrano 30 z nich i poddano analizie. Wyznaczone w ten sposób kryteria ujednolicają ocenę planu leczenia na podstawie dawki w rdzeniu kręgowym. Zgodnie z protokołem klinicznym, dawka maksymalna w tej strukturze nie może przekroczyć punktowo wartości 45 Gy.

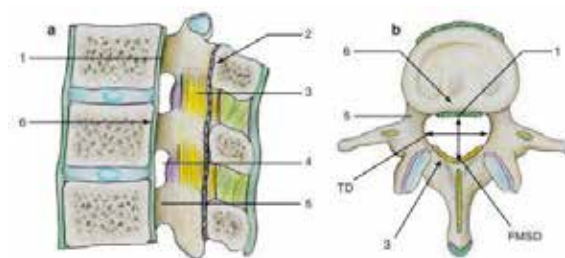
Pacjenci objęci byli leczeniem w Centrum Radioterapii Centralnego Szpitala Klinicznego Ministerstwa Spraw Wewnętrznych i Administracji w Warszawie. Terapia odbywała się z wykorzystaniem akceleratorów liniowych „True Beam” firmy Varian Medical między grudniem 2016 roku a grudniem roku 2019. Plany leczenia zostały stworzone w systemie do planowania leczenia Eclipse firmy Varian Medical System w wersji 13.6.

Numeracja pacjentów oraz schemat frakcjonowania zostały przedstawione w tabeli 1.

Przeanalizowano łącznie 926 zdjęć CBCT pod kątem ruchomości kanału kręgowego. Na każdym z wykonanych CBCT, za pomocą narzędzi do konturowania wrysowany został kanał kręgowy. Przekrój strzałkowy i poprzeczny kanału kręgowego został przedstawiony na rycinie 1.

Kanał kręgowy wrysowano również na tomografiach komputerowych, na których wykonywane było planowanie leczenia, a utworzone w ten sposób struktury stanowiły w późniejszej analizie rolę struktur referencyjnych.

Ze względu na niską jakość obrazowania, struktura rdzenia kręgowego na poszczególnych zdjęciach CBCT nie mogła zostać jednoznacznie poprawnie oceniona. Dlatego na potrzeby badania założono, że ruch rdzenia jest analogiczny do ruchu kanału, a jego ewentualne ruchy własne są pomijalnie małe.



Ryc. 1 Kanał kręgowy: (a) przekrój strzałkowy, (b) przekrój poprzeczny. 1. Więzadło podłużne grzbietowe, 2. Linia spinolaminarna, 3. Więzadło żółte, 4. Otwór międzykręgowy, 5. Łodyga, 6. Ściana tylna, TD – średnica poprzeczna, FMSD – przyśrodkowa średnica strzałkowa
Źródło: [12].

Rejestracja sztywna i fuzja CT-CBCT

W celu weryfikacji odtwarzalności planu leczenia wykonano fuzję sztywną CT ze wszystkimi tomografiami wiązką stożkową CBCT, wykorzystując do tego narzędzie Image Registration. U każdego z analizowanych pacjentów przeniesiono struktury kanału kręgowego z CBCT na CT i kolejno przeliczono rozkład dawki w programie TPS Eclipse. Uzyskano w ten sposób dawkę, jaką w przybliżeniu uzyskał kanał kręgowy w wyniku realizacji pojedynczej sesji terapeutycznej. Po zsumowaniu poszczególnych frakcji oszacowano dawkę, jaką kanał kręgowy otrzymał w trakcie całego leczenia.

