

Promieniowanie UV obejmuje fale elektromagnetyczne o długości od około 4 do 400 nm. Region ten wypełnia obszar między promieniowaniem X (poniżej 4 nm) a światłem widzialnym (promieniowanie, na które wrażliwe jest oko ludzkie, 400–700 nm). Na promieniowanie UV przypada około 10% całkowitej energii promieniowania słonecznego.

Wysoką wrażliwość na promieniowanie UV wykazują także dwa inne składniki komórkowe, tj. RNA i białka. Duża ilość identycznych kopii obu tych składników w komórce oraz możliwość ich odtworzenia dzięki informacji genetycznej zawartej w DNA sprawia, że zmiany fotochemiczne zachodzące w obrębie RNA i białek mają z punktu widzenia funkcji życiowych komórki znaczenie drugorzędne.

Ozon powstaje z tlenu cząsteczkowego ( $O_2$ ), silnie pochłaniającego fale o długości poniżej 200 nm i tlenu atomowego ( $O$ ), tworzonego w wyniku reakcji fotochemicznej z tlenu cząsteczkowego. Ozon w znacznych ilościach występuje na wysokości od 20 do 30 km nad poziomem morza (stratosfera), osiągając maksimum koncentracji na wysokości około 28 km (1 cząsteczka  $O_3$  na 10 milionów cząsteczek powietrza). Jego całkowita zawartość w atmosferze jest niewielka — wystarczyłaby na wytworzenie w normalnych warunkach temperatury i ciśnienia warstwy o grubości zaledwie 3 mm.



W 1877 roku Anglicy Downes i Blunt wykazali, że promieniowanie słoneczne ma charakter bakterioobójczy. Po 100 latach, które minęły od tego wydarzenia, dla nikogo nie jest tajemnicą, że za efekt ten odpowiedzialne jest promieniowanie ultrafioletowe (UV) stanowiące część widma emitowanego przez Słońce.

Podłożem szkodliwego wpływu promieniowania UV na organizmy żywe jest jego silna absorpcja przez DNA, substancję pełniącą podstawową funkcję w metabolizmie komórkowym i dziedziczeniu. Pod wpływem pochłoniętych kwantów energii wchodzące w skład DNA zasady pirymidynowe ulegają wzbudzeniu i z łatwością ze sobą reagują, tworząc tzw. dimery pirymidynowe (dwie sąsiednie zasady pirymidynowe połączone za pomocą nowo powstałego wiązania). Dimery pirymidynowe prowadzą do całkowitego zablokowania podstawowych funkcji DNA i to właśnie one w określonych warunkach mogą powodować szereg ujemnych efektów biologicznych, ze śmiercią komórki włącznie.

Dimery pirymidynowe z największą częstością tworzone są pod wpływem promieniowania UV o długości fali około 250–270 nm. W przedziale tym promieniowanie UV wywiera więc najbardziej szkodliwy wpływ na organizmy żywe. Obecnie powierzchnia naszej planety jest całkowicie pozbawiona tego zgubnego dla życia promieniowania. Za jego zatrzymanie w atmosferze ziemskiej odpowiedzialny jest ozon ( $O_3$ ), powodujący silną absorpcję fal o długości 200 — 290 nm.

Istotnym czynnikiem ograniczającym ilość promieniowania UV docierającego do powierzchni Ziemi jest jego rozpraszanie przez obecne w atmosferze cząsteczki gazów, pyły i parę wodną. Rozpraszanie osiąga największą wartość dla fal krótkich. Oprócz niewidzialnego promieniowania UV silnie rozpraszane jest światło fioletowe oraz niebieskie, obejmujące najkrótsze fale odbierane przez oko ludzkie (konsekwencją tego jest niebieski kolor nieba).

Przyjmuje się, że we wczesnych etapach rozwoju życia na Ziemi atmosfera zawierająca nieznaczne ilości tlenu nie zabezpieczała skutecznie przed krótkofalowym promieniowaniem UV. Większość żyjących wówczas na naszej planecie organizmów unikała jego zgubnego wpływu zamieszkując głębsze warstwy wód i mułu. Ekspansja życia na powierzchnię stała się możliwa prawdopodobnie dopiero po wykształceniu przez organizmy wodne procesu fotosyntezy i nagromadzeniu w atmosferze ziemskiej znacznych ilości tlenu.

