

są przyspieszane w polu elektrostatycznym. Niezmiernie trudno uzyskać pole elektrostatyczne o różnicy napięcia większej niż około 350 kV.

W akceleratorach liniowych elektrony są przyspieszane w kolejnych szczelinach rezonansowych w zmiennym polu elektromagnetycznym – jest to tzw. sekcja przyspieszająca. Dzięki temu energia przyspieszanych elektronów wynosi, w zależności od wyboru ustawień aparatu, od 6 do 20 MeV. Akceleratory liniowe mogą emitować zarówno wiązkę elektronową, jak i fotonową. W przypadku wiązki elektronowej przyspieszone elektrony są kierowane bezpośrednio z głowicy akceleratora na zewnątrz. Ponieważ wiązka elektronów, która opuszcza sekcję przyspieszającą, ma średnicę około 1 cm, a w praktyce klinicznej stosuje się pola napromieniania rzędu kilkunastu centymetrów, w celu uzyskania właściwej jednorodnej wiązki elektrony muszą zostać odpowiednio rozproszone.

Rozkład dawki promieniowania jonizującego

Promieniowanie korpuskularne (cząsteczkowe) (np. protony) stosowane w radioterapii oddziałuje z materią na zasadzie ładunku elektrostatycznego. Na każdą cząstkę po wnikięciu do materii działa siła, która powoduje zatrzymanie tej cząstki. Szybkie cząstki na początku toru oddają mniej energii na jednostkę przebytej drogi niż cząstki wolniejsze. W efekcie dawka promieniowania jest mniejsza na początku toru i wzrasta ku jego końcowi. Wyjątek stanowią elektrony, które jako cząstki bardzo lekkie (1800 razy lżejsze od protonu) podlegają tzw. rozproszeniu wstecznemu. Dodatkowo rozproszenie wiązki elektronowej w ośrodku pochłaniającym powoduje, że wiązka wysokoenergetycznych elektronów staje się zbyt szeroka i nie nadaje się do precyzyjnej radioterapii. Kolejnym problemem jest trudność w formowaniu kształtu napromienianego pola elektronowego.

W celu uzyskania odpowiedniej precyzji konieczne jest zastosowanie cząstek cięższych, najczęściej protonów, a w niektórych przypadkach – jąder atomów węgla. Niestety urządzenia stosowane do radioterapii protonowej i węglowej są znacznie droższe, zarówno pod względem konstrukcji, jak i utrzymania.

Na fotony po wnikięciu do ośrodka nie działa żadna siła i to, czy zostaną pochłonięte na torze w ośrodku, zależy od prawdopodobieństwa tego pochłonięcia. Wysokoenergetyczne promieniowanie wnika głębiej i prawdopodobieństwo jego pochłonięcia lub rozproszenia na jednostkę drogi w ośrodku jest mniejsze niż w przypadku promieniowania o mniejszej energii. Dla danego rodzaju ośrodka pochłaniającego i dla promieniowania fotonowego można

Aby uzyskać wiązkę fotonową, elektrony kieruje się na tzw. tarczę. Elektrony są zatrzymane w tarczy i emitują fotonowe promieniowanie hamowania. Ze względu na metodę rezonansowego przyspieszania akceleratory nie emitują wiązki ciągle, a emisja odbywa się w mikrosekundowych pulsach. W głowicy znajdują się dozymetry zliczające dawkę, która zostaje przeliczona na tzw. jednostki monitorowe. Zazwyczaj akceleratory są kalibrowane w ten sposób, aby dawka 1 Gy mierzona w referencyjnych warunkach pomiarowych odpowiadała 100 jednostkom monitorowym.

