

Doporučení pro používání gafchromických filmů v radioterapii

Obsah

1	Úvod	2
2	Seznam zkratk.....	3
3	Vlastnosti gafchromických filmů	4
3.1	Odezva filmů.....	5
3.2	Energetická závislost gafchromických filmů	6
3.3	Nehomogenita gafchromických filmů	7
3.4	Stabilita odezvy filmů v čase („Post irradiation darkening“)	7
3.5	Závislost odezvy filmů na dávkovém příkonu.....	8
3.6	Úhlová závislost gafchromických filmů	8
3.7	Závislost odezvy filmů na jejich orientaci při skenování	8
3.8	Výběr vhodného typu filmu (použitelný rozsah dávek)	8
4	Skenery	10
4.1	Transmisní a reflexní mód skenování	10
4.2	Stabilita skenerů, warm-up efekt a vliv teploty na odezvu filmů.....	10
4.3	Lateral response artefact (LRA)	11
4.4	Výběr vhodného skeneru	12
5	Software pro vyhodnocení gafchromických filmů.....	13
6	Korekce při filmové dozimetrii	13
6.1	Korekce na nehomogenitu filmu	13
6.2	„Single channel“ metoda.....	13
6.3	„Dual channel“ metoda	14
6.4	„Triple channel“ metoda	14
6.5	LRA (Lateral response artefact) korekce	14
6.6	„One-scan“ protokol.....	14
6.7	Rekalibrační metoda („recalibration method“)... ..	16
7	Doporučený postup práce s gafchromickými filmy	16
7.1	Kontroly skeneru	17
7.2	Příprava filmů (skladování, teplota, vlhkost, stříhání a značení filmů)	17
7.3	Ozáření kalibračních filmů	19
7.4	Ozáření měřících filmů	21
7.5	Skenování filmů	21

7.6	Převod odezvy filmů na dávku (kalibrační křivka).....	23
7.7	Zpracování dat a vyhodnocení filmů	24
7.8	Použití korekcí	24
8	Zavedení filmové dozimetrie na pracovišti	25
9	Nejistoty při filmové dozimetrii.....	25
10	Použití gafchromických filmů v protonových svazcích	27
11	Použití gafchromických filmů v kilovoltážích fotonových svazcích	29
12	Použití gafchromických filmů v megavoltážních fotonových svazcích	30
12.1	Pro konvenční velikosti radiačních polí	30
12.2	Pro malá pole.....	30
12.3	Pro oblast buildupu	31
12.4	Pro rozhraní materiálů (nehomogenní prostředí).....	31
13	Použití gafchromických filmů na tomoterapeutickém ozařovači a na ozařovačích CyberKnife a Leksellův gama nůž.....	31
14	Použití gafchromických filmů při IGRT procedurách	31
14.1	kV IGRT	31
14.2	MV IGRT.....	32
15	Použití gafchromických filmů v externích elektronových svazcích	32
16	Použití gafchromických filmů v brachyterapii	32
16.1	LDR brachyterapeutické zdroje	32
16.2	HDR brachyterapeutické zdroje	33
17	Použití gafchromických filmů při in-vivo dozimetrii.....	34
18	Literatura.....	34

1 Úvod

Toto národní doporučení navazuje na starší doporučení SÚJB se shodným názvem „Používání gafchromických filmů v radioterapii“ [2] vydané v roce 2019 a jeho cílem bylo aktualizovat toto starší doporučení SÚJB [2] zejména s ohledem na report AAPM TG 235 Radiochromic Film Dosimetry: An Update to TG-55 [1], který vyšel v roce 2020.

Mezinárodní report AAPM TG 235 [1] představuje ucelené souhrnné doporučení pro správné používání gafchromických filmů. Cílem národního doporučení bylo z reportu AAPM TG 235 [1] vybrat ty nejdůležitější informace, přeložit je do češtiny a navíc v národním doporučení ještě zohlednit vlastní poměrně bohatou zkušenost SÚRO s používáním gafchromických filmů.

Nedá se říct, že by tento dokument kompletně nahrazoval starší doporučení SÚJB [2], spíše ho v některých aspektech doplňuje (např. nové typy filmů), v jiných upřesňuje. Nicméně i ve starším

doporučení SÚJB [2] může čtenář nalézt relevantní informace související s filmovou dozimetrií, jež nejsou obsaženy v tomto dokumentu.

Tento dokument se oproti staršímu doporučení SÚJB [2] více věnuje např. různým korekcím souvisejícím s filmovou dozimetrií a tříkanálové metodě. V tomto dokumentu je také výrazně větší prostor věnován kalibraci gafchromických filmů a různým aplikacím gafchromických filmů, např. v brachyterapii, při in-vivo dozimetrii nebo při zobrazovacích procedurách IGRT.

Hlavním cílem tohoto dokumentu je, stejně jako u staršího doporučení SÚJB [2], poskytnout radioterapeutickým pracovištím návod pro zavedení filmové dozimetrie využívající gafchromické filmy. Pracovištím, jež už gafchromické filmy používají, by toto doporučení mělo pomoci nastavit správnou praxi použití filmové dozimetrie (gafchromických filmů a skenerů). Gafchromické filmy totiž vyžadují specifický způsob zacházení (manipulace, skenování, kalibrace, korekce, ...) a pro získání reprodukovatelných výsledků s potřebnou přesností je třeba konzistentně dodržovat určité zásady. Doporučení není výhradně určeno pouze pro radioterapeutická pracoviště, sloužit může také např. držitelům povolení při provádění ZDS a PZ.

2 Seznam zkratek

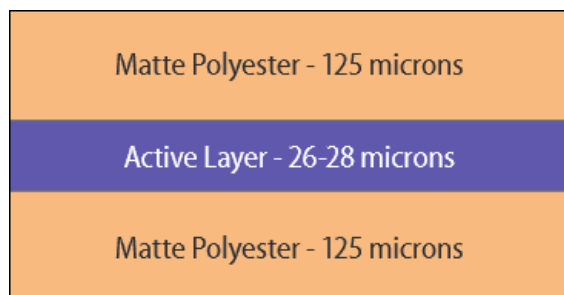
2D	Dvojměrný
3D	Trojměrný
AAPM	Americká asociace fyziků v medicíně (American Association of Physicists in Medicine)
CBCT	Výpočetní tomografie prováděná s využitím kuželovitého svazku (Cone Beam Computed Tomography)
CCD snímač	čip, který snímá barevný obraz (Charge–Coupled Device)
CT	Výpočetní tomografie (Computed Tomography)
Dpi	Počet bodů nebo pixelů na palec (dots per inch)
FWHM	Šířka píku v polovině jeho maximální výšky (full width at half maximum)
HDR	Vysoký dávkový příkon (High dose rate)
IGRT	Obrazem řízená radioterapie (Image Guided Radiation Therapy)
IMRT	Radioterapie s modulovanou intenzitou svazku
IOERT	intraoperační radioterapie elektronovým svazkem (intraoperative electron radiotherapy)
kV	Kilovoltážní
LDR	Nízký dávkový příkon (Low dose rate)
LED dioda	Elektroluminiscenční dioda (Light-Emitting Diode)
LET	Lineární přenos energie (Linear Energy Transfer)
LRA	Artefakt odezvy homogenně ozářeného filmu v laterálním směru skeneru (Lateral Response Artefact)
MC	Monte Carlo
MLC	Vícemelový kolimátor (multileaf colimator)
MR	Magnetická rezonance
MV	Megavoltážní
OD	Optická denzita

PDD	Procentuální hloubková dávka (Percentage depth dose)
PMMA	Polymethylmethakrylát
PV	Hodnota pixelu (Pixel Value)
PZ	Přejímací zkouška
QA	Zabezpečování jakosti (Quality Assurance)
RGB snímek	Snímek obsahující tři barevné kanály: červený, zelený a modrý (red green blue)
ROI	Oblast zájmu (Region of interest)
SBRT	Extrakraniální stereotaktická radioterapie (Stereotactic Body Radiation Therapy)
SRS/SRT	Stereotaktická radiochirurgie/radioterapie
SSD	Vzdálenost povrchu fantomu nebo kůže pacienta od zdroje záření (source to surface distance)
TBI	Celotělové ozařování (Total body irradiation)
TG	Pracovní skupina (Task Group)
TMR	Tissue maximum ratio
TRS	Technical Report Series
VMAT	Rotační radioterapie s modulovanou intenzitou svazku
ZDS	Zkouška dlouhodobé stability
ZPS	Zkouška provozní stálosti

3 Vlastnosti gafchromických filmů

Gafchromické filmy jsou filmy, v nichž po ozaření dochází k barevnému zabarvení (zčernání). Tato barevná změna je důsledkem polymerizace monomerů v citlivé vrstvě filmu a je úměrná absorbované energii ionizujícího záření, a tím i absorbované dávce. Gafchromické filmy jsou relativně málo citlivé na světlo, a proto s nimi lze manipulovat na denním i umělém světle. Avšak i přes relativně nízkou citlivost gafchromických filmů na světlo by se gafchromické filmy měly vystavovat světlu co nejméně [1]. Díky vysokému submilimetrovému prostorovému rozlišení jsou vhodným nástrojem zejména pro měření dvourozměrných dávkových distribucí v oblasti velkých dávkových gradientů. Navíc, gafchromické filmy jako např. EBT3 jsou navrženy tak, aby měly minimální energetickou závislost a aby byly téměř vodě-ekvivalentní.

V současnosti jsou jedním z nejčastěji používaných filmů v radioterapii filmy EBT3, které vyrábí firma Ashland (dříve International Specialty Products). Gafchromické filmy EBT3 jsou vhodné pro měření dávek přibližně od 0,01 Gy do 20 Gy [1]. Symetrická struktura gafchromického filmu EBT3 (matná polyesterová vrstva, vrstva aktivní složky, matná polyesterová vrstva) je znázorněna na Obr. 1.



Obr. 1: Schématická struktura gafchromického filmu EBT3 [60]

Aktivní vrstva EBT3 filmu je tvořena mikrokristaly monomeru citlivými na ionizující záření. Tyto mikrokristaly jsou umístěny a vázány v syntetickém polymeru. Tloušťka aktivní vrstvy je 26-28 μm . Aktivní vrstva filmu je obklopena polyesterovými vrstvami, jež chrání aktivní vrstvu před mechanickým poškozením.

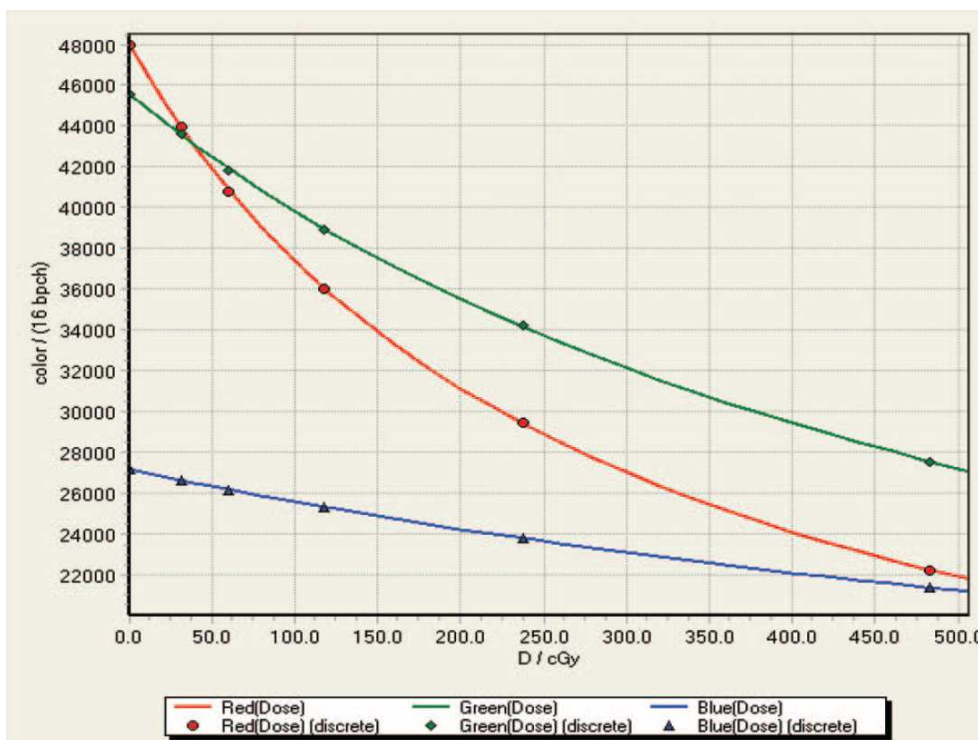
Výrobce EBT3 filmů udává, že díky symetrické struktuře filmů se při skenování nemusí rozlišovat přední a zadní strana filmu. To, že odezva EBT3 filmů nezávisí na tom, zda se film při skenování umístí na lůžko skeneru přední nebo zadní stranou potvrdili Dreindl a kol. [3], v jejich práci se změny optické denzity (OD) pro tyto dvě geometrie (přední vs. zadní strana) pro EBT3 filmy pohybovaly od 0,0% do 0,3%. U EBT2 filmů se změny OD pohybovaly od 0,1% do 1,1%.

Díky polyesterové matné vrstvě EBT3 filmy eliminují výskyt Newtonových kroužků, jež nepříznivě ovlivňují odezvu filmu. To potvrdili např. Dreindl a kol. [3], kteří na EBT3 filmech nezaznamenali žádné artefakty způsobené Newtonovými kroužky, na EBT2 filmech ale ano.

3.1 Odezva filmů

Odezvu filmů lze vyhodnocovat buď jako hodnoty pixelů (PV) nebo jako optickou denzitu (OD). Optická denzita se z hodnot pixelů získá pomocí následujícího vztahu: $OD = \log_{10} (65535/PV)$.

Pokud se gafchromické filmy skenují (digitalizují) jako RGB snímky, lze pak vyhodnocovat jejich odezvu v jednotlivých barevných kanálech (tzv. „single channel“ metoda), konkrétně v červeném, zeleném nebo modrém. Ukázka odezvy gafchromických filmů je zobrazena na Obr. 2, kde je ukázána závislost odezvy filmů (hodnot pixelů – svislá osa) na dávce (vodorovná osa) pro červený, zelený a modrý kanál. Pro dozimetrické účely je použitelný jak červený, tak zelený kanál. Obecně nelze říci, který kanál je pro dozimetrické účely vhodnější. Zelený kanál se doporučuje používat pro měření vyšších dávek, například přibližně od 10 Gy do 20 Gy.



Obr. 2: Odezva gafchromických filmů EBT3 v červeném, zeleném a modrém kanálu [4]

Vedle „single channel“ metody lze k vyhodnocení odezvy filmů použít také „multi channel“ metodu. Tato metoda pro stanovení dávky využívá kalibrační křivky (závislost odezvy filmů na dávce) ve více barevných kanálech (dvou nebo třech).

Při vyhodnocení odezvy filmů je možné od odezvy měřících filmů odečítat odezvy pozadových neozářených filmů. Při „multi channel“ metodě se odezvy neozářených filmů zpravidla neodečítají.

Postup vyhodnocení filmů využívající optickou denzitu a odečtení neozářeného filmu je uveden např. v práci [5].

3.2 Energetická závislost gafchromických filmů

Gafchromické filmy jsou navrženy tak, aby měly minimální energetickou závislost a aby byly téměř vodě-ekvivalentní, stejně tak jako ekvivalentní měkké tkáni.

Udává se, že energetická závislost gafchromických filmů je pro oblast megavoltážních energií nižší než 2% [1]. Dle Sarfehnia a kol. [6] je EBT3 film energeticky nezávislý v rozsahu od megavoltážních (MV) energií až do energie 400 keV. Dle práce [7] jsou filmy z řady EBT 2, EBT 3, HD – V2, MD – V3, EBT - XD v šaržích novějších roku 2014 energeticky téměř nezávislé v rozsahu energií od několika MeV až do 40 keV (od 1% do 5%). Snížení energetické závislosti bylo docíleno změnou dílčích složek materiálu filmu s požadavkem na protonové číslo $Z < 17$, čehož bylo docíleno užitím příměsi oxidu hlinitého (Al_2O_3).

Filmy typu XR – QA2, XR – RV3 vykazují silnou energetickou závislost díky obsahu prvků s vysokým Z.

Závislosti gafchromických filmů na lineárním přenosu energie (LET) se věnuje kapitola 10 - Použití gafchromických filmů v protonových svazcích.