Spośród docierającego obecnie do powierzchni naszej planety promieniowania słonecznego ujemny wpływ na organizmy żywe wywierają jedynie fale zawarte w przedziale 290–310 nm. Fale o długości większej niż 310 nm są absorbowane przez zasady pirymidynowe tylko w niewielkim stopniu i nie inicjują zmian fotochemicznych w DNA. Promieniowanie słoneczne zawarte w paśmie 290–310 nm w warunkach dobrego nasłonecznienia jest wystarczające do wytworzenia w ciągu 100 minut około 1 miliona dimerów pirymidynowych w pojedynczej komórce człowieka. Zastosowanie jako filtru szkła okiennego o grubości 2 mm, nie przepuszczającego promieniowania poniżej 310 nm, niemal w całości zapobiega temu efektowi.

Źródłem zmian w DNA, oprócz krótkofalowego promieniowania słonecznego, jest także szereg innych czynników środowiska zewnętrznego. Do grupy tej zalicza się zarówno czynniki występujące naturalnie (radioaktywność skorupy ziemskiej, niektóre substancje pochodzenia roślinnego), jak i wprowadzone do przyrody w wyniku działalności człowieka (chemizacja życia, uboczne produkty rozwoju przemysłu i motoryzacji, wybuchy nuklearne). Warto zaznaczyć, że znaczna ilość uszkodzeń powstaje w DNA spontanicznie, bez widocznego wpływu środowiska zewnętrznego. Ich przyczyną są normalnie zachodzące w komórce procesy metaboliczne oraz skokowe zmiany temperatury i pH.

Ogromna ilość uszkodzeń powstających w DNA w warunkach fizjologicznych spowodowała, że stosunkowo wcześnie w ewolucji organizmy żywe wykształciły mechanizmy obronne, neutralizujące szkodliwy wpływ środowiska i zapewniające stałą funkcjonalność ich materiału genetycznego. Mechanizmy te znane są pod ogólną nazwą naprawy DNA. O randze tego procesu w życiu organizmów doskonale świadczy eksperyment, w którym ekspozycji słonecznej poddawano komórki bakteryjne dwóch różnych typów. Dla mutantu całkowicie niezdolnego do naprawy DNA jedna minuta naświetlania jest wystarczająca do spowodowania śmierci ponad 90% komórek. W przypadku komórek szczepu dzikiego, wykazującego normalną aktywność tego procesu, analogiczny efekt obserwuje się dopiero po kilkugodzinnej ekspozycji. Naprawa DNA jest więc zjawiskiem powszechnym, którego obecność wykryto we wszystkich bez wyjątku badanych organizmach żywych.

Badania ostatniego czterdziestolecia doprowadziły do wykrycia kilku odrębnych dróg enzymatycznych, odpowiedzialnych za usuwanie uszkodzeń z DNA. Najprostszą z nich jest, opisana po raz pierwszy w 1949 roku, fotoreaktywacja. W procesie tym bierze udział tzw. enzym fotoreaktywujący, który łączy się z DNA w miejscu występowania dimeru, a następnie pochłaniając kwant promieniowania o długości fali 340–480 nm (tzw. bliski UV oraz światło

fioletowe i niebieskie) doprowadza do jego rozszczepienia. Efektem tej prostej enzymatycznej reakcji jest odtworzenie pierwotnej struktury DNA oraz oddzielenie enzymu fotoreaktywującego.

Fotoreaktywacja to forma przystosowania organizmów żywych do przebywania w warunkach silnej ekspozycji słonecznej, umożliwia bowiem eliminację znacznych ilości dimerów pirymidynowych przy wykorzystaniu energii promieniowania pochodzącego z tego samego źródła co promieniowanie UV, odpowiedzialne za powstawanie uszkodzeń w DNA. W naturalnym środowisku życia organizmów fotoreaktywacja ulega zahamowaniu po zachodzie Słońca, a zatem równocześnie z ustaniem szkodliwego wpływu promieniowania UV.

Obecność enzymu fotoreaktywującego stwierdzono w bardzo wielu (choć nie wszystkich) organizmach żywych, począwszy od najprostszych bakterii, na ssakach, z człowiekiem włącznie, kończąc. Zdolność do fotoreaktywacji wykazuje również *Escherichia coli*, bakteria zamieszkująca przewód pokarmowy człowieka, stale odcięta od dostępu promieniowania słonecznego. Prawdopodobnie obecność enzymu fotoreaktywującego w *E. coli* ma charakter reliktowy i jest odzwierciedleniem dawnych etapów ewolucji, w których bakteria ta była narażona na intensywne promieniowanie słoneczne.

