



Środowiskowe uwarunkowania czerniaka i zastosowanie sztucznej inteligencji w jego diagnostyce – przegląd narracyjny

Environmental factors of melanoma and use of artificial intelligence in its diagnosis – narrative review

Sebastian Górecki^{1,2,A,C-F}✉, Aleksandra Tatka^{3,A-F}, Wiktoria Duszczyk^{2,B-F}, Zuzanna Huda^{2,B}, Andrzej Faryna^{3,B}

¹ Centrum Cyfrowej Transformacji i Rozwiązań Prototypowych, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Łódzki Instytut Technologiczny, Łódź, Polska Edycja

² Research Department, Uczelnia Medyczna im. Marii Skłodowskiej-Curie, Warszawa, Polska Edycja

³ Badania i rozwój, Centrum Diagnostyczne im. Marii Skłodowskiej-Curie, Warszawa, Polska Edycja

A – Koncepcja i projekt badania, B – Gromadzenie i/lub zestawianie danych, C – Analiza i interpretacja danych, D – Napisanie artykułu, E – Krytyczne zrecenzowanie artykułu, F – Zatwierdzenie ostatecznej wersji artykułu

Górecki S, Tatka A, Duszczyk W, Huda Z, Faryna A. Środowiskowe uwarunkowania czerniaka i zastosowanie sztucznej inteligencji w jego diagnostyce – przegląd narracyjny. Med Srodow. doi:10.26444/ms/205956

■ Streszczenie

Wprowadzenie i cel pracy. Czerniak jest jednym z najbardziej agresywnych nowotworów skóry, coraz częściej występującym na całym świecie. Rozwój choroby wynika z interakcji predyspozycji genetycznych oraz czynników środowiskowych, takich jak promieniowanie UV, zanieczyszczenie powietrza czy ekspozycja na chemikalia. Wczesne wykrycie czerniaka jest kluczowe dla jego rokowania, ponieważ w zaawansowanych stadiach choroba ta wiąże się z wysoką śmiertelnością. Celem pracy jest analiza wpływu środowiskowych czynników ryzyka na rozwój czerniaka oraz ocena potencjału sztucznej inteligencji (AI) w diagnostyce tej choroby.

Opis stanu wiedzy. Tradycyjne metody wykrywania czerniaka, takie jak dermatoskopia i histopatologia, pozostają złotym standardem, lecz mają ograniczenia, takie jak ograniczona dostępność specjalistów, którzy dokonują oceny znamienia i jej subiektywność. W ostatnich latach narzędzia oparte na sztucznej inteligencji, w szczególności sieci neuronowe spłotowe (CNN), wykazały dużą skuteczność w analizie obrazu zmian skórnych. AI umożliwia automatyczną klasyfikację zmian skórnych i potencjalnie przyczynia się do wcześniejszego wykrywania nowotworu, co może znacząco poprawić wyniki leczenia pacjentów.

Podsumowanie. Integracja sztucznej inteligencji z klasycznymi metodami diagnostycznymi może zwiększyć efektywność wczesnego wykrywania czerniaka, zmniejszając liczbę błędnych diagnoz oraz odciążając lekarzy. Zastosowanie AI w praktyce klinicznej wymaga jednak dalszych badań oraz spełnienia rygorystycznych norm regulacyjnych. Ponadto istotnym elementem profilaktyki pozostaje edukacja społeczeństwa na temat czynników ryzyka i metod wczesnej detekcji, która może istotnie przyczynić się do redukcji zachorowalności na czerniaka.

Słowa kluczowe

diagnostyka, czynniki środowiskowe, czerniak, telemedycyna, sztuczna inteligencja, analiza obrazu

■ Abstract

Introduction and Objective. Melanoma is a highly aggressive skin cancer with a rising incidence worldwide. Its development is influenced by a combination of genetic predisposition and environmental factors, such as UV radiation, pollution, and exposure to harmful chemicals. The prognosis of melanoma is strongly linked to early diagnosis, as survival rates drop significantly in advanced stages. This study aims to examine how environmental factors contribute to the risk of melanoma and explore the potential of artificial intelligence (AI) in supporting its early detection.

Brief description of the state of knowledge. Conventional diagnostic approaches, including dermoscopy and histopathology, remain the gold standard of melanoma detection. However, their effectiveness depends on clinician expertise and access to specialized equipment, which can be limiting. In recent years, AI-driven methods, particularly convolutional neural networks (CNNs), have gained prominence for their ability to analyze medical images with high accuracy. AI-based tools can assist in the classification of skin lesions, facilitating earlier and more precise diagnosis, which is crucial for improving treatment outcomes.

Summary. The integration of AI with classic diagnostic methods has the potential to enhance accuracy, streamline clinical processes, and reduce misdiagnosis rates. Nevertheless, further validation studies and regulatory approvals are essential before AI systems can be widely implemented in clinical practice. Beyond technological advancements, raising public awareness of melanoma risk factors and promoting preventive strategies remain vital in reducing the incidence of this disease.

Key words

diagnostics, melanoma, image analysis, environmental factors, telemedicine, artificial intelligence

✉ Autor do korespondencji: Sebastian Górecki, Centrum Cyfrowej Transformacji i Rozwiązań Prototypowych, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Łódzki Instytut Technologiczny, Polska
E-mail: sebastian.gorecki@lit.lukasiewicz.gov.pl

WPROWADZENIE

Czerniak skóry (łac. *melanoma malignum*) stanowi poważny problem zdrowia publicznego, a częstota jego występowania systematycznie rośnie w Polsce i Europie. W ciągu ostatnich dekad zaobserwowano dynamiczny wzrost liczby nowych przypadków – w Polsce w latach 2010–2020 liczba zachorowań wzrosła aż o 74%. W 2020 roku odnotowano ponad 3300 nowych przypadków, a standaryzowany współczynnik zachorowalności wynosi obecnie ok. 6–7 na 100 tys. osób. W skali europejskiej sytuacja również jest niepokojąca – Europa odpowiada za niemal połowę światowych zachorowań na czerniaka, a sam nowotwór plasuje się na 6. miejscu pod względem częstości występowania wśród nowotworów złośliwych. Prognozuje się, że w populacjach zachodnich jedna na 50 osób jest w grupie ryzyka zachorowania na czerniaka. Czerniak występuje znacznie częściej u osób rasy białej, zwłaszcza tych o jasnej karnacji (fototyp I i II), a ryzyko jego rozwoju wzrasta wraz z wiekiem. Większość przypadków czerniaka występuje u ludzi starszych, ale nie dotyczy tylko osób w podeszłym wieku. Wśród nastolatków i młodych dorosłych w wieku od 15 do 39 lat jest to trzeci najczęściej występujący nowotwór [1]. Rokowanie w przypadku czerniaka silnie zależy od stadium zaawansowania w momencie rozpoznania. Pięcioletnie przeżycie dla stadium I wynosi ponad 95%, podczas gdy dla stadium IV spada do zaledwie 20–25%. Dzięki postępom w terapii systemowej, szczególnie immunoterapii i leczeniu celowanym, prognozy dla chorych w zaawansowanym stadium nieco się poprawiły, ale nadal pozostają niekorzystne – szczególnie wśród osób starszych. Rozwój czerniaka jest wieloczynnikowy, obejmuje współdziałanie predyspozycji genetycznych i wpływu środowiska. Poznanie i zrozumienie indywidualnych czynników ryzyka choroby umożliwia identyfikację osób szczególnie na nią narażonych. W zaawansowanych stadiach czerniaka jego prognoza terapeutyczna jest zła. Dlatego przez lata podkreślano, że kluczowym czynnikiem w terapii jest wczesna diagnostyka. Podstawowe metody wykrywania czerniaka, takie jak wizualna ocena skóry, dermatoskopia czy badanie histopatologiczne, mają swoje ograniczenia. W ostatnich latach rosnące zainteresowanie zastosowaniem sztucznej inteligencji (AI) w dermatologii otworzyło nowe możliwości w zakresie diagnostyki czerniaka i tradycyjną diagnostykę z powodzeniem wspierają metody wykorzystujące AI [2].