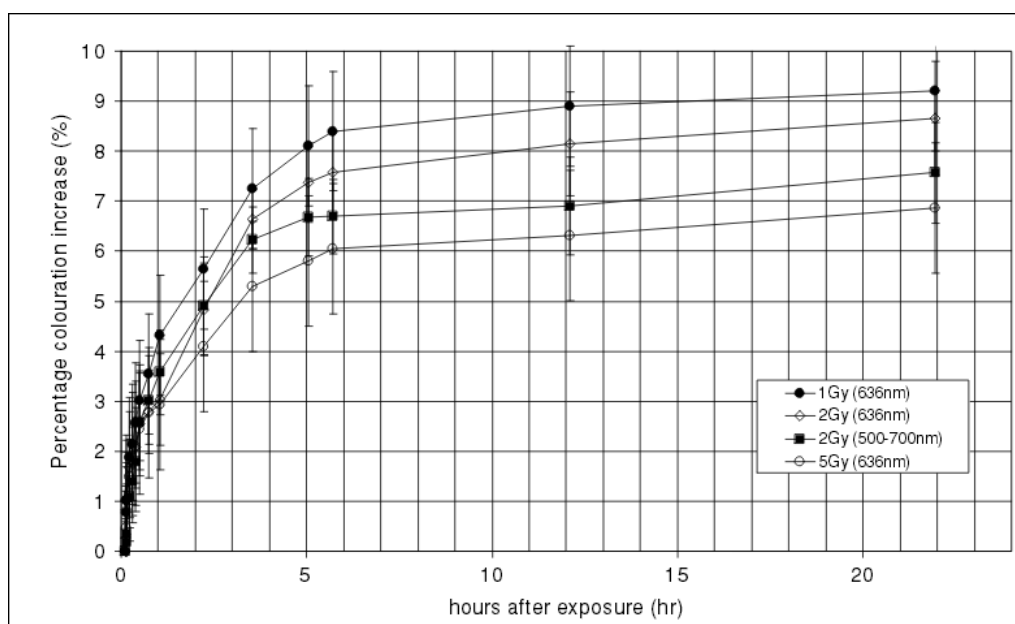
3.3 Nehomogenita gafchromických filmů

Nehomogenita EBT2 a EBT3 filmů je dle práce [3] pro rozpětí dávek 0 až 8 Gy a pro energie 6 MV, 10 MV a 18 MV nižší než $\pm 1,5\%$ (v hodnotách pixelů). Nehomogenitu v práci [3] stanovili jako směrodatnou odchylku hodnot pixelů pro malé oblasti zájmu od $0,5 \times 0,5 \text{ cm}^2$ až do $2,5 \times 2,5 \text{ cm}^2$ a vztáhli ji k průměrným hodnotám pixelů v daných ROI. Nehomogenitu stanovili pro EBT3 filmy šarže A101711-03 a EBT2 filmy šarže A06271102 a F03181001B.

Nehomogenitu gafchromických filmů si mohou různí autoři nadefinovat různě. Je třeba být si vědom toho, zda se jedná o nehomogenitu v hodnotách pixelů, v optické denzitě nebo v dávce.

3.4 Stabilita odezvy filmů v čase („Post irradiation darkening“)

Při vyhodnocení gafchromických filmů hraje významnou roli změna zčernání filmu s časem po ozáření, tzv. „post irradiation darkening“. „Darkening“ je způsoben polymerizací monomerů v aktivní vrstvě filmu. Změna zčernání gafchromického filmu je nejvýraznější prvních několik hodin po ozáření [8,9], viz Obr. 3.



Obr. 3: Procentuální nárůst odezvy (optické denzity) v závislosti na čase po ozáření (v hodinách) pro EBT film ozářený různými dávkami [8]

U filmů řady EBT, MD-V3, HD-V2, XR-RV a XR-QA je přibližně za 24 hodin polymerizace téměř kompletní a změna optické denzity je nízká. Dle [1] se u filmu EBT3 optická denzita zvyšuje přibližně o 2,5% mezi 24 hodinami a 14ti dny po ozáření. Přibližně o 2,5% se zvyšuje optická denzita během následujících šesti měsíců. Po 24 hodinách od ozáření je nejistota stanovení odezvy filmu malá, neboť doba od

ozáření má pouze malý vliv na měřenou odezvu. Protokoly pro vyhodnocení filmů často uvažují dobu mezi ozářením a skenováním filmů 16 až 24 hodin nebo se používá vždy stejná doba po ozáření.

Výše uvedenou dobu mezi ozářením a skenováním lze obejít tím, že se použije tzv. „one-scan“ protokol s rekaliбраční metodou (viz kapitola 6.7) nebo se měřicí a kalibrační filmy skenují spolu v rámci jednoho skenu (v tomto případě je dostatečná doba mezi ozářením a skenováním přibližně půl hodiny).

3.5 Závislost odezvy filmů na dávkovém příkonu

Práce [10] potvrdila nezávislost gafchromických filmů EBT3 na dávkovém příkonu od 100 do 600 MU/min. Pro jednotlivé dávkové příkony uvádějí rozdíly v optických denzitách do 1%. Nezávislost odezvy různých typů gafchromických filmů na dávkovém příkonu potvrzuje také doporučení AAPM TG 235 [1].

Pokud se filmy skenují v dostatečně časovém odstupu od ozáření (např. minimálně 16 hod) není třeba uvažovat, zda film byl ozářen jednorázově nebo v několika menších frakcích, navýšení odezvy filmu vlivem ozáření je v obou případech stejné [1].

3.6 Úhlová závislost gafchromických filmů

Pro filmy řady EBT a MD byla pro MV fotonové svazky změřena úhlová závislost do 1% [11, 12]. Úhlovou nezávislost gafchromických filmů EBT3 potvrdili také Huet a kol. [13].

3.7 Závislost odezvy filmů na jejich orientaci při skenování

Odezva gafchromických filmů závisí na orientaci těchto filmů na skeneru. Dreidl a kol. [3] porovnávali změnu odezvy EBT2 a EBT3 filmů při skenování v orientaci „portrait“ (0° a 180°) a „landscape“ (90° a 270°) a pro tyto orientace zjistili rozdíly v optické denzitě větší než 3,9%, přičemž největší rozdíly byly u nízkých dávek (0,5 Gy).

3.8 Výběr vhodného typu filmu (použitelný rozsah dávek)

Výběr vhodného typu filmu by se měl odvíjet od toho, pro jaké energie svazků (megavoltážní nebo kilovoltážní) se zamýšlí filmy používat spolu s předpokládaným rozsahem měřených dávek.

Pro měření dávek a dávkových distribucí v radioterapii lze pro megavoltážní fotonové svazky, svazky elektronů a svazky protonů použít filmy EBT2, EBT3 a nelaminované EBT3 filmy. Tyto filmy jsou vhodné k měření dávek přibližně od 10 mGy až do 20 Gy.

Také je třeba mít na paměti, že směrnice kalibračních křivek (popisující odezvu filmu v závislosti na dávce) se snižuje s rostoucí dávkou a blíží se saturaci při velkých dávkách (viz např. Obr. 2). Proto, pokud se velikost měřených dávek blíží k horní hranici použitelných dávek, je lepší zvolit typ filmu s menší citivostí. Například pro dávky vyšší než 10 Gy je lepší zvolit film EBT-XD oproti filmu EBT3. Filmy EBT-

XD s použitelným rozsahem dávek 40 mGy až 40 Gy jsou určeny zejména pro stereotaktické aplikace (jedna frakce SRS a SBRT).

Pro měření vyšších dávek jsou vhodné filmy MD-V3 (1 Gy až 100 Gy) a HD-V2 (10 Gy až 1000 Gy).

Pro měření dávek v kilovoltážních svazcích lze použít filmy XR-RV3 (50 mGy až 15 Gy) a XRQA2 (1 mGy až 200 mGy).

Pro měření nedozimetrických charakteristik radiačních polí pro megavoltážní svazky fotonů, elektronů a protonů lze použít vedle filmů řady EBT také filmy RTQA2 (20 mGy až 8 Gy). Pro kilovoltážní svazky se doporučuje použít filmy XRQA2 (1 mGy až 200 mGy), XRCT2 (1 mGy až 200 mGy) a XRM2 (1 mGy až 200 mGy).

Tab. 1: Dostupné typy filmů pro použití v radioterapii

Typ filmu	Velikost [palce]	Vhodný rozsah dávek [Gy]
HD – V2	8" × 10"	10 – 100
MD – V3*	5" × 5"	1 – 100
EBT2*	8" × 10"; 12,8" × 17"	0,01 – 20
EBT3*	8" × 10"; 12,8" × 17"	0,01 – 20
EBT3 nelaminovaný	8" × 10"	0,01 – 20
EBT-XD*	8" × 10"	0,04 – 40
RTQA2	10" × 10"; 12,8" × 17"; 1,25" × 11"	0,02 – 8

* Typy filmů MD-V3, EBT2, EBT3 a EBT-XD jsou dostupné také ve speciálních tvarech a velikostech pro fantomy k ozařovači CyberKnife, pro fantom Lucy a pro další fantomy.

Poznámka k Tabulce 1: Filmy typu EBT3F, EBT3P, EBT3+ a EBT3 + P mají stejnou konfiguraci vrstev a prvkové složení jako filmy typu EBT3. Velikost filmů EBT3F a EBT3P je stejná jako u filmů EBT3. Velikost filmů EBT3+ a EBT3 + P je 8" × 11". Filmy EBT3F již obsahují markery pro sesazení s osami urychlovače. Filmy EBT3P jsou již předstříhané od výrobce, aby se vešly do GafChromic QuiCk fantomu (Ashland). Filmy EBT3+ mají odnímatelné referenční proužky o velikosti 1,5" × 8". Filmy EBT3 + P jsou již předstříhané od výrobce, aby se vešly do GafChromic QuiCk fantomu (Ashland) a mají odnímatelné referenční proužky o velikosti 1,5" × 8". Ještě existují speciální filmy EBT3 určené přímo pro ozařovač CyberKnife (např. Ballcube II EBT3, AQA EBT3).

Tab. 2: Dostupné typy filmů pro použití v rentgenové diagnostice a při IGRT

Typ filmu	Velikost [palce]	Vhodný rozsah dávek [cGy]
XR – RV3	12,8" × 17"	5 – 1500
XR – QA2	10" × 12"	0,1 – 20
XR – CT2	0,75" × 5"	0,1 – 20
XR – M2	1" × 3,5"	0,1 – 20

Filmy XR-QA2 a XR-RV3 se používají nejčastěji ke geometrickým testům a k hodnocení dávek při KV zobrazování a IGRT.

4 Skenery

Ke stanovení odezvy filmů lze použít několik nástrojů. Například bodové denzitometry, 2D skenery translačního typu, 2D skenery zobrazovacího typu, 2D skenery kombinovaného translačního a zobrazovacího typu, barevné stolní skenery a spektrofotometry. Jelikož se pro dozimetrické účely gafchromické filmy skenují v současné době téměř výhradně na stolních skenerech, věnuje se tento dokument pouze stolním skenerům.

Ve stolních skenerech se k prosvětlování filmů používají různé zdroje světla, nejčastěji bílá fluorescenční lampa nebo pole bílých LED diod. Součástí optického systému těchto skenerů jsou vedle zdroje světla ještě zrcadla, čočky a pole CCD snímačů. CCD snímače se používají ke snímání množství světla prošlého skrz filmy.

4.1 Transmisní a reflexní mód skenování

Filmy se nejčastěji skenují na stolních skenerech v transmisním módu, lze použít ale také reflexní mód.

Skenovat v reflexním módu je možné na každém stolním skeneru. Zdroj světla, stejně jako pole CCD snímačů je umístěno pod skleněným lůžkem skeneru. Při reflexním skenování se nad lůžko s filmem umísťuje bílá reflexní podložka. Svazek světla vychází z lampy, prochází filmem, odráží se od reflexní podložky nebo od bílé substrátové vrstvy (v případě filmů jako RTQA2, XR-RV3 nebo XR-QA2), opět prochází filmem a dopadá na CCD snímače. Při skenování filmů typu RTQA2, XR-RV3 a XR-QA2 je nutné umístit filmy oranžovou stranou směrem na sklo skenované plochy. V případě transparentních filmů, jako jsou řady EBT, MD a HD, nezáleží na stranovém umístění. Skenování v reflexním režimu vede ke zvýšení signálu způsobeného odrazy v jednotlivých vrstvách, což omezuje dynamický rozsah filmů EBT2 a EBT3 na přibližně 2,5 Gy při použití červeného kanálu a na přibližně 8 Gy při použití zeleného kanálu. Výhodou reflexního módu oproti transmisnímu módu je zvýšená citlivost filmů pro měření malých dávek.

Pro skenování v transmisním módu je nutné ke skeneru přikoupit víko obsahující světelný zdroj (pokud již není součástí balení). Toto víko se pak umístí nad skleněné lůžko skeneru. Při transmisním módu kolimovaný svazek světla prochází gafchromickým filmem umístěným na skleněném skenovacím lůžku a pomocí CCD snímačů umístěných pod filmem se detekuje množství prošlého světla.

Je prokázáno, že odezva filmů závisí na vzdálenosti mezi filmem a zdrojem světla [14,15]. Pro EBT3 filmy a skener Epson 10000XL bylo zjištěn nárůst odezvy v hodnotě pixelů cca o 1,2% s s každým milimetrem směrem ke zdroji světla. Toto může nastat, pokud film neleží rovně na lůžku skeneru, ale v některých místech se zvedá. Tento problém lze vyřešit tím, že se filmy na skeneru přikryjí skleněnou deskou o tloušťce 3 až 4 mm.

4.2 Stabilita skenerů, warm-up efekt a vliv teploty na odezvu filmů

Matney a kol. [16] skenovali desetkrát po sobě EBT filmy ozářené různými dávkami na skeneru Epson V700. Směrodatné odchylky průměrných hodnot pixelů byly vždy menší než 0,2%. Dufek [17] stanovoval krátkodobou stabilitu skenerů Epson 10000XL a Epson V750 jako poměr maximální a

minimální odezvy (hodnot pixelů) EBT2 filmu pro dvacet skenů po sobě. Pro skener Epson 10000XL, resp. Epson V750 byla stabilita menší než 0,2%, resp. 0,3%.

Jelikož skenery zpravidla nebývají trvale zapnuty, doporučuje se v rámci zahřátí elektroniky ponechat skener alespoň 30 minut zapnutý před skenováním.

Vzhledem k tzv. „warm-up“ efektu se doporučuje před skenováním gafchromických filmů provést několik skenů naprázdno pro zahřátí lampy skeneru. Někteří autoři též vyhodnocují až druhé a další skeny.

Pro zahřátí světelného zdroje obvykle stačí provést 5 až 10 zahřívacích skenů.

Lewis a Devic [19] zjistili, že pokud se jednotlivé skeny provádí brzy po sobě (např. do 45 sekund), může se rozdílnost v odezvě jednotlivých skenů (tzv. scan-to-scan variabilita) projevit v nejistotě stanovení dávky vyšší než 5%. Příčinou je krátkodobé zvýšení teploty filmu vlivem zahřátí od lampy skeneru.

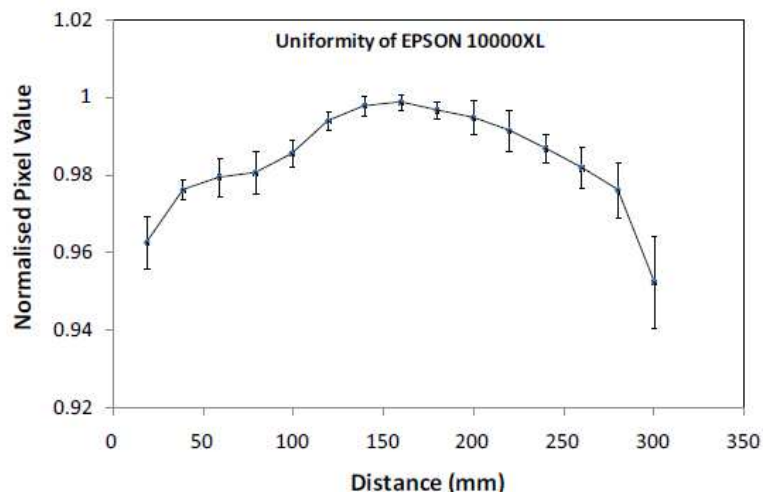
Déletrvající skenování filmů může způsobit zvýšení teploty o zhruba 1°C. Také je třeba brát v úvahu, že ke změně teploty filmů může vést změna teploty v místnosti během dne.

