

### Mittekoherentne optiline kiirgus

Biofüüsikaliselt põhjendatud ja asjakohased optilise kiirgusega kokkupuute väärtused on arvutatavad allpool toodud valemite abil, kasutades mõõtetulemusi ja arvesse võttes kokkupuute kestust, ohustatud elundeid ja kudesid. Valemi valik sõltub tehnilikust allikast lähtuva optilise kiirguse lainepikkuste vahemikust. Kiirguse ohtlikkuse hindamisel peab mõõtetulemuste alusel arvutatud väärtusi (koos mõõtemääramatusega) võrdlema tabelis 1.1 esitatud vastavate kokkupuute piirnormidega. Ühe optilise kiirguse allika kohta võib olla rohkem kui üks kokkupuute väärtus ja sellele vastav kokkupuute piirnorm.

Valemite tähistused a kuni o vastavad tabeli 1.1 ridade indeksitele.

$$\text{a) } H_{\text{eff}} = \int_0^t \int_{\lambda=180 \text{ nm}}^{\lambda=400 \text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda, t) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda \cdot dt \quad (H_{\text{eff}} \text{ on asjassepuutuv ainult vahemikus 180 kuni 400 nm})$$

$$\text{b) } H_{\text{UVA}} = \int_0^t \int_{I=315 \text{ nm}}^{I=400 \text{ nm}} E_I(\lambda, t) \cdot d\lambda \cdot dt \quad (H_{\text{UVA}} \text{ on asjassepuutuv ainult vahemikus 315 kuni 400 nm})$$

$$\text{c), d) } L_B = \int_{\lambda=300 \text{ nm}}^{\lambda=700 \text{ nm}} L_{\lambda}(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot d\lambda \quad (L_B \text{ on asjassepuutuv ainult vahemikus 300 kuni 700 nm})$$

$$\text{e), f) } E_B = \int_{\lambda=300 \text{ nm}}^{\lambda=700 \text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot d\lambda \quad (E_B \text{ on asjassepuutuv ainult vahemikus 300 kuni 700 nm})$$

$$\text{g-l) } L_R = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_I(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda \quad (\text{Vaata tabelist 1.1 asjakohased } \lambda_1 \text{ ja } \lambda_2 \text{ väärtused})$$

$$\text{m), n) } E_{\text{IR}} = \int_{\lambda=780 \text{ nm}}^{\lambda=3000 \text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (E_{\text{IR}} \text{ on asjassepuutuv ainult vahemikus 780 kuni 3000 nm})$$

$$\text{o) } H_{\text{skin}} = \int_0^t \int_{\lambda=380 \text{ nm}}^{\lambda=3000 \text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda, t) \cdot d\lambda \cdot dt \quad (H_{\text{skin}} \text{ on asjassepuutuv ainult vahemikus 380 kuni 3000 nm})$$

Määruse eesmärkidel võib ülalpool esitatud valemid asendada järgmiste avaldistega, milles saab kasutada tabelites 1.2 ja 1.3 esitatud diskreetseid väärtusi:

$$\text{a) } E_{\text{eff}} = \sum_{\lambda=180 \text{ nm}}^{\lambda=400 \text{ nm}} E_{\lambda} \cdot S(\lambda) \cdot \Delta\lambda \quad \text{ja} \quad H_{\text{eff}} = E_{\text{eff}} \cdot \Delta t$$

$$\text{b) } E_{\text{UVA}} = \sum_{I=315 \text{ nm}}^{I=400 \text{ nm}} E_I \cdot \Delta\lambda \quad \text{ja} \quad H_{\text{UVA}} = E_{\text{UVA}} \cdot \Delta t$$

$$\text{c), d) } L_B = \sum_{\lambda=300\text{ nm}}^{\lambda=700\text{ nm}} L_\lambda \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda$$

$$\text{e), f) } E_B = \sum_{\lambda=300\text{ nm}}^{\lambda=700\text{ nm}} E_\lambda \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda$$

$$\text{g-l) } L_R = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_\lambda \cdot R(\lambda) \cdot \Delta\lambda \quad (\text{Vaata tabelist 1.1 asjakohased } \lambda_1 \text{ ja } \lambda_2 \text{ väärtused})$$

$$\text{m), n) } E_{IR} = \sum_{\lambda=780\text{ nm}}^{\lambda=3000\text{ nm}} E_\lambda \cdot \Delta\lambda$$

$$\text{o) } E_{\text{skin}} = \sum_{\lambda=380\text{ nm}}^{\lambda=3000\text{ nm}} E_\lambda \cdot \Delta\lambda \quad \text{ja} \quad H_{\text{skin}} = E_{\text{skin}} \cdot \Delta t$$