CEL PRACY

Celem niniejszego przeglądu narracyjnego jest przedstawienie aktualnego stanu wiedzy na temat wpływu wybranych czynników środowiskowych na rozwój czerniaka skóry oraz ocena skuteczności nowoczesnych metod diagnostycznych, ze szczególnym uwzględnieniem narzędzi opartych na sztucznej inteligencji. W pracy omówiono rolę takich czynników jak promieniowanie UV, zanieczyszczenie powietrza, ekspozycja na substancje chemiczne oraz styl życia. Ponadto przeanalizowano możliwości zastosowania algorytmów uczenia maszynowego w detekcji zmian skórnych. Wczesne rozpoznanie czerniaka oraz ograniczenie ekspozycji na czynniki ryzyka stanowią istotny element profilaktyki i mogą przyczynić się do poprawy rokowania u pacjentów.

MATERIAŁY I METODY

Przegląd literatury przeprowadzono z wykorzystaniem baz danych PubMed, Google Scholar oraz ResearchGate. Poszukiwania skoncentrowano na publikacjach dotyczących wpływu czynników środowiskowych na rozwój czerniaka skóry oraz możliwości zastosowania sztucznej inteligencji w jego diagnostyce. Do analizy włączano artykuły recenzowane, zawierające pełny opis metodologii, obejmujące badania grup liczących co najmniej 100 uczestników, opublikowane nie wcześniej niż w 2000 roku oraz dostępne w języku polskim lub angielskim. Uwzględniono jedynie publikacje bezpośrednio związane z tematyką czerniaka, czynników środowiskowych i nowoczesnych metod diagnostycznych. Odrzucono takie, które nie spełniały wyznaczonych kryteriów, a także te, które nie mieściły się w tematyce analizowanych zagadnień. Preferowano metaanalizy i przeglądy systematyczne – ze względu na ich większą wartość dowodową i możliwość uogólnienia wyników. Badania oryginalne analizowano jedynie wówczas, gdy spełniały wszystkie kryteria jakościowe i ilościowe. Wyszukiwanie prowadzono z użyciem następujących słów kluczowych: „melanoma”, „environmental risk factors”, „UV radiation”, „artificial intelligence in dermatology”, „melanoma diagnosis” oraz „machine learning in oncology”.

OPIS STANU WIEDZY

Czynniki ryzyka

Badania epidemiologiczne pozwoliły zidentyfikować wiele czynników ryzyka rozwoju czerniaka skóry. Można je podzielić na czynniki wewnętrzne – genetyczne (analiza tego tematu wykracza poza nasz artykuł) i czynniki zewnętrzne – społeczno-środowiskowe. Najważniejszym czynnikiem egzogennym jest narażenie na promieniowanie UV, w szczególności okresowe wysokie nasłonecznienie. Aktualne dane wskazują, że głównymi czynnikami rozwoju i progresji czerniaka, oprócz odziedziczonych predyspozycji genetycznych, są wywołane promieniowaniem zmiany w strukturze DNA melanocytów [3, 4]. Badanie przeprowadzone w Kanadzie oceniło liczne potencjalne czynniki ryzyka środowiskowego analizowane przez Environment Canada (baza danych CANUE). Przedstawione dane wskazują, że wyższa ogólna roczna temperatura powietrza, większa dostępność terenów zielonych oraz wyższy wskaźnik UVR (ang. *ultraviolet radiation*) to trzy główne czynniki środowiskowe związane z podwyższonym ryzykiem zachorowania na czerniaka skóry [5]. Wzrost średnich temperatur sprzyja częstszemu przebywaniu na zewnątrz i dłuższej ekspozycji na promieniowanie słoneczne, co skutkuje zwiększoną kumulacją dawek UV i ryzykiem mutacji DNA melanocytów – kluczowego mechanizmu patogenezy czerniaka [3, 5]. W badaniu australijskim wykazano, że wyższe temperatury prowadzą do tego, że rzadziej stosuje się odzież ochronną, i zwiększają ryzyko poparzeń słonecznych, będących istotnym czynnikiem inicjującym zmiany nowotworowe w skórze [6]. Z kolei stosowanie preparatów z filtrem przeciwsłonecznym (ang. *sun protection factor*, SPF) teoretycznie zmniejsza ekspozycję melanocytów na promieniowanie UV i związane z tym uszkodzenia oksydacyjne oraz mutagenne [8]. Jednakże dane epidemiologiczne sugerują paradoksalny wzrost zachorowań na czerniaka mimo wzrostu użycia filtrów przeciwsłonecznych [9]. Tłumaczyć to można m.in. błędnym poczuciem

bezpieczeństwa, prowadzącym do dłuższego przebywania na słońcu, aplikowaniem kremu w niewystarczającej ilości, niestosowaniem reaplikacji oraz opóźnioną detekcją zmian nowotworowych wskutek ich maskowania [10].