Wiązka elektronowa jest rzadko wykorzystywana w nowoczesnej radioterapii, w której powszechnie stosuje się techniki dynamiczne, polegające na tym, że w czasie seansu terapeutycznego zmienia się kształt pola napromienianego oraz natężenie wiązki promieniowania.

zmierzyć tzw. warstwę połowicznego osłabienia. Promieniowanie po przebyciu tej drogi w ośrodku zostaje osłabione (pochłonięte lub rozproszone) do połowy. Dwie warstwy powodują osłabienie 4-krotne itd. Na rycinie 8.1 przedstawiono różnice w rozkładzie dawki dla różnych rodzajów promieniowania.

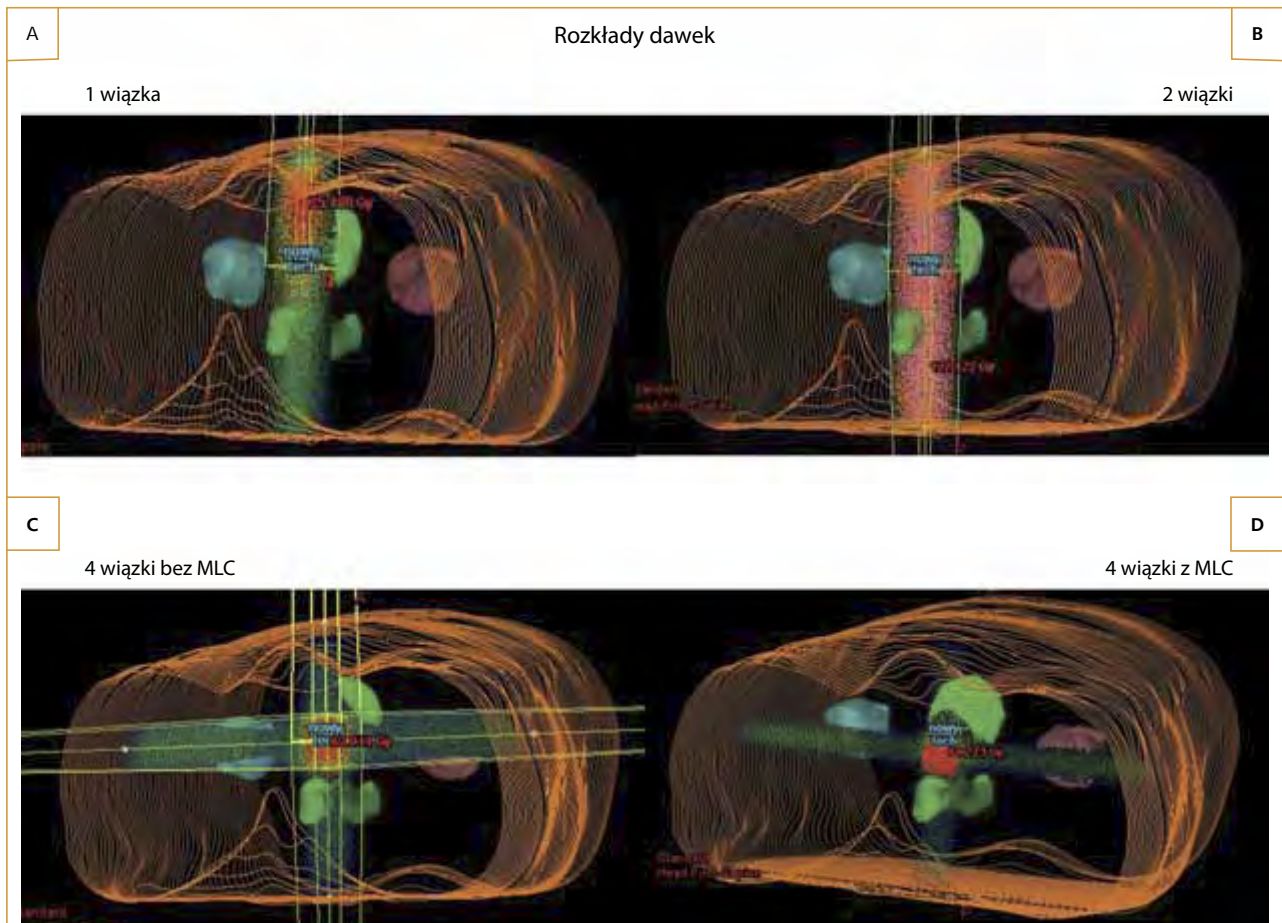
Oslabienie i rozproszenie wiązki nie są jedynymi zjawiskami istotnymi dla rozkładu dawki promieniowania. W przypadku promieniowania fotonowego wysokoenergetycznego (z zakresu megawoltowego) występuje zjawisko narastania dawki (build-up). Zjawisko to jest spowodowane mniejszym prawdopodobieństwem oddawania energii przez elektrony wybite w wyniku zjawiska Comptonowskiego na początku toru w ośrodku. Część elektronów opuszcza materiał w kierunku powietrza, które ma mniejszą gęstość niż woda (lub tkanka miękka), i nie wraca do tego materiału, co znacznie zmniejsza dawkę. Powoduje to istotne zmniejszenie dawki na powierzchni ośrodka. Zjawisko narastania dawki oraz większa przenikliwość promieniowania umożliwiły wykorzystanie radioterapii do leczenia narządów wewnętrznych człowieka. Gdyby człowiek miał wymiary słonia, radioterapia z pól zewnętrznych byłaby bezużyteczna, ponieważ promieniowanie nie docierałoby do narządów wewnętrznych.