Organizmy żywe zdolne są do naprawy dimerów pirymidynowych także w warunkach całkowitej ciemności. Procesem umożliwiającym usuwanie uszkodzeń z DNA bez udziału energii promienistej jest naprawa przez wycinanie. Ta droga naprawy jest bardziej skomplikowana od fotoreaktywacji i w najprostszych organizmach, jakimi są bakterie, wymaga aktywności kilku odrębnych białek enzymatycznych. Reakcja inicjowana jest przez tzw. UV-endonukleazę, która wprowadza jednoniciowe nacięcie w DNA w pobliżu uszkodzenia (DNA składa się z dwóch nici, z których jedna jest ścisłym odwzorowaniem drugiej). W dalszych etapach dochodzi do wycięcia uszkodzenia wraz z obszarami przyległymi i odtworzenia usuniętego fragmentu na matrycy drugiej, nieuszkodzonej nici DNA. Naprawa DNA przez wycinanie jest procesem niezwykle ważnym dla organizmów żywych, prowadzi bowiem do eliminacji znacznie szerszego zakresu uszkodzeń niż fotoreaktywacja. Proces ten chroni przed negatywnymi wpływami nie tylko promieniowania UV, lecz także niektórych innych czynników fizycznych oraz szeregu związków chemicznych.

Na zakończenie wspomnieć warto o naprawie DNA u człowieka. W komórkach naszego organizmu wykryto większość z poznanych w organizmach niższych dróg naprawy DNA, chociaż ich szczegółowy przebieg pozostaje do chwili obecnej niezny. Zablockowanie każdej z tych dróg na poziomie organizmu ujawnia się w rozwoju szeregu charakterystycznych objawów chorobowych. Najlepiej zbadaną od strony molekularnej chorobą jest *xeroderma pigmentosum*. Jej przyczyną jest częściowa niezdolność komórek do naprawy uszkodzeń powstających w DNA pod wpływem promieniowania UV (a więc głównie dimerów pirymidynowych). Niska efektywność usuwania fotoproduktów z DNA prowadzi w konsekwencji nie tylko do szybszego obumierania komórek skóry, lecz także do nagromadzenia trwałych zmian w ich materiale genetycznym (tzw. mutacji) i uruchomienia procesu nowotworowego. Liczne nawroty nowotworów skóry są najczęstszą przyczyną śmierci osób chorych na *xeroderma pigmentosum* (w przypadku wyższych organizmów wielokomórkowych, zdolnych do regeneracji obumierających komórek ciała, zgubne okazują się nie letalne, a mutagenne właściwości promieniowania UV). Jest rzeczą ciekawą, że długotrwałe przebywanie na słońcu sprzyja szybszemu starzeniu się skóry w miejscach eksponowanych i rozwojowi na ich obszarze nowotworów złośliwych także u osobników zdrowych, w szczególności u wykazujących obniżenie aktywności enzymów reperacyjnych ze względu na podeszły wiek. Wyobrazić sobie zatem można, jak wielkie konsekwencje dla życia na Ziemi miałyby zmniejszenie ilości ozonu atmosferycznego i związane z tym zwiększone przenikanie do powierzchni naszej planety fal o długości poniżej 290 nm, niezwykle skutecznego czynnika uszkadzającego DNA. Groźba ta staje się ostatnio coraz bardziej realna w związku z wprowadzaniem do otoczenia niektórych substancji chemicznych.

Organizm ludzki, oprócz naprawy DNA, dysponuje także innym mechanizmem chroniącym go przed szkodliwym wpływem krótkich fal UV. Jest nim opalanie, polegające na zwiększaniu w powierzchniowych warstwach skóry ilości brązowego barwnika — melaniny. Barwnik ten silnie pochłania i rozprasza promieniowanie UV i ogranicza tym samym jego ilość wnikającą do głębszych pokładów ciała. Brązowienie skóry stymulowane jest przez te same fale, które powodują powstawanie uszkodzeń w DNA. Proces ten jest najbardziej efektywny nad morzem oraz wysoko w górach, gdzie dociera stosunkowo najwięcej promieniowania krótkofalowego.

Opalanie jest jednak stosunkowo mało skutecznym mechanizmem ochronnym. Murzyny (których skóra zawiera wiele melaniny) z *xeroderma pigmentosum* wykazują objawy chorobliwe zbliżone do tych, jakie stwierdza się u białych pacjentów zamieszkujących w tych samych warunkach nasłonecznienia. Decydujące znaczenie w neutralizowaniu szkodliwego wpływu krótkofalowego promieniowania słonecznego na organizm ludzki przypisać zatem należy niezwykle wydajnym mechanizmom naprawy DNA.