Vliv teploty na odezvu filmů lze eliminovat použitím „one-scan“ protokolu, kdy se současně s měřicím filmem skenuje také neozářený film a referenční film ozářený známou dávkou. Neozářený film takhle může být skenován opakovaně.

4.3 Lateral response artefact (LRA)

Jednou z nejdůležitějších vlastností skenerů pro provádění filmové dozimetrie pomocí gafchromických filmů je tzv. „Lateral Response Artefact“ (LRA). Tento jev spočívá v tom, že odezva homogenně ozářeného filmu se může lišit v závislosti na vzdálenosti od středu skeneru ve směru kolmém ke směru pohybu lampy skeneru.

Na Obr. 4 je ilustrován tento jev na skeneru Epson 10000XL. Hodnoty pixelů jsou znormalizovány ke středu skenovací plochy. Je vidět, že směrem od středu skeneru k jeho okrajům v laterálním směru se nehomogenita odezvy filmu zvětšuje. Obecnou vlastností skenerů je, že nehomogenita odezvy homogenně ozářeného filmu ve směru kolmém k pohybu lampy je výraznější než ve směru rovnoběžném s pohybem lampy (viz „scan direction“ např. na Obr. 5).



Obr. 4: Ukázka laterální nehomogenity odezvy filmu (LRA artefakt) pro skener Epson 10000XL [18]

LRA závisí na velikosti nazářené dávky, s rostoucí nazářenou dávkou se obecně LRA zvětšuje.

Např. dle Lewise a kol. [4] se při vyhodnocení filmů v červeném kanále LRA pro skenery Epson 10000XL a Epson V700 pohybuje do 2% pro centrální oblast skeneru (vzdálenosti přibližně do 5 cm od středu skeneru) a pro dávky do 2 Gy.

Huet a kol. [13] stanovili LRA (v hodnotách pixelů) skeneru Epson V700 pomocí skenování neozářeného filmu EBT3 v různých pozicích skenovací plochy 1,2% a rozhodli se filmy vyhodnocovat pouze z centrální oblasti skeneru o velikosti 12 x 12 cm².

LRA může nepříznivě ovlivnit stanovení dávky a také může limitovat velikost a orientaci vyhodnocované oblasti. V práci [15] se uvádí, že umístění filmů mimo střed skeneru, použití dávek vyšších než 5 Gy nebo použití jedнокanálové metody může způsobit chyby ve stanovení dávky větší než 10%.

V AAPM TG 235 [1] je uvedeno, že korekce na LRA je malá (<1%) v případě malých dávek (<1 Gy) a pokud jsou filmy umístěny v oblasti do 5 až 7 cm laterálně od středu skeneru.

4.4 Výběr vhodného skeneru

AAPM TG 235 [1] doporučuje při výběru skeneru zvážit následující parametry:

- Vlnová délka zdroje světla (viditelné světlo, 400 až 700 nm)
- Citlivost detektoru světla na pásma vlnových délek (viditelné světlo, 400 až 700 nm)
- Typ skeneru (translační, kombinovaný translační a zobrazovací nebo 2D zobrazovací)
- Skenovací mód (transmisní a/nebo reflexní)
- Bitová hloubka (16 bitů)
- Prostorové rozlišení (<1 mm)
- Typ pořizovaných snímků (RGB)
- Rozměry skenovací plochy (20 x 28 cm² a větší)

- Rychlost skenování (<1 min)
- Rychlost nabírání dat (<1 min)
- Software pro nabírání dat (součástí dodávky skeneru nebo software třetí strany)

Výrobce gafchromických filmů doporučuje ke skenování používat skenery Epson Expression 10000XL, 11000XL a 12000XL zejména z důvodu jejich velké skenovací plochy (formát A3).

5 Software pro vyhodnocení gafchromických filmů

Software pro skenování gafchromických filmů je ve většině případů součástí dodávky skeneru (např. software EpsonScan pro skenery Epson) nebo je součástí komerčních programů pro filmovou dozimetrii jako např. FilmQA Pro (Ashland), RIT113 (Radiological Imaging Technology), OmniPro 1 mRT (IBA), Mephysto mc² (PTW), DoseLab Pro (Mobius Medical Systems), Film Analysis (Sun Nuclear) nebo TomoTherapy Film Analyzer (Accuray Inc.).

Pro vyhodnocení (analýzu) filmové dozimetrie lze použít výše zmíněné placené komerční programy. Jejich výhodou je přívětivé uživatelské rozhraní s množstvím různých funkcí pro kalibraci a vyhodnocení filmů. Nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady.

Pro vyhodnocení filmové dozimetrie je možné využít také programovací software jako např. Matlab (MathWorks) nebo IDL (Exelis VIS). Další možností je použití software jako ImageJ, ImageMagic nebo Radiochromic.com.

V některých software je již implementována „triple channel“ metoda: např. ve FilmQA Pro, Radiochromic.com nebo RIT113.

6 Korekce při filmové dozimetrii

Některé korekce mohou minimalizovat nebo eliminovat nepříznivé vlivy související s filmovou dozimetrií. Těmito vlivy jsou zejména nehomogenita filmu a „lateral response artefact“ (LRA).

6.1 Korekce na nehomogenitu filmu

Nehomogenita filmu je způsobena kolísáním tloušťky citlivé vrstvy filmu v jeho ploše. Úpravy složení filmů vedly ke snížení nehomogenity filmu. Nehomogenitu odezvy filmu lze korigovat použitím „dual channel“ metody a „triple channel“ metody (viz dále).

6.2 „Single channel“ metoda

Nejjednodušší metodou vyhodnocení filmů je tzv. „single channel“ metoda, kdy se změřená odezva ve vybraném barevném kanále (např. červeném) převádí přímo na dávku. V tomto případě artefakty jako např. nehomogenita filmu nebo prach, jež ovlivňují odezvu, ale nesouvisí s doručenou dávkou, mohou mít za následek chybné stanovení dávky.

6.3 „Dual channel“ metoda

V aktivní vrstvě filmů HD-V2, MD-V3, EBT2, EBT3 a EBT-XD je homogenně rozprostřeno žluté barvivo (yellow marker dye). „Dual channel“ metoda využívá toho, že odezva filmu v modrém kanále závisí zejména na tloušťce aktivní vrstvy filmu, zatímco odezvy filmu v červeném a zeleném kanále závisí zejména na dávce, kterou film obdržel. Kombinace odezvy filmu v červeném nebo zeleném kanále a odezvy filmu v modrém kanále pak umožňuje správněji stanovit dávku tím, že se kompenzuje vliv různé tloušťky aktivní vrstvy filmu v jeho ploše.

6.4 „Triple channel“ metoda

AAPM TG 235 [1] pro vyhodnocení filmů doporučuje používat tzv. „triple channel“ metodu, někdy nazývanou také „multi channel“ metodu [20-23]. Tato metoda pro stanovení dávky využívá kalibrační křivky (závislost odezvy filmů na dávce) ve všech třech barevných kanálech.

Pomocí „triple channel“ metody se odezva filmu rozděluje na část závislou na dávce a část nezávislou na dávce (např. kolísání tloušťky citlivé vrstvy filmu, šum, LRA). Pomocí „triple channel“ metody je tedy možné kompenzovat nejenom odchylky způsobené kolísáním tloušťky citlivé vrstvy filmu přes celý film, ale také např. LRA nebo šum).

V několika pracích [22-24] byly publikovány lepší výsledky dozimetrie pomocí „triple channel“ metody oproti „single channel“ metodě. „Multi channel“ dozimetrie je v současné době implementovaná v několika softwarových programech, např. ve FilmQA Pro, Radiochromic.com nebo RIT film software.

6.5 LRA (Lateral response artefact) korekce

„Lateral response artefact“ (LRA) spočívá v tom, že odezva homogenně ozářeného filmu se může lišit v závislosti na vzdálenosti od středu skeneru ve směru kolmém ke směru pohybu lampy skeneru.

LRA může být částečně kompenzován použitím „multi channel“ metody nebo může být eliminován patřičnou korekcí. Pro stanovení korekce na LRA je třeba filmy ozářené různými dávkami skenovat v různých laterálních pozicích skeneru. Korekce je specifická pro každý skener a typ filmu. Pro vytvoření korekce lze postupovat např. dle práce [15].

AAPM TG 235 [1] doporučuje, aby uživatel stanovil velikost LRA v závislosti na laterální pozici skeneru a na velikosti dávky. Na základě toho je pak třeba rozhodnout, zda je pro daný účel použití nutné LRA korekci provádět.

6.6 „One-scan“ protokol

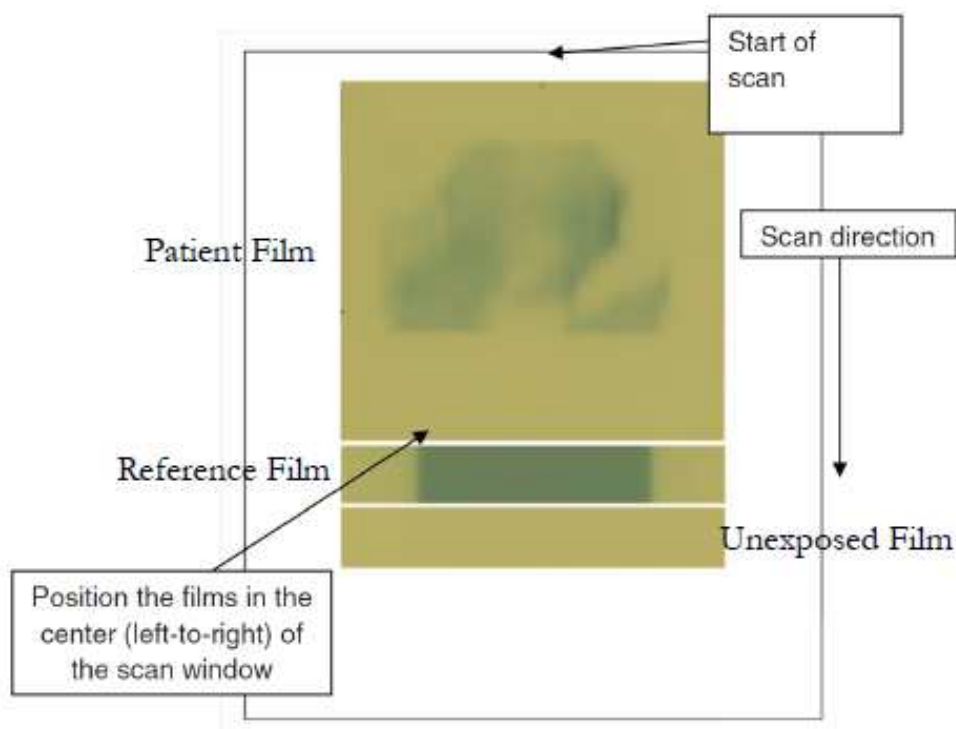
Filmy lze skenovat na skeneru postupně jeden za druhým nebo lze současně skenovat více filmů. Současné skenování více filmů bývá v literatuře označováno např. jako „one-scan“ protokol.

Při „one-scan“ protokolu se na lůžko skeneru umístí měřicí film, referenční film a neozářený film (viz Obr. 5). Referenční film je ozářen polem se známou hodnotou dávky (přibližně 80% až 100%

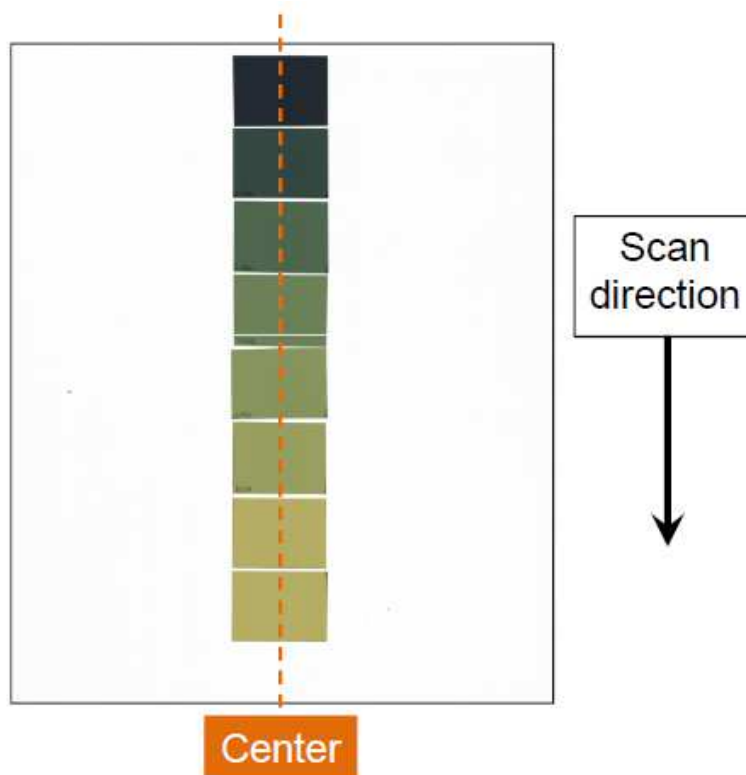
z maximální dávky na filmu). Referenční film se použije k renormalizaci (přeškálování) kalibrační křivky. Lewis a kol. [4] doporučují, aby měřicí a referenční film byly ozářeny s co nejmenší časovou prodlevou (např. 5 minut) a aby se čas mezi ozářením a skenováním rovnal minimálně čtyřnásobku časové prodlevy mezi ozářením měřicího a referenčního filmu (v tomto případě tedy minimálně 20 minut).

Při „one-scan“ protokolu se také kalibrační filmy skenují všechny současně (viz Obr. 6). Filmy by měly být umístěny laterálně ve středu skenovací plochy (kvůli snížení vlivu LRA).

Výhodou „one-scan“ protokolu oproti klasickému skenování filmů jeden po druhém je kratší doba skenování a také se při něm nemusí dodržovat časový odstup mezi ozářením a skenováním přibližně 16 až 24 hodin.



Obr. 5: Uspořádání při skenování filmů pomocí „one-scan“ protokolu [4]



Obr. 6: Uspořádání při skenování kalibračních filmů v rámci „one-scan“ protokolu [25]

6.7 Rekalibrační metoda („recalibration method“)

Pomocí rekalibrační metody aplikované v rámci „one-scan“ protokolu lze eliminovat rozdílnost odezev filmů mezi jednotlivými skeny („interscan variability“), rozdílnost odezev filmů vlivem odlišných podmínek prostředí (zejména teploty) a rozdílnost odezev filmů v závislosti na čase od ozáření („post irradiation darkening“).

Např. při skenování totiž může kolísání teploty lampy skeneru vést ke změně změřené optické hustoty filmu až o 3% [26].

Z výše uvedených důvodů AAPM TG 235 [1] doporučuje přednostně používat „one-scan“ protokol v kombinaci s rekalibrační metodou.

Několik různých rekalibračních metod je uvedeno v pracích [19,27]. Rekalibrační metody jsou implementovány např. v software FilmQA.

7 Doporučený postup práce s gafchromickými filmy

Gafchromické filmy vyžadují speciální způsob zacházení. Při použití gafchromických filmů k dozimetrickým účelům je třeba (např. pro získání reprodukovatelných výsledků a potřebné přesnosti stanovení dávky) dodržovat následující zásady.

7.1 Kontroly skeneru

- Před uvedením skeneru do provozu je třeba provést testování jeho charakteristik. Poté je třeba provádět periodické testy vybraných charakteristik skeneru.
- Pravidelně je třeba monitorovat stabilitu skeneru. K tomu lze použít různé pomůcky.

Pro RGB snímky AAPM TG 235 [1] doporučuje skenovat barevné filtry, např. GAMColor filter foil a CineFilter foil (GAMProduct Inc. – Rosco Laboratories) nebo Hoya 80A glass filter (Kenko Tokina Co. Ltd). Monitorováním odezvy těchto filtrů je možné odhalit případné změny ve výstupu světelného zdroje a v senzitivě CCD snímačů.