Dodatkowo zaobserwowano, że prawdopodobieństwo oparzenia słonecznego wzrastało dwukrotnie, gdy temperatura wynosiła 19–27°C w porównaniu do temp. 18°C. W Kanadzie przeprowadzono badanie ankietowe z udziałem ponad 7800 osób. Na jego podstawie udowodniono, że w prowincjach atlantyckich o wysokiej częstotliwości występowania czerniaka skóry występuje istotnie wyższy poziom narażenia na promieniowanie słoneczne oraz wyższa częstość oparzeń słonecznych w porównaniu do prowincji o niskiej zapadalności na tę chorobę. Dodatkowo mieszkańcy regionów o wyższej zapadalności na czerniaka częściej podejmowali działania profilaktyczne – rzadziej korzystali z łóżek opalających, częściej prowadzili samobadanie skóry oraz stosowali preparaty z filtrem przeciwsłonecznym [7]. Choć preparaty z SPF są powszechnie uznawane za skuteczny środek chroniący przed szkodliwym promieniowaniem UV – dzięki zdolności do pochłaniania lub odbijania promieniowania i redukcji stresu oksydacyjnego w melanocytach – ich skuteczność w zapobieganiu czerniakowi budzi pewne kontrowersje [8]. Pomimo deklarowanych właściwości ochronnych takich preparatów niektóre badania epidemiologiczne wykazały paradoksalny wzrost zachorowań na czerniaka w populacjach stosujących kremy z filtrem przeciwsłonecznym [9]. Wy tłumaczeniem może być tzw. paradoks kremu przeciwsłonecznego, polegający na tym, że osoby stosujące filtry czują się fałszywie bezpieczne i wydłużają czas przebywania na słońcu, przy czym nierzadko nie reaplikują preparatu lub nakładają go w zbyt małej ilości [10]. W rezultacie ekspozycja na promieniowanie UV może pozostać na poziomie sprzyjającym uszkodzeniom DNA i powstawaniu nowotworów skóry, w tym czerniaka. Ten paradoks stanowi problem wielopoziomowy, którego potencjalnymi przyczynami są: zwiększona wykrywalność przypadków choroby, stosowanie niewystarczających ilości kremu z SPF, w tym brak ponownej aplikacji. Innym nieoczywistym czynnikiem ryzyka jest nadmierna ekspozycja na światło słoneczne poprzez błędne wrażenie skutecznej ochrony [10]. Ryzyko zachorowania na czerniaka nie zależy wyłącznie od ekspozycji na słońce. Metaanaliza przeprowadzona przez koreańskich badaczy wykazała, że korzystanie z solarium zwiększa ryzyko raka skóry, a szczególnie rozwoju czerniaka w początkowym stadium [11]. Istnieje jednak wiele kontrowersji co do słuszności tezy, iż jedynym ryzykiem zachorowania na czerniaka nie jest ekspozycja na światło słoneczne. Krytyczna analiza dostępnej literatury, w tym niedawno opublikowanych metaanaliz, wskazuje na istnienie słabego związku pomiędzy regularną ekspozycją na promieniowanie UV z solarium a ryzykiem rozwoju czerniaka. Wątpliwości wynikają z niskiej jakości dowodów, co jest efektem braku badań interwencyjnych oraz istotnych ograniczeń w badaniach obserwacyjnych. W badaniach należałoby uwzględnić kluczowe czynniki zakłócające ich wyniki, takie jak ekspozycja na słońce, oparzenia słoneczne, typ skóry. W związku z powyższym obecne dane nie stanowią wystarczającej podstawy do stwierdzenia związku przyczynowo-skutkowego pomiędzy korzystaniem z solarium a ryzykiem wystąpienia czerniaka. Niejednoznaczne wyniki dotyczą szczególnie umiarkowanego i odpowiedzialnego korzystania z łóżek opalających [12]. Istotnym czynnikiem ryzyka, będącym wynikiem ekspozycji na działanie

promieniowania UV, jest także liczba znamion melanocytowych, których obecność wykazuje dodatnią korelację z ryzykiem czerniaka. Około 25% przypadków tego nowotworu rozwija się na podłożu wcześniej istniejącego znamienia, a osoby posiadające ponad 100 znamion są aż siedmiokrotnie bardziej narażone na zachorowanie. Szczególnie ryzykowne są znamiona atypowe, których nietypowe cechy – asymetria, nieregularne granice i zmienna pigmentacja – dodatkowo zwiększają prawdopodobieństwo transformacji nowotworowej [13]. W świetle licznych przedstawionych dowodów nie budzi wątpliwości, że istnieje stała potrzeba edukowania społeczeństwa na temat konsekwencji nadmiernej ekspozycji na promieniowanie ultrafioletowe. Działania edukacyjne powinny obejmować zagrożenia związane z opalaniem zarówno na świeżym powietrzu, jak i w zamkniętych pomieszczeniach – solariach, uwzględniając także zasady prawidłowego stosowania preparatów przeciwsłonecznych. Potwierdzają to wyniki przeprowadzonego niedawno badania, które oceniało poziom wiedzy pacjentów z czerniakiem na temat profilaktyki raka skóry. Wykazano w nim niską świadomość konieczności podejmowania działań zapobiegawczych, co mogło mieć wpływ na rozwój choroby w badanej grupie [12]. Kolejnym czynnikiem ryzyka są zmiany klimatyczne. Istnieją liczne badania potwierdzające wpływ „globalnego ocieplenia” na zdrowie. Kluczowe znaczenie ma analiza roli zmian klimatycznych w patogenezie nowotworów złośliwych skóry, w tym czerniaka. Wzrost zachorowalności na raka skóry wiąże się ze zwiększonym promieniowaniem UV spowodowanym zubożeniem warstwy ozonowej (ang. *stratospheric ozone depletion*, SOD), ze skutkami globalnego ocieplenia oraz z zanieczyszczeniem powietrza, będącym efektem spalania paliw kopalnych [15]. Czynniki te oddziałują zarówno bezpośrednio, jak i pośrednio, zwiększając ryzyko rozwoju zmian nowotworowych. Zubożenie warstwy ozonowej prowadzi do zwiększonej ekspozycji na promieniowanie UV, co wiąże się ze wzrostem zachorowalności na nowotwory skóry. Każdy 1% ubytku ozonu powoduje wzrost ryzyka czerniaka o 1–2%, raka kolczystokomórkowego (SCC) o 3–4,6% oraz raka podstawnkomórkowego (BCC) do 2,7% [14]. Prognozy wskazują na 10-proc. wzrost częstości występowania nowotworów skóry do połowy XXI wieku mimo wdrożenia protokołu montrealskiego. Wzrost ten będzie zróżnicowany geograficznie – przewiduje się nawet 200 dodatkowych przypadków na milion osób rocznie w Australii, 90–120/milion w Chinach, 100–150/milion w Nowej Zelandii, natomiast oczekuje się braku wzrostu w Kongu [15]. Zanieczyszczenie powietrza (AP), a zwłaszcza pył zawieszony PM2.5, jest istotnym czynnikiem ryzyka zwiększającym częstość występowania nowotworów skóry, w tym czerniaka [16]. PM2.5 oraz ultradrobne cząsteczki przenikają do krążenia ogólnoustrojowego i przez skórę, nasilając melanogenezę i sprzyjając powstawaniu zmian nowotworowych. Dodatkowo obecność rakotwórczych związków, takich jak czarny węgiel, metale toksyczne i PAHs (ang. *polycyclic aromatic hydrocarbons*), zwiększa ryzyko czerniaka [17]. Troposferyczny ozon i lotne związki organiczne (ang. *volatile organic compounds*, VOCs), w tym benzen, również przyczyniają się do rozwoju raka skóry poprzez wywołanie stresu oksydacyjnego i uszkodzeń DNA [18]. Ekspozycja na AP odpowiada za miliony zgonów rocznie, a jej bezpośrednie i pośrednie skutki zwiększają ryzyko czerniaka na całym świecie [19]. Aktywność fizyczna oraz wydolność krążeniowo-oddechowa mogą uchodzić za czynniki istotnie zmniejsz-