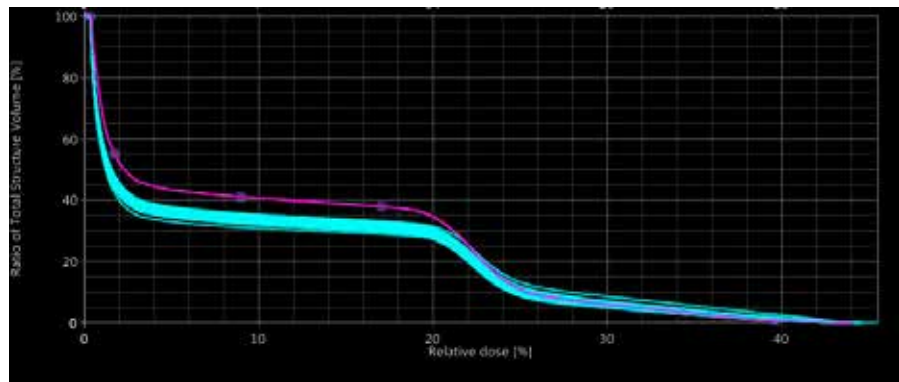
Rozbieżności w położeniu i w rozkładzie dawki w kanale kręgowym w kolejnych sesjach terapeutycznych przedstawione zostały na rycinie 2 i rycinie 3. Planowy rozkład dawki oznaczono kolorem fioletowym, natomiast poszczególne sesje terapeutyczne kolorem niebieskim.

Analiza i dyskusja wyników

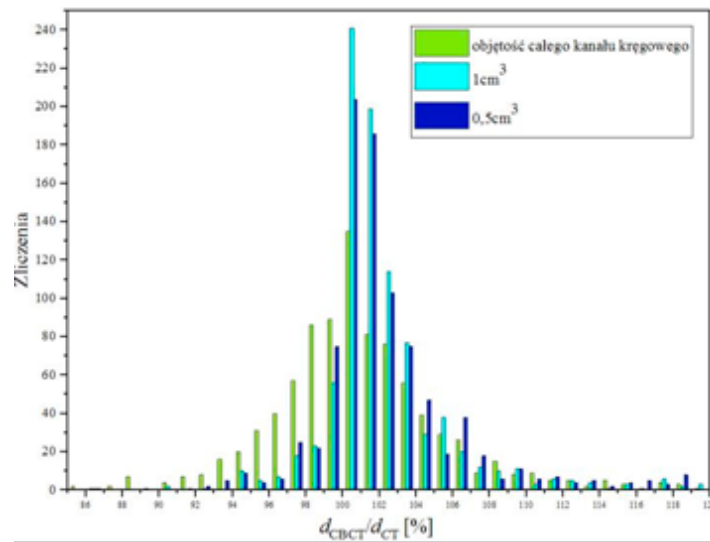
Na podstawie uzyskanych po przeliczeniu dawek, histogramów dawka – objętość (DVH, ang. *Dose Volume Histogram*), zebrano wartości maksymalnych dawek frakcyjnych w objętości 0,5 cm³, 1 cm³ kanału kręgowego oraz w całej jego objętości. Policzone stosunek



Ryc. 2 Przekrój czołowy (górną), strzałkowy (środek), poprzeczny (dół) CT pacjenta. Przeniesione struktury z CBCT, oznaczone kolorem niebieskim. Kontury reprezentują położenie kanału kręgowego podczas każdej frakcji. Pozycja kanału na obrazach tomograficznych wykonanych przed pierwszą sesją radioterapeutyczną oznaczona jest kolorem fioletowym
Źródło: Materiały własne.



Ryc. 3 Histogramy dawka – objętość dla leczonego pacjenta przedstawiające rozkład dawki frakcyjnej dla struktur uzyskanych poprzez wrysowanie konturów kanału kręgowego na CBCT i przeniesienie ich na CT (kolor niebieski)
Źródło: Materiały własne.



Ryc. 4 Histogram stosunku dawek frakcyjnych otrzymanych punktowo oraz w objętości kanału kręgowego 1 cm³ i 0,5 cm³. Całkowita liczba zliczeń dla pojedynczej objętości wynosi 926
Źródło: Materiały własne.

między dawką frakcyjną oszacowaną na podstawie obrazów CBCT (d_{CBCT}) i zaplanowaną dawką frakcyjną na podstawie CT (d_{CT}), wykorzystując wartości otrzymane dla całej badanej grupy. Otrzymane 2778 wartości dla trzech różnych objętości kanału kręgowego zostały przedstawione w postaci histogramu na rycinie 4.