### Märkused:

$E_\lambda(\lambda, t), E_\lambda$	<i>spektraalne kiirgusintensiivsus ehk võimsuse spektraaltihedus</i> – teatud pinnale langeva kiirguse võimsus pindalaühiku kohta, mida väljendatakse vattides ruutmeetri kohta ja nanomeetri kohta [ $\text{W m}^{-2} \text{ nm}^{-1}$ ]; $E_\lambda(\lambda, t)$ ja $E_\lambda$ väärtused saadakse mõõtmise teel või võib need anda seadme valmistaja;
$E_{\text{eff}}$	<i>efektiivne kiirgusintensiivsus (UV piirkond)</i> – $S(\lambda)$ järgi spektraalselt kaalutud arvutuslik kiirgustihedus UV lainepikkuste vahemikus 180 kuni 400 nm, mida väljendatakse vattides ruutmeetri kohta [ $\text{W m}^{-2}$ ];
$H$	<i>kokkupuude kiirgusega</i> – kiirgustiheduse ajaintegraal, mida väljendatakse džaulides ruutmeetri kohta [ $\text{J m}^{-2}$ ];
$H_{\text{eff}}$	<i>efektiivne kokkupuude kiirgusega</i> – $S(\lambda)$ järgi spektraalselt kaalutud kokkupuude kiirgusega, mida väljendatakse džaulides ruutmeetri kohta [ $\text{J m}^{-2}$ ];
$E_{\text{UVA}}$	<i>kogukiirgusintensiivsus (UVA)</i> – arvutuslik kiirgustihedus UV-A lainepikkuse vahemikus 315 kuni 400 nm, mida väljendatakse vattides ruutmeetri kohta [ $\text{W m}^{-2}$ ];
$H_{\text{UVA}}$	<i>kokkupuude kiirgusega</i> – kiirgustiheduse integraal aja ja lainepikkuse järgi või kiirgustiheduse summa UV-A lainepikkuse vahemikus 315 kuni 400 nm, mida väljendatakse džaulides ruutmeetri kohta [ $\text{J m}^{-2}$ ];
$S(\lambda)$	<i>spektraalne kaalutegur</i> , mis võtab arvesse silmadele ja nahale suunatud tervisemõju sõltuvuse UV kiirguse lainepikkusest, (tabel 1.2) [ühik on 1];
$t, \Delta t$	<i>aeg, ajavahemik, kokkupuute kestus</i> , mida väljendatakse sekundites [s];
$\lambda$	<i>lainepikkus</i> , mida väljendatakse nanomeetrites [nm];
$\Delta\lambda$	<i>ribalaius</i> , mida väljendatakse nanomeetrites [nm], arvutus- või mõõteintervallid;
$L_\lambda(\lambda), L_\lambda$	<i>allika spektraalne kiirgustihedus</i> , mida väljendatakse vattides ruutmeetri kohta, steradiaani kohta ja nanomeetri kohta [ $\text{W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ ];
$R(\lambda)$	<i>spektraalne kaalutegur</i> , mis võtab arvesse nähtava valguse ja IR-A kiirguse poolt silmadele põhjustatud termilise kahjustuse sõltuvuse lainepikkusest (tabel 1.3) [ühik on 1];
$L_R$	<i>efektiivne kiirgustihedus (termiline kahjustus)</i> – $R(\lambda)$ järgi spektraalselt kaalutud arvutuslik kiirgustihedus, mida väljendatakse vattides ruutmeetri kohta ja steradiaani kohta [ $\text{W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ ];
$B(\lambda)$	<i>spektraalne kaalutegur</i> , mis võtab arvesse sinise valguse poolt silmadele põhjustatud fotokeemilise kahjustuse sõltuvuse lainepikkusest (tabel 1.3) [ühik on 1];