Pro grayscale snímky (snímky ve stupních šedi) se doporučuje skenovat např. radiografický kalibrační steptable film, jež lze považovat za dostatečně stabilní v čase. Na tomto filmu jsou nazářeny proužky s definovanými optickými denzitami. Doporučení AAPM TG 235 [1] konkrétně zmiňuje pomůcky step tablet Stouffe T1530CC a step wedge GE Structurix. Na základě pravidelného skenování těchto pomůcek lze jednotlivým proužkům (denzitám) přiřadit jejich odezvy a monitorovat tak stabilitu skeneru v čase.

- AAPM TG 235 [1] doporučuje stanovit prostorové rozlišení skeneru v obou směrech. K tomu lze použít např. pomůcky 2“ x 2“ Positive, 1951 USAF Resolution Target (Edmund Optics, Barrington, NJ) nebo Stouffer 1-T resolution guide.
- Skenery nemusí digitalizovat snímky přesně v poměru 1:1, proto je nutné ověřit jejich geometrickou přesnost. Tu lze ověřit např. skenováním vhodného pravítka. Případné geometrické zkreslení by se mělo při vyhodnocování dávkových distribucí a při vyhodnocování velikostí radiačních polí korigovat.
- Je vhodné stanovit geometrické zkreslení skeneru („linear XY scaling“) v rámci uvádění skeneru do provozu a následně se doporučuje kontrola jedenkrát za rok z důvodu možného opotřebení řemene, kterým je mechanicky propojena lampa s CCD snímači.
- AAPM TG 235 [1] také doporučuje, aby se při uvádění skeneru do provozu zkontrolovalo, že čtverec se na digitalizovaném snímku zobrazí jako čtverec a nezdeformuje se např. do kosočtverce („squareness“ snímků). Pravidelné kontroly nejsou třeba.
- Doporučuje se průběžně sledovat mechanický stav skeneru, zejména víka, neboť jeho omezená funkčnost ovlivňuje vzdálenost mezi lampou skeneru a CCD snímači, a tím tedy i odezvu filmu.

7.2 Příprava filmů (skladování, teplota, vlhkost, stříhání a značení filmů)

Skladování filmů (vliv teploty a vlhkosti)

- Filmy by se měly správně skladovat zabalené v černých obálkách nebo fóliích na temném místě.
- Filmy by se měly skladovat na jednom místě, aby všechny měly podobnou historii skladování.
- Filmy by nikdy neměly být vystaveny teplotám nad 60°. Při teplotách nad 60° může docházet k nevratným permanentním změnám vlastností filmů.
- Filmy by se měly ideálně skladovat při teplotách okolo 22° nebo nižších. Při teplotách do 40° by případné změny vlastností filmů měly být pouze dočasné a vratné. Výrobce gafchromických filmů doporučuje filmy EBT3 skladovat při teplotách do 25°.

- Filmy by neměly být vystaveny velkým změnám relativní vlhkosti (změny o více než 60%). Změny vlastností filmů by se pak odehrávaly pomalu, v rámci dnů. Tyto změny jsou vratné.
- Filmy by se měly skladovat v prostředí s relativní vlhkostí přibližně od 20% do 60%.
- Ideálně by se s filmy mělo pracovat v prostřední s kontrolovanou a regulovanou teplotou a vlhkostí (např. pomocí klimatizace). Pokud teplotu a vlhkost není možné regulovat, může být vhodné filmy skladovat v lednici.
- Filmy by se neměly vystavovat ultrafialovému (UV) světlu. K tmavnutí filmů může docházet, pokud budou filmy vystaveni UV záření (zejména uměle vyrobenému) po dobu jedné hodiny a více.

Manipulace s filmy

- Při manipulaci s filmy je vhodné omezit dobu expozice filmu stávajícím osvětlením na nezbytně nutnou dobu. Filmy je pak dále vhodné skladovat ve světlotěsném obalu.
- S filmy by se mělo manipulovat v rukavicích.
- Dotýkat se pouze okrajů filmů.
- Před použitím by se filmy měly vizuálně prohlédnout, zda na nich nejsou artefakty.
- Nelámat filmy.
- Filmy by měly být čisté, nečistoty lze setřít hadříkem.

Stříhání filmů

- Filmy lze stříhat na menší kousky pomocí nůžek nebo řezačky.
- V závislosti na použití filmu je nutné volit nástroje pro úpravu velikosti. Při užití nůžek nebo řezačky se poškození řezem předpokládá do vzdálenosti cca 2 mm od hrany řezu. V případě potřeby měření již od hrany filmu, lze toto poškození snížit řezáním pomocí laseru (poškození do 1 mm od hrany filmu) nebo se lze obrátit na výrobce filmů s požadavkem přesného nařezání filmů na požadované velikosti.
- Atypické děrování filmů je možné přímo objednat u výrobce filmů. K děrování lze použít průbojníky nebo skalpel.

Značení filmů

- Nastříhané kousky filmů by se měly označit např. v rozích, aby byla zřejmá jejich orientace vůči původnímu filmu (orientace „landscape“ vs „portrait“). Je vhodné filmy stříhat např. na obdélníky tak, aby delší strana ustříhnutého filmu odpovídala delší straně celého filmu.
- Filmy lze na jejich okrajích popisovat např. pomocí permanentní fixy nebo propisovací tužky. Dobře odzkoušené jsou pro tento účel permanentní fixy s tenkým (0,3 mm) hrotem.
- Filmy by měly být označeny tak, aby bylo zřejmé, z jaké jsou šarže.

7.3 Ozáření kalibračních filmů

- Pro kalibraci filmů je důležité, aby kalibrační filmy byly ozářeny homogenní dávkou. Dle AAPM TG 235 [1] to znamená, aby na kalibračních filmech byla variabilita v dávce v oblasti zájmu (ROI) do 3%. ROI na kalibračních filmech by měla být dostatečně velká, aby histogram hodnot pixelů měl normální rozdělení.
- Velikost kalibračních filmů a vyhodnocovaná oblast zájmu (ROI) pro stanovení průměrné odezvy při kalibraci by neměla být příliš malá (kvůli lokální nehomogenitě filmu). Oblast zájmu by měla zachytit „průměrné chování filmu“. Pokud se k ozáření kalibračních filmů použije otevřené pole 10 x 10 cm² na lineárním urychlovači, může být dostatečně použit kalibrační filmy o velikosti např. 5 x 4 cm² a ROI 4 x 3 cm².
- Vhodnými ozařovači pro kalibrační ozáření jsou lineární urychlovače a kobaltové ozařovače. Kalibrační svazek by měl mít ideálně stejné energetické parametry jako svazek, kterým budou ozářeny měřicí filmy.
- Pro ozáření kalibračních filmů lze použít vodě-ekvivalentních fantomů, je ale třeba znát jejich vodě-ekvivalentnost pro dané energie.
- Během ozáření kalibračních filmů je možné monitorovat doručenu dávku ve vodě nebo kermu ve vzduchu pomocí ionizační komory. Komora však musí být v tomto případě umístěna dostatečně daleko od filmu, aby nenarušila jeho odezvu.

Níže jsou uvedeny doporučené podmínky ozáření kalibračních filmů dle AAPM TG 235 [1].

externí fotonové svazky

- ozáření více filmů, filmy kolmo ke svazku (pro MV a kV svazky)

Menší filmy nastřižané z jednoho nebo více celých filmů daného typu a šarže se ozáří jeden po druhém referenčním polem.

Pro MV svazky jsou filmy umístěny ve vodě-ekvivalentním fantomu v referenční hloubce. Dávka je stanovena na základě měření ionizační komorou dle formalismu TRS 398 [28] nebo AAPM TG 51 [29]. Průměrným odezvám filmů v ROI se přiřadí známé hodnoty dávky ve vodě.

Pro kV svazky doporučuje AAPM TG 235 [1] ozářit filmy volně ve vzduchu (bez build-up vrstvy) ve vzdálenosti, kde je známa kerma ve vzduchu dle měření s ionizační komorou podle doporučení AAPM TG 61 [30]. Průměrným odezvám filmů v ROI se přiřadí známé hodnoty kermu ve vzduchu. V těchto podmínkách probíhá kalibrace filmů ve většině případů.

Poznámka: Pro kV svazky je možné použít také formalismus TRS 398. V tom případě by se filmy měly umístit na povrch vhodného fantomu (např. PTW solid soft X-ray phantom T2962) pro svazky nízkých energií a do hloubky 2 cm vodního fantomu pro svazky středních energií. Dávka ve vodě se stanoví na základě měření vhodnou ionizační komorou dle formalismu TRS 398. Průměrným odezvám filmů v ROI se přiřadí známé hodnoty dávky ve vodě.

- ozáření jednoho filmu, film kolmo ke svazku (pro MV svazky)

Film je umístěn v dané hloubce fantomu. Film je ozářen radiačním polem s několika subpoli s různými dávkami. Dávky jsou spočteny plánovacím systémem a jsou ověřeny měřením

s ionizační komorou. Průměrným odezvám filmů v ROI v různých oblastech filmu se přiřadí známé hodnoty dávky ve vodě.

- ozáření jednoho filmu, film paralelně se svazkem (pro MV svazky)

Film je umístěn ve vodě-ekvivalentním fantomu paralelně s osou svazku. Pro MV svazek jsou známé hloubkové dávky na základě měření s ionizační komorou. Odezvy filmů jsou zprůměrované z bodů podél osy svazku z malé ROI $0,2 \times 0,2 \text{ cm}^2$. Průměrným odezvám filmů v ROI se přiřadí hloubkové dávky.

kV svazky při IGRT

Pro kV svazky doporučuje AAPM TG 235 [1] ozářit filmy jeden po druhém volně ve vzduchu (bez build-up vrstvy) ve vzdálenosti, kde je známa kerma ve vzduchu dle měření s ionizační komorou podle doporučení AAPM TG 61 [30]. Průměrným odezvám filmů v ROI se přiřadí známé hodnoty kermy ve vzduchu.

externí elektronové svazky

Používají se menší nastříhané filmy, které se ozáření jeden po druhém referenčním polem. Filmy jsou umístěny ve vodě-ekvivalentním fantomu v dané hloubce (např. referenční hloubka nebo hloubka maxima). Dávka je stanovena na základě měření ionizační komorou dle formalismu TRS 398 [28] nebo TG-51 [29]. Průměrným odezvám filmů v ROI se přiřadí známé hodnoty dávky ve vodě.

externí protonové svazky

- ozáření jednoho filmu, film téměř paralelně se svazkem

Vzduchové mezery mezi filmem a deskami fantomu při umístění filmu paralelně s osou protonového svazku způsobují výrazné artefakty ve změřené procentuální hloubkové dávce. Tyto artefakty lze redukovat nakloněním fantomu s filmem vůči ose svazku o malý úhel (např. 3° až 5°) [31]. Jinou možností je umístit film paralelně s osou svazku ve vodním fantomu. Průměrným odezvám filmu v různých ROI v úzkém pruhu podél osy svazku se přiřadí známé hodnoty dávek ve vodě. Je třeba aplikovat korekci na LET (viz kapitola 10 - Použití gafchromických filmů v protonových svazcích).

- ozáření více filmů, filmy kolmo ke svazku

Filmy jsou umístěny ve vodě-ekvivalentním fantomu kolmo k ose svazku. Jeden po druhém jsou ozářeny v hloubce plata (např. 4 cm) nebo ve středu rozšířeného Braggova píku protonového svazku dle doporučení TRS 398 [28]. Je výhodné kalibrační filmy ozářit v oblasti plata, kde jsou hodnoty LET velmi nízké, a tudíž tam nemusí být nutně potřeba aplikovat korekci na LET.

brachyterapeutické zdroje

- ozáření více filmů, filmy kolmo k externímu svazku

Filmy se ozařují externími fotonovými svazky, jejichž energie je blízká energii fotonů nebo beta částic emitovaných z brachyterapeutických zdrojů. Například v případě $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, $^{106}\text{Ru}/^{106}\text{Rh}$, ^{137}Cs a ^{192}Ir se používají externí MV svazky ^{60}Co nebo 6 MV svazky lineárních urychlovačů. Pro ^{125}I , ^{131}Cs a elektronickou brachyterapii s napětím rentgenky 50 kV se používají ortovoltážní svazky s napětím rentgenky 50 kV a vhodnou filtrací.

- Ozáření více filmů, filmy umístěny v dané vzdálenosti od brachyterapeutického zdroje

Filmy mohou být umístěny ve vodě-ekvivalentním fantomu nebo ve vodním fantomu. Více se doporučuje vodě-ekvivalentní fantom kvůli přesnějšímu nastavení filmu do dané vzdálenosti od zdroje. Filmy se ozáří jeden po druhém v dané vzdálenosti (např. 0,5 až 3 cm nebo na kontakt) od brachyterapeutického zdroje. Pro každé ozáření lze použít také dva filmy (jeden nad a jeden pod zdrojem). Pro LDR zdroje (zdroje s nízkým dávkovým příkonem) mohou být ozařovací časy velmi dlouhé. Pro brachyterapeutické zdroje ve formě zrn se dávka ve vodě stanoví pomocí formalismu TG-43, křemové vydatnosti a ozařovacího času.

Průměrná odezva filmu se získá z ROI cca $0,1 \times 0,1 \text{ cm}^2$ nebo $0,2 \times 0,2 \text{ cm}^2$ uprostřed filmu. Průměrným odezvám filmu se přiřadí známé hodnoty dávek ve vodě. V případě použití nízkoenergetických kV zdrojů a vodě-ekvivalentního fantomu bude zřejmě potřeba aplikovat korekci zohledňující odlišné složení vodě-ekvivalentního fantomu a vody.

7.4 Ozáření měřících filmů

- S filmy se často měří ve vodě-ekvivalentních nebo antropomorfních fantomech. Lze s nimi měřit také ve vodním fantomu.
- Pro EBT3 filmy je penetrace vody do filmu nižší než 1 mm za hodinu. Pro ostatní typy filmů je to podobné. AAPM TG 235 [1] doporučuje filmy ponechat ve vodě nejdéle 1 hodinu a po vyjmutí je osušit. Změny vlastností filmů způsobené penetrací vody jsou vratné. V práci [32] je zmíněno, že půlhodinové ponoření filmů EBT2 ve vodě vede k zanedbatelné změně optické denzity. Pozor, jednostranně laminované filmy (např. EBT3 unlaminated) nelze použít ve vodě, neboť dojde k rozmočení aktivní vrstvy a znehodnocení filmu.
- Pro měření na zakřiveném povrchu lze filmy ohýbat.
- Pro měření málo pronikavého záření se doporučuje použít filmy jako HD-V2 nebo nelaminované EBT3 filmy, kde se aktivní vrstva nachází na povrchu filmu. Filmy je třeba ozářit ze strany této nelaminované vrstvy. Příkladem je např. měření povrchové dávky pro manuální beta aplikátory.

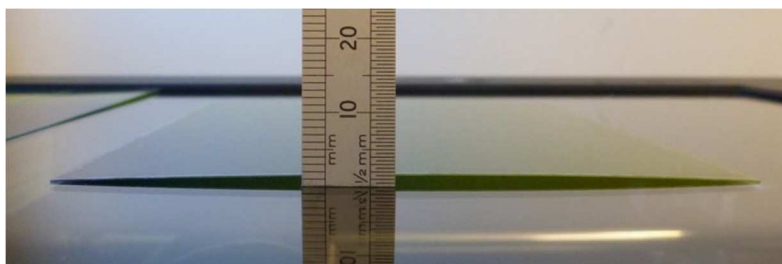
7.5 Skenování filmů

- Výrobce gafchromických filmů doporučuje ke skenování používat skenery Epson Expression 10000XL, 11000XL a 12000XL zejména z důvodu jejich velké skenovací plochy.