Wartości dla objętości 0,5 cm³ i 1 cm³ skupiają się blisko wartości 100%, uzyskując maksimum w zakresie dawek zrealizowanych, stanowiących 100-101% dawki zaplanowanej. Procentowy stosunek dawek w całej objętości kanału kręgowego również najwyższą liczbę zliczeń uzyskuje w zakresie 100-101%, ale w porównaniu z pozostałymi dwoma objętościami następuje duży spadek liczności kosztem wartości odbiegających od wartości zaplanowanej. Szerokość rozkładu dawek względnych w całym kanale kręgowym jest największa.

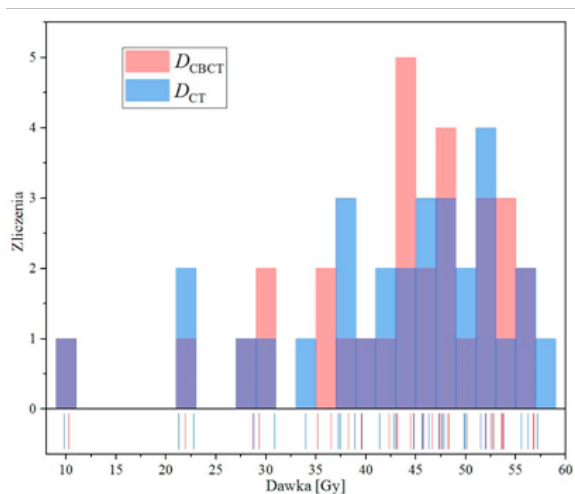
D_{CT} to punktowa dawka maksymalna w kanale kręgowym, uzyskana w pierwotnym planie leczenia, D_{CBCT} została uzyskana po zsumowaniu dawek maksymalnych dostarczonych w poszczególnych frakcjach. Zostało to ustalone przy założeniu, że każda kolejna frakcyjna dawka maksymalna odpowiada dawce maksymalnej uzyskanej w strukturze utworzonej poprzez wrysowanie kanału kręgowego na CBCT, a każdy kolejny obraz CBCT odpowiada kolejnej frakcji.

Dla każdego pacjenta obliczone zostało odchylenie standardowe dawek oraz ich różnice – absolutna i względna.

Wartość p testu t-Studenta dla pojedynczej próby oraz populacji uzyskano za pomocą statystycznego oprogramowania obliczeniowego PQStat.

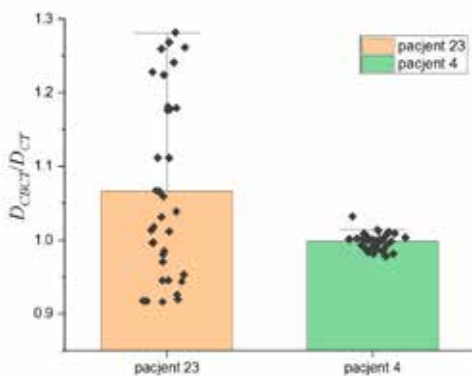
Rozkłady obliczonych dawek zaprezentowano na rycinie 5.

Procentowa różnica dawki całkowitej (D_{CBCT}) względem dawki zaplanowanej (D_{CT}) mieści się w zakresie od -3,14% do 26,01%, osiągając maksymalny spadek dawki o 1,74 Gy i maksymalny wzrost o 5,92 Gy w rozliczeniu końcowym, tj. po zrealizowaniu pełnej radioterapii.



Ryc. 5 Porównanie sumy dawek (w kanale kręgowym) zaplanowanych i zrealizowanych – zsumowanych dla każdego pacjenta osobno
 Źródło: Materiały własne.

Dwa najbardziej odstające wyniki, z różnicami na poziomie 6,88% (pacjent nr 23) i 26,01% (pacjent nr 15), charakteryzują się wartościami *STD* odpowiednio 4,83 Gy oraz 3,87 Gy, co świadczy o dużej zmienności dawki dostarczonej do kanału kręgowego z frakcji na frakcję. Na rycinie 6 zostały przedstawione rozrzuty wartości dawek frakcyjnych dla pacjenta, u którego obliczona wartość *STD* była wysoka i niska.