szające ryzyko wystąpienia czerniaka ze względu na lepsze zdolności naprawcze DNA, zmniejszony stres oksydacyjny oraz utrzymywanie prawidłowej masy ciała. Jednak w rzeczywistości bagatelizowanie uszkodzeń skóry spowodowanych promieniowaniem UV może podnosić ryzyko występowania czerniaka. Osoby regularnie wykazujące aktywność fizyczną często przebywają na świeżym powietrzu, co zwiększa ich ekspozycję na słońce. Jeśli nie stosują odpowiedniej ochrony przeciwsłonecznej, może to prowadzić do oparzeń i uszkodzeń skóry wywołanych promieniowaniem UV, a w konsekwencji – zwiększać ryzyko rozwoju czerniaka [20]. Sportowcy nie tylko poddani są znaczącej ekspozycji na słońce, ale także podejmują wysiłek fizyczny, czego efektem może być immunosupresja – powtarzające się urazy tkanek (stymulujące produkcję cytokin Th2, co osłabia odporność komórkową), co z kolei może zwiększać ich ryzyko zachorowania na nowotwory skóry – w tym czerniaka [20]. Ważnym czynnikiem ryzyka występowania czerniaka niezależnym od UV jest spożywanie etanolu. Alkohol ma działanie kancerogenne, powoduje zmiany genetyczne związane z nowotworzeniem. Przewlekłe spożywanie alkoholu powoduje trwałe zmiany w komórkach skóry, zaburza metabolizm etanolu oraz wywołuje stan zapalny i immunosupresję. Te procesy sprzyjają powstawaniu, rozwojowi i przerzutom czerniaka [21]. Wykazano, że regularne picie alkoholu może zwiększać ryzyko zachorowania na czerniaka nawet o 20% [22]. Obserwacyjne badanie WHI (ang. Women’s Health Initiative) ukazało zależności między spożywaniem alkoholu, a także preferencją co do jego rodzaju, a ryzykiem rozwoju czerniaka u białych kobiet. Według badań WHI wyższe spożycie alkoholu oraz preferowanie białego wina lub mocnych trunków zwiększało ryzyko czerniaka i innych nowotworów skóry [23]. W ostatnich latach obserwuje się wzrost zachorowań na nowotwory u kobiet w ciąży, spośród których najczęściej występującym nowotworem złośliwym jest czerniak skóry [24]. Dane z Australii z lat 1994–2008 wskazują, że na 100 tys. ciąż przypadało 45,7 przypadków czerniaka skóry, podczas gdy rak piersi występował rzadziej – odnotowano 28,8 przypadków tej choroby [25]. Jedną z możliwych przyczyn tej tendencji jest przesuwanie macierzyństwa na późniejszy wiek, np. rodzenie dzieci po 30. i 40. roku życia, co zwiększa ogólne ryzyko rozwoju nowotworów skóry. Dodatkowo zmiany hormonalne i fizjologiczna immunosupresja towarzysząca ciąży mogą sprzyjać bardziej agresywnemu przebiegowi czerniaka [24]. U kobiet ciężarnych częściej niż w innych grupach pacjentów obserwuje się większą grubość guza, co wiąże się z gorszym rokowaniem. Podejrzewa się również, że zmiany hormonalne mogą powodować ciemnienie i powiększanie się znamion, a to może opóźniać ich diagnostykę i przyczyniać się do późniejszego rozpoznania choroby [26].

Podsumowanie stanu wiedzy na temat czynników ryzyka zachorowania na czerniaka przedstawia poniższa tab. 1.

Tabela 1. Tabela przedstawiająca wpływ różnych czynników na ryzyko czerniaka

Kategoria	Czynnik	Efekt
Promieniowanie UV	Wysoka ekspozycja na słońce	Zmiany w DNA melanocytów, zwiększone ryzyko nowotworzenia [4]
	Wzrost temperatury otoczenia	Większa ekspozycja na słońce, wyższe ryzyko oparzeń słonecznych [7]
Warstwa ozonowa	Zubożenie warstwy ozonowej	Wzrost promieniowania UV, zwiększone ryzyko nowotworzenia [14]
Zanieczyszczenia	Pył PM2.5, czarny węgiel, metale toksyczne i PAHs, lotne	Nasilenie stresu oksydacyjnego i melanogenezy [27]
Fizjologia	Ciąża	Zmiany hormonalne i immunosupresja sprzyjające agresywniejszemu przebiegowi czerniaka [28]
Styl życia	Aktywność fizyczna	Zwiększona ekspozycja na słońce, ryzyko oparzeń i uszkodzeń skóry [20]
	Spożywanie alkoholu	Uszkodzenia genetyczne, stan zapalny, immunosupresja [21]
	Łóżka opalające	Zwiększone ryzyko zachorowania na raka skóry, zwłaszcza czerniaka o wczesnym początku [12]
	Lampy UV do paznokci	Potencjalne uszkodzenia DNA z niskim ryzykiem rakotwórczym [29]

Źródło: [4, 7, 12, 14, 20, 21, 27–29].

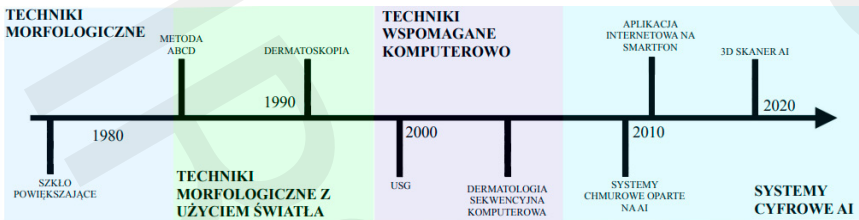
Dzieli ona czynniki ryzyka na kategorie oraz uwzględnia efekty działania przedstawionych determinantów.

Diagnostyka

W przypadku czerniaka wczesna diagnostyka odgrywa kluczową rolę w poprawie rokowania u pacjentów. Roczny wskaźnik przeżycia dla czerniaka zdiagnozowanego w I stadium według AJCC (ang. American Joint Cancer Committee) wynosi 100%, w porównaniu z zaledwie 53% w przypadku tej choroby zdiagnozowanej w stadium IV [30]. Diagnostyka kliniczna czerniaka opiera się na metodach tradycyjnych. Dermatoskopia, metoda ABCDE (asymetria – A, nierówny brzeg – B, niejednorodny kolor – C, średnica – D, ewolucja zmiany – E), USG (ultrasonografia) oraz metody histopatologiczne skupiają się na wizualizacji znamion skórnych na różnych poziomach [31].

Zasada ABCDE

Charakterystyka cech znamion, takich jak kolor, faktura lub kształt, pomaga określić typ zmiany skórnej i odróżnić czerniaka łagodnego od złośliwego. Służy do tego reguła ABCDE, która podaje kryteria pozwalające na określenie cech charakterystycznych czerniaka, pomocnych w jego rozpoznaniu. Cechy te są następujące: asymetria (A), nie-



Rysunek 1. Oś czasu rozwoju technologii wykrywania czerniaka. Źródło: [31]

równy brzeg (B), niejednorodny kolor (C), rozmiar (D) i ewolucja zmiany (E). Ocena ABCDE jest kluczowa dla lekarzy i pracowników ochrony zdrowia, którzy nie mają wystarczającego doświadczenia w stosowaniu metod przesiewowych i diagnostycznych służących do badania zmian skórnych. Abbasi i wsp. oraz Thomas i wsp. w przeprowadzonych badaniach wykazali, że czułość i swoistość różnicowania zmian łagodnych od złośliwych na podstawie zasady ABCDE mają następujące wyniki: 57–100% i 37–100%, co wskazuje na ograniczenia tej metody diagnostycznej [32].

