



REVIEW PAPER

The impact of air pollution on facial skin: pathological mechanisms, clinical implications, and aesthetic aspects

PRACA POGLĄDOWA

Wpływ zanieczyszczenia powietrza na skórę twarzy: mechanizmy patologiczne, implikacje kliniczne i aspekty estetyczne

Michał Surdacki^{1, a*}, Yuen Fung Brian Tan^{2, b}

¹ Department of Pediatric Otolaryngology, Karol Jonscher Clinical Hospital, Poznan University of Medical Sciences, Poland

^a Trinity Medical Centre, Hong Kong

¹ Uniwersytet Medyczny im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu, Klinika Otolaryngologii Dziecięcej, Szpital Kliniczny im. Karola Jonschera

² Trinity Medical Centre, HongKong

^a  <https://orcid.org/0009-0007-5338-9274>

^b  <https://orcid.org/0009-0002-4251-2760>

DOI: <https://doi.org/10.20883/jofa.107>

* Corresponding author / Osoba do kontaktu
surdacki90@gmail.com

ABSTRACT

Air pollution is an increasing global health problem that significantly affects various organs, including the skin. The human face, being directly exposed to environmental pollutants, undergoes a series of pathological changes due to air pollution. The aim of this paper is to discuss the mechanisms through which air pollution affects facial skin, focusing on pathophysiological processes, clinical symptoms, and aesthetic implications. Based on selected reports, the results of various studies on oxidative stress, inflammatory responses, and changes associated

STRESZCZENIE

Zanieczyszczenie powietrza jest rosnącym globalnym problemem zdrowotnym, który ma znaczący wpływ na różne organy, w tym skórę. Ludzka twarz, która jest bezpośrednio narażona na zanieczyszczenia środowiskowe, przechodzi szereg zmian patologicznych wskutek zanieczyszczenia powietrza. Celem pracy jest omówienie mechanizmów, poprzez które zanieczyszczenie powietrza wpływa na skórę twarzy. Analizowano procesy patofizjologiczne, objawy kliniczne i implikacje estetyczne. Na podstawie wybranych doniesień przedstawiono wyniki różnych badań

with the skin aging process are presented. Additionally, suggestions for potential therapeutic approaches for facial skin aimed at mitigating the effects of air pollution, including aesthetic aspects, are discussed.

Keywords: air pollution, facial skin, oxidative stress, skin aging.

dotyczących stresu oksydacyjnego, odpowiedzi zapalnych oraz zmian związanych z procesem starzenia się skóry. Ponadto przedstawiono sugestie dotyczące potencjalnych podejść terapeutycznych do skóry twarzy, mających na celu złagodzenie skutków zanieczyszczenia powietrza, w tym uwzględniono aspekt estetyczny.

Słowa kluczowe: zanieczyszczenie powietrza, skóra twarzy, stres oksydacyjny, starzenie się skóry.

Introduction

Air pollution is associated with many harmful health effects, primarily respiratory and cardiovascular diseases [1, 2]. However, in recent years, its impact on facial skin health has gained increasing attention. The face is the most exposed part of the human body to air pollutants such as airborne particulate matter (PM), nitrogen dioxide (NO₂), sulfur dioxide (SO₂), ozone (O₃), and volatile organic compounds (VOCs). These pollutants interact with skin cells, leading to the development of inflammatory conditions, genotoxic changes, and increased oxidative stress, resulting in visible skin damage, premature aging, and other aesthetic issues. Studies have shown that these environmental factors significantly alter skin homeostasis and contribute to dermatological pathologies such as acne, eczema, pigmentation disorders, and accelerated aging [3–5]. The aim of this paper is to discuss the pathomechanisms through which air pollution affects facial skin, evaluate clinical research findings, and present various therapeutic strategies to mitigate these effects.

Material and methods

A comprehensive literature review was conducted in PubMed, Google Scholar, and Scopus databases for studies published between 2010 and 2023. Keywords such as "air pollution," "skin," "oxidative stress," "PM," and "facial aging" were used in the search. Initially, 80 articles were selected, with 13 relevant studies included in the discussion based on their contribution to understanding the interaction between skin and air pollution.