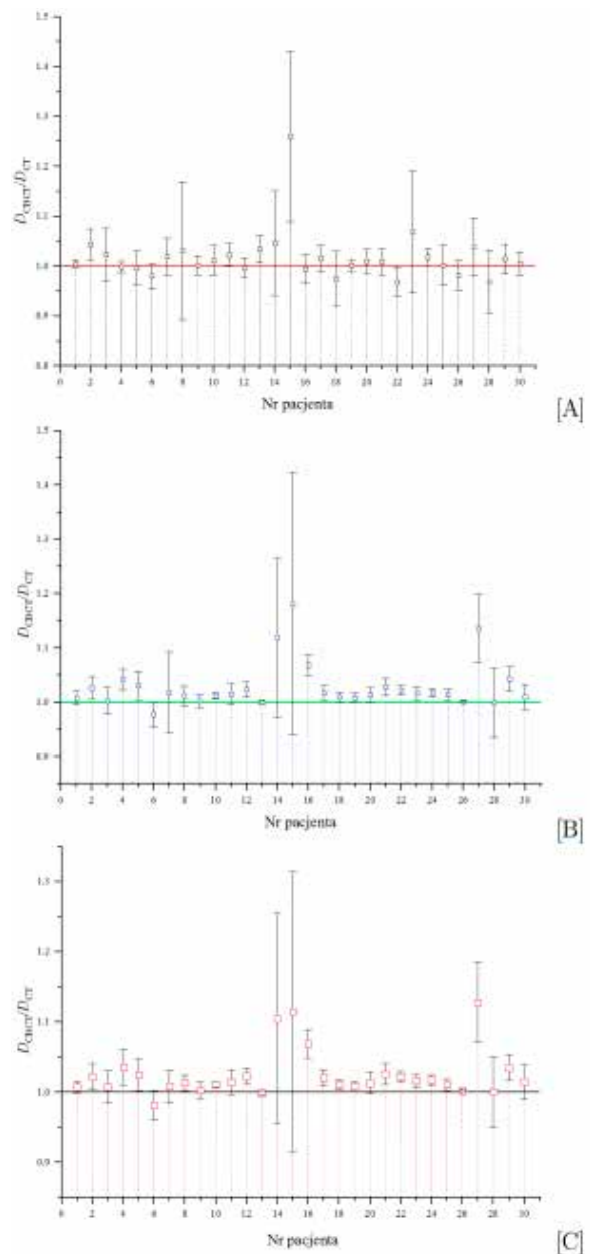
Ryc. 6 Stosunek dawki zrealizowanej do dawki planowanej w kolejnych frakcjach dla pacjentów nr 23 oraz 4. Wartości po lewej stronie charakteryzują się dużą wartością *STD*, po prawej natomiast niską
 Źródło: Materiały własne.

Przeprowadzony test t-Studenta z poziomem istotności 5% wykazuje, że u 43% pacjentów różnice między D_{CT} i D_{CBCT} nie były istotne statystycznie. Wśród pozostałych 57% – u siedmiorga z nich całkowita dawka maksymalna D_{CBCT} w kanale kręgowym przekracza 45 Gy, a u dziewięciu różnica $(D_{CBCT} - D_{CT}) > 1$ Gy w ciągu całego leczenia.

Należy zwrócić uwagę, że spośród pacjentów, których terapię uznano uprzednio za zrealizowaną poprawnie – u ośmiu dawka maksymalna w kanale kręgowym przekracza 45 Gy. Jednakże u tych pacjentów różnica $(D_{CBCT} - D_{CT}) < 1$ Gy. Jednocześnie dla całej badanej grupy, w wyniku testu t-Studenta otrzymujemy wartość $p = 0,76$, która świadczy o braku istotnych statycznie różnic

między dawkami. Pozwala to w oparciu o punktowe dawki maksymalne na określenie radioterapii jako leczenia zrealizowanego poprawnie. Średnie wartości uzyskane dla całej badanej grupy mieszczą się w zakresie poniżej 45 Gy. Średnia różnica dawek nie przekracza 0,5 Gy, co stanowi 1,8% różnicy względem średniej dawki D_{CT} , a średnie wartości D_{CT} i D_{CBCT} wynoszące odpowiednio 43,29 Gy i 42,8 Gy nie świadczą o zagrożeniu uszkodzenia rdzenia kręgowego.