W przypadku zastosowania promieniowania kilowoltowego maksimum dawki występuje na skórze, dlatego skóra była narządem limitującym wykorzystanie radioterapii kilowoltowej. W radioterapii narządów wewnętrznych nie można było uzyskać dawki leczącej bez uszkodzenia

skóry, stosując tylko jedną wiązkę promieniowania. Z tego powodu w pierwszych latach stosowania radioterapii zmniejszenie dawki w pierwszym roku było miarą dawki promieniowania.

Rozpraszanie promieniowania fotonowego i jego pochłanianie w ośrodku biologicznym powoduje zmniejszenie się dawki wraz z głębokością. Gdy guz nowotworu znajduje się np. na głębokości 10 cm, podanie za pomocą „bomby kobaltowej” dawki frakcyjnej 2 Gy spowoduje, że na tej głębokości dawka maksymalna będzie wynosiła 4 Gy. Jeśli jednak zastosujemy dwie naprzeciwległe wiązki, np. od przodu i od tyłu pacjenta, dawka w guzie będzie wynosiła również 2 Gy, ale dawka maksymalna zmniejszy

się do 2 Gy. Oznacza to, że zastosowanie większej liczby wiązek, np. czterech, które będą przecinały się w guzie nowotworowym, spowoduje zmniejszenie dawki maksymalnej z każdego pola do dawki 1 Gy. W efekcie uzyskuje się mniejszą dawkę w tkankach otaczających niż w guzie. Opisany proces wyboru liczby i geometrii przestrzennej wiązek promieniowania, kształtu pola wiązki, energii i wielu jeszcze innych parametrów, które mają wpływ na rozkład dawki w napromienianym obszarze, nazywa się w radioterapii planowaniem leczenia. Na rycinie 8.4 przedstawiono przykład rozkładów dawki dla technik jedno-, dwu- i wielopolowych.



Rycina 8.4. Przykład napromieniania gruczołu krokowego. Rozkłady dawek promieniowania dla jednej wiązki: A – bardzo wysoka dawka w pęcherzu moczowym, dwie wiązki promieniowania; B – dawki w pęcherzu moczowym i odbytnicy przekraczają dawki tolerancji; C – cztery wiązki promieniowania, dawki w pęcherzu moczowym i odbytnicy są akceptowalne; D – najnowsza technika dynamiczna, kilka łuków, zmienna moc wiązki, wysoka dawka terapeutyczna w prostaty, bardzo małe dawki w pęcherzu moczowym i odbytnicy. Kolor czerwony oznacza dużą dawkę promieniowania, niebieski – bardzo małą. Źródło: opracowanie własne.