Selection criteria for reports included:

- › Clinical studies conducted on humans or in vitro studies showing clear pathophysiological links between air pollution and skin changes.

Wprowadzenie

Zanieczyszczenie powietrza jest związane z wieloma szkodliwymi skutkami zdrowotnymi, przede wszystkim chorobami układu oddechowego i krążenia [1, 2]. Jednak w ostatnich latach jego wpływ na zdrowie skóry twarzy zyskuje coraz większą uwagę. Twarz jest częścią ludzkiego ciała najbardziej narażoną na zanieczyszczenia powietrza, takie jak mieszanina zawieszonych w powietrzu cząsteczek (PM), dwutlenek azotu (NO₂), dwutlenek siarki (SO₂), ozon (O₃) oraz lotne związki organiczne (VOCs). Zanieczyszczenia te oddziałują z komórkami skóry, co może prowadzić do rozwinięcia się stanów zapalnych, zmian genotoksycznych oraz zwiększenia stresu oksydacyjnego, co objawia się widocznymi uszkodzeniami skóry, przedwczesnym starzeniem się i innymi problemami estetycznymi. Badania wykazały, że wymienione czynniki środowiskowe znacząco zmieniają homeostazę skóry i przyczyniają się do patologii dermatologicznych, takich jak trądzik, egzema, zaburzenia pigmentacji i przyspieszone starzenie [3–5]. Celem pracy jest: omówienie patomechanizmów, poprzez które zanieczyszczenie powietrza wpływa na skórę twarzy, ocena wyników badań klinicznych i zaprezentowanie różnych propozycji strategii terapeutycznych, aby złagodzić ich skutki.

Materiał i metody

Przeprowadzono obszerną kwerendę literatury w bazach PubMed, Google Scholar i Scopus, które zostały opublikowane w latach 2010–2023. W poszukiwaniu artykułów wykorzystano słowa kluczowe, takie jak: „zanieczyszczenie powietrza”, „skóra”, „stres oksydacyjny”, „PM”, „starzenie się twarzy”. Początkowo wybrano 80 artykułów, z których 13 istotnych badań zostało

- › Studies evaluating molecular mechanisms of skin damage related to pollutants.
- › Studies analyzing aesthetic effects such as accelerated skin aging, pigmentation changes, and inflammatory responses.
- › Review articles summarizing existing knowledge on this topic.

Results

Oxidative Stress and Inflammatory Responses

Oxidative stress, defined as an imbalance between reactive oxygen species (ROS) and antioxidants, is one of the main mechanisms through which air pollution causes skin damage. Pollutants such as particulate matter (PM), ozone, and nitrogen oxides trigger ROS production. These highly reactive molecules can damage cellular components, including lipids, proteins, and DNA, leading to inflammation, cell aging, and apoptosis [6, 7]. Increased ROS production has been linked to the activation of signaling pathways such as nuclear factor kappa B (NF- κ B), leading to the release of pro-inflammatory cytokines like interleukin-6 (IL-6) and tumor necrosis factor-alpha (TNF- α) [8, 9]. Furthermore, exposure to PM_{2.5} (particles with a diameter of 2.5 micrometers or smaller) shows an increase in the production of inflammatory mediators, contributing to conditions such as acne, rosacea, and eczema [10]. Activation of matrix metalloproteinases (MMPs), enzymes responsible for collagen and elastin degradation, accelerates the breakdown of the extracellular matrix, which contributes to skin aging [11].

Skin Aging and Pigmentation Disorders

Air pollution is a key factor accelerating skin aging, with visible changes such as wrinkles, fine lines, and hyperpigmentation. Studies have shown that pollutants cause the breakdown of collagen and elastin fibers, which are essential proteins maintaining the structural integrity of the skin [12, 13]. Pigmentation disorders are also common among individuals exposed to high levels of pollution. Studies have demonstrated that prolonged exposure to air pollution contributes to increased melanin production, resulting in dark spots and pigmentation irregularities [14]. The mechanisms underlying these disorders involve both direct damage to melanocytes by ROS and the inflammatory response triggered by pollutants [15].

uwzględnionych w omówieniu, biorąc pod uwagę ich wkład w zrozumienie interakcji pomiędzy skórą a zanieczyszczeniem powietrza.