Dermatoskopia

Dermatoskopia, metoda oparta na zastosowaniu dermatoskopu, znacząco usprawnia diagnostykę raka skóry, szczególnie czerniaka. Urządzenie to umożliwia 10-krotne powiększenie oraz redukcję refleksów świetlnych, co pozwala na dokładniejszą wizualizację struktur podskórnych. Technika ta, będąca metodą nieinwazyjną, przewyższa badanie wzrokowe pod względem skuteczności diagnostycznej. W diagnostyce stosuje się algorytmy takie jak reguła ABCDE oraz metoda Menzies. Dodatkowe wsparcie zapewniają technologie cyfrowe, m.in. monitorowanie zmian i fotografia całego ciała (TBP). Główne ograniczenia obejmują zależność od doświadczenia lekarza oraz trudności w ocenie głębokich zmian [33].

Ultrasonografia (USG)

USG odgrywa istotną rolę w diagnostyce zaawansowanych stadiów czerniaka skóry, a szczególnie w ocenie przerzutów do węzłów chłonnych i narządów wewnętrznych. Technika ta, oparta na wykorzystaniu fal dźwiękowych o wysokiej częstotliwości, umożliwia wizualizację struktur wewnętrznych w czasie rzeczywistym. Pozwala na ocenę wielkości, kształtu i echogeniczności węzłów chłonnych oraz oszacowanie głębokości Breslowa, co jest kluczowe w planowaniu leczenia i określaniu zaawansowania według wytycznych AJCC. Chociaż ultrasonografia jest bezpieczna i nieinwazyjna, posiada ograniczenia, takie jak trudności w wykrywaniu zmian skórnych w początkowych stadiach choroby. To sprawia, że pełni ona przede wszystkim funkcję uzupełniającą w kompleksowej diagnostyce czerniaka [34–36].

Oparte na sztucznej inteligencji innowacje w zakresie wczesnego wykrywania czerniaka

Sztuczna inteligencja, a zwłaszcza sieci neuronowe spłotowe (ang. *convolutional neural networks*, CNN), znacząco poprawiła diagnostykę zmian skórnych, osiągając wysoką skuteczność w różnicowaniu czerniaka (np. AUC – ang. *area under the curve* = 0,94). Dzięki automatycznej ekstrakcji cech takich jak tekstura, kształt i kolor modele te wspomagają wczesną diagnostykę nowotworów skóry. Transfer learning zwiększa ich wydajność przy ograniczonych zbiorach danych. Ograniczenia obejmują zależność od niepełnych danych oraz trudności w interpretacji wyników, przy czym zjawiska te wskazują, że należy poprawić przejrzystość modeli przy zastosowaniu technik takich jak Grad-CAM (ang. *Gradient-weighted Class Activation Mapping*) oraz SHAP (ang. *SHapley Additive exPlanations*).

Diagnostyka histopatologiczna czerniaka

Badanie histopatologiczne to podstawowa metoda diagnostyki czerniaka, wykorzystująca techniki barwienia, takie jak markery immunologiczne HMB-45, S-100 i MART-1, do identyfikacji złośliwych melanocytów. Na decyzje terapeutyczne

wpływa występowanie kluczowych cech, takich jak atypia jądrowa, nieregularne granice oraz głębokość naciekania oceniona według skali Breslowa. Głębokie zmiany mogą wymagać szerokiego wycięcia i terapii adiuwantowej, np. zastosowania inhibitorów PD-1 (ang. *programmed cell death protein 1*) lub BRAF (gen kodujący białko kinazy serynowo-treoninowej). Histopatologia wspiera kwalifikację do immunoterapii, umożliwiając personalizację leczenia. Proces ten bywa czasochłonny i kosztowny, a ograniczona dostępność laboratoriów może powodować opóźnienia oraz ryzyko błędnych wyników w bardziej skomplikowanych przypadkach [38].

Sztuczna inteligencja w diagnostyce czerniaka

Sztuczna inteligencja w diagnostyce czerniaka zrewolucjonizowała praktyki dermatologiczne, zapewniając ich większą dokładność i wydajność. Kluczową rolę w tej transformacji odgrywają neuronowe sieci spłotowe, wykazujące wyjątkową skuteczność w różnicowaniu zmian łagodnych, złośliwych i potencjalnie złośliwych. CNN są szczególnie skuteczne w identyfikacji subtelnych zmian wizualnych, które często umykają tradycyjnym metodom diagnostycznym opierającym się na wzroku ludzkim [39]. Badania podkreślają przydatność systemów AI, takich jak Deep Ensemble for Recognition of Malignancy (DERM), który integruje głębokie uczenie z klinicznymi procedurami diagnostycznymi. Systemy te wykazują zdolność do utrzymania wysokiej czułości, co jest kluczowe dla wczesnego wykrywania czerniaka [40]. Również badania nad metodami transfer learning z zastosowaniem CNN wykazały znaczący potencjał w poprawie dokładności diagnostycznej dzięki wykorzystaniu zestawu danych HAM10000 (ang. *Human Against Machine with 10000 training images*), który jest szeroko stosowanym punktem odniesienia w badaniach dermatologicznych [41]. Pomimo tych postępów nadal istnieje wiele wyzwań. Modele AI ogólnego zastosowania, dzięki technikom takim jak augmentacja danych, lepiej ograniczają nadmierne dopasowanie (ang. *overfitting*), co zwiększa ich skuteczność na różnych zbiorach danych [39]. Ponadto badania nad wdrożeniem systemów w rzeczywistych warunkach klinicznych ujawniają dodatkowe trudności, takie jak zmienność danych oraz przeszkody regulacyjne [40]. Wyzwania te podkreślają potrzebę zastosowania solidnych technik augmentacji danych oraz kompleksowych ram monitorowania po wprowadzeniu na rynek. Korzyści płynące z opartej na AI oceny znamion są jednak wyraźne: zwiększenie precyzji diagnostycznej, zmniejszenie liczby niepotrzebnych biopsji, ograniczenie wydatków związanych z przeprowadzeniem biopsji oraz hospitalizacją pacjentów w dalszym stadium choroby, usprawnienie procedur klinicznych oraz przystępność aplikacji służącej edukacji o zagrożeniach nowotworowych skóry. Rola sztucznej inteligencji w diagnostyce medycznej jest coraz większa. Odpowiednie poznanie, opracowanie i sprawdzenie algorytmów jest w stanie wykazywać skuteczność porównywalną z diagnostyką realizowaną przez człowieka [42].

Inteligentne systemy mobilne wykorzystywane w wykrywaniu czerniaka skóry

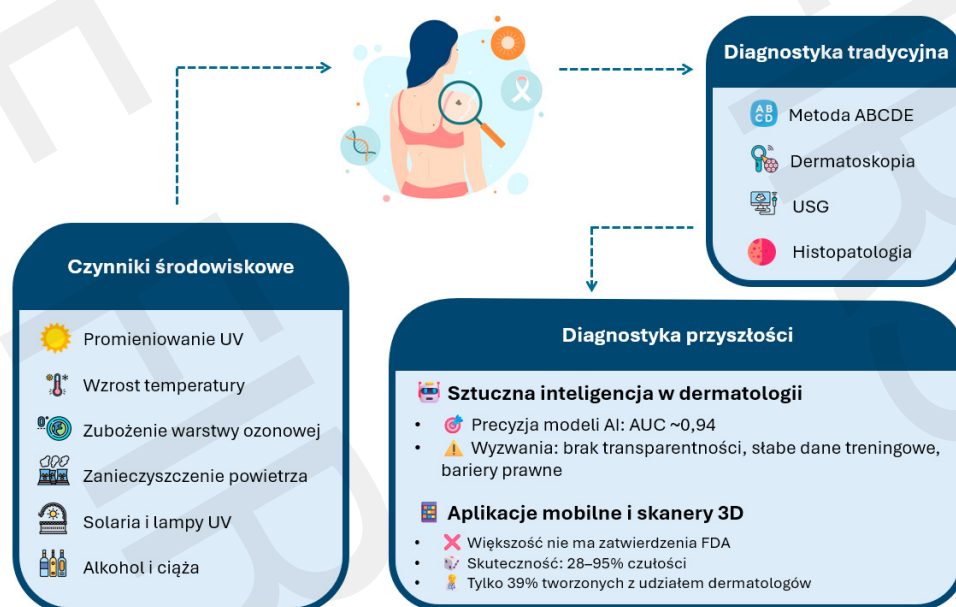
W ostatnich latach obserwujemy dynamiczny rozwój aplikacji mobilnych wspierających diagnostykę chorób skóry, w tym czerniaka. Coraz więcej z nich wykorzystuje sztuczną inteligencję do oceny ryzyka nowotworów skóry, jednak ich skuteczność i precyzja pozostają dyskusyjne. Brak oficjalnych

