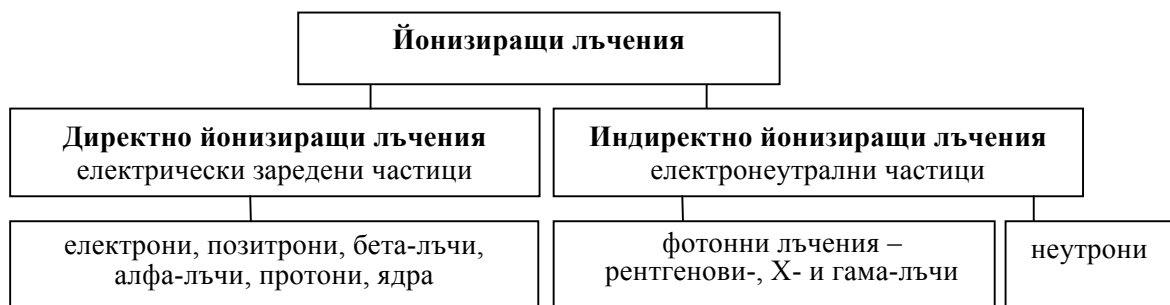


ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НА ЙОНИЗИРАЩЕ ЛЪЧЕНИЕ С ВЕЩЕСТВОТО

Взаимодействието на йонизиращите лъчения с веществото има различен характер в зависимост от характеристиките на лъчението (електричен заряд, енергия, маса) и на веществото (атомен номер, плътност, масова концентрация на електрони, йонизационен потенциал и др.).

В основата на радиобиологичния ефект е йонизацията. Според начина, по който предизвикват йонизация, лъченията се делят на директно (пряко) йонизиращи и индиректно (косвено) йонизиращи лъчения (фиг. 4). Директно йонизиращи са всички електрически заредени частици, а индиректно йонизиращи лъчения са всички електронеутрални лъчения.



Фигура 4. Класификация на йонизиращите лъчения

Взаимодействие на заредените частици. Взаимодействието на заредените частици с веществото се определя най-вече от електростатичното взаимодействие между тях и електроните в атомите. Ако заредената частица има достатъчна енергия E , тя може чрез удар да предизвика възбуждане и йонизация на атомите на веществото, през което преминава. При ударите частицата, отдавайки енергията си на атома, губи част от своята кинетична енергия – *загуби при удар* или *йонизационни загуби* E_c . Възбудените атоми и молекули отделят получената при възбуждането си енергия под формата на фотони светлина (радиолуминесценция) или на характеристично рентгеново лъчение. Поради способността на заредените частици директно да възбуждат и йонизират атомите и молекулите на веществото при удари с тях, те се наричат *директно (пряко) йонизиращи лъчения*.

Мярка за йонизиращата способност на заредената частица е *линейната йонизация* – отношението на броя на йонните двойки, създавани от частицата по протежение на

определена дължина от нейния път, и дължината на този път. При еднаква енергия, тежките частици (алфа-лъчи, тежки ядра) имат значително по-голяма линейна йонизация от леките частици (бета-лъчи, електрони, позитрони). Например, алфа частиците създават във въздух 20 000-60 000 йонни двойки на 1 cm, докато бета-частиците – само 100-400 йонни двойки на 1 cm. Тежките частици имат по-малък *пробег* във веществото – това е пътят, изминаван от частицата във веществото до нейното спиране. Пробегът на алфа-частиците във въздуха е до 2,5-11 cm, а в мускулна тъкан – до 30-130 μm (таблица 1). Затова алфа-частиците не представляват радиационна опасност при външно облъчване; те се поглъщат в кожата и не проникват в дълбочина.

Пробегът на бета-частиците нараства с тяхната енергия. Например, при енергия 200 keV, пробегът им в мускулна тъкан е 1 mm и във въздух 31 cm, а при 1 MeV – съответно 5 и 3 m. Радиационната защита при външно облъчване с бета-лъчи се осъществява най-често чрез защитни екрани от пластмаса с дебелина до 1-2 cm. По-голяма дебелина е нужна при защитата от ускорени електрони с енергии няколко десетки MeV, получавани например в медицинските ускорители за лъчелечение.

Таблица 1. Пробег на алфа-частици и бета-частици във въздух и в биологична тъкан

Вид на частиците	Алфа-частици			Бета-частици		
	4 MeV	7 MeV	10 MeV	200 keV	1 MeV	3 MeV
Енергия на частицата	4 MeV	7 MeV	10 MeV	200 keV	1 MeV	3 MeV
Пробег в мускулна тъкан	30 μm	76 μm	130 μm	1 mm	5 mm	15 mm
Пробег във въздух	2,5 cm	6 cm	10,6 cm	31 cm	3 m	9 m

За целите на радиобиологията се въвежда величината *линейно предаване на енергия (ЛПЕ)*, характеризираща предаването на енергия от заредената частица на единица дължина от пътя ѝ в определена клетъчна структура. ЛПЕ е толкова по-голямо, колкото по-голяма е линейната йонизация на частиците. Лъченията с голямо ЛПЕ (алфа-частици, тежки ядра и др.) създават по-големи лъчеви увреждания при вътрешно облъчване, защото въздействат на всички клетки по своя път. Заредените частици с малко ЛПЕ (електроните и позитроните) поразяват само част от клетките, което улеснява репаративните процеси в облъчваните тъкани и намалява тяхното лъчево увреждане.

Освен чрез удари, при рязкото си спиране в електромагнитното поле на атомите заредените частици могат да трансформират част от енергията си във фотони *спирално лъчение*. Това са *радиационните загуби* на енергия на заредените частици, които са вероятни при по-леките частици и при вещества с по-голям атомен номер. Затова за

получаване на рентгеново лъчение в рентгеновите тръби и на X-лъчи в медицинските ускорители като бомбардиращи частици се използват електрони, а мишените са най-често от волфрам (${}_{74}W$).

