

Obsevalne naprave za teleradioterapijo

na oddelku za radioterapijo Onkološkega inštituta Ljubljana

Janka Čarman, Irena Oblak in Primož Strojman

Uvod

Onkološki inštitut Ljubljana je edina ustanova v Sloveniji, kjer se izvaja zdravljenje z ionizirajočim sevanjem. Leta 2004 je bilo na Oddelku za radioterapijo, v enoti Teleterapija, z obsevanjem zdravljenih 3253 bolnikov, pri katerih je bilo izvedenih 5186 obsevalnih ciklov (en obsevalni cikel vključuje od enega do 70 obsevalnih odmerkov). V Sloveniji je obsevanje sestavni del zdravljenja pri približno 40 % vseh obolelih za rakom; po mednarodnih priporočilih naj bi se z obsevanjem zdravilo vsaj 50 % vseh bolnikov z rakom.

Na Onkološkem inštitutu Ljubljana od januarja 2006 obratuje šest megavoltnih obsevalnih naprav in ena terapevtska rentgenska obsevalna naprava:

- 2 telekobalta,
- 4 linearni pospeševalniki,
- 1 terapevtska rentgenska obsevalna naprava.

Izbira obsevalne naprave, na katero zdravnik specialist radioterapije in onkologije napoti posameznega bolnika, je odvisna od značilnosti obsevalnika (natančnosti, vrste in prodornosti žarkovnih snopov), bolnika (stanja zmogljivosti, dimenzij obsevanega dela telesa) in njegove bolezni (mesta v telesu, razsežnosti, oblike tumorja).

Namen našega prispevka je predstaviti temeljne značilnosti obsevalnih naprav, ki obratujejo na Oddelku za radioterapijo Onkološkega inštituta Ljubljana. Zdravnikom drugih strok in študentom medicine želimo prikazati prednosti in slabosti posameznih vrst obsevalnikov, ki vplivajo na odločitev, na kateri napravi bo bolnik obsevan, s tem pa tudi na odločitev o nakupu novih tovrstnih naprav.



Slika 1: Telekobalt Philips Co, Philips. Naprava je bila kupljena leta 1979. V letošnjem letu je predvidena zamenjava tega obsevalnika z novim, zmogljivejšim linearnim pospeševalnikom.

Telekobalt

V glavi obsevalnika se nahaja radioaktivni izotop kobalta ^{60}Co , ki kontinuirano seva fotone (γ -žarki). Pri radioaktivnem razpadu ^{60}Co se sprostita dva fotona z energijama 1,17 MV in 1,33 MV (povprečna energija 1,25 MV), ki ju izkoriščamo za obsevalno zdravljenje.

Telekobalt je pretežno mehanska naprava, zato je razmeroma poceni, vzdrževanje pa preprosto. Danes veljajo telekobaltne obsevalne naprave za zastarele, saj so pomanjkljivosti fotonskega žarkovnega snopa iz izvira ^{60}Co in samega obsevalnika številne:

- energija fotonskega žarkovnega snopa je sorazmerno nizka (srednja energija 1,25 MV) in kot taka ni primerna za obsevanje tumorjev, ki ležijo globoko v telesu, npr. v prsnem košu, trebuhu in medenici;
- točka najvišje doze (t. i. dozni maksimum) v tkivu se nahaja 0,5 cm pod površino obsevanega predela, kar povzroča klinično pomembne okvare kože in podkožnih struktur (tabela 1);

Tabela 1: Primerjava globine najvišje doze (doznega maksimuma) in deleža doze na površini fotonskih žarkovnih snopov različnih energij.

Doza	^{60}Co	5 MV	6 MV	15 MV
$D_{\max}$ (cm)	0,5	1,2	1,5	2,9
D na površini (%)	80 %	50 %	50 %	35 %

$D_{\max}$ – globina najvišje doze (doznega maksimuma); D – doza.