- Filmy lze skenovat na skeneru postupně jeden za druhým nebo lze současně skenovat více filmů současně. V druhém případě se mluví o tzv. „one-scan“ protokolu.
- Gafchromické filmy je nutné skenovat konzistentně. To znamená dodržovat geometrii filmu vzhledem ke skeneru (portrait vs landscape orientace). Dále je třeba rozlišovat přední a zadní stranu u asymetrických filmů (není třeba u EBT3 filmů). V tomto případě je třeba, aby stejná strana filmu byla nahoře jak při ozáření, tak při skenování.
- V rámci konzistentního skenování gafchromických filmů je třeba také dodržovat stejný časový odstup mezi ozářeními a skenováním filmů, tak aby byl minimalizován vliv tzv. „post irradiation darkening“ na odezvu filmu, např. 16 až 24 hodin. Tento časový odstup by měl být stejný jako při kalibraci. Požadavek na dodržování časového odstupu neplatí pro „one-scan“ protokol (viz kapitola 6.6). Při použití „one-scan“ protokolu lze filmy skenovat již půl hodiny po ozáření.
- Udržovat filmy a skener čisté (k čištění lze použít líh a papírové ubrousky).
- Neskenovat filmy hned po zapnutí skeneru, počkat alespoň 30 min pro zahřátí elektroniky.
- Před skenováním zahřát skener několika „prázdnými“ skeny (5 až 10 skenů). Při skenování totiž může kolísání teploty lampy skeneru vést ke změně optické hustoty filmu až o 3% [26].
- Je možné každý film skenovat několikrát po sobě a výslednou odezvu stanovit jako průměr z několika skenů, například tří. Nedoporučuje se do průměrování zahrnout první sken, protože jeho odezva se nejvíc odlišuje od ostatních skenů. Lze také pořizovat vždy dva skeny každého filmu a vyhodnocovat pouze druhý sken.
- Skenovat by se mělo v režimu 48bitových barev (to je 16 bitů na jeden barevný kanál). Dle AAPM TG 235 [1] je doporučené minimum 12 bitů na kanál.
- Rozlišení 72 dpi (cca 0,35 mm na pixel) je ve většině případů dostatečné. S rostoucím rozlišením roste šum ve snímcích.
- Vyšší rozlišení (vyšší než 72 dpi) může být vyžadováno v případě použití v brachyterapii a při dozimetrii malých polí.
- Snímky by se měly ukládat jako bezztrátové TIFF soubory.
- Při skenování je nutné vypnout automatické softwarové úpravy snímku (např. barevné korekce), neboť tyto úpravy jsou nežádoucí pro dozimetrické účely.
- Bezprostředně po ukončení skenování by se filmy měly odebrat z plochy skeneru a následně umístit do tmavé obálky, aby se minimalizovala doba, po kterou bude film vystaven ozáření lampou skeneru.
- Filmy je třeba umísťovat do středu skenovací plochy skeneru v laterálním směru nebo do oblasti, kde je nejmenší tzv. „lateral response artefact“ (LRA). Pro tento účel je možné si vytvořit šablonu (např. z tenké fólie).
- Při skenování by měl film ležet rovně na lůžku skeneru. Je třeba zamezit výraznému prohnutí filmů (viz Obr. 7), které ovlivňuje transmisi světla, a tím odezvu filmu. Prohnutí filmů lze eliminovat např. přilepením okrajů filmů k lůžku skeneru nebo lze na film položit tenkou skleněnou destičku o tloušťce 3 až 4 mm. Je třeba, aby tato destička byla čistá a bez vizuálních artefaktů.
- U některých typů filmů (např. HD-V2, MD-V3 a EBT2) může použití skleněné destičky vést ke vzniku artefaktů ve formě Newtonových kroužků. V tomto případě se doporučuje použít

speciální skla, která vzniku Newtonových kroužků zabraňují. Tyto skla dodávají např. firmy Focal Point (Deltona, FL), B&H Company (www.bhphotovideo.com) nebo Knight Optical (www.knightoptical.com). U filmů EBT3 a EBT-XD ke vzniku Newtonových kroužků nedochází.

- Je nutné volit velikost skleněné destičky tak, aby při uložení na skenovanou plochu zasahovala plně do prostoru, ve kterém skener provádí automatickou kalibraci světelného zdroje. Oblast pro automatickou kalibraci světelného zdroje je široká přibližně 1,5 cm a nachází se v horní části skeneru, odkud skenování začíná.



Obr. 7: Ukázka prohnutí gafchromického filmu na skenovací ploše skeneru [14]

- V závislosti na použitém software pro vyhodnocení filmů je možné gafchromické filmy ještě před ozáření oskenovat a odečíst jejich odezvy od odezev stejných, ale ozářených filmů. Tento postup použili např. v pracích [5,27].

7.6 Převod odezvy filmů na dávku (kalibrační křivka)

- Odezvu filmu lze vyhodnocovat buď jako hodnoty pixelů (PV) nebo jako optickou denzitu (OD).
- Optická denzita (OD) se z hodnot pixelů (PV) získá pomocí následujícího vztahu: $OD = \log_{10}(65535/PV)$.
- V případě vyhodnocování optické denzity se zpravidla od optické denzity kalibračního filmu odečítá optická denzita neozářeného pozadového filmu. Tím se získá tzv. čistá optická denzita (netOD).
- Pro převedení odezvy filmů (PV, netOD) na dávku je třeba použít kalibrační křivku.
- Kalibrační křivka bude různá pro různé typy filmů, šarže filmů a skenery.
- Kalibrace filmů je platná pouze pro dané nastavení dozimetrického systému (typ filmu, šarže filmů, použitý skener, bitová hloubka snímků, orientace filmu (portrait vs landscape) a doba mezi ozáření a skenování filmů).
- Je třeba ověřovat, že rozmezí dávek měřených pomocí gafchromických filmů se nachází v rozmezí dávek použitých ke kalibraci. Nedoporučuje se extrapolovat kalibrační křivky vně rozmezí kalibračních dávek.
- K proložení kalibrační křivky kalibračními body lze použít mnoho programů, a to buď komerčních, nebo zdarma dostupných.
- Jako fitovací funkce (převádějící odezvu filmu na dávku) lze použít např. polynomy, mocninné funkce, racionální funkce nebo exponenciální funkce.

- Počet kalibračních dávek pro kalibrační křivku se obecně odvíjí od použité fitovací funkce. Posloupnost jednotlivých kalibračních dávek může být aritmetická, geometrická nebo jiná, opět v závislosti na použité fitovací funkci. Méně kalibračních bodů lze použít u racionální fitovací funkce. Velikosti kalibračních dávek by měly pokrývat alespoň dva řády.
- Je vhodné mít více kalibračních bodů v oblasti nízkých dávek, kde typicky dochází oproti oblasti vyšších dávek k větším změnám odezvy filmu v závislosti na dávce.
- Je vhodné znát oblast dávek, kde již dochází k saturaci odezvy a tuto oblast nepoužívat k dozimetrickým účelům.
- Kalibrační křivku je třeba ověřit, a tím potvrdit, že s její pomocí lze měřit dávky s dostatečnou přesností v celém jejím rozsahu. Pro tento účel se doporučuje použít klínová pole a pro tato pole porovnat dávkovou distribuci změřenou filmem s referenční dávkovou distribucí. Porovnání s několika filmy ozářenými různými dávkami nemusí být dostatečné.

7.7 Zpracování dat a vyhodnocení filmů

- Digitalizovaná data z filmů jsou zašuměná. Šum lze potlačit filtrováním dat (např. mediánový filtr nebo Wienerův filtr) nebo průměrováním odezvy z více skenů daného filmu. Uživatel by měl znát, jaká je tzv. „interscan“ variabilita používaného skeneru, která vyjadřuje rozdílnost odezvy filmů mezi jednotlivými po sobě jdoucími skeny. K potlačení šumu může být užitečné také použití speciálních filtrů šumu v některých ovladačích ke skenerům.
- Zpracování dat (např. filtrování) by mělo být stejné pro měřicí i kalibrační filmy.
- Data se zpravidla vyhodnocují/analyzují ve vhodném software (např. OmniPro 1mRT, Mephysto mc², Matlab, ImageJ).
- K vyhodnocení filmů nepoužívat oblast u krajů filmů (např. o šířce cca 2 mm), jež může být poškozena vlivem stříhání filmů.
- Při „single channel“ dozimetrii by se měla odezva filmů vyhodnocovat v červeném nebo zeleném kanále.

7.8 Použití korekcí

- Ačkoliv se doporučuje používat „triple channel“ metodu, tak také „single channel“ metoda může být použitelná a může dávat podobně dobré výsledky jako „triple channel“ metoda. Nicméně u „single channel“ metody je třeba být si vědom jejich případných limitací (např. vyšší LRA) a správně se s nimi vypořádat.
- Uživatel musí zhodnotit, zda je potřeba LRA korekci provádět. To se odvíjí od účelu použití a požadované nejistoty. Proto se doporučuje, aby uživatel stanovil velikost LRA v závislosti na laterální pozici skeneru a na velikosti dávky. Toto je třeba stanovit pro používaný skener a jednotlivé typy filmu. Například se může ukázat, že LRA korekci není nutné aplikovat u malých polí při SBRT.
- Při „one-scan“ protokolu je třeba používat zvolenou rekalibrační metodu (např. „Dose linear scaling“ ve FilmQA) .

8 Zavedení filmové dozimetrie na pracovišti

V rámci zavádění filmové dozimetrie by mělo pracoviště dodržovat následující zásady:

- Stanovit si, k jakému účelu se budou gafchromické filmy používat (např. ke stanovení dvourozměrné dávkové distribuce, k ověření shody radiačního a světelného pole, ...).
- Provést rešerši literatury pro daný účel použití filmů a seznámit se s vlastnostmi filmů a skenerů. Potřebné informace lze nalézt v tomto doporučení.
- Konzultovat danou problematiku s pracovištěm, jež s ní má zkušenosti, případně absolvovat stáž na tomto pracovišti.
- Na základě účelu použití vybrat vhodný typ filmu (viz kapitola 3.8).
- Vybrat vhodný typ skeneru (viz kapitola 4.4).
- Vybrat vhodný software (viz kapitola 5). Tady je třeba zohlednit předpokládaný způsob vyhodnocení gafchromických filmů („single channel“ metoda, „triple channel“ metoda, „one-scan“ protokol, odečtení nebo neodečtení pozadového neozářeného filmu, ...)
- Před uvedením skeneru do provozu je třeba stanovit jeho charakteristiky (viz kapitola 7.1). AAPM TG 235 [1] také doporučuje, aby si uživatelé ověřili dozimetrické charakteristiky filmů dané šarže a typu pro danou kvalitu svazku.
- Navrhnout metodiku vhodnou pro daný účel použití gafchromických filmů (např. zahřátí skeneru, rozlišení snímků, použití korekcí).
- Při vyhodnocení filmů postupovat konzistentně dle navržené metodiky.
- Pokud se budou provádět korekce, např. LRA korekce, tak ověřit, že korekce povede k lepším výsledkům (větší shodě).
- Odhadnout nejistotu stanovení dávky pomocí filmové dozimetrie.
- Provádět periodické testy vybraných charakteristik skeneru (viz kapitola 7.1).
- Je užitečné porovnat výsledky filmové dozimetrie s jinými metodami. Např. porovnat dávkové distribuce změřené pomocí gafchromických filmů s dávkovými distribucemi změřenými jinými detektory (např. ionizačními komorami nebo polem detektorů).

9 Nejistoty při filmové dozimetrii

Při měření s gafchromickými filmy by se měly uvažovat nejistoty uvedené níže. Stanovení nejistot měření závisí na konkrétním použití filmů. Nejistoty jsou uvedeny pro $k = 1$.

- Kalibrace svazku:

Nejistota stanovení absorbované dávky ve vodě resp. kermy ve vzduchu za referenčních podmínek. Pro kalibrace filmů prováděné ve svazcích lineárního urychlovače je dle AAPM TG 235 [1] typická nejistota 0.9%. Tato nejistota v sobě zahrnuje nejistotu kalibrace ionizační komory a elektrometru v kalibrační laboratoři spolu s nejistotou nastavení.

Pro kalibrace využívající brachyterapeutická zrna emitující nízkenergetické fotony je typická nejistota stanovení kermy ve vzduchu 6,2%.

- Homogenita svazku:
Na každém kalibračním filmu by oblast zájmu (ROI) měla být v oblasti, kde je známá homogenita svazku. V brachyterapii je třeba použít malé filmy.
- Kermová vydatnost v brachyterapii:
Dle AAPM TG 235 [1] je pro zrna ^{125}I typická nejistota kermové vydatnosti 1,2%.
- Vzdálenost mezi aktivní vrstvou filmu a středem brachyterapeutického zdroje:
Typická nejistota je 0,1 mm, jež odpovídá nejistotě v dávce 1,8%.
- Energie kalibračního svazku:
Pro svazky lineárního urychlovače se tato nejistota obvykle považuje za zanedbatelnou. Pokud se pro měření nízkonoenergetických fotonových svazků použijí filmy zkalibrované ve svazcích lineárního urychlovače, je dle AAPM TG 235 [1] typická nejistota 5%.
- Pozice filmu vzhledem ke svazku:
Pro měření ve svazcích lineárního urychlovače a v oblasti s malým gradientem dávky se tato nejistota obvykle považuje za zanedbatelnou. Pro oblasti s vysokým gradientem dávky lze nejistotu odhadnout na základě poziční nejistoty 0,1 mm.
- Doba ozáření filmů:
Tato nejistota se vztahuje pouze k situacím, kdy jsou filmy ozářeny krátkými ozařovacími časy. V takových případech je typická nejistota <1 s.
- Vlastnosti skeneru (stabilita, reprodukovatelnost, vliv teploty):
Dle AAPM TG 235 [1] je typická nejistota 0,5%. Tuto nejistotu je ale třeba stanovit pro konkrétní skener.
- Kalibrace skeneru (použití kalibrovaných neutrálních filtrů):
Obecně je tato nejistota zanedbatelná.
- Nehomogenita filmu:
Tato nejistota silně závisí na typu filmu a také se liší mezi jednotlivými filmy z dané šarže. Dle AAPM TG 235 [1] mají současné filmy typicky nejistotu 1,5%. Při použití "one-scan" protokolu lze tuto nejistotu snížit na méně než 1%.
- Orientace filmů během skenování:
Tato nejistota se vztahuje pouze k použití laserových denzitometrů, jež vykazují velkou úhlovou závislost.
- Rozlišení při skenování:
Při skenování filmů platí, že čím vyšší je rozlišení snímků, tím je také vyšší šum. AAPM TG 235 [1] jako horní mezní hodnotu nejistoty pro vyšší rozlišení uvažuje nejistotu 2%.

- Velikost oblasti zájmu (ROI) při vyhodnocení filmů (vliv vyhlazení):

Při vyhodnocení filmů platí, že čím vyšší je vyhlazení dat (např. filtrování oblasti 3x3 pixelů nebo 5x5 pixelů), tím je nižší nejistota odečtu. Nevýhodou vyššího vyhlazení dat je snížené rozlišení v oblastech vyššího gradientu dávky.

- Výběr fitovací funkce pro kalibrační křivku (zejména v oblasti nízkých dávek):

Se současnými fitovacími programy a nástroji je možné dosáhnout velmi přesných fitů změřených dat.

- Parametry fitu ve fitovací funkci:

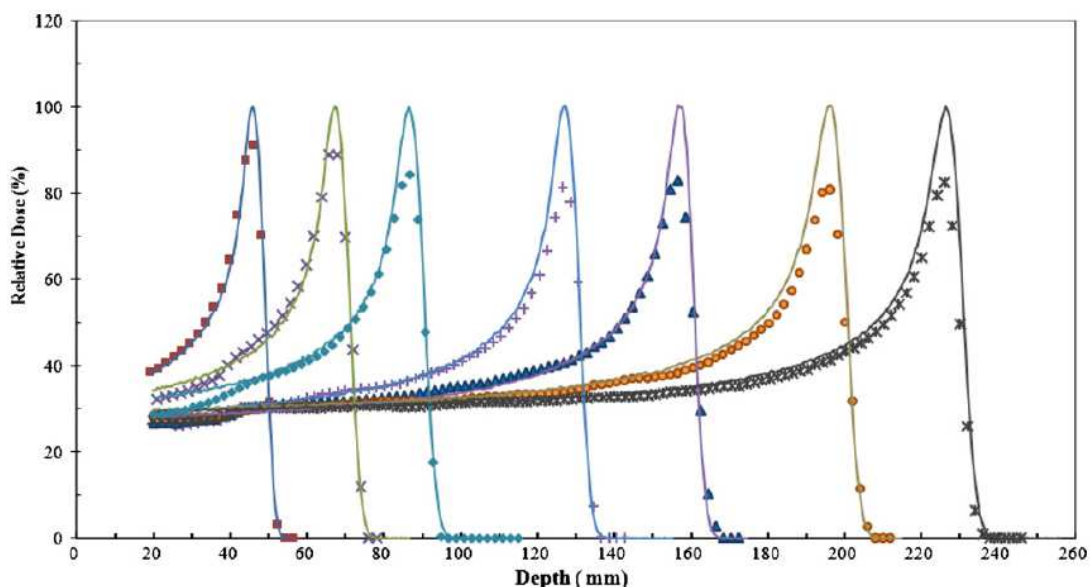
Ve spojení s předchozím bodem je dle AAPM TG 235 [1] typická nejistota 1,5%.