Kryteria wyboru doniesień obejmowały:

- › badania kliniczne prowadzone na ludziach lub badania in vitro, które wykazały wyraźne powiązania patofizjologiczne między zanieczyszczeniem powietrza a zmianami skórnymi,
- › badania oceniające molekularne mechanizmy uszkodzeń skóry związane z zanieczyszczeniami,
- › badania analizujące efekty estetyczne, takie jak przyspieszenie starzenia skóry, zmiany pigmentacyjne oraz odpowiedzi zapalne,
- › artykuły przeglądowe podsumowujące istniejącą wiedzę na temat tego zagadnienia.

Wyniki

Stres oksydacyjny i odpowiedzi zapalne

Stres oksydacyjny, definiowany jako brak równowagi między reaktywnymi formami tlenu (ROS) a przeciwutleniaczami, jest jednym z głównych mechanizmów, przez które zanieczyszczenia powietrza prowadzą do uszkodzenia skóry. Zanieczyszczenia, takie jak pył zawieszony (PM), ozon i tlenki azotu, wywołują produkcję ROS. Te wysoko reaktywne cząsteczki mogą uszkadzać składniki komórek, w tym lipidy, białka i DNA, prowadząc do zapalenia, starzenia się komórek i apoptozy [6, 7]. Zwiększona produkcja ROS została powiązana z aktywacją szlaków sygnalizacyjnych, takich jak czynnik transkrypcyjny kappa B (NF- κ B), który prowadzi do uwalniania cytokin prozapalnych, takich jak interleukina-6 (IL-6) oraz czynnik martwicy nowotworów alfa (TNF- α) [8, 9]. Ponadto ekspozycja na PM_{2.5} (cząstki o średnicy 2,5 mikrometra lub mniejszej) wykazuje wzrost produkcji mediatorów zapalnych, co przyczynia się do wystąpienia takich chorób jak trądzik, różowaty i egzema [10]. Aktywacja metaloproteinaz macierzy (MMP), enzymów odpowiedzialnych za degradację kolagenu i elastyny, przyspiesza rozkład macierzy pozakomórkowej, co przyczynia się do starzenia się skóry [11].

Starzenie się skóry i zaburzenia pigmentacyjne

Zanieczyszczenie powietrza jest kluczowym czynnikiem przyspieszającym starzenie się skóry, z widocznymi zmianami, takimi jak zmarszczki, drobne linie i hiperpigmentacja. Badania wykazały, że zanieczyszczenia powodują rozkład włókien kolagenowych i elastynowych, które

Barrier Function and Skin Moisture

Air pollution disrupts the skin's barrier function, which is crucial for maintaining hydration and preventing the penetration of harmful substances. Pollutants such as ozone and particulate matter damage the stratum corneum, making it more permeable and less capable of retaining moisture [16, 17]. This disruption contributes to dry skin, irritation, and increased susceptibility to infections. Additionally, the loss of barrier function allows the infiltration of allergens and other harmful compounds, exacerbating conditions such as allergic eczema [18].

Discussion

The skin's response to air pollution is complex and multifactorial, involving several biological mechanisms. One of the most significant factors is the induction of oxidative stress, which disrupts cellular homeostasis and accelerates aging. ROS generated by pollutants damage cellular components, leading to inflammation and the breakdown of skin structure. Pollutants also stimulate inflammatory pathways, exacerbating the progression of chronic skin diseases such as acne, eczema, and psoriasis. The role of the skin barrier function cannot be overlooked. The outermost layer of the skin, the stratum corneum, serves as a protective barrier against environmental stressors, including pollutants. Damage to this barrier by air pollution leads to increased skin permeability, which can result in dehydration, irritation, and other dermatological disorders. The aesthetic implications of skin damage caused by air pollution are vast. Premature aging, characterized by wrinkles, fine lines, and loss of elasticity, is one of the most visible effects. As a result, patients exposed to high levels of pollution seek dermatological interventions, such as antioxidant creams, retinoids, or laser treatments, to combat visible signs of skin damage caused by pollution [19, 20]. Additionally, patients with pigmentation disorders, including melasma and post-inflammatory hyperpigmentation, often experience exacerbation of symptoms due to pollution. Since these conditions are typically difficult to treat, a multidisciplinary approach, involving dermatologists and facial aesthetics specialists, is necessary to achieve optimal results. Given the harmful effects of air pollution on facial skin, preventive measures are crucial. The use of sunscreen creams, cosmetics rich in antioxidants, and avoiding