- obsevalno polje je zaradi pojava plosce razmeroma neostro omejeno. Na širino plosce delno vpliva velikost izvira – ta v premeru navadno meri 1,5–2 cm (v nasprotju z izvirom v linearnem pospeševalniku, kjer je premer le nekaj mm);
- oblikovanje obsevalnih polj je zaradi preprostega kolimatorskega sistema v glavi obsevalnika omejeno na zamuden postopek vlijanja t. i. individualnih zaščit, ki so nerodne za rokovanje in pogost vir nenatančnosti v obsevalnem postopku;
- zaradi sorazmerno majhne aktivnosti radioaktivnega izvira je razdalja med njim in bolnikom (površino telesa) omejena na največ 80 cm, kar v večini primerov onemogoča izvajanje natančnejše izocentrične obsevalne tehnike;
- zaradi stalnega razpadanja radioaktivnega izotopa ^{60}Co (s tem pa zmanjševanja njegove aktivnosti in podaljševanja obsevalnega časa) je treba izvir zamenjati na 4 do 5 let (razpolovna doba ^{60}Co , tj. čas, ko pade aktivnost izotopa na polovico izhodne aktivnosti, je 5,28 leta), kar pri vzdrževanju teh naprav predstavlja pomemben strošek;

- stalna prisotnost radioaktivnega izotopa Co^{60} na oddelku predstavlja potencialno nevarnost s stališča varstva pred ionizirajočim sevanjem. Radioaktivni izvir namreč seva tudi, kadar ni v t. i. aktivnem položaju, torej tudi takrat, ko ne obsevamo bolnikov. V neaktivnem položaju varuje okolico pred pretiranim sevanjem radioaktivnega izvira svinčena glava, kjer se izotop Co^{60} nahaja. Najverjetnejša nevarnost predstavlja zataknevanje radioaktivnega izvira na poti iz aktivnega v neaktivni položaj ali obratno. Do takega incidenta je že večkrat prišlo tudi na Onkološkem inštitutu Ljubljana;
- telekobaltne obsevalne naprave niso opremljene z računalniškimi sistemi, ki bi omogočali povezavo s sistemi za načrtovanje obsevanja in s sistemi za preverjanje lege obsevalnih polj.

Uporaba telekobaltne obsevalne naprave je torej omejena na bolnike s tumorji, ki ležijo na površini telesa ali v njeni bližini (tumorji kože, udov, dojke ter tumorji področja glave in vratu). Zaradi omejene natančnosti in možnosti kontrole lege obsevalnih polj v razvitem svetu te naprave uporabljajo le pri paliativnem obsevanju. Na Onkološkem inštitutu Ljubljana delujeta dve telekobaltni obsevalni napravi: prva, častitljive starosti 27 let (zamenjava predvidena letos), in druga, stara 16 let (zamenjava predvidena leta 2008, tj. ob zastaranju izvira Co^{60}). Zaradi splošnega pomanjkanja obsevalnih zmogljivosti v naši državi je dobršen del bolnikov, ki se obsevajo na teh dveh obsevalnikih, zdravljenih z namenom ozdravitve, kar je, žal, v nasprotju s priporočili in izkušnjami.



Slika 2: Linearni pospeševalnik Elekta Synergy. Sodobna obsevalna naprava, ki tvori fotonjski in elektronski žarkovni snop različnih energij.

Linearni pospeševalnik

Je megavoltna obsevalna naprava, ki danes v radioterapiji predstavlja zlati standard. Temeljne prednosti linearnega pospeševalnika pred telekobaltom so, da lahko tvori dve vrsti žarkovnih snopov različnih energij, elektronskega in fotonjskega, večja natančnost in varnost.

Izvir žarkovnega snopa ni več radioaktivni izotop, temveč t. i. elektronski top, ki se nahaja v pospeševalni cevi. Ob segrevanju volframove nitke iz nje izparevajo elektroni, ki jih elektromagnetno valovanje v cevi pospeši do zelo visokih energij. Visokoenergijski elektronski curek je na

izhodu iz pospeševalne cevi oblikovan v ozek snop, usmerjen bodisi na:

- tarčo, iz katere kot posledica zavornega sevanja elektronov izhajajo visokoenergijski fotoni (obsevanje s fotoni, x-žarki), ali na
- sipalno folijo, ki ozek elektronski curek razprši v primerno širok elektronski snop (obsevanje z elektroni).