zatwierdzeń, np. przez Agencję Żywności i Leków (ang. Food and Drug Administration, FDA), rodzi pytania o ich rzeczywistą wartość kliniczną i bezpieczeństwo stosowania [43]. Mimo to technologie informacyjno-komunikacyjne (ang. *information and communication technologies*, ICT) mają ogromny potencjał we wczesnym wykrywaniu nowotworów. Analiza 41 aplikacji dermatologicznych wykorzystujących sztuczną inteligencję wykazała, że 34,1% było przeznaczonych do wykrywania raka skóry, a 24,4% deklarowało zdolność diagnostyczną, jednak żadna nie posiadała formalnego zatwierdzenia regulacyjnego ani nie była poparta solidnymi dowodami naukowymi. Ponadto ponad połowa (58,5%) nie podawała informacji o wykorzystanych zbiorach danych, a tylko 39% uwzględniło udział dermatologów w procesie ich opracowywania, co rodzi wątpliwości dotyczące ich skuteczności i bezpieczeństwa [44]. W prospektywnym, wielośrodkowym badaniu oceniono skuteczność algorytmu sztucznej inteligencji ADAE w diagnozowaniu czerniaka na heterogenicznym zestawie danych obejmującym obrazy z ośmiu szpitali akademickich, wykazując jego wyższą czułość (92,1% vs 73,4%) i lepszą dokładność zrównoważoną (79,8% vs 78,1%) w porównaniu z rozpoznaniem postawionym przez dermatologów, kosztem niższej swoistości (67,3% vs 82,8%) [45]. Badanie przeprowadzone w 36 ośrodkach podstawowej opieki zdrowotnej w Szwecji wykazało, że oparta na sztucznej inteligencji aplikacja mobilna do wykrywania czerniaka osiągnęła wysoką skuteczność diagnostyczną. Wskaźnik czułości wynosił 95,2%, a swoistości 84,5%, przy negatywnej wartości predykcyjnej wynoszącej 99,5%. Wnioski płynące z przeprowadzonego badania sugerują jej potencjalną wartość w ograniczaniu niepotrzebnych wycięć łagodnych zmian skórnych [46]. Kolejna praca oceniająca skuteczność komercyjnych aplikacji mobilnych opartych na AI w wykrywaniu czerniaka wykazała średnią czułość na poziomie 28%, a swoistość na poziomie 81%. Żadna z analizowanych aplikacji nie została zatwierdzona przez FDA [47]. Systematyczny przegląd badań dowiódł, że algorytmy sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego stosowane we wczesnej diagnostyce raka skóry osiągają średnią dokładność diagnostyczną na poziomie 89,5% dla czerniaka, 85,3% dla raka

kolczystokomórkowego i 87,6% dla raka podstawnkomórkowego. Ograniczenia metodologiczne i niewystarczająca liczba badań w populacjach o niskiej częstości występowania nowotworów budzą niepokój potencjalnych użytkowników. Obawy związane są głównie z brakiem zaufania do urządzeń wykorzystujących AI i wątpliwościami co do poprawności postawionego przez nie rozpoznania [48]. Aplikacje mobilne wykorzystujące sztuczną inteligencję mogą być pomocne we wczesnym wykrywaniu czerniaka, ułatwiając monitorowanie zmian skórnych i potencjalnie zmniejszając obciążenie systemu opieki zdrowotnej. Jednak ich skuteczność pozostaje niejednorodna z powodu zmiennej dokładności algorytmów, braku standaryzacji oraz formalnych zatwierdzeń regulacyjnych. Konieczne są dalsze badania i rozwój metod walidacji aplikacji mobilnych wykorzystujących AI, aby zwiększyć ich wiarygodność i bezpieczeństwo kliniczne [49]. Skanery mapujące ciało są ważnymi narzędziami pozwalającymi na automatyczne wykrywanie i ocenę znamion skórnych na całym ciele jednocześnie. Urządzenia do obrazowania całego ciała tworzą trójwymiarową (3D) mapę skóry na podstawie zdjęć wielokamerowych, zapewniających objęcie analizą całego ciała – a zatem wszystkich występujących na nim znamion – za pomocą sztucznej inteligencji. Umożliwiają wczesne wykrywanie czerniaka oraz monitorowanie zmian, minimalizując ryzyko przeoczeń. Automatyzacja procesu zwiększa precyzję diagnostyczną i wspiera pracę dermatologów [50].

PODSUMOWANIE

Czerniak jest istotnym zagrożeniem zdrowotnym, a częstość jego występowania wzrasta, zwłaszcza w populacji o jasnej karnacji narażonej na intensywne promieniowanie UV. Spośród najważniejszych czynników ryzyka wyróżnia się nadmierną ekspozycję na słońce, zanieczyszczenie powietrza, styl życia oraz czynniki fizjologiczne, takie jak ciąża. Współczesna diagnostyka, choć skuteczna, wymaga zaawansowanych metod wspomagania. Nowoczesne metody diagnostyczne, zwłaszcza te oparte na sztucznej inteligencji,



Rysunek 2. Środowiskowe czynniki ryzyka czerniaka oraz porównanie metod diagnostycznych