Pro získání podrobnějších informací ke stanovení nejistoty měření pomocí gafchromických filmů AAPM TG 235 [1] doporučuje prostudovat následující články: [33-42].

Například výrobce gafchromických filmů ve své brožuře [43] k software FilmQA uvádí, že pomocí software FilmQA a „one-scan“ protokolu lze s filmy stanovit dávku s nejistotou do 2%.

10 Použití gafchromických filmů v protonových svazcích

Při užití gafchromických filmů pro dozimetrii protonových svazků musí být uváženo vliv lineárního přenosu energie (LET), neboť pro jednotlivé „pristine“ píky může být odezva filmů v oblasti Braggova píku podhodnocena až o 20% (viz [31] a Obrázek 8).



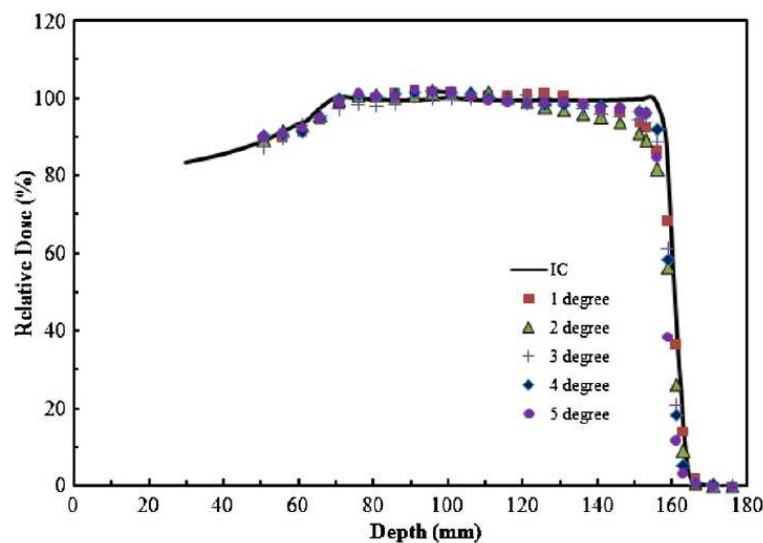
Obr. 8: Procentuální hloubkové dávky pro nedomulované protonové svazky změřené pomocí gafchromických filmů EBT (diskrétní body) a ionizační křivky změřené komorou Markus (plné čáry) [31]

Podhodnocení je způsobeno tzv. „quenching“ efektem, který nastává zejména v Braggově píku a v distální části rozšířeného Braggova píku a je závislý na lineárním přenosu energie (LET). Tento efekt může souviset s rekombinací volných radikálů v aktivní vrstvě filmu [44].

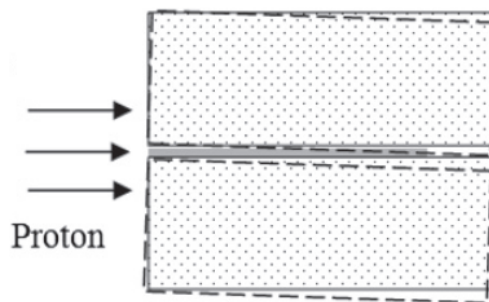
LET obecně závisí na hloubce. Proto je třeba při kalibraci filmů a při měření s nimi aplikovat vhodné korekční faktory, jež závisí na hloubce a energii svazku [1].

V literatuře je publikováno několik metod korekce na LET [31,45-50]. Např. Zhao a Das [31] charakterizovali odezvu EBT filmů jako funkci efektivní energie protonového svazku a korekční faktor na LET pak představoval polynom třetího stupně procentuální houbkové dávky. Carnicer a kol. [49] stanovili korekční faktor v závislosti na exponenciální funkci fluenčně váženého LET. Anderson a kol. [50] charakterizovali podhodnocení EBT3 filmů pomocí dávkově váženého LET. V současné době nicméně není shoda na tom, jakou metodu korekce na LET používat. Je na uživateli, aby pro danou aplikaci filmů použil vhodnou korekci na LET.

Zhao a Das [31] také zjistili, že vzduchové mezery mezi filmem a deskami fantomu při umístění filmu paralelně s osou protonového svazku způsobují výrazné artefakty ve změřené procentuální hloubkové dávce. Zjistili, že tyto artefakty lze redukovat nakloněním fantomu s filmem vůči ose svazku o malý úhel 3° až 5° (viz Obr. 9 a 10). Proto je vhodné fantom o tento malý úhel naklonit a také minimalizovat vzduchovou mezeru mezi filmem a deskami fantomu.



Obr. 9: Procentuální hloubkové dávky změřené gafchromickými filmy EBT pro protonové svazky při různém naklonění fantomu o 1° až 5° vůči paralelní orientaci k ose svazku. Černá linka značí hloubkovou dávku změřenou ionizační komorou Markus [31].



Obr. 10: Ukázka naklonění fantomu, aby film nebyl umístěn rovnoběžně se svazkem protonů [31]

Gafchromické filmy lze v protonových svazcích použít také pro stanovení dosahu. Zhao a Das [31] uvádějí, že pomocí gafchromických filmů EBT lze měřit dosah protonových svazků s nejistotou 0,5 mm.

Filmy lze dále použít ke stanovení dávkových distribucí v blízkosti nehomogenit, např. titanu [121], kovových implantátů [122] a markerů [123]. Další aplikací filmů může být kontrola bolusů a kompenzátorů vytisknutých na 3D tiskárnách [124].

Při uvádění protonového ozařovače do provozu lze filmy použít ke stanovení velikosti jednotlivých spotů (FWHM) pro tužkové svazky [125]. Filmy lze též použít ke stanovení 2D dávkové distribuce v nízkodávkové oblasti spotu (tzv. „low dose envelope of the spot“) [126].

11 Použití gafchromických filmů v kilovoltážích fotonových svazcích

Gafchromické filmy lze použít pro stanovení charakteristik kilovoltážních svazků jako faktory velikosti pole [51], faktory zpětného rozptylu (backscatter factor), procentuálních hloubkových dávek [60] a dávkových profilů [51-54]. Filmy lze s výhodou použít také ke stanovení dávek pod očním stíněním [55]. V terapeutických rentgenových svazcích lze gafchromické filmy použít dále např. ke stanovení velikosti radiačního pole a ke stanovení shody osy radiačního pole a středu tubusu, jenž vymezuje svazek.

AAPM TG 235 [1] doporučuje filmy kalibrovat volně ve vzduchu ve veličině kerma ve vzduchu dle formalismu AAPM TG 61 [30] (viz kapitola 7.3).

Dozimetrie kilovoltážních svazků pomocí gafchromických filmů by měla být prováděna s velkou obezřetností vzhledem k energetické závislosti těchto filmů. Publikovaná data raných šarží filmů poukazují na vyšší energetickou závislost gafchromických filmů pro kilovoltážní svazky oproti svazkům megavoltážním [56-59]. Novější šarže filmů se již vyznačují nižší energetickou závislostí. Dle práce [7] jsou filmy z řady EBT 2, EBT 3, HD – V2, MD – V3, EBT - XD v šaržích novějších roku 2014 energeticky téměř nezávislé v rozsahu energií od několika MeV až do 40 keV (od 1% do 5%). Filmy typu XR – QA2, XR – RV3 vykazují silnou energetickou závislost díky obsahu prvků s vysokým protonovým číslem Z.

Jednou z nových technik radioterapie je tzv. „microbeam“ radioterapie, jež využívá svazky rentgenova záření ze synchrotronu s energiemi od 50 do 600 keV [127]. „Microbeam“ radioterapie se používá zejména k léčbě tumorů v mozku. Při „microbeam“ radioterapii je tumor ozařován velmi tenkými

svazky záření s velkou dávkou. Pro dozimetrii při "microbeam" radioterapii jsou vhodné filmy HD-V2 a HD-810.

12 Použití gafchromických filmů v megavoltážních fotonových svazcích

12.1 Pro konvenční velikosti radiačních polí

Gafchromické filmy lze v megavoltážních svazcích použít pro stanovení absolutních a relativních dávek, procentuálních hloubkových dávek, dávkových profilů a pro měření charakteristik klínových polí [11, 57,62-65]. Gafchromické filmy jsou obzvláště vhodné pro stanovení dávkových distribucí v oblastech s velkými gradienty dávky a pro měření polostínu svazků kolimovaných jak sekundárními clonami, tak vícemelovým kolimátorem (MLC) [64,66]. Další uplatnění nacházejí gafchromické filmy při měření periferních dávek [67,68] a při modelování svazků při Monte Carlo (MC) simulacích [64,65]. Při celotělovém ozařování (TBI) v prodloužené SSD vzdálenosti lze gafchromické filmy použít k měření bodových dávek, procentuálních hloubkových dávek a dávkových profilů ve fantomech i k in-vivo dozimetrii [69-71].

Dále lze gafchromické filmy použít k provádění předléčebné verifikace patientských plánů a k provádění zkoušek (ZPS, ZDS, PZ) ozařovačů, např. souhlas radiačního a světelného pole, symetrie a homogenita radiačního pole, ověření radiačního izocentra, ověření rotace kolimátoru a stolu [72-75]. Filmy lze též použít k provádění zkoušek polohování lamel MLC (např. picket fence). RTQA2 film je také přijatelný ke stanovení velikosti pole, ačkoli tento typ filmu se nedoporučuje pro aplikace vyžadující přesnou absolutní kalibraci [73].

Vliv magnetického pole na odezvu gafchromických filmů není úplně prozkoumán, proto se doporučuje např. v případě MR lineárních urychlovačů filmy kalibrovat ve statickém magnetickém poli [76-77].

12.2 Pro malá pole

S malými poli se lze setkat při stereotaktické radiochirurgii (SRS) a extrakraniální stereotaktické radioterapii (SBRT), ale také při technikách IMRT a VMAT. Gafchromické filmy jsou vhodným nástrojem pro dozimetrii malých polí zejména s ohledem na jejich vysoké rozlišení (méně než 1 mm).

Filmy lze použít k měření charakteristik svazků, jako např. faktory velikosti pole, procentuální hloubkové dávky, TMR (tissue maximum ratio) a dávkové profily pro svazky kolimované sekundárními clonami, MLC a aplikátory na konvenčním lineárním urychlovači [78-79], na ozařovačích CyberKnife [80], Leksellův gama nůž [81] a na tomoterapeutickém ozařovači [82].

Při stanovení faktorů velikosti pole pomocí filmů je třeba aplikovat korekci na ROI, jež souvisí s objemovým efektem detektoru. Takovou korekci navrhl Morales a kol. [61]. Při dozimetrii malých polí se doporučuje používat kruhové ROI (namísto pravouhlých). AAPM TG 235 [1] doporučuje pro malá pole o velikosti přibližně 3 cm² používat rozlišení vyšší než 72 dpi a pro ještě menší velikosti polí pak rozlišení 150 až 600 dpi.

12.3 Pro oblast buildupu

Filmy lze použít k dozimetrii MV svazků na povrchu fantomu (s rozhraním vzduchu) pro 3D konformní pole i IMRT pole. Filmy lze dále použít také k měření hloubkových dávek a dávkových profilů v malých hloubkách v oblasti buildupu. Pro takováto měření se filmy umísťují paralelně k povrchu a kolmo k ose svazku. Různé práce, např. [83-86], uvádějí pro oblast buildupu dobrou shodu dávkových distribucí změřených filmy s distribucemi stanovenými pomocí Monte Carlo simulací. Oproti tomu je v literatuře uváděno podhodnocení dávek spočtených v oblasti buildupu plánovacími systémy [86].

Filmy lze také použít ke stanovení dávkových distribucí v případě použití bolusu nebo imobilizačních pomůcek [84].

Pro dozimetrii na povrchu vykazují dle AAPM TG 235 [1] filmy EBT shodu s Monte Carlo výpočty do 3%.

12.4 Pro rozhraní materiálů (nehomogenní prostředí)

Filmy lze použít ke stanovení dávkových distribucí v materiálech simulujících plíce [87] a kosti [87,88], ve vzduchových dutinách [87] a v titanu [89]. Filmy jsou velmi vhodné k ověření dávkových distribucí spočtených terapeutickými plánovacími systémy pro konformní pole v nehomogenních fantomech během uvádění ozařovačů do provozu [87].

13 Použití gafchromických filmů na tomoterapeutickém ozařovači a na ozařovačích CyberKnife a Leksellův gama nůž

U tomoterapeutického ozařovače lze filmy použít při zkouškách provozní stálosti k ověření stálosti procentuálních hloubkových dávek a profilů svazku. Filmy lze dále použít k ověření pozice zelených laserů, k ověření pozice a rotace MLC a y -ové clony, k ověření úhlu gantry, k ověření synchronizace mezi rotací gantry a pohybem stolu a k ověření správného dodání dávky při přerušeném ozáření [90].

U ozařovače CyberKnife se gafchromické filmy používají k testu správnosti polohování s AQA fantomem, k vyhodnocení symetrie svazku a profilu svazku a pro end-to-end testy ověřující správné prostorové doručení dávky a pro zkoušky ověřující sledování polohy pacienta na základě 2D snímků (tzv. tracking system) [91].

U ozařovače Leksellův gama nůž lze gafchromické filmy použít k ověření pozice izocentra ozařovacího plánu a ke kontrole tzv. UCP bodu (unit center point) [93]. Filmy lze použít též při end-to-end testech [93].

14 Použití gafchromických filmů při IGRT procedurách

14.1 kV IGRT

Gafchromické filmy lze použít k měření dávkových distribucí při kV CBCT skenech. Pro kV IGRT procedury je vhodné použít filmy typu XR. Tyto filmy obsahují v citlivé vrstvě větší zastoupení prvků s

vyšším protonovým číslem Z, díky čemuž vykazují větší odezvu pro nízké fotonové energie. Referenční dozimetrií pro kV IGRT procedury se zabývá článek [34].

14.2 MV IGRT

V případě MV zobrazovacích metod lze gafchromické filmy použít při testech hodnotících geometrickou přesnost, šum, homogenitu a prostorové rozlišení, CT čísla při MV CT a dávku [90,94]. Dle AAPM TG 142 [73] a TG 148 [90] by se jednou ročně měla ověřovat dávka z MV CT skenu. K tomu lze použít pole detektorů (např. diod) nebo právě gafchromické filmy. Filmy jsou ideální k ověření mechanického izocentra CBCT skenů pomocí tzv. „star pattern” testu [96].

15 Použití gafchromických filmů v externích elektronových svazcích

V elektronových svazcích lze gafchromické filmy použít podobně jako v případě fotonových svazků ke stanovení charakteristik svazků jako jsou dávky, procentuální hloubkové dávky, dávkové profily a dávkové distribuce [95]. Filmy lze použít také k měření dávek a dávkových distribucí při celotělovém ozařování elektronovými svazky [96] a při intraoperační radioterapii elektronovým svazkem (IOERT) [97,98]. Filmy lze dále použít ke stanovení dávkových distribucí v blízkosti nehomogenit, např. stínění oka [99], titanu [100] nebo chirurgických klipů [101].

16 Použití gafchromických filmů v brachyterapii

Gafchromické filmy mají vhodné vlastnosti pro dozimetrii v brachyterapii. Nejčastěji se s filmy měří ve vodě-ekvivalentních fantomech, např. Solid Water nebo PMMA. Výhodou měření ve vodě-ekvivalentních fantomech je reprodukovatelná geometrie umístění filmů vzhledem k pozici brachyterapeutického zdroje. Materiály vodě-ekvivalentních fantomů ale nejsou identické vodě. Dávku ve vodě-ekvivalentním fantomu lze převést na dávku ve vodě pomocí formalismu AAPM TG 43 [102] a metody Monte Carlo [38].

Brachyterapeutické zdroje lze dělit na zdroje s nízkým dávkovým příkonem (LDR) a na zdroje s vysokým dávkovým příkonem (HDR).