Prednosti linearnih pospeševalnikov so torej naslednje:

- ena sama naprava lahko tvori fotonjski in elektronski žarkovni snop različnih energij, ki imata različne radiofizikalne značilnosti, kar s pridom izrabljamo v klinični praksi (glej spodaj);
- visokoenergijski žarkovni snopi omogočajo obsevanje tumorjev globlje v telesu (v prsnem košu, trebuhu, medenici);
- točka najvišje doze je pomaknjena v globino obsevanega tkiva, proti tarči, kar pomeni, da je doza na površini telesa nad tumorjem nižja, torej so okvare tkiv v tem predelu manjše (tabela 2);

Tabela 2: Globina najvišje doze (doznega maksimuma), 90 % doze in delež doze na površini pri obsevanju z elektronskim žarkovnim snopom različnih energij.

Doza	6 MeV	9 MeV	12 MeV	15 MeV	18 MeV
$D_{\max}$ (cm)	1,2	2	2,4	2,6	2,9
D_{90} (cm)	2	3	4	4,8	5,5
D na površini (%)	79	83	90	92	95

$D_{\max}$ – globina najvišje doze (doznega maksimuma);
 D_{90} – globina 90 % doze; D – doza.

- ker je izvir skoraj točkast, je obsevalno polje ostreje omejeno (polsenca je ožja);
- računalniško vodeni večlistni kolimatorski sistem v glavi sodobnih obsevalnikov omogoča oblikovanje obsevalnih polj, kot ga zahteva oblika tumorja oziroma tarče. Zamuden postopek izdelave individualnih zaščit in njihovega nameščanja v žarkovni snop pod glavo naprave ni več potreben;
- zaradi večje hitrosti doze je razdalja izvir–tarča večja, navadno 100 cm ali več, kar omogoča uporabo natančne izocentrične obsevalne tehnike in uporabo večjih polj (npr. pri zdravljenju Hodgkinove bolezni);
- nevarnost izpostavljenosti sevanju je omejena le na čas obratovanja naprave. V vmesnem času, ko osebe namešča bolnika na obsevalno mizo ali po koncu obsevanja, je naprava izključena in ne seva;
- sodobni linearni pospeševalniki so v celoti računalniško krmiljeni, kar omogoča računalniški nadzor izvedbe obsevanja. Računalniška tehnologija hkrati omogoča preprosto in natančno preverjanje kakovosti obsevanja in povezavo s sistemi za načrtovanje obsevanja. Vzpostavitev te povezave je nadomestila ročno vnašanje obsevalnih parametrov (za posameznega bolnika tudi več 100 ali 1000 podatkov), določenih v procesu načrtovanja obsevanja, v računalnik obsevalnika, kar je močno zmanjšalo možnost napake.

Po svojih radiofizikalnih lastnostih se fotonjski in elektronski žarkovni snop močno razlikujeta, kar s pridom izrabljamo v vsakodnevni klinični praksi. Temeljna razlika izhaja iz načina predajanja energije vpadlega fotona oziroma

elektrona atomom tkiva, ki ga obsevamo. Doza fotonkega žarkovnega snopa v obsevanem tkivu pada približno eksponentno z globino v tkivu, medtem ko v primeru elektronskega žarkovnega snopa doza hitro in strmo pade do zanemarljive vrednosti, tj. na manj kot 5 % izhodiščne vrednosti (diagrami 3, 4, 5). Fotonsko delovanje linearnega

Diagram 1: Odvisnost deleža globinske doze (PDD) od energije fotonkega žarkovnega snopa. (Vir: Enota za radiofiziko, Onkološki inštitut Ljubljana)

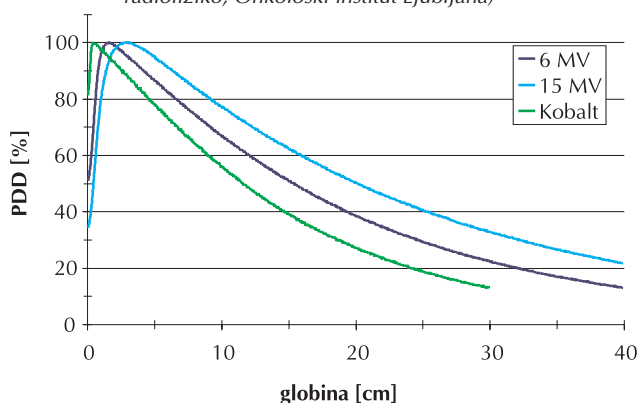


Diagram 2: Odvisnost deleža globinske doze (PDD) od energije elektronskega žarkovnega snopa. (Vir: Enota za radiofiziko, Onkološki inštitut Ljubljana)