Stosunek wartości dawek obliczonych na podstawie CT oraz obliczonych z wykorzystaniem fuzyj CBCT dla wybranych trzech objętości kanału kręgowego został przedstawiony na



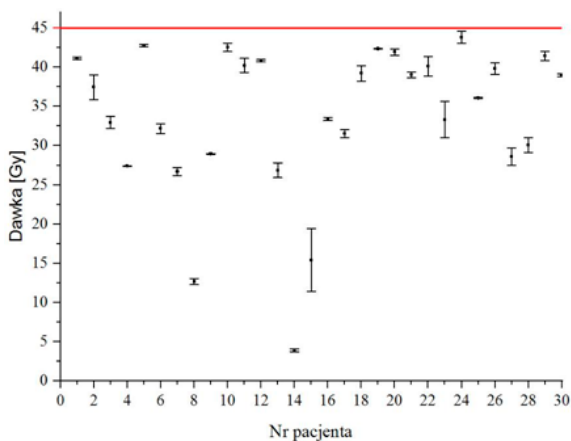
Ryc. 7 Znormalizowane wartości dawek zaabsorbowanych w kanale kręgowym (A), w jego objętości 0,5 cm³ (B) oraz w objętości 1 cm³ (C) obliczonych po zrealizowaniu wszystkich frakcji dla poszczególnych pacjentów
 Źródło: Materiały własne.



rycynie 7, która potwierdza, że zmienność skumulowanej dawki maksymalnej jest najwyższa. Świadczy to o stosunkowo jednorodnych rozkładach dawek z punktowymi wzrostami dawki (mieszczącymi się w zakresie dawek tolerancji zgodnie z wytycznymi). Największe zmiany w odczytach maksymalnych dawek punktowych świadczą także o lokalnym charakterze zmienności pozycji pacjenta. Odrzucamy w ten sposób hipotezę, że zmiana dawki nastąpiła wskutek przemieszczenia całego ciała pacjenta, np. poprzez błędne pozycjonowanie stołu terapeutycznego. Ustawienie stołu bliżej lub dalej od źródła promieniowania determinowałaby proporcjonalny spadek lub wzrost dawki w całym napromienianym obszarze.

Wszystkie dawki dotyczą kanału kręgowego, natomiast ograniczenie $D_{max} < 45$ Gy dotyczy rdzenia kręgowego. Rdzeń kręgowy znajduje się w kanale kręgowym, dlatego każda dawka powyżej 45 Gy w kanale stanowi potencjalne niebezpieczeństwo uszkodzenia rdzenia. Po wrysowaniu rdzenia na każdym CT i odczytaniu dawki zaplanowanej oraz po dodaniu odpowiadającej mu procentowej różnicy obliczonej dla kanału kręgowego oszacowano dawki dostarczone do rdzenia kręgowego. Uzyskane wartości dla rdzenia kręgowego zostały przedstawione na rycinie 8. Niepewności zaznaczone na obrazie ilustrują różnice procentowe między dawkami CT a CBCT.

Z ryciny 8 wynika, że żaden z pacjentów nie uzyskał dawki przekraczającej 45 Gy w rdzeniu kręgowym.



Ryc. 8 Dawki całkowite dostarczone do rdzenia kręgowego podczas wszystkich frakcji radioterapeutycznych przedstawione dla poszczególnych pacjentów. Czerwoną linią zaznaczona jest dawka tolerancji dla rdzenia
Źródło: Materiały własne.

Błędy pozycjonowania

Za pomocą narzędzia Off-line Review możliwe było wykonanie fuzji, dzięki której zostały uśrednione po frakcjach wartości wektorów translacji i rotacji, o które zmieniła się pozycja pacjenta w stosunku do jego pozycji na obrazach tomograficznych wykonanych przed pierwszą sesją radioterapeutyczną.