wnoszą znaczący postęp w detekcji czerniaka, zapewniając wysoką precyzję diagnostyczną i możliwość wcześniejszego wykrywania choroby. Mimo że AI może stanowić cenne wsparcie w diagnostyce, nie zastąpi doświadczonego lekarza. Kluczowe jest odpowiednie wdrożenie tych technologii w praktyce klinicznej, z zachowaniem ścisłych standardów regulacyjnych i nadzoru nad ich stosowaniem. Należy podkreślić, iż wykorzystanie sztucznej inteligencji w medycynie wiąże się z pewnymi zagrożeniami. Głównie z nich to błędna klasyfikacja zmian skórnych (zarówno fałszywie dodatnie, jak i fałszywie ujemne), niedostateczna reprezentatywność danych treningowych, a także problem tzw. czarnej skrzynki, czyli brak transparentności mechanizmów decyzyjnych algorytmów. Może to skutkować utratą zaufania do metod opartych na AI zarówno ze strony lekarzy, jak i pacjentów. Wdrażanie AI w diagnostyce czerniaka wiąże się z określonymi uwarunkowaniami prawnymi. Zgodnie z europejskim Rozporządzeniem MDR (2017/745) systemy wykorzystujące AI do podejmowania decyzji medycznych muszą być klasyfikowane jako wyroby medyczne i przechodzić odpowiednią procedurę certyfikacyjną. Dodatkowo mający wejść w życie Akt w sprawie sztucznej inteligencji (AI Act) na poziomie Unii Europejskiej może nałożyć kolejne wymogi w zakresie transparentności, jakości danych i odpowiedzialności za szkody wynikające z użycia AI w opiece zdrowotnej. Szczegółne znaczenie ma również kwestia ochrony danych osobowych i zapewnienia cyberbezpieczeństwa systemów przetwarzających obrazy skóry pacjentów. Zgodnie z polskim systemem prawnym sztuczna inteligencja nie jest uznawana za podmiot prawa, ponieważ nie posiada statusu osoby fizycznej ani prawnej. W konsekwencji nie przysługuje jej osobowość prawna ani zdolność do czynności prawnych. Podmioty nieposiadające osobowości prawnej nie mają legitymacji sądowej ani procesowej, a zatem nie mogą być pociągnięte do odpowiedzialności na podstawie ustawodawstwa wybranej gałęzi prawa. Przypisywanie odpowiedzialności prawnej sztucznej inteligencji jest obecnie niemożliwe i ma charakter czysto abstrakcyjny. Podobnie nie można pociągnąć do odpowiedzialności prawnej narzędzi diagnostycznych, takich jak stetoskop czy tomograf, które jedynie wspomagają proces podejmowania decyzji medycznych. W kontekście zdrowia publicznego szczególnie istotne jest edukowanie społeczeństwa w zakresie prewencji czerniaka oraz ograniczania czynników ryzyka tej choroby, co może być ułatwione i propagowane poprzez wdrażanie systemów sztucznej inteligencji do obiegu społecznego. AI może stanowić poszerzenie wiedzy na temat diagnostyki czerniaka wśród pacjentów. Wczesne wykrywanie i świadomość zagrożeń mogą znacząco poprawić rokowania w przypadku czerniaka i zmniejszyć liczbę zachorowań.

PIŚMIENNICTWO

1. Miller KD, Fidler-Benaoudia M, Keegan TH, et al. Cancer statistics for adolescents and young adults, 2020. *CA Cancer J Clin.* 2020;70:443–459. <https://doi.org/10.3322/caac.21637>.
2. Ostrowski SM, Fisher DE. Biology of melanoma. *Hematol/Oncol Clin North Am.* 2021;35:29–56. <https://doi.org/10.1016/j.hoc.2020.08.010>
3. Loras A, Gil-Barrachina M, Marqués-Torrejón MÁ, et al. UV-induced somatic mutations driving clonal evolution in healthy skin, nevus, and cutaneous melanoma. *Life* 2022;12:1339. <https://doi.org/10.3390/life12091339>
4. McMeniman EK, Duffy DL, Jagirdar K, et al. The interplay of sun damage and genetic risk in Australian multiple and single primary melanoma cases and controls. *Br J Dermatol.* 2020;183:357–366. <https://doi.org/10.1111/bjd.18777>
5. Berman-Rosa M, Logan J, Ghazawi FM, et al. Analysis of geographic and environmental factors and their association with cutaneous melanoma incidence in Canada. *Dermatol.* 2022;238:1006–1017. <https://doi.org/10.1159/000524949>
6. Watson TPG, Tong M, Bailie J, et al. Relationship between climate change and skin cancer and implications for prevention and management: A scoping review. *Public Health.* 2024;227:243–249. <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2023.12.003>
7. Lagacé F, Noorah BN, Conte S, et al. Assessing skin cancer risk factors, sun safety behaviors and melanoma concern in Atlantic Canada: A comprehensive survey study. *Cancers (Basel).* 2023;15:0000. <https://doi.org/10.3390/cancers1500000>
8. McDonald KA, Lytvyn Y, Mufti A, et al. Review on photoprotection: A clinician's guide to the ingredients, characteristics, adverse effects, and disease-specific benefits of chemical and physical sunscreen compounds. *Arch Dermatol Res.* 2022;315:735–749. <https://doi.org/10.1007/s00403-022-02483-4>
9. Lapidés R, Saravi B, Mueller A, et al. Possible explanations for rising melanoma rates despite increased sunscreen use over the past several decades. *Cancers (Basel).* 2023;15:5868. <https://doi.org/10.3390/cancers15245868>
10. Alli S, LeBeau J, Hasbani A, et al. Understanding the perceived relationship between sun exposure and melanoma in Atlantic Canada: A consensual qualitative study highlighting a „sunscreen paradox.” *Cancers (Basel).* 2023;15:4726. <https://doi.org/10.3390/cancers15194726>
11. An S, Kim K, Moon S, et al. Indoor tanning and the risk of overall and early-onset melanoma and non-melanoma skin cancer: Systematic review and meta-analysis. *Cancers* 2021;13:5940. <https://doi.org/10.3390/cancers13235940>
12. Burgard B, Reichrath J. Solarium use and risk for malignant melanoma: Many open questions, not the time to close the debate. *Sunlight Vitam D Skin Cancer.* 2020;155–170. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46227-7_8
13. Rastrelli M, Tropea S, Rossi CR, Alaibac M. Melanoma: epidemiology, risk factors, pathogenesis, diagnosis and classification. *In Vivo.* 2014;28(6):1005–11.
14. López Figueroa F. Implicaciones dermatológicas del cambio climático y de la disminución de la capa de ozono. *Actas Dermosifiliogr.* 2011;102:311–315. <https://doi.org/10.1016/j.ad.2010.12.006>
15. Van Dijk A, Slaper H, den Outer PN, et al. Skin cancer risks avoided by the Montreal Protocol-worldwide modeling integrating coupled climate-chemistry models with a risk model for UV. *Photochem Photobiol.* 2012;89:234–246. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.2012.01223.x>
16. Lee H, Kim OJ, Jung J, et al. Long-term exposure to particulate air pollution and incidence of Parkinson's disease: A nationwide population-based cohort study in South Korea. *Environ Res.* 2022;212:113165. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113165>
17. Liu J, Chen Y, Cao H, Zhang A. Burden of typical diseases attributed to the sources of PM_{2.5}-bound toxic metals in Beijing: An integrated approach to source apportionment and QALYs. *Environ Int.* 2019;131:105041. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105041>
18. Burke KE. Mechanisms of aging and development – a new understanding of environmental damage to the skin and prevention with topical antioxidants. *Mech Ageing Dev.* 2018;172:123–130. <https://doi.org/10.1016/j.mad.2017.12.003>
19. Schraufnagel DE, Balmes JR, Cowl CT, et al. Air pollution and noncommunicable diseases. *Chest* 2019;155:409–16. <https://doi.org/10.1016/j.chest.2018.10.042>
20. Behrens G, Niedermaier T, Berneburg M, et al. Physical activity, cardiorespiratory fitness and risk of cutaneous malignant melanoma: Systematic review and meta-analysis. *PLOS ONE* 2018;13:e0206087. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206087>
21. Yamauchi T, Shangraw S, Zhai Z, et al. Alcohol as a non-UV social-environmental risk factor for melanoma. *Cancers.* 2022;14:5010. <https://doi.org/10.3390/cancers14205010>
22. Rota M, Pasquali E, Bellocchio R, et al. Alcohol drinking and cutaneous melanoma risk: A systematic review and dose-risk meta-analysis. *Br J Dermatol.* 2014;170:1021–1028. <https://doi.org/10.1111/bjd.12856>
23. Kubo JT, Henderson MT, Desai M, et al. Alcohol consumption and risk of melanoma and non-melanoma skin cancer in the Women's Health Initiative. *Cancer Causes Control.* 2013;25:1–10. <https://doi.org/10.1007/s10552-013-0280-3>
24. Born LJ, Tembunde Y, Driscoll MS, Grant-Kels JM. Melanoma and melanocytic nevi in pregnancy. *Clin Dermatol.* 2025. <https://doi.org/10.1016/j.clindermatol.2025.01.017>