są niezbędnymi białkami utrzymującymi integralność strukturalną skóry [12, 13]. Zaburzenia pigmentacyjne są również powszechne u osób narażonych na wysokie poziomy zanieczyszczeń. Badania wykazały, że długotrwała ekspozycja na zanieczyszczenia powietrza przyczynia się do zwiększonej produkcji melaniny, co skutkuje pojawieniem się ciemnych plam i nierówności pigmentacyjnych [14]. Mechanizmy leżące u podstaw tych zaburzeń obejmują zarówno bezpośrednie uszkodzenie melanocytów przez ROS, jak i odpowiedź zapalną wywołaną przez zanieczyszczenia [15].

Funkcja bariery i nawilżenie skóry

Zanieczyszczenie powietrza zakłóca funkcję bariery skórnej, która jest kluczowa dla utrzymania nawilżenia i zapobiegania przenikaniu szkodliwych substancji. Zanieczyszczenia, takie jak ozon i cząstki stałe, uszkadzają warstwę rogową, sprawiając, że staje się ona bardziej przepuszczalna i mniej zdolna do zatrzymywania wilgoci [16, 17]. To zakłócenie przyczynia się do suchości skóry, podrażnień i zwiększonej podatności na infekcje. Ponadto utrata funkcji bariery pozwala na infiltrację alergenów i innych szkodliwych związków, co nasila takie choroby jak wyprysk alergiczny [18].

Dyskusja

Reakcja skóry na zanieczyszczenie powietrza jest złożona i wieloczynnikowa; obejmuje kilka mechanizmów biologicznych. Jednym z najistotniejszych czynników jest indukcja stresu oksydacyjnego, który zakłóca homeostazę komórkową i przyspiesza starzenie. ROS generowane przez zanieczyszczenia uszkadzają składniki komórek, prowadząc do zapalenia oraz rozkładu struktury skóry. Zanieczyszczenia stymulują również szlaki zapalne, które nasilają przebieg przewlekłych chorób skóry, takich jak trądzik, egzema i łuszczyca. Nie można pominąć roli funkcji bariery skórnej. Zewnętrzna warstwa skóry, warstwa rogowa, pełni rolę ochronną przed stresorami środowiskowymi, w tym zanieczyszczeniami. Uszkodzenie tej bariery przez zanieczyszczenia powietrza prowadzi do zwiększonej przepuszczalności skóry, co może skutkować jej odwodnieniem, podrażnieniami i innymi zaburzeniami dermatologicznymi. Implikacje estetyczne uszkodzeń skóry spowodowanych zanieczyszczeniem powietrza są ogromne. Przedwczesne starzenie się, charakteryzujące się zmarszczkami,

prolonged exposure in highly polluted areas are recommended strategies [21]. Furthermore, therapeutic approaches may include the use of moisturizing and anti-inflammatory preparations based on antioxidants, as well as professional treatments such as chemical peels, microneedling, or laser therapy to restore skin integrity and improve its structure [22]. Many proposals in aesthetic medicine also serve a preventive function, limiting the adverse effects of air pollution on facial skin. As the global prevalence of air pollution rises, it is essential to implement both preventive and therapeutic measures to mitigate its impact on facial aesthetics.

Conclusions

Air pollution exerts a profound impact on the human face, leading to oxidative stress, inflammation, and premature aging. The mechanisms underlying these changes involve a complex interaction between pollutants and skin cells, with subsequent effects on skin structural integrity, pigmentation, and barrier function. Continued research into the pathological mechanisms of skin damage caused by pollution will be crucial for developing more effective treatment methods and interventions to protect its health.