Dane pokazują, że jeżeli $(D_{CT} - D_{CBCT}) < 0,65$ Gy w kanale, to dawka D_{CT} nie różni się statystycznie z D_{CBCT} . Dlatego też realizację planów trzech pacjentów zostały uznane za zrealizowane

poprawnie, mimo wyższej w porównaniu z innymi pacjentami różnicy dawek, a powodu, dla którego test t-Studenta wskazał inaczej, dopatruje się w niskiej wartości STD ($STD < 1,05$). Ze względu na niską różnicę w dawkach oraz wielkościach uzyskanych z analizy off-line wykluczono, by za niską wartość STD odpowiadał systematyczny błąd ułożenia. Na podstawie zestawu danych zauważono, że kiedy średnia wartość wektora PITCH dla pacjenta przekracza $0,5^\circ$, to D_{CBCT} różni się statycznie od D_{CT} .

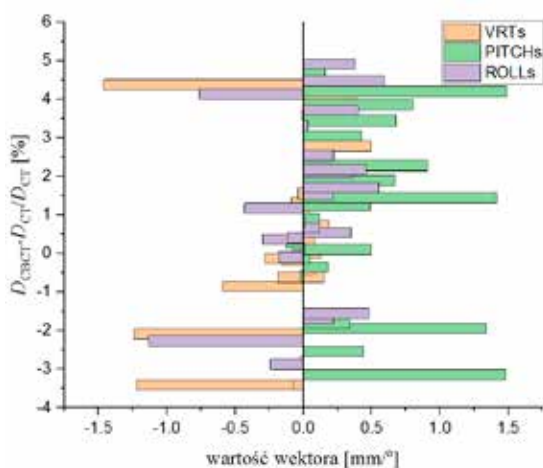
W celu wyodrębnienia najczęściej występujących błędów ułożenia została wprowadzona bezwzględna wartość graniczna $[0,5 \text{ mm}]/[0,5^\circ]$. Najliczniej przekraczającymi wartość $[0,5 \text{ mm}]/[0,5^\circ]$ wektorami są translacja VRT oraz rotacja PITCH.

Tabela 2 Analiza off-line: średnie wartości wektorów translacji oraz rotacji

Nr	VRT	LNG	LAT	PITCH	ROLL	RTN
	(mm)			(o)		
1	0,05	0,02	0,07	-0,10	0,12	0,04
2	0,39	-0,42	0,08	1,49	0,59	-0,10
3	0,02	0,50	-0,79	0,91	0,22	-0,49
4	0,08	0,26	-0,23	0,05	0,01	-0,03
5	0,15	0,33	0,29	0,18	-0,18	0,07
6	-0,82	-0,57	0,15	1,34	0,22	-0,02
7	0,12	0,09	0,40	0,67	0,46	0,18
8	0,50	-0,09	0,18	0,43	0,03	0,10
9	-0,28	0,10	-0,26	-0,08	-0,12	0,07
10	0,04	0,08	0,23	0,49	0,21	0,03
11	0,02	0,62	-0,83	0,91	0,21	-0,48
12	-0,19	-0,33	-0,11	0,00	0,00	-0,04
13	0,00	0,09	0,10	0,68	0,40	0,02
14	-1,46	-0,43	0,12	0,16	0,38	-0,02
15	1,74	1,14	-0,16	-1,99	1,31	-0,53
16	-0,59	-0,22	-0,22	-0,02	0,00	0,02
17	-0,09	-0,18	-0,28	0,00	0,00	-0,16
18	-0,02	-0,49	-1,34	0,44	-1,13	-0,32
19	-0,16	-0,12	-0,08	0,50	-0,30	0,16
20	0,19	0,20	0,01	0,00	0,00	0,02
21	0,01	0,00	0,01	0,12	-0,43	0,03
22	-1,22	0,20	-0,69	0,00	0,00	-1,22
23	0,26	0,04	-0,03	-0,26	-0,71	-0,25
24	-0,04	0,04	-0,02	0,02	0,37	0,09
25	0,13	-0,28	0,22	-0,13	0,35	0,05
26	-1,24	-0,25	-0,09	0,34	0,48	0,22
27	-0,01	0,02	0,00	0,80	-0,76	-0,17
28	-0,07	0,00	-0,01	1,48	-0,24	0,09
29	-0,01	-0,02	0,01	1,42	0,55	-0,08
30	0,08	0,26	-0,23	0,05	0,01	-0,03
Średnia	-0,08	0,02	-0,12	0,33	0,07	-0,09
+/-	0,58	0,34	0,37	0,68	0,46	0,29

Źródło: Materiały własne.