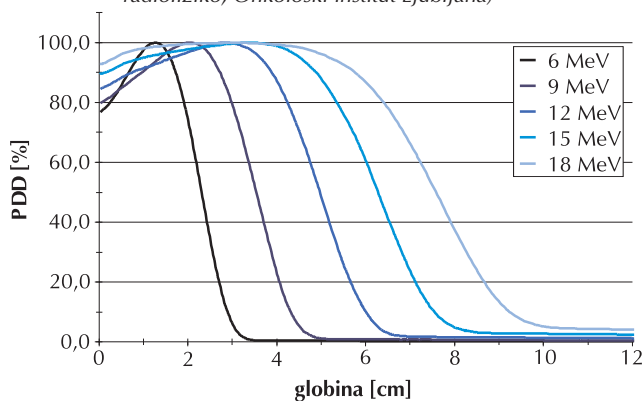
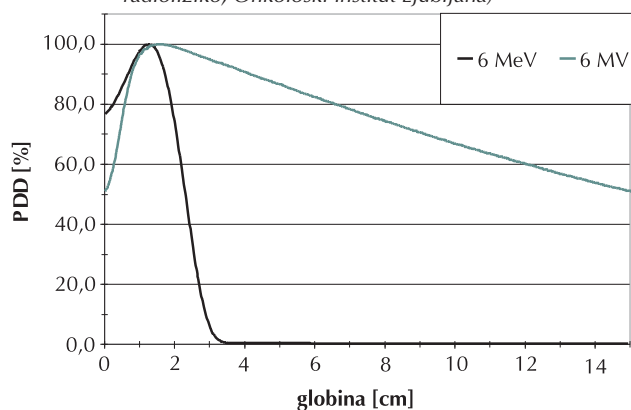


Diagram 3: Primerjava deleža globinske doze (PDD) fotonkega žarkovnega snopa energije 6MV in elektronskega žarkovnega snopa energije 6MeV. (Vir: Enota za radiofiziko, Onkološki inštitut Ljubljana)



pospeševalnika uporabljamo, kadar se tarča nahaja v globini telesa. S kombinacijo večjega števila fotonkih žarkovnih snopov, ki jih iz različnih smeri usmerimo proti tarči, dosežemo koncentriranje obsevalne doze v predelu tarče (t. i. visokodozno območje) in povečamo dozni gradient proti okolnim in na površini ležečim strukturam (t. i. nizkodozno območje). Nasprotno pa izberemo elektronsko delovanje obsevalnika, kadar se tarča nahaja na površini telesa ali tik pod njo. Zaradi hitrega padca doze v globini lahko učinkovito obsevamo površinsko ležeče tumorje, pri tem pa ohranimo občutljiva globlje ležeča zdrava tkiva (npr. obsevanje prizadetih bezgavk na vratu z radikalno dozo; kritično strukturo predstavlja spodaj ležeča hrbtenjača).

Na Onkološkem inštitutu Ljubljana obratujejo štiri linearni pospeševalniki. Najstarejši med njimi, Philips SL 75/5 iz leta 1996, je t. i. monoenergijska naprava, ki tvori le fotonski žarkovni snop ene same energije (5 MV). Zaradi omejene računalniške podpore in visoke cene te naprave pri nas nismo povezali z računalniškim sistemom za načrtovanje obsevanja. Vnos obsevalnih podatkov je zato ročen in kot tak zamuden ter podvržen možnim napakam. Ker gre za pospeševalnik starejše generacije, je obsevalno polje mogoče oblikovati le z uporabo individualnih zaščit, ki so same po sebi potencialen vir nenatančnosti oziroma napak. Na tej napravi se obsevajo predvsem bolniki z možganskimi tumorji in tumorji v območju glave in vratu. Paliativnega obsevanja na tej napravi praviloma ne izvajamo.

Drugi trije linearni pospeševalniki so sodobni dvoenergijski obsevalniki, ki so začeli obratovati leta 2001 (Varian 2100 C/D), 2004 (Elekta Synergy) oziroma 2006 (Varian 2100 C/D). Vsi tvorijo dva fotonska žarkovna snopa energij 6 MV in 15 MV ter spekter elektronskih snopov energij 6, 9, 12, 15 in 18 MeV. Popolna računalniška podpora omogoča povezavo z računalniškim sistemom za načrtovanje obsevanja in računalniškim tomografom v sklenjen računalniški mrežni sistem. Obsevalniki so opremljeni z večlistnim kolimatorskim sistemom, ki zagotavlja preprosto, hitro in natančno oblikovanje polj, kot ga narekuje oblika tarče. Uporabljamo jih predvsem za obsevanje bolnikov s tumorji v prsnem košu, trebuhu in medenici ter vedno za obsevanje z elektronskim žarkovnim snopom. Na vseh treh napravah je možno izvajati tudi sodobnejše obsevalne tehnike, kot je intenzitetno modulirajoče obsevanje (*ang. intensity modulated radiotherapy, IMRT*), na najnovejšem izmed njih, ob souporabi dodatne specifične opreme, tudi stereotaktično obsevanje. Slikovno vodeno obsevanje (*ang. image guided radiotherapy, IGRT*) brez drage dodatne opreme in navigacijskih sistemov na naših obsevalnikih trenutno, žal, ni izvedljivo.

Terapevtska rentgenska naprava

Te vrste obsevalnik je namenjen obsevanju s fotoni nizkih energij v območju nekaj 10 do nekaj 100 kV. V osnovi je podoben diagnostični rentgenski napravi z rentgensko cevjo kot ključnim sestavnim delom. V njej iz žareče katode izparevajo elektroni, ki jih napetost med elektrodama pospešuje proti tarči – anodi. Iz slednje ob trku izhajajo fotoni (x-žarki), ki jih uporabljamo v terapevtske namene.



Slika 3: Terapevtska rentgenska naprava Pantak-Terapax.

Točka najvišje doze se nahaja na sami površini kože. Zaradi omejene prodornosti so kilovoltni žarki primerni le za obsevanje tumorjev na površini kože z omejenim prodorom v globino (odvisno od energije, od nekaj milimetrov do nekaj centimetrov). Ti obsevalniki so poceni, prav takšno je tudi njihovo vzdrževanje, izvedba obsevanja pa je preprosta.

Na Onkološkem inštitutu Ljubljana je že 15 let v uporabi naprava Pantak-Terapax. Energijski spekter fotonskega snopa seže od 40 kV do 150 kV. Na njej obsevamo večino

primarnih nemelanomskih kožnih tumorjev, zasevkov v koži in podkožju, redkeje zasevke v rebrih ali povrhnje ležečih kosteh oziroma nekatere benigne lezije in obolenja (keloidi, teniški komolec, artritis ipd). Zaradi dotrajanosti naj bi to napravo že v bližnji prihodnosti nadomestila sodobna in zmogljivejša, ki bo z energijami fotonskega snopa do 300 kV omogočala tudi obsevanje nekoliko debelejših površinskih tumorjev.

Sklep

V pregledu smo predstavili arzenal teleterapevtskih obsevalnih naprav Oddelka za radioterapijo na Onkološkem inštitutu Ljubljana. Naš namen je informirati zdravnike drugih strok in študente medicine o njihovih najpomembnejših lastnostih in uporabnosti. Na tem mestu naj poudarimo, da le tehnično dovršeni sodobni obsevalniki v omrežni povezavi z računalniškim sistemom za načrtovanje obsevanja omogočajo varno, natančno in učinkovito obsevanje, kar se kaže bodisi v večjem deležu ozdravitev, zmanjšanju obsevalne poškodbe zdravih tkiv v okolici tarče ali obojem.

Viri

1. Khan FM. The physics of radiation therapy. 3rd ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2003: 38–58.
2. Verhey LJ, Petti PL. Principles of radiation physics. In: Leibel SA, Phillips TL, eds. Textbook of radiation oncology. 2nd ed. Philadelphia: Saunders, 2004: 101–27.
3. Brady LW, Simpson LD, Day JL, Tapley NV. Clinical application of electron-beam therapy. In: Perez CA, Brady LW, eds. Principles and practice of radiation oncology. 2nd ed. Philadelphia: JB Lippincott, 1992: 246–55.
4. Oldham M. Radiation physics and applications in therapeutic medicine. Med Phys 2001: 460–6.