- $L_B$  *efektiivne kiirgustihedus (sinine valgus)* –  $B(\lambda)$  järgi spektraalselt kaalutud arvutuslik kiirgustihedus, mida väljendatakse vattides ruutmeetri kohta ja steradiaani kohta [ $W\ m^{-2}\ sr^{-1}$ ];
- $E_B$  *efektiivne kiirgusintensiivsus (sinine valgus)* –  $B(\lambda)$  järgi spektraalselt kaalutud arvutuslik kiirgusintensiivsus, mida väljendatakse vattides ruutmeetri kohta [ $W\ m^{-2}$ ];
- $E_{IR}$  *kogukiirgusintensiivsus (termiline kahjustus)* – arvutuslik kiirgustihedus infrapunakiirguse lainepikkuse vahemikus 780 kuni 3000 nm, mida väljendatakse vattides ruutmeetri kohta [ $W\ m^{-2}$ ];
- $E_{skin}$  *kogukiirgusintensiivsus (nähtav valgus, IR-A ja IR-B)* – arvutuslik kiirgustihedus nähtava valguse ja infrapunakiirguse lainepikkuse vahemikus 380 kuni 3000 nm, mida väljendatakse vattides ruutmeetri kohta [ $W\ m^{-2}$ ];
- $H_{skin}$  *kokkupuude kiirgusega* – kiirgustiheduse integraal aja ja lainepikkuse järgi või kiirgustiheduse summa nähtava valguse ja infrapunakiirguse lainepikkuse vahemikus 380 kuni 3000 nm, mida väljendatakse džaulides ruutmeetri kohta ( $J\ m^{-2}$ );
- $\alpha$  *nägemisnurk* – nurk, mille all paistab nähtav allikas vaatepunktist ümbritsevas ruumis, mida väljendatakse milliradiaanides (mrad). Nähtav allikas on tõeline või virtuaalne objekt, mis moodustab võrkkestale väikseima võimaliku kujutise.

Tabel 1.1: Mittekoherentse optilise kiirgusega kokkupuute piirnormid

Indeks	Lainepikkus nm	Kokkupuute piirnorm	Ühikud	Märkused	Ohustatud elundid ja koed	Võimalikud tagajärjed
a	180–400 (UV-A, UV-B ja UV-C)	$H_{\text{eff}} = 30$ Päeva kestus 8 tundi	$[\text{J m}^{-2}]$		silma sarvkest silma sidekest silmalääts nahk	valgusest põhjustatud sarvkestapõletik fotokeratiit sidekestapõletik/ konjunktiviit kae moodustumine/ kataraktogenees erüteemia elastoos nahavähk
b	315–400 (UV-A)	$H_{\text{UVA}} = 10^4$ Päeva kestus 8 tundi	$[\text{J m}^{-2}]$		silmalääts	Kae moodustumine/ kataraktogenees
c	300–700 (sinine valgus) <i>vt märkus 1</i>	$L_B = \frac{10^6}{t}$ kui $t \leq 10\,000$ s	$L_B: [\text{W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}]$ t: [sekundit]	kui $\alpha \geq 11$ mrad		
d	300–700 (sinine valgus) <i>vt märkus 1</i>	$L_B = 100$ kui $t > 10\,000$ s	$[\text{W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}]$		silma võrkkest	valgusest põhjustatud võrkkesta põletik/ fotoretiniit
e	300–700 (sinine valgus) <i>vt märkus 1</i>	$E_B = \frac{100}{t}$ kui $t \leq 10\,000$ s	$E_B: [\text{W m}^{-2}]$ t: [sekundit]	kui $\alpha < 11$ mrad <i>vt märkus 2</i>		
f	300–700 (sinine valgus) <i>vt märkus 1</i>	$E_B = 0,01$ $t > 10\,000$ s	$[\text{W m}^{-2}]$			
g	380–1400 (nähtav valgus ja IR-A)	$L_R = \frac{2,8 \cdot 10^7}{C_a}$ kui $t > 10$ s	$[\text{W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}]$	$C_\alpha = 1,7$ kui $\alpha \leq 1,7$ mrad $C_\alpha = \alpha$ kui $1,7 \leq \alpha \leq 100$ mrad		
h	380–1400 (nähtav valgus ja IR-A)	$L_R = \frac{5 \cdot 10^7}{C_a t^{0,25}}$ kui $10 \mu\text{s} \leq t \leq 10$ s	$L_R: [\text{W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}]$ t: [sekundit]	$C_\alpha = 100$ kui $\alpha > 100$ mrad	silma võrkkest	võrkkesta põletus
i	380–1400 (nähtav valgus ja IR-A)	$L_R = \frac{8,89 \cdot 10^8}{C_a}$ kui $t < 10 \mu\text{s}$	$[\text{W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}]$	$\lambda_1 = 380; \lambda_2 = 1400$		

Indeks	Lainepikkus nm	Kokkupuute piirnorm	Ühikud	Märkused	Ohustatud elundid ja koed	Võimalikud tagajärjed
j	780-1400 (IR-A)	$L_R = \frac{6 \cdot 10^6}{C_a}$ kui $t > 10$ s	$[W m^{-2} sr^{-1}]$	$C_\alpha = 11$ kui $\alpha \leq 11$ mrad $C_\alpha = \alpha$ kui $11 \leq \alpha \leq 100$ mrad $C_\alpha = 100$ kui $\alpha > 100$ mrad (mõõdevaateväli 11 mrad)  $\lambda_1 = 780; \lambda_2 = 1400$	silma võrkkest	võrkkesta põletus
k	780-1400 (IR-A)	$L_R = \frac{5 \cdot 10^7}{C_a t^{0,25}}$ kui $10 \mu s \leq t \leq 10$ s	$L_R: [W m^{-2} sr^{-1}]$ t: [sekundit]			
l	780-1400 (IR-A)	$L_R = \frac{8,89 \cdot 10^8}{C_a}$ kui $t < 10 \mu s$	$[W m^{-2} sr^{-1}]$			
m	780-3000 (IR-A ja IR-B)	$E_{IR} = 18000 t^{0,75}$ kui $t \leq 1000$ s	E: $[W m^{-2}]$ t: [sekundit]		silma sarvkest silmalääts	sarvkesta põletus kae moodustumine
n	780-3000 (IR-A ja IR-B)	$E_{IR} = 100$ kui $t > 1000$ s	$[W m^{-2}]$			
o	380-3000 (nähtav valgus, IR-A ja IR-B)	$H_{skin} = 20000 t^{0,25}$ kui $t < 10$ s	H: $[J m^{-2}]$ t: [sekundit]		nahk	põletus

*Märkus 1:* Vahemik 300 kuni 700 nm hõlmab osa UV-B kiirgusest, kogu UV-A kiirguse ja enamiku nähtavast valgusest; siiski viidatakse üldjuhul nendega seotud ohtude korral „sinise valguse“ ohule. Rangelt võttes hõlmab sinine valgus ainult vahemikku orienteeruvalt 400 kuni 490 nm.

*Märkus 2:* Eriti väikeste allikate fikseerimise korral (nägemisnurk  $\alpha < 11$  mrad) võib  $L_B$  ümber arvestada  $E_B$ -ks. Tavaliselt kohaldatakse seda vaid oftalmoloogiliste instrumentide puhul või liikumatu silma korral anesteesia ajal. Maksimaalne „vaatamise aeg“ leitakse:  
 $t_{max} = 100 / E_B$ , kus  $E_B$  väljendatakse ühikuga  $W m^{-2}$ . Tavaliste nägemisülesannete ajal ei ületa see silma liikumise tõttu 100 s.