U dziesięciu pacjentów średnia wartość PITCH przekroczyła $0,5^\circ$, w tym u pięciu pacjentów przekroczone zostało 1° . U sześciu pacjentów średnia wartość VRT przekroczyła 0,5 mm, w tym u czterech przekroczone zostało 1 mm. Wysokie wartości tych przesunięć świadczą o ruchomości pacjenta, a więc i kanału kręgowego, w kierunkach, które obserwujemy podczas ruchu głowy w przód i w tył i wygięciu szyi w kształt „U”. Średnia wartość



Ryc. 9 Zależność różnicy względnej DCT i DCBCT od średnich wartości wektorów
Źródło: Materiały własne.

rotacji ROLL przekracza $0,5^{\circ}$, co sugeruje, że część pacjentów ma także problem z obrotem głowy w lewo lub w prawo.

W tabeli 2 przedstawiono wartości średnie dla każdej wartości translacji i rotacji według zaleceń Polskiego Towarzystwa Fizyki Medycznej [13]. Na podstawie tych samych zaleceń wykonano test t-Studenta, którego wyniki wskazują, że dla grupy pacjentów wszystkie przesunięcia, poza rotacją PITCH, są zgodne z hipotezą, że $y = 0$, gdzie y stanowi dany wektor przesunięcia, tym samym można uznać przesunięcia te za pomijalnie małe. W badaniach nad błędami pozycjonowania i ich wpływem na zmiany dawki w stereotaktycznej radioterapii kręgosłupa [14] otrzymano wartość błędu rotacji PITCH = $(1,6 \pm 1,3^{\circ})$ i uznano to za wynik świadczący o dobrej precyzji. W prezentowanej analizie wartość wektora pochylenia przekroczyła $1,6^{\circ}$ tylko u jednego pacjenta (nr 15). Rycina 9 przedstawiająca zależność różnicy względnej D_{CT} i D_{CBCT} od wartości wektora przesunięcia obrazuje, że kiedy wartość różnicy $D_{CT} - D_{CBCT}$ jest bliska zera, to wartości wektorów są niskie lub równe zeru, natomiast kiedy różnice rosną, następuje zagęszczenie lub/i wzrost ich wartości.

Podsumowanie

Zarówno uzyskane rozkłady, jak również późniejsza weryfikacja poprawności zrealizowania leczenia (ułożenie pacjenta) wykonywane są poprawnie. Dawki maksymalne uzyskane w objętościach $0,5 \text{ cm}^3$ i 1 cm^3 charakteryzowały się mniejszą zmiennością niż dawki punktowe. Wartość średnia maksymalnej dawki dostarczonej do rdzenia kręgowego dla grupy pacjentów wyniosła $D_{CTsr} = 43,29 \text{ Gy}$, a średnia różnica względem dawki zaplanowanej wynosiła $1,8\%$, co stanowiło różnicę na poziomie $0,5 \text{ Gy}$. Wynik ten został uznany jako zadowalający. Mimo pojawiających się błędów w ułożeniu i różnic w dawce, sięgających nawet $26,01\%$, u żadnego pacjenta rdzeń kręgowy nie był zagrożony. U pacjentów, u których różnica pomiędzy dawką zaplanowaną w TPS a zrealizowaną nie była istotna statystycznie, został zaobserwowany brak ścisłej korelacji między wartością

zmiany dawki a wartością wektorów translacji czy rotacji. Zaobserwowano jednak u nich zagęszczenie błędów w ułożeniu, w szczególności przesunięć translacyjnych w kierunku góra-dół na poziomie $0,08 (+/-) 0,58 \text{ mm}$ oraz rotacyjnych na poziomie $0,33^{\circ} (+/-) 0,68^{\circ}$. Przesunięcia te można częściowo powiązać z odchyleniem głowy w tył i wygięciem szyi w kierunku źródła promieniowania. Brak korelacji sugeruje występowanie także dodatkowych czynników, takich jak np. napięcie mięśni, spadek wagi pacjenta czy błędy przypadkowe. Pacjent, u którego został stwierdzony najwyższy spadek dawki, również charakteryzuje się wysoką wartością $STD = 3,49 \text{ Gy}$. Pozwala to przypuszczać, że pacjenci ci nie byli zdolni zachować odpowiedniej pozycji przez cały czas podawania dawki frakcyjnej lub wykazywali brak współpracy z personelem medycznym.