16.1 LDR brachyterapeutické zdroje

Při LDR brachyterapii lze gafchromické filmy použít k dozimetrii při léčbě lézí v oku využívající např. zdroje $^{106}\text{Ru}/^{106}\text{Rh}$. Trichter a kol. [103] k tomu použili jak jednostranně, tak oboustranně laminované gafchromické filmy umístěné ve speciálním vodě-ekvivalentním očním fantomu. Filmy lze ohnout tak, aby se přizpůsobily povrchu oka a aby tam mohly měřit dávky. Podobně lze provádět dozimetrii také např. pro zdroje ^{125}Ir [33].

16.2 HDR brachyterapeutické zdroje

Při HDR brachyterapii jsou dávkové příkony v cílovém objemu ve vzdálenostech do několika centimetrů od zdroje typicky několik Gy za minutu. Filmy lze použít pro afterloadingové ozařovače s ^{192}Ir , při intravaskulární brachyterapii, při elektronické brachyterapii a v případě manuálních beta aplikátorů.

Afterloadingové ozařovače s ^{192}Ir

Gafchromické filmy se běžně používají ke kontrole přesnosti umístění zdrojů do zvolených pozic ve vybraných aplikátorech při uvádění brachyterapeutických ozařovačů do provozu, při zkouškách provozní stálosti a při výměně zdroje [104]. K tomuto účelu lze použít jak RTQA filmy, tak EBT2 nebo EBT3 filmy.

Filmy lze dále použít k měření dozimetrických charakteristik ve vodě nebo ve vodě-ekvivalentních fantomech pro zdroje ^{192}Ir a ^{60}Co . Ze změřených dávkových distribucí lze stanovit dozimetrické parametry podle formalismu AAPM TG 43 [102].

Palmer a kol. [105] použili EBT3 filmy k ověření dodání dávkové distribuce v rámci předléčebné verifikace. Stejní autoři použili filmy při auditu HDR gynekologické brachyterapie využívající zdroje ^{192}Ir a ^{60}Co . Při tomto auditu porovnávali plánované a doručené dávkové distribuce ve čtyřech kolmých rovinách procházejících intrauterinní trubici [106].

Intravaskulární brachyterapie

Při intravaskulární brachyterapii se dávka předepisuje do bodů umístěných velmi blízko radionuklidových zdrojů (do několika mm). V oblasti zájmu, jež může začínat ve vzdálenostech již od 0,5 mm od zdroje, pak mohou být velmi vysoké gradienty dávky (více než 50% na 1 mm) [107,108]. Pro intravaskulární brachyterapii jsou vhodné filmy typu HD-810, MD-55 a HS. Pomocí těchto filmů lze zkoumat vliv nehomogenit, jako jsou např. stenty, zlaté markery, vápník nebo vzdušné kapsy na dávkovou distribuci v okolí intravaskulárních brachyterapeutických zdrojů [109, 110]. Uvedené filmy lze též použít k verifikaci MC simulací pro intravaskulární brachyterapeutické zdroje [111] nebo k ověření referenčního dávkového příkonu v dané vzdálenosti od osy zdroje [112].

Elektronická brachyterapie

Elektronická brachyterapie využívá miniaturní rentgenku umístěnou v aplikátorech k dodání dávky s dávkovým příkonem několik Gy za minutu ve vzdálenostech 1 až 5 cm [113]. V klinické praxi se používá nominální napětí rentgenky 50 kV nebo 70 kV. Vhodnými typy filmů pro elektronickou brachyterapii jsou RTQA2, EBT, EBT2 a EBT3. Tyto filmy lze při elektronické brachyterapii použít např. k ověření dávkového příkonu [114].

Manuální beta aplikátory

Pro oftalmologické aplikace v brachyterapii se používají např. beta zářiče $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ nebo ^{32}P . Tyto aplikace se vyznačují vysokým dávkovým příkonem na povrchu (6 až 60 Gy/min) a vysokým dávkovým gradientem blízko zdroje. K měření dávkových distribucí v okolí těchto zářičů jsou vhodné filmy HD810 a MD55-1. Tyto filmy lze použít ke kalibraci oftalmologických aplikátorů využívajících beta zářiče [115] nebo také k ověření homogenity beta zářičů [116].

17 Použití gafchromických filmů při in-vivo dozimetrii

Díky tomu, že jsou gafchromické filmy tenké, ohebné a lze je stříhat na malé kousky, tak nacházejí uplatnění při in-vivo dozimetrii. Filmy jsou vhodné k relativní dozimetrii, umísťují se buď na kůži nebo do dutin v těle pacientů. U externích fotonových svazků lze filmy použít buď k měření dávek v poli svazku [117,118], nebo k měření dávek vně pole svazku, např. ke stanovení dávek, které obdrží kardios stimulátor nebo ke stanovení dávek v kritických orgánech [117]. In-vivo dozimetrii pomocí filmů lze provádět také při celotělovém ozařování elektronovými svazky [96], při intraoperační radioterapii elektronovým svazkem, při intraoperační brachyterapii pomocí ozařovače INTRABEAM [119] a při zobrazovacích procedurách IGRT [120].

18 Literatura

- [1] Niroomand-Rad A, Chiu-Tsao ST, Grams MP. Report of AAPM Task Group 235 Radiochromic Film Dosimetry: An Update to TG-55. *Med Phys.* 2020;47(12):5986-6025.
- [2] Dufek V. Doporučení SÚJB - Používání gafchromických filmů v radioterapii. 2019.
- [3] Dreindl R, Georg D, Stock M. Radiochromic film dosimetry: Considerations on precision and accuracy for EBT2 and EBT3 type films. *Z Med Phys.* 2014;24:153-63.
- [4] Lewis D, Micke A, Yu X. An efficient protocol for radiochromic film dosimetry combining calibration and measurement in a single scan. *Med Phys.* 2012;39(10):6339-50.
- [5] Devic S, Seuntjens J, Sham E, et al. Precise radiochromic film dosimetry using a flat-bed document scanner. *Med Phys.* 2005;32(7):2245-53.
- [6] Sarfehnia A, Stewart K, Seuntjens J. An absorbed dose to water radiation standard for ^{192}Ir HDR brachytherapy sources based on water calorimetry: Numerical and experimental proof-of-principle. *Med Phys.* 2007;34(12):4957-61.
- [7] Bekerat H, Devic S, DeBlois F, et al. Improving the energy response of external beam therapy (EBT) GafChromic™ dosimetry films at low energies (≤ 100 keV). *Med Phys.* 2014;41:022101-1–022101-14.
- [8] Cheung T, Butson MJ, Yu PKN. Post-irradiation colouration of Gafchromic EBT radiochromic film. *Phys Med Biol.* 2005;50:N281-5.
- [9] Hu Y, Ahmad S, Ali I, et al. Evaluation of optical density growth and sensitivity of EBT1 and EBT2 gafchromic films on the dosimetry for IMRT quality assurance. *Med Phys.* 2011;38:3529.

- [10] Casanova Borca V, Pasquino M, Russo G, et al. Dosimetric characterization and use of GAFCHROMIC EBT3 film for IMRT dose verification. *J Appl Clin Med Phys*. 2013;14(2):158-71.
- [11] Van Battum L J, Hoffmans D, Piersma H, et al. Accurate dosimetry with GafChromic™ EBT film of a 6MV photon beam in water: What level is achievable? *Med Phys*. 2008;35(2):704-16.
- [12] Kairn T, Hardcastle N, Kenny J, et al. EBT2 radiochromic film for quality assurance of complex IMRT treatments of the prostate: micro-collimated IMRT, RapidArc, and TomoTherapy. *Australas Phys Eng Sci Med*. 2011;34(3):333-43.
- [13] Huet C, Dagois S, Derreumaux S, et al. Characterization of the gafchromic EBT3 films for dose distribution measurements in stereotactic radiotherapy. *Rad Meas - Proceedings of the 17th Solid State Dosimetry Conference*. 2014;71:364-8.
- [14] Palmer AL, Bradley DA, Nisbet A. Evaluation and mitigation of potential errors in radiochromic film dosimetry due to film curvature at scanning. *J Appl Clin Med Phys*. 2015;16(2):425-31.
- [15] Lewis D, Chan MF. Correcting lateral response artifacts from flatbed scanners for radiochromic film dosimetry. *Med Phys*. 2015;42:416–429.
- [16] Matney JE, Parker BC, Neck DW, et al. Evaluation of a commercial flatbed document scanner and radiographic film scanner for radiochromic EBT film dosimetry. *J Appl Clin Med Phys*. 2010;11(2):198-208.
- [17] Dufek V. Gafchromické filmy – použitelnost v praxi a naše zkušenost s nimi (přednáška), Kurz radiační ochrany, SÚRO, v. v. i., 24.9.2015.
- [18] Hae S J., Youngyih H, Oyeon K, et al. Pixel-Based Correction Method for Gafchromic EBT Film Dosimetry. *Nuclear Engineering and Technology*. 2010;42(6):670-9.
- [19] Lewis D, Devic S. Correcting scan-to-scan response variability for a radiochromic film-based reference dosimetry system. *Med Phys*. 2015;42:5692–5701.
- [20] Micke A, Lewis DF, Yu X. Multichannel film dosimetry with nonuniformity correction. *Med Phys*. 2011;38(5):2523-34.
- [21] Mayer RR, Ma F, Chen Y, et al. Enhanced dosimetry procedures and assessment for EBT2 radiochromic film. *Med Phys*. 2012;39(4):2147–55.
- [22] Van Hoof SJ, Granton PV, Landry G, et al. Evaluation of a novel triple-channel radiochromic film analysis procedure using EBT2. *Phys Med Biol*. 2012;57(13):4353–68.
- [23] Hayashi N, Watanabe Y, Malmin R, et al. Evaluation of triple channel correction acquisition method for radiochromic film dosimetry. *J Radiat Res*. 2012;53:930–5.
- [24] Palmer AL, Bradlez D, Nisbet A. Evaluation and implementation of triple-channel radiochromic film dosimetry in brachytherapy. *J Appl Clin Med Phys*. 2014;15(4):280-96.
- [25] Lewis DF. A Guide to Radiochromic Film Dosimetry with EBT2 and EBT3 (přednáška) 2014.
- [26] Paelinck L, De Neve W, De Wagter C. Precautions and strategies in using a commercial flatbed scanner for radiochromic film dosimetry. *Phys Med Biol*. 2007;52:231-43.
- [27] Ruiz-Morales C, Vera-Sánchez JA, González-López A. On the re-calibration process in radiochromic film dosimetry. *Phys Medica*. 2017;42:67–75.
- [28] Andreo P, Burns DT, Hohlfield K, et al. Absorbed dose determination in external beam radiotherapy: an international code of practice for dosimetry based on absorbed dose to water. Technical Report Series No. 398, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria; 2000.

- [29] Almond PR, Biggs PJ, Coursey BM, et al. AAPM's TG-51 protocol for clinical reference dosimetry of high-energy photon and electron beams. *Med Phys*. 1999;26:1847–1870.
- [30] Ma C-M, Coffey CW, DeWerd LA, et al. AAPM protocol for 40–300 kV x-ray beam dosimetry in radiotherapy and radiobiology. *Med Phys*. 2001;28:868–893.
- [31] Zhao L, Das JJ. Gafchromic EBT film dosimetry in proton beams. *Phys Med Biol*. 2010;55:N291–301.
- [32] Aldelaijan S, Devic S, Mohammed H, et al. Evaluation of EBT-2 model GAFCHROMIC™ film performance in water. *Med Phys*. 2010;37(7), 3687-93.
- [33] Soares CG, Trichter S, Devic S. Radiochromic film. In: *Clinical Dosimetry for Radiotherapy: AAPM Summer School*, edited by D.W.O. Rogers, and J.E. Cygler (Medical Physics Publishing, Madison, WI, ISBN 9781888340846) 2009), Chap. 23, pp. 759–813.
- [34] Devic S, Tomic N, Lewis D. Reference radiochromic film dosimetry: review of technical aspects. *Phys Med*. 2016;32:541–556.
- [35] Massillon-JL G, Zuniga-Meneses L. The response of the new MD-V2-55 radiochromic film exposed to ⁶⁰Co gamma rays. *Phys Med Biol*. 2010;55:5437–5449.
- [36] Massillon-JL G, Munoz-Molina ID, Diaz-Aguirre P. Optimum absorbed dose versus energy response of Gafchromic EBT2 and EBT3 films exposed to 20–160 kV x-rays and ⁶⁰Co gamma. *Biomed Phys Eng Expr*. 2016;2:045005.1–12.
- [37] Saur S, Frengen J. GafChromic EBT film dosimetry with flatbed CCD scanner: a novel background correction method and full dose uncertainty analysis. *Med Phys*. 2008;35:3094–3101.
- [38] Chiu-Tsao ST, Napoli JJ, Davis SD, Hanley J, Rivard MJ. Dosimetry for ¹³¹Cs and ¹²⁵I seeds in solid water phantom using radiochromic EBT film. *Appl Radiat Isot*. 2014;92:102–114.
- [39] Bouchard H, Lacroix F, Beaudoin G, Carrier JF, Kawrakow I. On the characterization and uncertainty analysis of radiochromic film dosimetry. *Med Phys*. 2009;36:1931–1946.
- [40] DeWerd LA, Ibbott GS, Meigooni AS, et al. A dosimetric uncertainty analysis for photon-emitting brachytherapy sources: Report of AAPM Task Group No. 138 and GEC-ESTRO. *Med Phys*. 2011;38:782–801.
- [41] Taylor BN, Kuyatt CE. 1994 guidelines for evaluating and expressing the Uncertainty of NIST measurement results. *Natl Inst Stand Technol. Technical Note 1297*; 1994.
- [42] Mitch MG, DeWerd LA, Minniti R, Williamson JF. Treatment of uncertainties in radiation dosimetry, Chap. 22. In: Rogers DWO, Cygler JE, eds. *Clinical Dosimetry for Radiotherapy: AAPM Summer School*. Madison, WI: Medical Physics Publishing; 2009:724–757.
- [43] FilmQA pro™ software version 7. Brožura Ashland Inc. Dostupné na: https://www.ashland.com/file_source/Ashland/Documents/FilmQA%20Pro%20v.7%20Brochure.pdf
- [44] Charlie Ma C-M, Lomax T. *Proton and Carbon Ion Therapy (Imaging in Medical Diagnosis and Therapy)* 1st Edition. 2012, CRC Press.
- [45] Kirby D, Green S, Palmans H, Hugtenburg R, Wojnecki C, Parker D. LET dependence of GafChromic films and an ion chamber in low-energy proton dosimetry. *Phys Med Biol*. 2010;55:417–433.
- [46] Fiorini F, Kirby D, Borghesi M, et al. Dosimetry and spectral analysis of a radiobiological experiment using laser-driven proton beams. *Phys Med Biol*. 2011;56:6969–6982.