25. Lee Y, Roberts C, Dobbins T, et al. Incidence and outcomes of pregnancy-associated cancer in Australia, 1994–2008: A population-based linkage study. *BJOG*. 2012;119:1572–1582. <https://doi.org/10.1111/j.1471-0528.2012.03475.x>
26. Zelin E, Conforti C, Giuffrida R, et al. Melanoma in pregnancy: Certainties unborn. *Melanoma Management* 2020;7. <https://doi.org/10.2217/mmt-2020-0007>
27. Głuszek J, Kosicka TM. Wpływ smogu (zanieczyszczonego powietrza) na choroby układu sercowo-naczyniowego. *Choroby Serca i Naczyń* 2019;16:201–6. <https://doi.org/10.5603/chsin.2019.0030>
28. Carter TJ, George C, Harwood C, Nathan P. Melanoma in pregnancy: Diagnosis and management in early-stage and advanced disease. *Eur J Cancer*. 2022;166:240–253. <https://doi.org/10.1016/j.ejca.2022.02.016>
29. Metko D, Mehta S, McMullen E, et al. A systematic review of the risk of cutaneous malignancy associated with ultraviolet nail lamps: What is the price of beauty? *Eur J Dermatol*. 2024;34:26–30. <https://doi.org/10.1684/ejd.2024.4616>
30. UK CR. Melanoma skin cancer survival statistics — cancerresearchuk.org. [Accessed 16-02-2025]. <https://www.cancerresearchuk.org/health-professional/cancer-statistics/statistics-by-cancer-type/melanoma-skin-cancer/survival>
31. Chatzilakou E, Hu Y, Jiang N, et al. Biosensors for melanoma skin cancer diagnostics. *Biosens Bioelectron*. 2024;250:116045. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2024.116045>
32. Kasmi R, Mokrani K. Classification of malignant melanoma and benign skin lesions: Implementation of automatic ABCD rule. *IET Image Process*. 2016;10:448–455. <https://doi.org/10.1049/iet-ipr.2015.0385>
33. Williams NM, Rojas KD, Reynolds JM, et al. Assessment of diagnostic accuracy of dermoscopic structures and patterns used in melanoma detection: A systematic review and meta-analysis. *JAMA Dermatol*. 2021;157:1078. <https://doi.org/10.1001/jamadermatol.2021.2845>
34. Pathania YS, Apalla Z, Salerni G, et al. Non-invasive diagnostic techniques in pigmentary skin disorders and skin cancer. *J Cosmet Dermatol*. 2021;21:444–450. <https://doi.org/10.1111/jocd.14547>
35. Wortsman X. Ultrasound in skin cancer: Why, how, and when to use it? *Cancers* 2024;16:3301. <https://doi.org/10.3390/cancers16193301>
36. Asato MA, Moares-Neto FA, Toledo Moraes MP de, et al. Depth of invasion analysis to predict acral melanoma outcomes. *Ann Diagnostic Pathol* 2024;71:152305. <https://doi.org/10.1016/j.anndiagpath.2024.152305>
37. Bissoto A, Perez F, Valle E, et al. Skin lesion synthesis with generative adversarial networks 2019. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1902.03253>
38. Tschandl P. The HAM10000 dataset, a large collection of multi-source dermoscopic images of common pigmented skin lesions 2018. <https://doi.org/10.7910/DVN/DBW86T>
39. Kreouzi M, Theodorakis N, Feretzakis G, et al. Deep learning for melanoma detection: A deep learning approach to differentiating malignant melanoma from benign melanocytic nevi. *Cancers* 2024;17:28. <https://doi.org/10.3390/cancers17010028>
40. Thomas L, Hyde C, Mullarkey D, et al. Real-world post-deployment performance of a novel machine learning-based digital health technology for skin lesion assessment and suggestions for post-market surveillance. *Front Med*. 2023;10. <https://doi.org/10.3389/fmed.2023.1264846>
41. Bhojane S, Shrestha K, Bharadwaj S, et al. Automated skin cancer detection web-based application and review of some image classification algorithm. *SSRN Elect J*. 2020. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3703135>
42. Strzelecki M, Kociolek M, Strąkowska M, et al. Artificial intelligence in the detection of skin cancer: State of the art. *Clin Dermatol*. 2024;42:280–295. <https://doi.org/10.1016/j.clindermatol.2023.12.022>
43. Brancaccio G, Balato A, Malvey J, et al. Artificial intelligence in skin cancer diagnosis: A reality check. *J Invest Dermatol*. 2024;144:492–9. <https://doi.org/10.1016/j.jid.2023.10.004>
44. Wongvibulsin S, Yan MJ, Pahalyants V, et al. Current state of dermatology mobile applications with artificial intelligence features. *JAMA Dermatol*. 2024;160:646–50. <https://doi.org/10.1001/jamadermatol.2024.0468>
45. Heinlein L, Maron RC, Hekler A, et al. Prospective multicenter study using artificial intelligence to improve dermoscopic melanoma diagnosis in patient care. *Commun Med*. 2024;4. <https://doi.org/10.1038/s43856-024-00598-5>
46. Papachristou P, Söderholm M, Pallon J, et al. Evaluation of an artificial intelligence-based decision support for the detection of cutaneous melanoma in primary care: A prospective real-life clinical trial. *Br J Dermatol*. 2024;191:125–133. <https://doi.org/10.1093/bjd/ljae021>
47. Sun MD, Kentley J, Mehta P, et al. Accuracy of commercially available smartphone applications for the detection of melanoma. *British J Dermatol*. 2022;186:744–6. <https://doi.org/10.1111/bjd.20903>
48. Jones OT, Matin RN, Schaar M van der, et al. Artificial intelligence and machine learning algorithms for early detection of skin cancer in community and primary care settings: A systematic review. *The Lancet Digital Health* 2022;4:e466–76. [https://doi.org/10.1016/S2589-7500\(22\)00023-1](https://doi.org/10.1016/S2589-7500(22)00023-1)
49. Mar VJ, Soyer HP. Artificial intelligence for melanoma diagnosis: How can we deliver on the promise? *Ann Oncol*. 2019;30:e1–3. <https://doi.org/10.1093/annonc/mdy191>
50. Ahmmedt-Aristizabal D, Nguyen C, Tychsen-Smith L, et al. Monitoring of pigmented skin lesions using 3D whole body imaging. *Comp Methods Progr Biomed*. 2023;232:107451. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2023.107451>