Piśmiennictwo

1. Understanding Head and Neck Cancers – A guide for people with cancer, their families and friends, Cancer Council Australia 2017, Sydney 2017.
2. A.L.S. Galbiatti, J.A. Padovani-Junior, J.V. Man'iglia, C.D. Soares Rodrigues, E.M. Goloni-Bertollo, E.C. Pavarino: *Head and neck cancer: causes, prevention and treatment*, Brazilian Journal of Otorhinolaryngology, 79(2), 2013, 239-247.
3. M. Hutnik, K. Skłodowski, A. Wygoda, T. Rutkowski, B. Pilecki: *Dawki tolerancji dla narządów krytycznych w radioterapii chorych na raka głowy i szyi*, NOWOTWORY Journal of Oncology, 63(1), 2013.
4. J.P. Kirkpatrick, A.J. van der Kogel, T.E. Schultheiss: *Radiation dose–volume effects in the spinal cord*, International Journal of Radiation Oncology* Biology* Physics, 76(3), 2010, S42-S49.
5. D.C. Shrieve, J.S. Loeffler: *Human radiation injury*, Lippincott Williams & Wilkins, 2010.
6. M.E.P. Philippens, L.A.M. Pop, A.G. Visser, A.J. van der Kogel: *Dose–Volume Effects in Rat Thoracolumbar Spinal Cord: The Effects of Nonuniform Dose Distribution*, International Journal of Radiation Oncology* Biology* Physics, 69(1), 2007, 204-213.
7. T.E. Schultheiss: *The radiation dose–response of the human spinal cord*, International Journal of Radiation Oncology* Biology* Physics, 71(5), 2008, 1455-1459.
8. J.A. Coderre, G.M. Morris, P.L. Micca, J.W. Hopewell, I. Verhagen, B.J. Kleiboer, A.J. van der Kogel: *Late effects of radiation on the central nervous system: role of vascular endothelial damage and glial stem cell survival*, Radiation Research, 166(3), 2006, 495-503.
9. R.A. Rozendaal, B.J. Mijnhoe, O. Hamming-Vrieeze, A. Mans, M. Van Herk: *Impact of daily anatomical changes on EPID-based in vivo dosimetry of VMAT treatments of head-and-neck cancer*, Radiotherapy and Oncology, 116(1), 2015, 70-74.
10. A.C.C. Ruifrok, L.C. Stephens, A.J. Van der Kogel: *Radiation response of the rat cervical spinal cord after irradiation at different ages: tolerance, latency and pathology*, International Journal of Radiation Oncology* Biology* Physics, 29(1), 1994, 73-79.
11. K.K. Ang, R.E. Price, L.C. Stephens, G.L. Jiang, Y. Feng, T.E. Schultheiss, L.J. Peters: *The tolerance of primate spinal cord to re-irradiation*, International Journal of Radiation Oncology* Biology* Physics, 25(3), 1993, 459-464.
12. J.M. Vital, D.T. Cawley: *Spinal Anatomy: Modern Concepts*, Springer Nature, 2019.
13. P. Kukotowicz: *Zalecenia PTFM dotyczące prowadzenia kontroli ułożenia pacjentów leczonych wiązkami zewnętrznymi. Część II – Metody*, Polish Journal of Medical Physics and Engineering, 21(1), 2015, 3-26.
14. S. Kim, H. Jin, H. Yang, R.J. Amdur: *A study on target positioning error and its impact on dose variation in image-guided stereotactic body radiotherapy for the spine*, International Journal of Radiation Oncology* Biology* Physics, 73(5), 2009, 1574-1579.