Поради голямата вероятност за възникване на спиращо лъчение, при работа с източник на леки заредени частици (бета-лъчение или ускорени електрони), трябва да се предвиди защита от вторичното спиращо лъчение, което има много по-голяма проникваща способност от първичните електрони.

Взаимодействие на фотоните йонизиращи лъчения. Фотоните нямат електричен заряд и не могат да йонизират чрез удар. Те взаимодействат с веществото като трансформират цялата или част от енергията си в енергия на вторични заредени частици, които от своя страна предизвикват възбуждане и йонизация. Трансформацията на енергия на фотоните в енергия на заредени частици става по един от следните три механизма:

▪ *Фотоелектрично поглъщане* – при него цялата енергия на фотона се предава на един електрон от атомната обвивка. Този ефект е преобладаващото взаимодействие в биологичните тъкани при енергия на фотоните до около 60 keV, а за олово – над около 500 keV.

▪ *Комптънов ефект* – при него енергията на фотона се поделва между един електрон от веществото (Комптънов електрон) и *разсеян фотон* с по-ниска енергия от тази на падащия. Комптъновият ефект е преобладаващото взаимодействие на фотоните с биологичните тъкани при енергии между 60 keV и 10 MeV.

▪ *Образуване на двойка електрон-позитрон* – при него енергията на фотона се изразходва за създаване на двойка заредени частици – електрон и позитрон. Това взаимодействие е възможно при енергия на фотоните над 1022 keV и става доминиращ вид взаимодействие с биологичните тъкани при енергии над 10 MeV.

Отслабване на фотонните лъчения. Ако точков източник на фотонно йонизиращо лъчение с интензитет се намира във вакуум, неговият интензитет ψ намалява с разстоянието r до източника по известния закон за обратните квадрати:

$$\psi = \frac{1}{4\pi} \frac{\psi_0}{r^2}.$$

Тук ψ_0 е интензитетът на лъчението на мястото на източника.

Ако фотонният източник се намира в някакво вещество, в резултат на взаимодействието на лъчението с веществото неговият интензитет намалява (лъчението отслабва) с дебелината x на изминатия слой от веществото по закона:

$$\psi(x) = \psi_0 e^{-\mu x},$$

където μ е общият линеен коефициент на отслабване на веществото за фотоните. Отслабването във въздух е пренебрежимо малко, затова за практически цели може да се приеме, че интензитетът на фотонните йонизиращи лъчения във въздуха намалява с квадрата на разстоянието до източника. Коефициентът μ има относително най-големи стойности при вещества с голям атомен номер и при ниски енергии на фотоните. Затова оловото (${}_{82}\text{Pb}$) е предпочитаният материал за защита от рентгеновите лъчи и от гамалъчите с по-ниска енергия. За определяне на степента на отслабване на лъчението за изчисляване на необходимата дебелина на защитния слой се използва величината *слой на полуотслабване* – дебелината на слоя от определено вещество, при преминаване през който интензитетът на лъчението намалява наполовина (таблица 2). Слой от веществото с дебелина, равна на 2 слоя на полуотслабване, намалява интензитета $2^2 = 4$ пъти; 3 слоя на полуотслабване – $2^3 = 8$ пъти и т.н. При определянето на дебелина на защитни прегради от фотонни лъчения най-напред се пресмята т.нар. кратност на отслабване, в зависимост от интензитета на първичното лъчение, след което се определя какъв материал да се използва и каква да бъде дебелината на преградата.

Таблица 2. Стойности на слоя на полуотслабване в олово за гама-лъчението от някои радионуклиди

Радионуклид	Енергия E,	Слой на полуотслабване в олово
Технеций-99m (${}^{99m}\text{Tc}$)	140 keV	0,3 mm
Йод-131 (${}^{131}\text{I}$)	284 keV и 364 keV	3 mm
Цезий-137 (${}^{137}\text{Cs}$)	661,7 keV	6,2 mm
Кобалт-60 (${}^{60}\text{Co}$)	1,25 MeV	10,4 mm

Взаимодействие на неутроните. Поради липсата на електричен заряд, неутроните йонизират подобно на фотонните лъчения чрез вторичните заредени частици, които създават във веществото. Според енергията си, неутроните се делят на бавни (от 0 eV до 1 keV), междинни (от 1 keV до 0,5 MeV) и бързи и свръхбързи (над 0,5 MeV). По отношение на

биологичното действие е прието неутроните да се делят в пет групи по енергия: под 10 keV; от 10 keV до 100 keV; от 100 keV до 2 MeV; от 2 MeV до 20 MeV и над 20 MeV.

Основен процес на взаимодействие на бързите неутрони с веществото е еластичното разсейване с ядрата, при което се получават вторични откатни ядра, с достатъчна енергия за йонизация. В биологичните тъкани най-интензивно е еластичното разсейване с ядрата на леките елементи, най-вече на водорода. Това е основният начин за предаване на енергия от бързите неутрони на тъканите. За бавните неутрони еластичното разсейване е също възможно, но образуваните откатни ядра получават енергия, недостатъчна за йонизация. По-съществен за взаимодействието на бавните и на междинните неутрони с тъканите е радиационното залавяне от ядрата, при което се получават вторични заредени частици (протони и др.) и гама-лъчи. Реакцията на делене под действие на неутроните, характерна за тежките ядра, е без значение за биологичните тъкани.

Отслабването на потока неутрони става приблизително по законите за отслабване на фотонното лъчение – с квадрата на разстоянието и експоненциално от дебелината на преминатия слой вещество – и зависи от енергията на неутроните и атомния номер на веществото.