- [47] Fiorini F, Kirby D, Thompson J, et al. Under-response correction for EBT3 films in the presence of proton spread out Bragg peaks. *Phys Medica*. 2014;30:454–461.
- [48] Perles LA, Mirkovic D, Anand A, Titt U, Mohan R. LET dependence of the response of EBT2 films in proton dosimetry modeled as a bimolecular chemical reaction. *Phys Med Biol*. 2013;58:8477–8491.
- [49] Carnicer A, Angellier G, Gerard A, et al. Development and validation of radiochromic film dosimetry and Monte Carlo simulation tools for acquisition of absolute, high-spatial resolution longitudinal dose distributions in ocular proton therapy. *Radiat Meas*. 2013;59:225–232.
- [50] Anderson SE, Grams MP, Tseung HWC, Furutani KM, Beltran CJ. A linear relationship for the LET-dependence of Gafchromic EBT3 film in spot-scanning proton therapy. *Phys Med Biol*. 2019;64:055015
- [51] Gill S, Hill R. A study on the use of GafChromic™ EBT3 film for output factor measurements in kilovoltage X-ray beams. *Austr Phys Eng Sci Med*. 2013;36:465–471.
- [52] Smith L, Hill R, Nakano M, Kim J, Kuncic Z. The measurement of backscatter factors of kilovoltage X-ray beams using Gafchromic EBT2 film. *Austr Phys Eng Sci Med*. 2011;34:261–266.
- [53] Butson MJ, Cheung T, Yu PK. Radiochromic film for verification of superficial x-ray backscatter factors. *Austr Phys Eng Sci Med*. 2007;30:269–273.
- [54] Kim J, Hill R, Claridge Mackonis E, Kuncic Z. An investigation of backscatter factors for kilovoltage x-rays: a comparison between Monte Carlo simulations and GafChromic EBT film measurements. *Phys Med Biol*. 2010;55:783–797.
- [55] Butson MJ, Cheung T, Yu PKN, Price S, Bailey M. Measurement of radiotherapy superficial X-ray dose under eye shields with radiochromic film. *Phys Medica*. 2008;24:29–33.
- [56] Massillon-JL G, Chiu-Tsao ST, Domingo-Munoz I, et al. Energy dependence of the new Gafchromic EBT3 film: dose response curves for 50 kV, 6 and 15 MV x-ray beams. *Int J Med Phys Clin Eng Rad Oncol*. 2012;1(2):60-5.
- [57] Arjomandy B, Tailor R, Anand A, et al. Energy dependence and dose response of Gafchromic EBT2 film over a wide range of photon, electron, and proton beam energies. *Med Phys*. 2010;37(5):1942-47.
- [58] Lindsay P, Rink A, Ruschin M, et al. Investigation of energy dependence of EBT and EBT-2 Gafchromic film. *Med Phys*. 2010;37, 571-6.
- [59] Butson M J, Yu PKN, Cheung T, et al. Energy response of the new EBT2 radiochromic film to x-ray radiation. *Rad Meas*. 2010;45:836-9.
- [60] Hossein Z. Radiochromic Film Dosimetry in Kilovoltage X-ray Beams: A Pre Investigation for In Vitro Studies of Bystander Effects. 2015, Master thesis, Lund University.
- [61] Morales JE, Butson M, Crowe SB, Hill R, Trapp JV. An experimental extrapolation technique using the GafChromic EBT3 film for relative output factor measurements in small x-ray fields. *Med Phys*. 2016;43:4687–4692.
- [62] Fiandra C, Ricardi U, Ragona R, Anglesio S, Giglioli FR, Calamia E, Lucio F. Clinical use of EBT model Gafchromic film in radiotherapy. *Med Phys*. 2006;33:4314–4319.
- [63] Buckley C, Stathakis S, Cashon K, et al. Evaluation of a commercially available block for spatially fractionated radiation therapy. *J Appl Clin Med Phys*. 2010;11:2–11.
- [64] Almberg SS, Frengen J, Kylling A, Lindmo T. Monte Carlo linear accelerator simulation of megavoltage photon beams: independent determination of initial beam parameters. *Med Phys*. 2012;39:40–47.

- [65] Chan MF, Zhang Q, Li J, Parhar P, Schupak K, Burman C. The verification of iPlan commissioning by radiochromic EBT2 films. *Int J Med Phys Clin Eng Rad Oncol*. 2012;1:1–7.
- [66] Cheung T, Butson MJ, Yu PK. Measurement of high energy x-ray beam penumbra with GafChromic EBT radiochromic film. *Med Phys*. 2006;33:2912–2914.
- [67] Chiu-Tsao ST, Chan MF. Use of new radiochromic devices for peripheral dose measurement: potential in-vivo dosimetry application. *Biomed Imaging Interv J*. 2009;5:e16 (1–12).
- [68] Van den Heuvel F, Defraene G, Crijs W, Bogaerts R. Out-of-field contributions for IMRT and volumetric modulated arc therapy measured using GafChromic films and compared to calculations using a superposition/convolution based treatment planning system. *Radiother Oncol*. 2012;105:127–132.
- [69] Su FC, Shi C, Papanikolaou N. Clinical application of GAFCHROMIC EBT film for in vivo dose measurements of total body irradiation radiotherapy. *Appl Radiat Isot*. 2008;66:389–394.
- [70] Ganapathy K, Kurup PG, Murali V, Muthukumaran M, Bhuvaneshwari N, Velmurugan J. Patient dose analysis in total body irradiation through in vivo dosimetry. *J Med Phys*. 2012;37:214–218.
- [71] Jahnke A, Jahnke L, Molina-Duran F, et al. Arc therapy for total body irradiation – A robust novel treatment technique for standard treatment rooms. *Radiother Oncol*. 2014;110:553–557.
- [72] Klein EE, Hanley J, Bayouth J, et al. Task Group 142 report: quality assurance of medical accelerators. *Med Phys*. 2009;36:4197–4212.
- [73] Thomas MD, Warrington AP. GafChromic RTQA film for routine quality assurance of high-energy photon beams. *Phys Med Biol*. 2006;51:1439–1447.
- [74] Depuydt T, Penne R, Verellen D, et al. Computer-aided analysis of star shot films for high-accuracy radiation therapy treatment units. *Phys Med Biol*. 2012;57:2997–3011.
- [75] Girardi A, Anglesio S, Amadore G, Trevisiol E, Redda MG. Implementation of a program for quality assurance on leaf positioning accuracy using GafChromic RTQA2 films. *J Med Phys*. 2014;39:116–120.
- [76] Reyhan ML, Chen T, Zhang M. Characterization of the effect of MRI on Gafchromic film dosimetry. *J Appl Clin Med Phys*. 2015;16:325–332.
- [77] Reynoso F, Curcuru A, Green O, Mutic S, Das I, Santanam L. Magnetic field effects on GafChromic film response in MR-IGRT. *Med Phys*. 2016;43:6552–6556.
- [78] Hassani H, Nedaie HA, Zahmatkesh MH, Shirani K. A dosimetric study of small photon fields using polymer gel and Gafchromic EBT films. *Med Dos*. 2014;39:102–107.
- [79] Gonzalez-Lopez A, Vera-Sanchez JA, Lago-Martin JD. Small fields measurements with radiochromic films. *J Med Phys*. 2015;40:61–67.
- [80] Bassinet C, Huet C, Derreumaux S, et al. Small fields output factors measurements and correction factors determination for several detectors for a CyberKnife and linear accelerators equipped with microMLC and circular cones. *Med Phys*. 2013;40:071725-1–071725-13.
- [81] Das I. Radiochromic film: role and applications in radiation dosimetry. In: *Imaging in Medical Diagnosis and Therapy*. Boca Raton: CRC Press; 2017.
- [82] Hardcastle N, Bayliss A, Wong JHD, Rosenfeld AB, Tome WA. Improvements in dose calculation accuracy for small off-axis targets in high dose per fraction tomotherapy. *Med Phys*. 2012;39:4788–4794.

- [83] Chiu-Tsao ST, Chan MF. Photon beam dosimetry in the superficial buildup region using radiochromic EBT film stack. *Med Phys*. 2009;36:2074–2083.
- [84] Ali I, Matthiesen C, Algan O, Thompson S, Bogardus C, Herman T, Ahmad S. Quantitative evaluation of increase in surface dose by immobilization thermoplastic masks and superficial dosimetry using Gaf-Chromic EBT film and Monte Carlo calculations. *J Xray Sci Technol*. 2010;18:319–326.
- [85] Kim JH, Hill R, Kuncic Z. Practical considerations for reporting surface dose in external beam radiotherapy: a 6 MV X-ray beam study. *Austr Phys Eng Sci Med*. 2012;35:271–282.
- [86] Cho GA, Ralston A, Tin MM, Martin D, Pickard S, Kim JH, Tse R. In vivo and phantom measurements versus Eclipse TPS prediction of near surface dose for SBRT treatments. *J Phys*. 2014;489:012008.
- [87] Jung H, Kum O, Han Y, Park B, Cheong KH. Photon beam dosimetry with EBT3 film in heterogeneous regions: application to the evaluation of dose-calculation algorithms. *J Korean Phys Soc*. 2014;65:1829–1838.
- [88] Bueno M, Carrasco P, Jornet N, Munoz-Montplet C, Duch MA. On the suitability of ultrathin detectors for absorbed dose assessment in the presence of high-density heterogeneities. *Med Phys*. 2014;41:142–153.
- [89] Grams MP, Fong de Los Santos LE, Antolak JA, et al. Cadaveric verification of the Eclipse AAA algorithm for spine SBRT treatments with titanium hardware. *Pract Radiat Oncol*. 2016;6:131–141.
- [90] Langen KM, Papanikolaou N, Balog J, et al. QA for helical tomotherapy: report of the AAPM Task Group 148. *Med Phys*. 2010;37:4817–4853.
- [91] Dieterich S, Cavedon C, Chuang CF, et al. Report of AAPM TG 135: quality assurance for robotic radiosurgery. *Med Phys*. 2011;38:2914–2936.
- [92] Heck B, Jess-Hempfen A, Kreiner HJ, Schopgens H, Mack A. Accuracy and stability of positioning in radiosurgery: long-term results of the Gamma Knife system. *Med Phys*. 2007;34:1487–1495.
- [93] Brezovich IA, Wu XG, Duan J, et al. End-to-end test of spatial accuracy in Gamma Knife treatments for trigeminal neuralgia. *Med Phys*. 2014;41:111703.
- [94] Nobah A, Aldelaijan S, Devic S, et al. Radiochromic film based dosimetry of image-guidance procedures on different radiotherapy modalities. *J Appl Clin Med Phys*. 2014;15:229–239.
- [95] El Barouky J, Fournier-Bidoz N, Mazal A, Fares G, Rosenwald JC. Practical use of GafChromic EBT films in electron beams for in-phantom dose distribution measurements and monitor units verification. *Phys Medica*. 2011;27:81–88.
- [96] Schiapparelli P, Zefiro D, Massone F, Taccini G. Total skin electron therapy (TSET): a reimplementation using radiochromic films and IAEA TRS-398 code of practice. *Med Phys*. 2010;37:3510–3517.
- [97] Baghani HR, Aghamiri SMR, Mahdavi SR, et al. Dosimetric evaluation of GafChromic EBT2 film for breast intraoperative electron radiotherapy verification. *Phys Medica*. 2015;31:37–42.
- [98] Costa F, Sarmiento S, Sousa O. Assessment of clinically relevant dose distributions in pelvic IOERT using GafChromic EBT3 films. *Phys Medica*. 2015;31:692–701.
- [99] Kang SK, Park S, Hwang T, et al. Application of a dummy eye shield for electron treatment planning. *J Radiat Res*. 2013;54:174–181.
- [100] Jabbari K, Rostampour M, Roayaei M. Monte Carlo simulation and film dosimetry for electron therapy in vicinity of a titanium mesh. *J Appl Clin Med Phys*. 2014;15:67–79.

- [101] Gossman MS, Zhao L, Cao M, Lopez JP, Das IJ. Dosimetric impact of surgical clips in electron beam treatment of breast cancer. *Med Dosimetry*. 2010;35:85–86.
- [102] Rivard MJ, Coursey BM, DeWerd LA, et al. Update of AAPM Task Group No. 43 Report: a revised AAPM protocol for brachytherapy dose calculations. *Med Phys*. 2004;31:633–674.
- [103] Trichter S, Soares C, Zaider M, DeWyngaert JK, DeWerd L, Kleiman NJ. 15 years of ^{106}Ru eye plaque dosimetry at Memorial Sloan-Kettering Cancer Center and Weill Cornell Medical Center using radiochromic film in a solid water phantom. *Biomed Phys Eng Expr*. 2018;4:045017.
- [104] Anderson LL, Mick FW, Zabrouski K, Watanabe Y. Photoelectrons facilitate autoradiography for ^{192}Ir remote afterloaders. *Med Phys*. 1995;22:1759–1761.
- [105] Palmer AL, Nisbet A, Bradley D. Verification of high dose rate brachytherapy dose distributions with EBT3 Gafchromic film quality control techniques. *Phys Med Biol*. 2013;58:497–511.
- [106] Palmer AL, Lee C, Ratcliffe AJ, Bradley D, Nisbet A. Design and implementation of a film dosimetry audit tool for comparison of planned and delivered dose distributions in high dose rate (HDR) brachytherapy. *Phys Med Biol*. 2013;58:6623–6640.
- [107] Nath R, Amols H, Coffey C, et al. Intravascular brachytherapy physics: report of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 60. *Med Phys*. 1999;26:119–152.
- [108] Chiu-Tsao ST, Schaart DR, Soares CG, Nath R. Dose calculation formalisms and consensus dosimetry parameters for intravascular brachytherapy dosimetry: recommendations of the AAPM Therapy Physics Committee Task Group No. 149. *Med Phys*. 2007;34:4126–4157.
- [109] Chiu-Tsao ST, Duckworth TL, Patel NS, Pisch J, Harrison LB. Verification of ^{192}Ir near source dosimetry using GAFCHROMIC film. *Med Phys*. 2004;31:201–207.
- [110] Soares CG. Dosimetry of sealed beta particle sources. In: *Vascular Brachytherapy*. Armonk, NY: Futura Publishing Company; 2002:197–211.
- [111] Holmes SM, DeWerd LA, Micka JA. Experimental determination of the radial dose function of $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ IVBT sources. *Med Phys*. 2006;33:3225–3233.
- [112] Kirisits C, Stemberger A, Pokrajac B, Glogar D, Potter R, Georg D. Clinical quality assurance for endovascular brachytherapy devices. *Radiother Oncol*. 2004;71:91–98.
- [113] Nath R, Rivard MJ, DeWerd LA, et al. Guidelines by the AAPM and GEC-ESTRO on the use of innovative brachytherapy devices and applications: report of Task Group 167. *Med Phys*. 2016;43:3178–3205.
- [114] Fulkerson RK, Micka JA, DeWerd LA. Dosimetric characterization and output verification for conical brachytherapy surface applicators. Part I. Electronic brachytherapy source. *Med Phys*. 2014;41:022103.
- [115] Holmes SM, Micka JA, DeWerd LA. Ophthalmic applicators: an overview of calibrations following the change to SI units. *Med Phys*. 2009;36:1473–1477.
- [116] Cohen GN, Munro JJ, Kirov A, et al. ^{32}P brachytherapy conformal source model RIC-100 for high-dose-rate treatment of superficial disease: Monte Carlo calculations, diode measurements, and clinical implementation. *Int J Radiat Oncol*. 2014;88:746–752.
- [117] Chiu-Tsao ST, Chan MF. Use of new radiochromic devices for peripheral dose measurement: potential in-vivo dosimetry application. *Biomed Imaging Interv J*. 2009;5:e16 (1–12).

- [118] Cho GA, Ralston A, Tin MM, Martin D, Pickard S, Kim JH, Tse R. In vivo and phantom measurements versus Eclipse TPS prediction of near surface dose for SBRT treatments. *J Phys.* 2014;489:012008.
- [119] Avanzo M, Rink A, Dassie A, et al. In vivo dosimetry with radiochromic films in low-voltage intraoperative radiotherapy of the breast. *Med Phys.* 2012;39:2359–2368.
- [120] Boivin J, Tomic N, Fadlallah B, Deblois F, Devic S. Reference dosimetry during diagnostic CT examination using XR-QA radiochromic film model. *Med Phys.* 2011;38:5119–5129.
- [121] Dietlicher I, Casiraghi M, Ares C, Bolsi A, Weber DC, Lomax AJ, Albertini F. The effect of surgical titanium rods on proton therapy delivered for cervical bone tumors: experimental validation using an anthropomorphic phantom. *Phys Med Biol.* 2014;59:7181–7194.
- [122] Jia YC, Zhao L, Cheng CW, McDonald MW, Das IJ. Dose perturbation effect of metallic spinal implants in proton beam therapy. *J Appl Clin Med Phys.* 2015;16:333–343.
- [123] Newhauser WD, Koch NC, Fontenot JD, et al. Dosimetric impact of tantalum markers used in the treatment of uveal melanoma with proton beam therapy. *Phys Med Biol.* 2007;52:3979–3990.
- [124] Zou W, Fisher T, Zhang M, et al. Potential of 3D printing technologies for fabrication of electron bolus and proton compensators. *J Appl Clin Med Phys.* 2015;16:90–98.
- [125] Gillin MT, Sahoo N, Bues M, et al. Commissioning of the discrete spot scanning proton beam delivery system at the University of Texas M.D. Anderson Cancer Center, Proton Therapy Center, Houston. *Med Phys.* 2010;37:154–163.
- [126] Lin LY, Kang ML, Solberg TD, Ainsley CG, McDonough JE. Experimentally validated pencil beam scanning source model in TOPAS. *Phys Med Biol.* 2014;59:6859–6873.
- [127] Brauer-Krisch E, Adam JF, Alagoz E, et al. Medical physics aspects of the synchrotron radiation therapies: microbeam radiation therapy (MRT) and synchrotron stereotactic radiotherapy (SSRT). *Phys Med.* 2015;31:568–583.

Autoři:

Ing. Vladimír Dufek, Ph.D.

Ing. David Kecek

Rok:

2021