drobnymi liniami i utratą elastyczności, jest jednym z najbardziej widocznych efektów. W związku z tym pacjenci narażeni na wysokie poziomy zanieczyszczeń szukają pomocy w postaci interwencji dermatologicznych, takich jak preparaty z antyoksydantami, retinoidy lub zabiegi laserowe w celu zwalczania widocznych oznak uszkodzenia skóry spowodowanego zanieczyszczeniem [19, 20]. Ponadto pacjenci z zaburzeniami pigmentacyjnymi, w tym melazmą i przebarwieniami pozapalnymi, często doświadczają nasilenia objawów w wyniku zanieczyszczeń. Ponieważ te schorzenia są zwykle trudne do leczenia, podejście multidyscyplinarne, obejmujące dermatologów i specjalistów z zakresu estetyki twarzy, jest niezbędne do uzyskania optymalnych rezultatów. Biorąc pod uwagę szkodliwe skutki zanieczyszczenia powietrza na skórę twarzy, środki zapobiegawcze są kluczowe. Zastosowanie kremów z filtrem przeciwsłonecznym, kosmetyków bogatych w antyoksydanty oraz unikanie długotrwałej ekspozycji w obszarach o wysokim zanieczyszczeniu są zalecanymi strategiami [21]. Dodatkowo podejścia terapeutyczne mogą obejmować stosowanie preparatów nawilżających i przeciwzapalnych na bazie antyoksydantów, a także profesjonalne zabiegi, takie jak peelingi chemiczne, mikroigłowanie czy terapia laserowa w celu przywrócenia integralności skóry i poprawy jej struktury [22]. Wiele propozycji z zakresu zabiegowej medycyny estetycznej pełni także funkcję profilaktyki, ograniczając niekorzystne działanie zanieczyszczeń powietrza na skórę twarzy. W miarę jak globalna prevalencja zanieczyszczenia powietrza rośnie, niezbędne jest wdrożenie zarówno środków zapobiegawczych, jak i terapeutycznych w celu złagodzenia jego wpływu na estetykę twarzy.

Wnioski

Zanieczyszczenie powietrza ma ogromny wpływ na ludzką twarz, prowadzi bowiem do stresu oksydacyjnego, zapaleń oraz przedwczesnego starzenia się. Mechanizmy leżące u podstaw tych zmian obejmują złożoną interakcję między zanieczyszczeniami a komórkami skóry, z późniejszymi skutkami dla integralności strukturalnej skóry, pigmentacji i funkcji bariery.

Kontynuowanie badań nad mechanizmami patologicznymi uszkodzeń skóry spowodowanych zanieczyszczeniem będzie kluczowe dla opracowania skuteczniejszych metod leczenia i interwencji w celu ochrony jej zdrowia.

Acknowledgements

Conflict of interest statement

The authors declares no conflict of interest.

Funding sources

There are no sources of funding to declare.

References / Piśmiennictwo

1. Surdacki M, Pirogowicz I, Sobieszkańska M. Wpływ zanieczyszczenia powietrza na układy sercowo-naczyniowy i nerwowy osób w wieku podeszłym. Współczesna Geriatria – Choroby Ośpiewne. 2019;189-195.
2. Surdacki M, Sobieszkańska M. The Impact of Particulate Matter on Prenatal and Infant Child Development. Alergologia Polska - Polish Journal of Allergology. 2022;9(3):179-185. <https://doi.org/10.5114/pja.2022.119230>.
3. Bickers D, Athar M. Oxidative stress in the pathogenesis of skin disease. J Invest Dermatol. 2006;126(12):2565-2575. <https://doi.org/10.1038/SJ.JID.5700340>.
4. Pecorelli A, Woodby B, Prioux R, Valacchi G. Involvement of 4-hydroxy-2-nonenal in pollution-induced skin damage. BioFactors. 2019;45:536-547. <https://doi.org/10.1002/biof.1513>.
5. Ivarsson J, Ferrara F, Vallese A, et al. Comparison of Pollutant Effects on Cutaneous Inflammation Activation. Int J Mol Sci. 2023;24. <https://doi.org/10.3390/ijms242316674>.
6. Shan X, Liu L, Li G, et al. PM2.5 and the typical components cause organelle damage, apoptosis and necrosis: Role of reactive oxygen species. Sci Total Environ. 2021;782:146785. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146785>.
7. Kim K, Cho D, Park H. Air pollution and skin diseases: Adverse effects of airborne particulate matter on various skin diseases. Life Sci. 2016;152:126-134. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2016.03.039>.
8. Youn G, Lee K, Choi S, Park J. Overexpression of HDAC6 induces pro-inflammatory responses by regulating ROS-MAPK-NF-κB/AP-1 signaling pathways in macrophages. Free Radic Biol Med. 2016;97:14-23. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2016.05.014>.
9. Li W, Zhou X, Cai J, et al. Recombinant Treponema pallidum protein Tp0768 promotes proinflammatory cytokine secretion of macrophages through ER stress and ROS/NF-κB pathway. Appl Microbiol Biotechnol. 2020. <https://doi.org/10.1007/s00253-020-11018-8>.
10. Ryu Y, Kang K, Piao M, et al. Particulate matter induces inflammatory cytokine production via activation of NFκB by TLR5-NOX4-ROS signaling in human skin keratinocyte and mouse skin. Redox Biol. 2018;21. <https://doi.org/10.1016/j.redox.2018.101080>.
11. Sárdy M. Role of Matrix Metalloproteinases in Skin Ageing. Connect Tissue Res. 2009;50:132-138. <https://doi.org/10.1080/03008200802585622>.
12. Park S, Byun E, Lee J, et al. Air Pollution, Autophagy, and Skin Aging: Impact of Particulate Matter (PM10) on Human Dermal Fibroblasts. Int J Mol Sci. 2018;19. <https://doi.org/10.3390/ijms19092727>.