Tabel 1.2: Spektraalne kaalutegur  $S(\lambda)$  vahemikus 180 nm kuni 400 nm

$\lambda$ (nm)	$S(\lambda)$	$\lambda$ (nm)	$S(\lambda)$	$\lambda$ (nm)	$S(\lambda)$	$\lambda$ (nm)	$S(\lambda)$	$\lambda$ (nm)	$S(\lambda)$
180	0,0120	228	0,1737	276	0,9434	324	0,000520	372	0,000086
181	0,0126	229	0,1819	277	0,9272	325	0,000500	373	0,000083
182	0,0132	230	0,1900	278	0,9112	326	0,000479	374	0,000080
183	0,0138	231	0,1995	279	0,8954	327	0,000459	375	0,000077
184	0,0144	232	0,2089	280	0,8800	328	0,000440	376	0,000074
185	0,0151	233	0,2188	281	0,8568	329	0,000425	377	0,000072
186	0,0158	234	0,2292	282	0,8342	330	0,000410	378	0,000069
187	0,0166	235	0,2400	283	0,8122	331	0,000396	379	0,000066
188	0,0173	236	0,2510	284	0,7908	332	0,000383	380	0,000064
189	0,0181	237	0,2624	285	0,7700	333	0,000370	381	0,000062
190	0,0190	238	0,2744	286	0,7420	334	0,000355	382	0,000059
191	0,0199	239	0,2869	287	0,7151	335	0,000340	383	0,000057
192	0,0208	240	0,3000	288	0,6891	336	0,000327	384	0,000055
193	0,0218	241	0,3111	289	0,6641	337	0,000315	385	0,000053
194	0,0228	242	0,3227	290	0,6400	338	0,000303	386	0,000051
195	0,0239	243	0,3347	291	0,6186	339	0,000291	387	0,000049
196	0,0250	244	0,3471	292	0,5980	340	0,000280	388	0,000047
197	0,0262	245	0,3600	293	0,5780	341	0,000271	389	0,000046
198	0,0274	246	0,3730	294	0,5587	342	0,000263	390	0,000044
199	0,0287	247	0,3865	295	0,5400	343	0,000255	391	0,000042
200	0,0300	248	0,4005	296	0,4984	344	0,000248	392	0,000041
201	0,0334	249	0,4150	297	0,4600	345	0,000240	393	0,000039
202	0,0371	250	0,4300	298	0,3989	346	0,000231	394	0,000037
203	0,0412	251	0,4465	299	0,3459	347	0,000223	395	0,000036
204	0,0459	252	0,4637	300	0,3000	348	0,000215	396	0,000035
205	0,0510	253	0,4815	301	0,2210	349	0,000207	397	0,000033
206	0,0551	254	0,5000	302	0,1629	350	0,000200	398	0,000032
207	0,0595	255	0,5200	303	0,1200	351	0,000191	399	0,000031
208	0,0643	256	0,5437	304	0,0849	352	0,000183	400	0,000030
209	0,0694	257	0,5685	305	0,0600	353	0,000175		
210	0,0750	258	0,5945	306	0,0454	354	0,000167		
211	0,0786	259	0,6216	307	0,0344	355	0,000160		
212	0,0824	260	0,6500	308	0,0260	356	0,000153		
213	0,0864	261	0,6792	309	0,0197	357	0,000147		
214	0,0906	262	0,7098	310	0,0150	358	0,000141		
215	0,0950	263	0,7417	311	0,0111	359	0,000136		
216	0,0995	264	0,7751	312	0,0081	360	0,000130		
217	0,1043	265	0,8100	313	0,0060	361	0,000126		
218	0,1093	266	0,8449	314	0,0042	362	0,000122		
219	0,1145	267	0,8812	315	0,0030	363	0,000118		
220	0,1200	268	0,9192	316	0,0024	364	0,000114		
221	0,1257	269	0,9587	317	0,0020	365	0,000110		
222	0,1316	270	1,0000	318	0,0016	366	0,000106		
223	0,1378	271	0,9919	319	0,0012	367	0,000103		

$\lambda$ (nm)	S ( $\lambda$ )	$\lambda$ (nm)	S ( $\lambda$ )	$\lambda$ (nm)	S ( $\lambda$ )	$\lambda$ (nm)	S ( $\lambda$ )	$\lambda$ (nm)	S ( $\lambda$ )
224	0,1444	272	0,9838	320	0,0010	368	0,000099		
225	0,1500	273	0,9758	321	0,000819	369	0,000096		
226	0,1583	274	0,9679	322	0,000670	370	0,000093		
227	0,1658	275	0,9600	323	0,000540	371	0,000090		

Tabel 1.3: Spektraalsed kaalutegurid  $B(\lambda)$ ,  $R(\lambda)$  vahemikus 380 nm kuni 1400 nm

$\lambda$ (nm)	$B(\lambda)$	$R(\lambda)$
$300 \leq \lambda < 380$	0,01	–
380	0,01	0,1
385	0,013	0,13
390	0,025	0,25
395	0,05	0,5
400	0,1	1
405	0,2	2
410	0,4	4
415	0,8	8
420	0,9	9
425	0,95	9,5
430	0,98	9,8
435	1	10
440	1	10
445	0,97	9,7
450	0,94	9,4
455	0,9	9
460	0,8	8
465	0,7	7
470	0,62	6,2
475	0,55	5,5
480	0,45	4,5
485	0,32	3,2
490	0,22	2,2
495	0,16	1,6
500	0,1	1
$500 < \lambda \leq 600$	$10^{0,02 \cdot (450 - \lambda)}$	1
$600 < \lambda \leq 700$	0,001	1
$700 < \lambda \leq 1050$	–	$10^{0,002 \cdot (700 - \lambda)}$
$1050 < \lambda \leq 1150$	–	0,2
$1150 < \lambda \leq 1200$	–	$0,2 \cdot 10^{0,02 \cdot (1150 - \lambda)}$
$1200 < \lambda \leq 1400$	–	0,02