Oświadczenia

Oświadczenie dotyczące konfliktu interesów

Autorzy deklarują brak konfliktu interesów w autorstwie oraz publikacji pracy.

Źródła finansowania

Autorzy deklarują brak źródeł finansowania.

13. Aravitskaya E, Berardesca E, Bieber T, et al. The impact of airborne pollution on skin. J Eur Acad Dermatol Venereol. 2019;33:1496-1505. <https://doi.org/10.1111/jdv.15583>.
14. Deyvapriya S, Halai P, Kiss O, et al. P30 Exposure to particulate matter induces structural and pigmentary changes to human skin. Br J Dermatol. 2024. <https://doi.org/10.1093/bjd/ljae105.052>.
15. Chan T, Bramono D, Bourokba N, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons regulate the pigmentation pathway and induce DNA damage responses in keratinocytes, a process driven by systemic immunity. J Dermatol Sci. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jdermsci.2021.09.003>.
16. Jin S, Li Z, Choi E, et al. Urban particulate matter in air pollution penetrates into the barrier-disrupted skin and produces ROS-dependent cutaneous inflammatory response in vivo. J Dermatol Sci. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jdermsci.2018.04.015>.
17. Dijkhoff I, Drasler B, Karakocak B, et al. Impact of airborne particulate matter on skin: a systematic review from epidemiology to in vitro studies. Part Fibre Toxicol. 2020;17. <https://doi.org/10.1186/s12989-020-00366-y>.
18. To T, Zhu J, Stieb D, et al. Early life exposure to air pollution and incidence of childhood asthma, allergic rhinitis and eczema. Eur Respir J. 2019;55. <https://doi.org/10.1183/13993003.00913-2019>.
19. Marrot L. Pollution and Sun Exposure: A Deleterious Synergy. Mechanisms and Opportunities for Skin Protection. Curr Med Chem. 2019;25(40):5469-5486. <https://doi.org/10.2174/0929867324666170918123907>.
20. Krutmann J, Liu W, Li L, et al. Pollution and skin: from epidemiological and mechanistic studies to clinical implications. J Dermatol Sci. 2014;76(3):163-168. <https://doi.org/10.1016/j.jdermsci.2014.08.008>.
21. Bocheva G, Slominski R, Slominski A. Environmental Air Pollutants Affecting Skin Functions with Systemic Implications. Int J Mol Sci. 2023;24. <https://doi.org/10.3390/ijms241310502>.
22. Damevska K, Simeonovski V, Razvigor D, Stefana D. How to prevent skin damage from air pollution part 2: Current treatment options. Dermatol Ther. 2021;34. <https://doi.org/10.1111/dth.15132>.

Acceptance for editing: **2024-12-27**
Artykuł przyjęty do redakcji:

Acceptance for publication: **2025-06-02**
Artykuł zaakceptowany do publikacji: