10.32394/pe/242585

Marta Wiejak-Giza[1] , *Grzegorz Dziubanek*[2]

HOW CAN PHARMACEUTICALS AFFECT THE ENVIRONMENT: A NARRATIVE LITERATURE REVIEW

W JAKI SPOSÓB FARMACEUTYKI MOGĄ ODDZIAŁYWAĆ NA ŚRODOWISKO – NARRACYJNY PRZEGLĄD LITERATURY

[1]Doctoral School, Medical University of Silesia in Katowice, Poland
Szkoła Doktorska Śląskiego Uniwersytetu Medycznego w Katowicach

[2]Department of Environmental Health, Faculty of Public Health, Medical University of Silesia in Katowice, Poland
Katedra Zdrowia Środowiskowego, Wydział Zdrowia Publicznego Śląskiego Uniwersytetu Medycznego

ABSTRACT

The development of modern medicine enables increasingly effective treatment of a growing number of diseases, largely due to the rapid progress of the pharmaceutical industry. Currently, the production and widespread use of pharmaceuticals expand therapeutic possibilities, contributing to improved quality of life and increased life expectancy. However, the growing production and consumption of pharmaceuticals may also have a significant negative impact on the natural environment. The aim of this study is to review the current state of knowledge regarding the environmental and health consequences associated with the increasing presence of pharmaceuticals and their metabolites in the environment as well as to identify possible preventive measures. The paper is based on a review of the current scientific literature on the subject. Pharmaceutical contaminants may enter the environment through various pathways, including municipal wastewater and insufficiently treated industrial effluents. Pharmaceutical substances pose a potential threat to ecosystems due to their ability to bioaccumulate. Moreover, not only active pharmaceutical ingredients but also their metabolites and transformation products formed in the environment may adversely affect living organisms and ecosystems. Both aquatic and terrestrial ecosystems are at risk. In aquatic environments, pharmaceuticals may disrupt the growth and reproductive cycles of organisms, while soil contamination may negatively affect ecosystems essential for food production. Consequently, the presence of pharmaceuticals in the environment may contribute to biological imbalance, biodiversity loss, and the development of antibiotic resistance. Therefore the implementation of effective monitoring systems, proper pharmaceutical waste management, and technologies reducing the emission of pharmaceutical residues into the environment is essential. The presence of pharmaceuticals in the environment is becoming an increasingly significant challenge for ecosystem protection and public health. Further research on the effects of long-term exposure of organisms to pharmaceutical substances, as well as the development of effective methods for reducing their emission into the environment is therefore necessary.

Keywords: *pollution, environment, metabolites, health hazards, pharmaceuticals*

INTRODUCTION

One of the landmark events in the history of pharmacology was the synthesis of acetylsalicylic acid by Felix Hoffmann in 1897 at the laboratories of Bayer AG. In 1899, its industrial-scale production began under the brand name Aspirin. Since then, the development of chemical synthesis of medicinal substances has accelerated rapidly, shaping modern pharmacotherapy (1). Today, nearly 130 years after the introduction of acetylsalicylic acid into clinical practice, the vast majority of available medicinal products contain active pharmaceutical ingredients (APIs) obtained through chemical synthesis. It is estimated that approximately 90% of APIs currently on the market are of synthetic origin (2).

The rapid development of the pharmaceutical industry has significantly expanded therapeutic, diagnostic and preventive capabilities, contributing to increased life expectancy and improved quality of life. At the same time, however, the growing production and consumption of pharmaceuticals are associated with their inevitable release into the natural environment at various stages of their life cycle – from manufacturing and use to improper disposal, as illustrated in Fig. 1.

The presence of active pharmaceutical ingredients and their metabolites in the environment represents a significant environmental and public health challenge. This phenomenon has raised considerable concern among researchers regarding its potential adverse short- and long-term consequences. The development of the pharmaceutical industry is essential for protecting human health; however, it must be aligned with the principles of sustainable development. Increasing attention is also being paid to the implementation of the One Health approach, promoted by the World Health Organization (WHO), which recognises the close interconnection between human, animal and environmental health. This approach acknowledges that health threats, such as infectious diseases, antibiotic resistance and climate change, can only be effectively addressed through cross-sectoral collaboration involving disciplines such as medicine, veterinary medicine, ecology and environmental sciences. Its primary objective is to promote a holistic approach to epidemic prevention, minimise the risk of zoonotic diseases and improve global public health. Environmental exposure to pharmaceuticals and their metabolites may adversely affect not only aquatic and soil organisms but also, indirectly, human health (3).

The aim of this study is to review the current state of knowledge regarding the environmental and health consequences of the increasing use of pharmaceuticals and their metabolites, as well as to identify potential preventive measures.

MATERIALS AND METHODS

To present the environmental consequences of the development of the pharmaceutical industry, a narrative literature review was conducted using publications from 2015 to 2026 available through PubMed and Google Scholar. The literature selection process included scientific publications directly or indirectly addressing issues related to the environmental impact of pharmaceuticals.

The literature search was performed using the following search terms: "environmental pollution from pharmaceuticals", "climate changes and health", "pollution of water ecosystems", and "One Health". Publications in Polish and English were considered, and their relevance to the subject of the review was assessed based on their titles and abstracts. Publications meeting the thematic inclusion criteria were included in the review, comprising narrative reviews, systematic reviews, meta-analyses and original research articles available through Open Access.

All figures presented in this article were created by the authors. Graphic elements available under Canva's free license were used in their preparation.

RESULTS AND DISCUSSION

Environmental fate of pharmaceuticals. Pollutants posing a threat to the environment, animals and humans may be generated at any stage of pharmaceutical product manufacturing and use. These may include active pharmaceutical ingredients (APIs), pharmaceutical excipients and materials used in packaging. During pharmaceutical manufacturing, synthesis products and reaction by-products are generated, and various solvents are used. Since APIs must exhibit appropriate biological activity and stability even at low concentrations, molecules with specific structural characteristics, lipophilicity and solubility are selected for their production (4).

Pharmaceuticals can enter the environment through various pathways. Examples of these pathways are presented in Fig. 2.

Following the administration of a medicinal product, the active ingredient is released from its dosage form and subsequently absorbed into the body. The unabsorbed fraction may be excreted in the faeces, whereas the absorbed fraction enters the systemic circulation and is distributed to various tissues. Once in the body, pharmaceuticals undergo metabolic transformations and are excreted, along with their metabolites, through various routes, including urine. A substantial proportion of pharmaceuticals is also excreted unchanged. Topically applied medicinal products may be washed off the skin during activities such as

showering or handwashing, similarly to medicinal personal hygiene products. Furthermore, many consumers continue to dispose of unwanted or expired medicines through household wastewater systems or general household waste. Common practices include pouring pharmaceutical products down sinks or toilets and discarding them in waste bins not designated for pharmaceutical waste (5).

Pharmaceuticals and their metabolites excreted in the urine or faeces of individuals taking these medicines enter the sewerage system and subsequently reach wastewater treatment plants (WWTPs). Wastewater contains both pharmaceuticals and their biologically active metabolites, which are transported to WWTPs, where they undergo biodegradation through the activated sludge process. Unfortunately, currently available wastewater treatment technologies do not ensure the complete removal of pharmaceutical residues and other contaminants. Consequently, these substances may be discharged into surface waters with treated effluent, where they can enter the food chain.

Furthermore, extreme weather events, such as heavy rainfall, rapid snowmelt and severe storms, may lead to sewer overflows and the discharge of contaminated wastewater from municipal and industrial sources without undergoing treatment at wastewater treatment plants. As a result, higher concentrations of pharmaceutical contaminants may enter the environment. It is worth noting that such events are becoming increasingly frequent in connection with ongoing climate change. Another consequence of climate change, particularly global warming, is the increasing likelihood of drought. One approach to mitigating its effects is the increased use of treated wastewater for agricultural irrigation, although this water may contain pharmaceutical residues (6). However, the reuse of reclaimed water for crop irrigation is subject to the legal regulations applicable in each country. Irrigation with treated wastewater may result in the contamination of agricultural soils and crops, which may subsequently be used as animal feed or enter the human food supply.

Pharmaceuticals are also widely used in livestock farming. The uncontrolled use of pharmaceuticals in agricultural facilities, such as poultry and cattle farms, may significantly contribute to the emergence and spread of bacterial strains resistant to currently available antibiotics (7).

In addition to households, hospitals represent another significant source of pharmaceutical contamination in the environment. Both the chemical composition of hospital wastewater and the concentrations of contaminants it contains differ considerably from those of conventional municipal wastewater. Therefore, the pretreatment of hospital wastewater

before its discharge into municipal sewerage systems is an important measure, although it is still implemented relatively rarely (6).

Advances in medicine have made pharmaceuticals more widely available than ever before. In highly developed countries, medicines are readily accessible, while populations are ageing, contributing to the global challenge of increasing pharmaceutical consumption and the improper disposal of unused medicines. A substantial proportion of patients do not return expired medicines to designated pharmaceutical waste collection points. Consequently, these medicines often end up in landfills with other waste or enter wastewater systems, contributing to environmental contamination. According to the literature, the pharmaceuticals most frequently detected in aquatic environments include antibiotics, non-steroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs), antidepressants and cardiovascular medicines (8).

Particular attention should be paid to endocrine-disrupting chemicals (EDCs). These are exogenous chemical substances that can interfere with the normal functioning of the endocrine system in humans and animals through mechanisms including interactions with hormone receptors, modulation of signalling pathways, and effects on hormone synthesis, transport, metabolism or action in target tissues (9). Compounds exhibiting endocrine activity that may be detected in wastewater and surface waters include primarily natural oestrogens, such as oestrone (E1) and 17β-oestradiol (E2), as well as synthetic oestrogens, including 17α-ethinyloestradiol (EE2), which is used, among other applications, as a component of hormonal contraceptives. Other steroid hormones, including progestogens, androgens and corticosteroids, may also be present in the environment. The literature also suggests that certain pharmaceuticals may exhibit endocrine-disrupting properties, including selected antidepressants from the selective serotonin reuptake inhibitor (SSRI) class, anticonvulsants such as carbamazepine, and fibrates used in the treatment of lipid disorders (10). Exposure to substances with endocrine activity may disrupt the functioning of various hormonal axes, including those associated with thyroid hormones, oestrogens and androgens. Consequently, long-term exposure to these compounds may be associated with disturbances in metabolic, reproductive and developmental processes, as well as an increased risk of certain diseases, including obesity, type 2 diabetes and hormone-dependent cancers (9).

In addition to the aforementioned pharmaceuticals, hormones and antiparasitic agents used in veterinary medicine also pose environmental risks (11).

A major environmental concern is the potential of pharmaceuticals or their metabolites to undergo bioaccumulation (the process by which contaminants taken up from the environment accumulate in the tissues of living organisms), followed by biomagnification, whereby the

concentrations of these substances increase at successively higher trophic levels of the food chain (12), as well as their toxic effects on wildlife. These processes may result in significant physiological, behavioural and reproductive changes in exposed animals (4).

Municipal wastewater as a tool for monitoring psychoactive substances. Municipal wastewater can provide valuable information on the presence and prevalence of psychoactive substances within a population. The analysis of municipal wastewater samples is increasingly being used to monitor the occurrence of new psychoactive substances (NPS) in populations. This approach can be applied to assess trends in the use of these substances and to identify compounds whose presence may not be detected through conventional monitoring methods. Despite limitations related to the cost and time required for sample collection and analysis, the application of modern analytical chemistry techniques enables the detection of even low concentrations of NPS in wastewater. One limitation of this approach is the considerable dilution of the target substances in wastewater, resulting from both the volume of wastewater flowing through the system and the presence of urine from individuals who do not use these substances (13).

An example of the application of this approach is a study conducted by Jaunay et al., in which wastewater samples collected in Australia between February 2022 and February 2023 from 57 wastewater catchment areas were analysed. Several substances were detected in the samples, including hydroxyetamine, mephedrone, methoxetamine, methylone, mitragynine, pentylone and eutylone. Changes in the frequency of detection of individual substances were also observed, including a decreasing trend for eutylone. The findings suggest that wastewater analysis may be a useful tool for monitoring the occurrence of NPS in populations and could potentially support early warning systems (14).

Impact on aquatic ecosystems. Considering the environment as a whole, studies have demonstrated that pharmaceuticals accumulate in plants and animals inhabiting aquatic ecosystems (11). The adverse effects of this phenomenon include endocrine and reproductive disorders in fish, crustaceans, molluscs and other aquatic organisms, as well as the development of resistance among microorganisms to various classes of antibiotics (15). Veterinary pharmaceuticals, particularly antibiotics, may enter both standing and flowing water bodies as a result of insufficient wastewater treatment. Aquaculture is also becoming an increasingly important source of water contamination. Antibiotics may be used in fish farming to prevent the spread of bacterial diseases (16). Aquaculture may also adversely affect the environment through the accumulation of fish excreta, uneaten feed and pharmaceutical residues within relatively confined areas. Such ecosystems are at risk of eutrophication, which can lead to the

formation of anoxic zones in water bodies and the death of aquatic organisms (17). Fish raised in aquaculture systems may also be exposed to toxic decomposition products originating from their own excreta, uneaten feed and dead fish. Once released into aquatic environments, pharmaceutical residues may undergo various processes, including bioaccumulation, biodegradation, photolysis and hydrolysis (18). The greatest accumulation of contaminants occurs in sediments at the bottom of water bodies.

An example of a widely used pharmaceutical that has adverse effects on aquatic environments is diclofenac, a non-steroidal anti-inflammatory drug (NSAID) used to treat pain of various origins, as well as post-traumatic and postoperative inflammatory conditions. It is used by patients following dental or orthopaedic procedures and for the treatment of menstrual pain, rheumatic pain and pain associated with degenerative conditions. In Poland, diclofenac is available in various pharmaceutical dosage forms, including topical gels, tablets, capsules, transdermal patches and liquid preparations for external use, such as sprays and mouthwashes. Parenteral formulations and suppositories are also available. Some of these preparations are available over the counter (OTC), whereas others require a medical prescription (19). Pharmaceuticals present in aquatic ecosystems may accumulate in plants, vertebrates and invertebrates inhabiting these environments, including algae, mussels, crabs, fish, amphibians and aquatic birds. According to the literature, diclofenac exhibits toxic effects on these organisms and, through biomagnification along the food chain, may also exert toxic effects on terrestrial animals that consume fish and other aquatic organisms (20). Exposure may also occur when livestock, such as cattle, consume contaminated water.

Other non-steroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs) may also exhibit toxic effects on aquatic organisms, as exemplified by ibuprofen (21). Like diclofenac, ibuprofen is widely consumed, with literature data indicating that its annual consumption in Poland has reached approximately 58 tonnes (22). The physicochemical properties of ibuprofen contribute to its potential environmental impact, particularly its high lipophilicity and low susceptibility to biodegradation. Its presence in the environment is associated with its use in veterinary medicine and, as with diclofenac, the fact that some ibuprofen-containing medicinal products are available over the counter (OTC) in Poland, making them readily accessible. Prolonged exposure to ibuprofen may induce cytotoxic and genotoxic effects in aquatic organisms, increase cellular oxidative stress, and affect growth and reproduction. Studies involving model organisms used to assess the adverse environmental effects of pharmaceuticals, including the zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) and zebrafish (*Danio rerio*), have demonstrated harmful effects of ibuprofen exposure (21). Long-term exposure in zebra mussels has been associated

with genetic and cellular damage, whereas developmental abnormalities of the head, skeletal deformities, hypopigmentation, pericardial oedema and impaired heart rate have been observed in zebrafish. In certain freshwater fish species, ibuprofen exposure has also been associated with renal alterations and changes in heat shock protein expression. Such effects have been observed, for example, in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) (21).

It should also be recognised that pharmaceutical metabolites frequently enter the environment and may subsequently react with other compounds, including antibiotics, potentially forming new substances that have not yet been adequately investigated. Consequently, the extent of their toxic effects on various organisms remains poorly understood (22).

Impact on soil ecosystems. Pharmaceutical products affect soil ecosystems to a lesser extent than aquatic ecosystems. Soil contamination most commonly occurs when farmers apply animal manure as a natural fertiliser to agricultural land (23). Pharmaceuticals, including antiparasitic agents and antibiotics, as well as growth hormones and their metabolites, may enter the soil through this pathway.

Antibiotics have particularly adverse effects on soil ecosystems, as some may exhibit long biological half-lives, resulting in slow biodegradation and potential accumulation in the environment. It has been demonstrated that certain antimicrobial agents, such as sulfamethoxazole, undergo extensive biodegradation in soils, whereas antibiotics such as amoxicillin and tetracycline are less readily biodegraded. Antibiotics present in soil may adversely affect the growth and development of plants, including agricultural crops used for human consumption (24).

Interestingly, certain pharmaceutical metabolites excreted by animals may be converted back into the active form of the parent drug, potentially causing considerable harm to organisms inhabiting soil ecosystems through exposure to both the parent compounds and their metabolites. The highest concentrations of antibiotics have been reported in manure originating from intensive livestock farming, particularly pig farms (25).

Impact on air quality. The pharmaceutical industry forms part of the broader healthcare system, whose operations involve substantial consumption of energy, raw materials and natural resources, consequently contributing to greenhouse gas emissions. The pharmaceutical industry is considered one of the sectors associated with particularly high emissions of carbon dioxide and other greenhouse gases (4,26). Emissions associated with pharmaceutical industry activities arise at multiple stages of the production and consumption of medicinal products. These primarily include the extraction and processing of raw materials, synthesis of active

pharmaceutical ingredients, manufacture of pharmaceutical dosage forms, purification and sterilisation processes, transportation of raw materials and finished products, and the production and disposal of packaging materials. Of particular importance is the high energy demand of manufacturing processes, as pharmaceutical production requires, among other factors, the maintenance of appropriate temperature, humidity and microbiological cleanliness, as well as the use of energy-intensive technological processes.

It is estimated that nearly 99% of active pharmaceutical ingredients and reagents used in the pharmaceutical industry originate from petroleum processing (27). Petroleum is a major raw material for the pharmaceutical industry, serving both as a transport fuel and as a feedstock for the production of various materials. Examples of substances derived from petrochemical feedstocks include benzene and its derivatives, which are used as starting compounds in chemical synthesis. Petrochemical products are also used in the manufacture of packaging materials and certain pharmaceutical excipients, such as paraffin and petroleum jelly. The pharmaceutical industry's dependence on fossil-based raw materials therefore has both environmental and economic implications. Consequently, disruptions in global markets, such as those associated with a prolonged crisis in the Strait of Hormuz, may adversely affect the availability of pharmaceuticals to patients (27). The extraction, processing and transportation of crude oil are associated with greenhouse gas emissions, while additional emissions arise from the use of fossil fuels for energy generation and transportation. This means that the carbon footprint of a medicinal product is not limited to its manufacture at a pharmaceutical facility but extends across the entire supply chain.

Importantly, the carbon footprint associated with global pharmaceutical consumption has shown a clear upward trend. Between 1995 and 2019, it increased by 77%, from 124.2 to 219.6 Mt CO_2e, with much of this increase driven by the United States and China (26).

Another source of emissions associated with the healthcare sector is the use of gases in medical procedures (28). These primarily include nitrous oxide, which is widely used as an anaesthetic and analgesic agent in fields such as anaesthesiology, dentistry and gynaecology. Alongside carbon dioxide and methane, nitrous oxide is one of the major greenhouse gases contributing to global warming. Another example of a medical gas contributing to global warming is isoflurane, which is widely used in surgery and anaesthesia. As the number of medical procedures continues to increase, the use of these medical gases is also rising (28).

Greenhouse gas emissions associated with the pharmaceutical industry and the healthcare sector as a whole are significant not only from an environmental perspective but also in terms of public health. Increasing atmospheric concentrations of greenhouse gases contribute

to global warming, one consequence of which is the increasing frequency and intensity of extreme weather events, including heatwaves (7). Climate change may directly affect human health and survival. One example is heatstroke, a life-threatening condition in which the body can no longer regulate its temperature. During the summer of 2022, an estimated 61,672 people died as a result of heat exposure in Europe. Projections indicate that the frequency of extreme weather events in Europe will increase over the coming decades. Consequently, heat-related mortality is expected to become an increasingly important public health concern, potentially slowing or even reversing the long-standing trend towards increasing life expectancy. Furthermore, rising ambient temperatures are associated with an increased risk of cardiac arrhythmias, myocardial infarction and coronary artery disease (29). Thus, greenhouse gas emissions associated with the pharmaceutical industry and the wider healthcare sector may create an indirect link between the operation of healthcare systems and population health. A sector whose primary purpose is to protect and improve human health simultaneously contributes to emissions that affect the climate. Reducing this environmental impact through measures such as improving energy efficiency, adopting renewable energy sources, optimising supply chains and reducing reliance on fossil-derived materials and raw materials is therefore an important component of efforts to develop a more sustainable healthcare system.

CONCLUSIONS

The development of the pharmaceutical industry, although beneficial to human health, poses significant environmental risks and may, in the long term, also become a risk factor for public health. Pharmaceuticals and their metabolites enter water, soil and air, contaminating different environmental compartments and affecting individual organisms as well as entire ecosystems. Their entry into the food chain may ultimately lead to human exposure, potentially resulting in a range of adverse health effects. The pharmaceutical industry is also associated with substantial greenhouse gas emissions, contributing to global warming, the environmental, health, social and economic consequences of which are expected to become increasingly apparent. Therefore, the pharmaceutical industry should place greater emphasis on the principles of sustainable development, the optimisation and improved efficiency of manufacturing processes, and the reduction of fossil-based raw material consumption. Collaboration with other sectors is also essential to develop effective and safe solutions for pharmaceutical waste disposal and the removal of pharmaceutical residues and their metabolites from the environment. Given the increasing contamination of the environment with pharmaceuticals, there is an urgent need to reduce their release into the environment and

improve the efficiency of wastewater treatment processes in removing these contaminants. Another important measure is the introduction of mandatory pretreatment of hospital wastewater.

The implementation of the One Health approach is also becoming increasingly important in this context. According to this concept, effective management of these threats requires the integration of medical, veterinary and environmental knowledge to protect human and animal health, as well as the health of ecosystems.

REFERENCES

1. Zdrojewicz Z, Jagodziński A, Kowalik-Jagodzińska M, Zielińska E. Stare i nowe oblicze aspiryny Pediatr Med Rodz. 2018: 14(4), 369–375. doi: 10.15557/PiMR.2018.0046
2. Synthetic vs. Natural APIs: Key Considerations for Pharmaceutical Manufacturers 2026. Available from: https://www.pharmasources.com/industryinsights/synthetic-vs-natural-apis-key-considerat-335215.html. Accessed: 30.04.2026
3. Adisasmito WB, Almuhairi S, Behravesh CB, Bilivogui P, Bukachi SA, Casas Net. al. One Health: A new definition for a sustainable and healthy future. PLoS Pathog. 2022; 18(6): e1010537. doi: 10.1371/journal.ppat.1010537.
4. Egaña I, Akhrimenko V, Ayerbe M, Abasolo E, Lertxundi U, Orive G Promoting sustainable pharmacy for tackling environmental pharmaceutical pollution. Drug Discov Today. 2026;31(1):104559 doi: 10.1016/j.drudis.2025.104559.
5. Benítez-Rico A, Pérez-Martínez A, Muñóz-López BI, Martino-Roaro L, Alegría-Baños JA, Vergara-Castañeda A, et al. Medical Household Waste as a Potential Environmental Hazard: An Ecological and Epidemiological Approach. Int J Environ Res Public Health. 2023;20(7):5366 doi:10.3390/ijerph20075366.
6. Äystö L, Vieno N, Fjäder P, Mehtonen J, Nystén T. Hospitals and households as primary emission sources for risk-posing pharmaceuticals in municipal wastewater, Ecotoxicol Environ Saf. 2023; 262: 115149 doi:10.1016/j.ecoenv.2023.115149.
7. Arker G, Miller FA. Tackling Pharmaceutical Pollution Along the Product Lifecycle: Roles and Responsibilities for Producers, Regulators and Prescribers. Pharmacy. 2024; 12(6):173 doi: 10.3390/pharmacy12060173.
8. Świacka K, Maculewicz J, Kowalska D, Caban M, Smolarz K, Świeżak J. Presence of pharmaceuticals and their metabolites in wild-living aquatic organisms – Current state

of knowledge. J Hazard Mater. 2022: 424(A), 127350 doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.127350.

9. Turan S. Endocrine disrupting chemicals and bone.Best Pract Res Clin Endocrinol Metab. 2021(5):101495. doi: 10.1016/j.beem.2021.101495
10. Metcalfe CD, Bayen S, Desrosiers M, Muñoz G, Sauvé S, Yargeau V. An introduction to the sources, fate, occurrence and effects of endocrine disrupting chemicals released into the environment. Environ Res. 2022;207:112658. doi: 10.1016/j.envres.2021.
11. Kock A, Glanville HC., Law AC, Stanton, T Carter, LJ, Taylor, JC. Emerging challenges of the impacts of pharmaceuticals on aquatic ecosystems: A diatom perspective. Sci Total Environ. 2023:878:162939. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.162939
12. Danovaro R, Cocozza di Montanara A, Corinaldesi C, Dell'Anno A, Illuminati S, Willis T.J et al. Bioaccumulation and biomagnification of heavy metals in marine micro-predators. Commun Biol. 2023; 27;6(1):1206 doi:10.1038/s42003-023-05539-x.
13. Fitzgerald ND, Cottler LB, Palamar JJ. Public health surveillance of new psychoactive substances: recent developments. Curr Opin Psychiatry. 2024;37(4):270-276 doi: 10.1097/YCO.0000000000000938.
14. Jaunay E.L, Bade R, Paxton K.R, Nadarajan D, Barry D.C, Zhai Y, et al. Monitoring the use of novel psychoactive substances in Australia by wastewater-based epidemiology. Sci Total Environ. 2024: 919:170473. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.170473
15. Rodrigues F, Durães L, Simões NEC, Pereira AMPT, Silva LJG, João Feio M. Pharmaceuticals in urban streams: A review of their detection and effects in the ecosystem. Water Res. 2025;268(Pt B):122657. doi: 10.1016/j.watres.2024.122657.
16. Chen J, Sun R, Pan C, Pereira AMPT, Silva LJG, Feio MJ. Antibiotics and Food Safety in Aquaculture. J Agric Food Chem. 2020; 68(43):11908-11919 doi: 10.1016/j.watres.2024.122657.
17. Wang Z, Pu D, Zheng J, Li P, Lü H, Wei X, et al. Hypoxia-induced physiological responses in fish: From organism to tissue to molecular levels. Ecotoxicol Environ Saf. 2023; 267: 115609 doi:10.1016/j.ecoenv.2023.115609.
18. Saeed H, Padmesh S, Singh A, Nandy A, Singh SP, Deshwal RK. Impact of veterinary pharmaceuticals on environment and their mitigation through microbial bioremediation. Front Microbiol. 2024:15 1396116 doi: 10.3389/fmicb.2024.1396116.
19. Medycyna Praktyczna. Indeks Leków MP: Diklofenak. Available from: https://indeks.mp.pl/leki/subst.php?id=227. Accessed: 29.09.2026

20. Nosek K, Zhao D. Transformation products of diclofenac: Formation, occurrence, and toxicity implication in the aquatic environment. Water Res. 2024: 266, 122388 doi: 10.1016/j.watres.2024.122388.
21. Jan-Roblero J, Cruz-Maya JA. Ibuprofen: Toxicology and Biodegradation of an Emerging Contaminant. Molecules. 2023, 23;28(5):2097 doi: 10.3390/molecules28052097
22. Marchlewicz A, Guzik U, Wojcieszyńska D. Over-the-Counter Monocyclic Non-Steroidal Anti-Inflammatory Drugs in Environment—Sources, Risks, Biodegradation. Water Air Soil Pollut 226, 355 (2015) doi: 10.1007/s11270-015-2622-0.
23. Kodešová R, Grabic R, Kočárek M, Klement A, Golovko O, Fér M et al. Pharmaceuticals' sorptions relative to properties of thirteen different soils. Sci Total Environ. 2015;511:435-43. doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.12.088.
24. Wydro U, Wołejko E, Struk-Sokołowska J, Puchlik M. Pozostałości farmaceutyków w środowisku oraz możliwości ich usuwania Interdyscyplinarne zagadnienia w inżynierii i ochronie środowiska [Dokument elektroniczny]. 2016, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej,
25. Osiński Z, Patyra E. Nawozy naturalne i organiczne jako źródło zanieczyszczenia środowiska substancjami przeciwbakteryjnymi. Med Weter. 2022: 78 (4): 173-183 doi:10.21521/mw.6638.
26. Hagenaars RH, Heijungs R, de Koning A, Tukker A, Wang R. The greenhouse gas emissions of pharmaceutical consumption and production: an input-output analysis over time and across global supply chains. Lancet Planet Health. 2025 Mar;9(3):e196-e206. doi: 10.1016/S2542-5196(25)00028-2.
27. Hess J, Bednarz D, Bae J, Pierce J. Petroleum and health care: evaluating and managing health care's vulnerability to petroleum supply shifts. Am J Public Health. 2011;101(9): 1568-79 doi:10.2105/AJPH.2011.300233.
28. Bara M, Janczak A. Toxicity of anesthetic gases: exposure in operating rooms and influence on the environment. Prospects in Pharmaceutical Sciences. 2023; 21(3): 1–5 doi:10.56782/pps.157.
29. Komitet Problemowy ds. Kryzysu Klimatycznego przy Prezydium PAN. Komunikat 04/2024 na temat wpływu zmiany klimatu na zdrowie, Warszawa 21.05.2024

Received: 05.06.2026
Accepted for publication: 05.11.2026
Otrzymano: 05.06.2026 r.
Zaakceptowano do publikacji: 05.11.2026 r.

Address for correspondence:
Adres do korespondencji:
Marta Wiejak-Giza
Szkoła Doktorska Śląskiego Uniwersytetu Medycznego
w Katowicach
email: mwiejak3@gmail.com

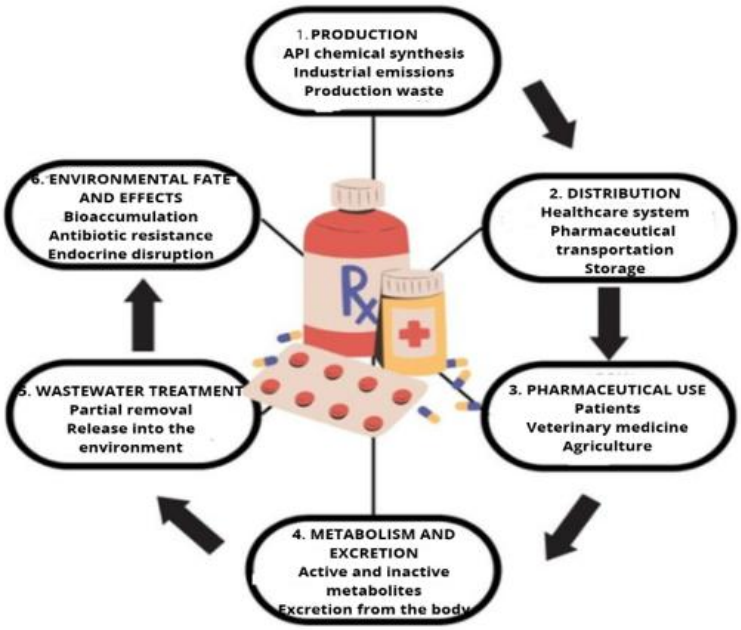


Fig. 1. Stages of pharmaceutical product manufacturing and use. Source: Authors' own work
Ryc. 1. Etapy wytwarzania i użytkowania produktu farmaceutycznego. Źródło: opracowanie własne.

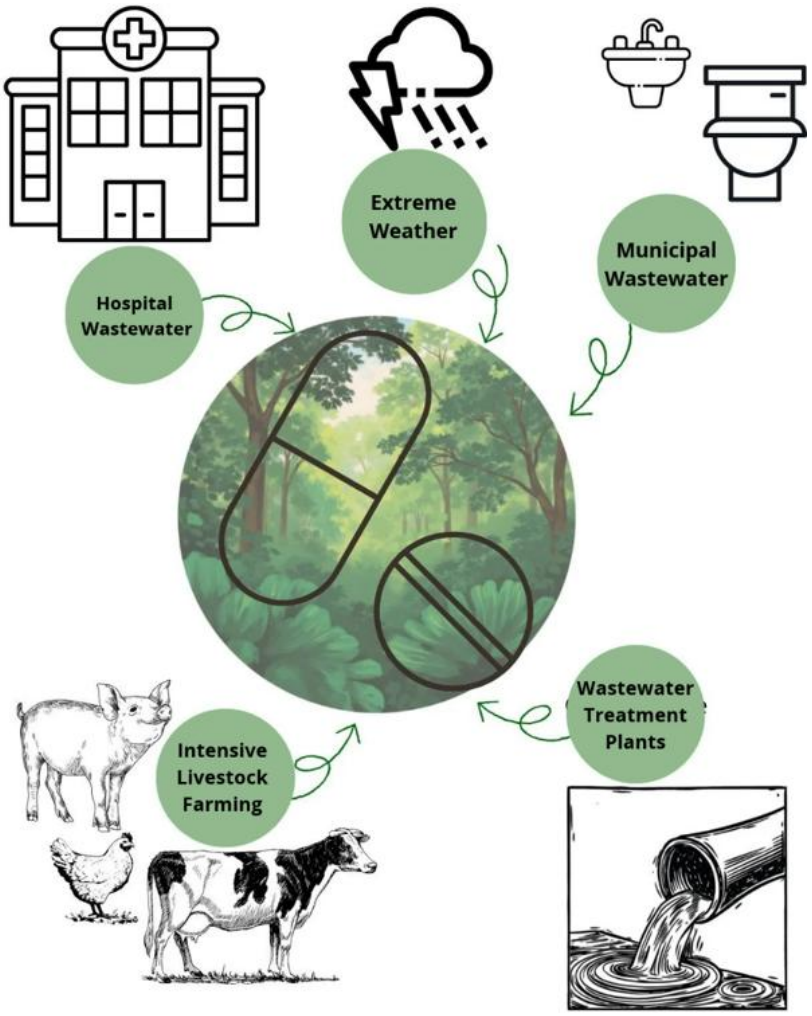


Fig. 2. Potential sources of pharmaceuticals in the environment. Source: Authors' own work
Ryc. 2. Potencjalne źródła farmaceutyków w środowisku. Źródło: opracowanie własne.

10.32394/pe/242585

Marta Wiejak-Giza[1] , *Grzegorz Dziubanek*[2]

HOW CAN PHARMACEUTICALS AFFECT THE ENVIRONMENT: A NARRATIVE LITERATURE REVIEW

W JAKI SPOSÓB FARMACEUTYKI MOGĄ ODDZIAŁYWAĆ NA ŚRODOWISKO – NARRACYJNY PRZEGLĄD LITERATURY

[1]Doctoral School, Medical University of Silesia in Katowice, Poland
Szkoła Doktorska Śląskiego, Uniwersytetu Medycznego w Katowicach

[2]Department of Environmental Health, Faculty of Public Health, Medical University of Silesia in Katowice, Poland
Katedra Zdrowia Środowiskowego, Wydział Zdrowia Publicznego Śląskiego Uniwersytetu Medycznego

STRESZCZENIE

Rozwój medycyny umożliwia skuteczniejszą walkę z coraz większą liczbą jednostek chorobowych, co jest możliwe m.in. dzięki intensywnemu postępowi przemysłu farmaceutycznego. Obecnie produkcja leków zwiększa możliwości terapeutyczne, co w ujęciu praktycznym skutkuje poprawą jakości oraz wydłużeniem życia pacjentów. Jednocześnie wzrost produkcji i konsumpcji leków może wiązać się z istotnym, szkodliwym oddziaływaniem na środowisko naturalne. Celem pracy jest przegląd aktualnego stanu wiedzy na temat konsekwencji środowiskowych i zdrowotnych stosowania na coraz większą skalę środków farmaceutycznych i ich metabolitów, a także wskazanie możliwych działań profilaktycznych. W pracy dokonano przeglądu aktualnej literatury naukowej w zakresie poruszanej tematyki. Odpady farmaceutyczne mogą przedostawać się do środowiska różnymi drogami, m.in. poprzez ścieki komunalne oraz niewłaściwie oczyszczone ścieki przemysłowe. Substancje lecznicze stanowią potencjalne zagrożenie dla ekosystemów ze względu na ich zdolność do bioakumulacji. Ponadto, negatywny wpływ na środowisko mogą wykazywać nie tylko substancje czynne, lecz także ich metabolity powstające w wyniku przemian metabolicznych zachodzących w organizmie człowieka jak i w środowisku. Narażone są zarówno ekosystemy wodne, w których farmaceutyki mogą zaburzać cykle rozwojowe organizmów, a także ekosystemy glebowe, stanowiące podstawę produkcji żywności. W konsekwencji obecność farmaceutyków w środowisku może przyczyniać się do zaburzeń równowagi biologicznej, spadku bioróżnorodności oraz rozwoju antybiotykooporności. Dlatego konieczne jest wdrażanie skutecznych systemów monitoringu, właściwej utylizacji odpadów farmaceutycznych oraz technologii ograniczających emisję substancji farmakologicznie aktywnych w lekach do środowiska. Problem obecności farmaceutyków w środowisku staje się coraz większym wyzwaniem dla ochrony ekosystemów oraz zdrowia publicznego. Konieczne są dalsze badania nad skutkami długotrwałej ekspozycji organizmów na substancje farmaceutyczne oraz rozwój skutecznych metod ograniczania ich emisji do środowiska.

Słowa kluczowe: *środowisko, farmaceutyki, metabolity, zanieczyszczenia zagrożenia zdrowia*

WPROWADZENIE

Jednym z przełomowych wydarzeń w historii farmakologii było zsyntetyzowanie w 1897 roku kwasu acetylosalicylowego przez Felixa Hoffmanna w laboratoriach firmy Bayer AG. W 1899 roku rozpoczęto jego produkcję na skalę przemysłową pod nazwą handlową Aspirin. Od tego czasu rozwój syntezy chemicznej substancji leczniczych dynamicznie przyspieszył, kształtując współczesną farmakoterapię (1). Obecnie, niemal 130 lat po wprowadzeniu kwasu acetylosalicylowego do lecznictwa, zdecydowana większość dostępnych produktów leczniczych zawiera aktywne substancje farmaceutyczne (API, ang. *Active Pharmaceutical Ingredients*) otrzymywane metodami syntezy chemicznej. Szacuje się, że około 90% API obecnych na rynku ma pochodzenie syntetyczne (2).

Intensywny rozwój przemysłu farmaceutycznego znacząco zwiększył możliwości terapeutyczne, diagnostyczne oraz profilaktyczne, przyczyniając się do zwiększenia przewidywanej długości życia oraz poprawy jego jakości. Jednocześnie jednak rosnąca produkcja i konsumpcja leków wiąże się z ich nieuniknionym uwalnianiem do środowiska naturalnego na różnych etapach wytwarzania i użytkowania produktu farmaceutycznego – od procesu wytwarzania, poprzez stosowanie, aż po niewłaściwą utylizację, co przedstawiono na Ryc. 1.

Obecność substancji czynnych oraz ich metabolitów w środowisku stanowi współcześnie jedno z istotnych wyzwań ekologicznych i zdrowotnych. Zjawisko to budzi liczne obawy naukowców przed negatywnymi konsekwencjami zarówno krótko, jak i długoterminowymi. Rozwój przemysłu farmaceutycznego jest koniecznością służącą ochronie zdrowia ludzi, przy czym musi on być zgodny z zasadami zrównoważonego rozwoju. Coraz większą uwagę zwraca się także na wdrażanie promowanej przez Światową Organizacją Zdrowia (WHO, ang. *World Health Organization*) koncepcji One Health (Jedno Zdrowie), która opiera się na uznaniu ścisłego związku pomiędzy zdrowiem ludzi, zwierząt oraz środowiskiem. Idea zakłada, że zagrożenia zdrowotne, takie jak choroby zakaźne, odporność na antybiotyki czy zmiany klimatyczne mogą być skutecznie kontrolowane tylko dzięki współpracy międzysektorowej obejmującej takie dziedziny jak: medycyna, weterynaria, ekologia oraz nauki o środowisku. Zasadniczym celem jest holistyczne podejście do zapobiegania epidemiom, minimalizacja ryzyka zoonoz i poprawy zdrowia globalnego ludności. Środowiskowe narażenie na farmaceutyki i ich metabolity może negatywnie oddziaływać nie tylko na organizmy wodne i glebowe, lecz także pośrednio na zdrowie człowieka (3).

Celem niniejszej pracy jest przegląd aktualnego stanu wiedzy na temat konsekwencji środowiskowych i zdrowotnych stosowania na coraz większą skalę środków farmaceutycznych i ich metabolitów, a także wskazanie możliwych działań profilaktycznych.

MATERIAŁ I METODY

Dla przedstawienia środowiskowych konsekwencji rozwoju przemysłu farmaceutycznego dokonano narracyjnego przeglądu danych literaturowych opublikowanych w latach 2015-2026, dostępnych za pośrednictwem baz PubMed oraz Google Scholar. W procesie doboru literatury uwzględniono publikacje naukowe odnoszące się bezpośrednio lub pośrednio do zagadnień dotyczących oddziaływania farmaceutyków na środowisko. Wyszukiwanie literatury przeprowadzono z wykorzystaniem następujących fraz: „environmental pollution from pharmaceuticals", "climate changes and health", "pollution of water ecosystems", "One Health".

Analizowano publikacje w języku polskim i angielskim, których przydatność dla tematyki pracy oceniano na podstawie tytułu i abstraktu. Do opracowania włączono publikacje spełniające kryteria tematyczne, w tym prace przeglądowe, przeglądy systematyczne, metaanalizy oraz badania oryginalne, udostępnione w modelu otwartego dostępu (Open Access).

Wszystkie ryciny zamieszczone w pracy stanowią opracowanie własne autorów. Do ich przygotowania wykorzystano elementy graficzne dostępne w serwisie Canva w ramach darmowej licencji.

WYNIKI I DYSKUSJA

Losy środków farmaceutycznych w środowisku. Zanieczyszczenia stanowiące zagrożenie dla środowiska, zwierząt oraz ludzi mogą powstawać na każdym etapie wytwarzania i użytkowania produktu farmaceutycznego. Takimi związkami mogą być zarówno substancje tworzące API, substancje pomocnicze w leku, jak i materiały wykorzystywane jako opakowania. W trakcie procesu wytwarzania leków powstają produkty syntezy, produkty uboczne reakcji, a także stosowane są rozpuszczalniki. W związku z faktem, że substancje API muszą zapewnić odpowiednią aktywność biologiczną oraz stabilność już przy niskich stężeniach, do ich produkcji wybiera się cząsteczki o specyficznej konstrukcji, określonej lipofilności, oraz rozpuszczalności (4).

Leki mogą przedostawać się do środowiska różnymi drogami. Przykładowe drogi przedostania się farmaceutyków do środowiska przedstawiono na Ryc. 2.

Po podaniu leku do organizmu człowieka następuje proces uwalniania substancji czynnej z określonej postaci leku, a następnie wchłaniania do organizmu. Niewchłonięta część może zostać wydalona z kałem, natomiast część wchłonięta przedostaje się do krążenia ogólnoustrojowego i tkanek. Farmaceutyk po dostaniu się do organizmu ulega reakcjom metabolicznym i wraz metabolitami jest wydalany m.in. z moczem. Znaczna część leków wydalana jest w formie niezmienionej. Leki do stosowania miejscowego usuwane są z powierzchni skóry np. podczas korzystania z prysznica czy mycia dłoni itp., w taki sam sposób jak medyczne produkty do higieny osobistej. Ponadto, w celu usuwania niechcianych lub przeterminowanych leków wielu użytkowników nadal wykorzystuje w swoich gospodarstwach domowym kanalizację ściekową lub kosze na śmieci. Wyroby farmaceutyczne również są wylewane do zlewu lub toalety, lub są wyrzucane do nieprzeznaczonych do tego celu śmietników (5).

Lek i jego metabolity wydalone z moczem lub kałem przez osoby je zażywające trafiają do kanalizacji, a następnie do oczyszczalni ścieków. W ściekach spotyka się zarówno leki jak i ich aktywne biologicznie metabolity, które przedostają się do oczyszczalni ścieków, gdzie podlegają biodegradacji technologią osadu czynnego. Niestety, znane technologie oczyszczania ścieków z pozostałości farmaceutycznych i innych zanieczyszczeń nie zapewniają 100% eliminacji tego rodzaju zanieczyszczeń. Dlatego wraz ze ściekami oczyszczonymi przedostają się one do wód powierzchniowych, gdzie wbudowują się w łańcuch pokarmowy.

Dodatkowo, w wyniku ekstremalnych zjawisk pogodowych np. ulew, intensywnych roztopów czy silnych burz może dochodzić do przepełnienia kanalizacji i pominięcia oczyszczalni ścieków przez zanieczyszczoną wodę pochodzącą zarówno ze źródeł komunalnych, jak i przemysłowych. Tym samym do środowiska trafiają wyższe stężenia zanieczyszczeń pochodzenia farmaceutycznego. Warto w tym miejscu wspomnieć, że w związku z zachodzącymi zmianami klimatu tego typu sytuacje są coraz częstsze. Innym skutkiem zmian klimatu, a dokładnie jego ocieplenia, jest wzrastające prawdopodobieństwo wystąpienia suszy. Jednym ze sposobów przeciwdziałania jej skutkom jest zwiększone nawadnianie upraw z wykorzystaniem wody pochodzącej z oczyszczalni, w której mogą znajdować się pozostałości farmaceutyczne (6), jednak ponowne wykorzystanie odzyskanej wody do nawadniania upraw zależy od przepisów prawa obowiązujących w kraju.

W wyniku nawadniania upraw wodą pochodzącą z oczyszczalni skażeniu ulegać może gleba orna oraz uprawy, które mogą być wykorzystywane jako pasza dla zwierząt lub żywność trafiająca do konsumentów. W rolnictwie środki farmaceutyczne stosowane są w hodowli

zwierząt na masową skalę. Niekontrolowany proceder wykorzystywania farmaceutyków w gospodarstwach takich jak np. fermy drobiu, bydła itp. może znamiennie przyczyniać się do rozwoju szczepów bakterii opornych na znane obecnie antybiotyki (7).

Poza gospodarstwami domowymi istotnym źródłem zanieczyszczenia środowiska preparatami farmaceutycznymi są również szpitale. Zarówno skład chemiczny ścieków szpitalnych, jak i stężenie zawartych w nich zanieczyszczeń bardzo różni się od zwykłych ścieków komunalnych. Dlatego istotnym działaniem jest poddawanie takich ścieków szpitalnych oczyszczeniu jeszcze przed odprowadzeniem ich do standardowej kanalizacji, aczkolwiek jest to rozwiązanie stosowane sporadycznie (6).

Rozwój medycyny wiąże się z większą dostępnością leków niż kiedykolwiek wcześniej. W krajach wysoko rozwiniętych leki są łatwo dostępne, a społeczeństwo starzeje się, co powoduje, że w skali światowej obserwuje się problem rosnącego spożycia leków oraz nieodpowiedniej utylizacji leków niewykorzystanych. Duża część pacjentów nie dostarcza przeterminowanych farmaceutyków do dedykowanych temu celowi punktów odbioru odpadów. Stąd też takie leki często trafiają na składowiska wraz innymi odpadami lub do ścieków, prowadząc do skażenia środowiska. Jak wskazują dane literaturowe, farmaceutykami najczęściej wykrywanymi w środowisku wodnym są antybiotyki, niesteroidowe leki przeciwzapalne (NLPZ), leki przeciwdepresyjne oraz kardiologiczne (8).

Szczególną uwagę należy zwrócić na substancje chemiczne zaburzające funkcjonowanie układu hormonalnego (EDCs, ang. *endocrine-disrupting chemicals*). Są to egzogenne substancje chemiczne, które mogą zakłócać prawidłowe funkcjonowanie układu hormonalnego ludzi i zwierząt poprzez m.in. oddziaływanie na receptory hormonalne, modulację szlaków sygnałowych oraz wpływ na syntezę, transport, metabolizm lub działanie hormonów w tkankach docelowych (9). Wśród związków wykazujących właściwości endokrynnie czynne, które mogą być wykrywane w ściekach i wodach powierzchniowych, wymienia się przede wszystkim naturalne estrogeny, takie jak estron (E1) i 17β-estradiol (E2) oraz syntetyczne estrogeny, w tym 17α-etynyloestradiol (EE2), stosowane m.in. jako składniki hormonalnych środków antykoncepcyjnych. W środowisku mogą być również obecne inne hormony steroidowe, w tym gestageny, androgeny oraz kortykosteroidy. W literaturze wskazuje się również na możliwość występowania takich właściwości w przypadku m.in. wybranych leków przeciwdepresyjnych z grupy selektywnych inhibitorów wychwytu zwrotnego serotoniny (SSRI), leków przeciwdrgawkowych, takich jak karbamazepina, oraz fibratów stosowanych w leczeniu zaburzeń lipidowych (10). Oddziaływanie substancji o właściwościach endokrynnie czynnych może prowadzić do zaburzenia funkcjonowania różnych osi

hormonalnych, w tym związanych z hormonami tarczycy, estrogenami i androgenami. W konsekwencji długotrwała ekspozycja na tego rodzaju związki może wiązać się z zaburzeniami procesów metabolicznych, reprodukcyjnych i rozwojowych, a także zwiększonym ryzykiem występowania niektórych chorób, w tym otyłości, cukrzycy typu 2 oraz nowotworów hormonozależnych (9).

Poza wymienionymi lekami niebezpieczne dla środowiska są także hormony oraz środki przeciwpasożytnicze stosowane w weterynarii (11).

Duże zagrożenie dla środowiska stanowi zdolność farmaceutyków bądź ich metabolitów do bioakumulacji (czyli procesu kumulowania zanieczyszczeń pobieranych z środowiska w tkankach żywych organizmów), następnie do biomagnifikacji polegającej na zwiększaniu się stężenia tych substancji na kolejnych, wyższych poziomach troficznych łańcucha pokarmowego (12) oraz do ich toksycznego wpływu na dzikie gatunki zwierząt. Konsekwencją tych procesów może być występowanie u narażonych zwierząt istotnych zmian fizjologicznych, behawioralnych czy też reprodukcyjnych (4).

Ścieki komunalne jako narzędzie monitorowania substancji psychoaktywnych. Ścieki komunalne mogą stanowić źródło informacji o występowaniu i rozpowszechnieniu substancji psychoaktywnych w populacji. Analiza próbek ścieków komunalnych stanowi coraz częściej wykorzystywane narzędzie monitorowania występowania nowych substancji psychoaktywnych (NPS, ang. *new psychoactive substances*) w populacji. Metoda ta może być stosowana do oceny trendów dotyczących stosowania tych substancji oraz identyfikacji tych, których obecność może nie być rozpoznana na podstawie tradycyjnych metod monitorowania. Pomimo ograniczeń związanych z kosztami oraz czasochłonnością pobierania i analizy próbek, zastosowanie nowoczesnych metod chemii analitycznej umożliwia wykrywanie nawet niewielkich stężeń NPS w ściekach. Ograniczeniem metody jest m.in. znaczne rozcieńczenie badanych substancji w ściekach, wynikające zarówno z objętości przepływających ścieków, jak i obecności moczu osób, które nie stosują tego rodzaju substancji (13).

Przykładem zastosowania tej metody jest badanie przeprowadzone przez Jaunay i wsp., w którym analizowano próbki ścieków pobierane na terenie Australii od lutego 2022 r. do lutego 2023 r. z 57 zlewni ściekowych. W próbkach wykryto m.in. hydroksyetaminę, mefedron, metoksetaminę, metylon, mitragyninę, pentylon i eutylon. Zaobserwowano również zmiany w częstości wykrywania poszczególnych substancji, w tym tendencję spadkową w przypadku eutylonu. Wyniki badania wskazują, że analiza ścieków może stanowić przydatne narzędzie monitorowania występowania NPS w populacji oraz potencjalnie wspierać systemy wczesnego ostrzegania (14).

Wpływ na ekosystemy wodne. Biorąc pod uwagę ogół środowiska, wykazano że farmaceutyki kumulują się w roślinach i zwierzętach ekosystemów wodnych (11). Do negatywnych efektów tego zjawiska zalicza się m.in. zaburzenia układu hormonalnego oraz reprodukcji ryb, skorupiaków, mięczaków i innych organizmów wodnych, jak też rozwój oporności mikroorganizmów na różne typy antybiotyków (15). Leki wykorzystywane w weterynarii, głównie antybiotyki, mogą, w wyniku niedokładnego oczyszczania ścieków, przedostać się zarówno do zbiorników wodnych, jak i do wód płynących. Coraz istotniejszym źródłem skażenia wód są również akwakultury. W hodowlach ryb stosowane mogą być również antybiotyki celem uniknięcia rozprzestrzeniania się chorób bakteryjnych (16). Akwakultury wywierają negatywny wpływ na środowisko również w wyniku kumulowania się na stosunkowo małej powierzchni wydalin ryb, niezjedzonej paszy, pozostałości stosowanych leków). Ryby w akwakulturach ulegają zatruciu produktami rozkładu własnych wydalin, niezjedzonej paszy i obumarłych ryb. Takie ekosystemy zagrożone są eutrofizacją, prowadzącą do powstawania stref beztlenowych w wodach i zamierania żyjących tam organizmów (17). Wprowadzone do środowiska wodnego pozostałości farmaceutyków mogą ulegać różnym procesom np. bioakumulacji, biodegradacji, fotolizie lub hydrolizie itd. (18). Najsilniejsza kumulacja zanieczyszczeń następuje w osadach dennych zbiorników wodnych.

Przykładem często stosowanego leku, który wywiera szkodliwy wpływ na środowisko wodne, jest diklofenak – niesteroidowy lek przeciwzapalny stosowany w leczeniu bólu różnego pochodzenia oraz pourazowych i pooperacyjnych stanów zapalnych. Zażywany jest przez pacjentów po zabiegach stomatologicznych lub ortopedycznych, a także w przypadku występowania bólów miesiączkowych oraz bólów pochodzenia reumatycznego i zwyrodnieniowego. W Polsce lek ten jest dostępny w różnych postaciach farmaceutycznych, m.in. w postaci żelu do stosowania miejscowego, tabletek i kapsułek, plastrów, a także płynów do stosowania zewnętrznego, np. aerozoli i płynów do płukania jamy ustnej. Dostępne są również postacie przeznaczone do podawania pozajelitowego oraz czopki. Część wymienionych preparatów jest dostępna bez recepty (OTC, ang. *over-the-counter*), natomiast pozostałe wymagają recepty lekarskiej (19). Obecne w ekosystemach wodnych leki mogą ulegać kumulacji w występujących w tym środowisku roślinach, kręgowcach i bezkręgowcach np. w glonach, w organizmach małży, krabów, a także ryb, płazów oraz ptaków wodnych. Jak wskazują dane literaturowe, diklofenak wykazuje działanie toksyczne wobec wymienionych organizmów, ale również w wyniku biomagnifikacji w łańcuchu pokarmowym może wykazywać toksyczność wobec zwierząt lądowych spożywających ryby i inne organizmy

wodne (20). Do narażenia może dochodzić również w efekcie pojenia zwierząt hodowlanych np. bydła, skażoną wodą.

Inne leki należące do grupy NLPZ również mogą wykazywać działanie toksyczne wobec organizmów wodnych, czego przykładem jest ibuprofen (21). Jego zużycie, podobnie jak w przypadku diklofenaku, jest wysokie; dane literaturowe wskazują, że w Polsce zużycie ibuprofenu sięgało około 58 ton rocznie (22). Lek posiada specyficzną budowę która powoduje że jego obecność w środowisku jest tak niebezpieczna – to substancja o wysokim stopniu lipofilności oraz niskiej podatności na biodegradację. Jego obecność w środowisku wynika z tego, że jest to lek wykorzystywany w medycynie weterynaryjnej oraz podobnie jak w przypadku diklofenaku, część preparatów zawierających ibuprofen jest w Polsce dostępna bez recepty (OTC), co oznacza łatwą dostępność. Długotrwała ekspozycja organizmów wodnych na działanie tego leku może powodować działanie cytotoksyczne i genotoksyczne, wysoki stres oksydacyjny komórek oraz wpływać na tempo wzrostu i reprodukcji. Ekspozycja organizmów modelowych wykorzystywanych do badania działań niepożądanych leków w środowisku – małże *Dreissena polimorpha* oraz danio pręgowany *(Danio rerio*) pokazała, że ibuprofen działa na nie bardzo niekorzystnie. Długotrwała ekspozycja małż spowodowała u nich uszkodzenia genetyczne oraz komórkowe, natomiast u danio zaobserwowano wady rozwojowe głowy, deformacje szkieletów, hipopigmentację, obrzęk osierdzia i upośledzenie częstości akcji serca. U niektórych gatunków ryb słodkowodnych również w wyniku ekspozycji na ibuprofen zaobserwowano m.in. zmiany w nerkach i zmiany ekspresji białka szoku cieplnego – przykładem organizmu u którego takie zmiany zaobserwowano jest pstrąg tęczowy *Oncorhynchus mykiss* (21).

Należy mieć również świadomość, że do środowiska często trafiają metabolity środków farmaceutycznych, które następnie mogą wchodzić w reakcje z innymi związkami np. z antybiotykami tworząc nowe substancje, które dotychczas nie zostały zbadane przez naukowców, a tym samym skala ich toksycznego oddziaływania wobec różnych organizmów nie została jeszcze poznana (22).

Wpływ na ekosystemy glebowe. Preparaty farmaceutyczne w mniejszym stopniu oddziałują na ekosystemy glebowe niż na ekosystemy wodne. Do zanieczyszczenia gleb najczęściej dochodzi w wyniku stosowania przez rolników odchodów zwierzęcych jako naturalnych nawozów gleb ornych (23). Do gleb mogą trafić zarówno leki (np. przeciwpasożytnicze, antybiotyki itp.), hormony wzrostu, jak również ich metabolity.

Najbardziej niekorzystny wpływ na ekosystemy glebowe wykazują antybiotyki. Ze względu na możliwy długi okres biologicznego półtrwania następuje ich powolna

biodegradacja oraz może dochodzić do ich kumulacji w środowisku. Wykazano, że niektóre chemioterapeutyki np. sulfametoksazol ulegają silnej biodegradacji w glebach, a antybiotyki np. amoksycylina i tetracyklina, słabszej. Zawarte w glebach antybiotyki mogą wykazywać negatywny wpływ na wzrost oraz rozwój roślin, w tym roślin uprawnych stanowiących źródło pożywienia dla ludzi (24).

Interesujący jest fakt, że niektóre metabolity środków farmaceutycznych po wydaleniu z organizmu zwierząt mogą przekształcić się do aktywnej postaci leku, powodując wysoką szkodliwość dla żyjących w ekosystemach glebowych organizmów zarówno ze strony cząsteczek macierzystych leku, jak i jego metabolitów. Najwyższe stężenia antybiotyków wykazywane są w nawozach z gospodarstw masowych, szczególnie tych zajmujących się hodowlą trzody chlewnej (25).

Wpływ na jakość powietrza. Przemysł farmaceutyczny stanowi część szeroko rozumianego systemu ochrony zdrowia, którego funkcjonowanie wiąże się ze znaczącym zużyciem energii, surowców oraz zasobów naturalnych, a w konsekwencji również z emisją gazów cieplarnianych. Przyjmuje się, że przemysł farmaceutyczny jest jednym z segmentów o największej emisyjności dwutlenku węgla i innych gazów szklarniowych (4,26). Emisje związane z działalnością przemysłu farmaceutycznego powstają na wielu etapach produkcji oraz konsumpcji produktu leczniczego. Obejmują one przede wszystkim pozyskiwanie i przetwarzanie surowców, syntezę substancji czynnych, produkcję postaci farmaceutycznych, procesy oczyszczania i sterylizacji, transport surowców i produktów, a także wytwarzanie oraz zagospodarowanie opakowań. Szczególne znaczenie ma przy tym wysokie zapotrzebowanie energetyczne procesów produkcyjnych, ponieważ wytwarzanie produktów leczniczych wymaga m.in. utrzymywania odpowiednich warunków temperatury, wilgotności i czystości mikrobiologicznej oraz stosowania energochłonnych procesów technologicznych.

Szacuje się, że blisko 99% substancji czynnych oraz reagentów wykorzystywanych w przemyśle farmaceutycznym ma swoje źródło w przetwórstwie ropy naftowej (27). W przemyśle farmaceutycznym ropa naftowa to bardzo istotny surowiec, który wykorzystywany jest jako paliwo transportowe, a także składnik do produkcji surowców. Przykładami substancji otrzymywanych z wykorzystaniem surowców petrochemicznych są m.in. benzen i jego pochodne, wykorzystywane jako związki wyjściowe w syntezie chemicznej. Produkty przemysłu petrochemicznego znajdują również zastosowanie w wytwarzaniu materiałów opakowaniowych oraz niektórych substancji pomocniczych, takich jak parafina czy wazelina. Zależność przemysłu farmaceutycznego od surowców kopalnych ma znaczenie zarówno środowiskowe, jak i gospodarcze. Zatem wszelkiego rodzaju zawirowania na rynku np.

związane z przedłużającym się kryzysem w Cieśninie Ormuz, mogą negatywnie wpłynąć na dostępność farmaceutyków dla pacjentów (27). Wydobycie, przetwarzanie i transport ropy naftowej wiążę się z emisją gazów cieplarnianych, a dodatkowe emisje powstają podczas wykorzystania paliw kopalnych do produkcji energii i transportu. Oznacza to, że ślad węglowy produktu leczniczego nie jest ograniczony wyłącznie do etapu jego wytwarzania w zakładzie farmaceutycznym, lecz obejmuje cały łańcuch dostaw.

Co istotne, ślad węglowy związany z globalną konsumpcją produktów farmaceutycznych wykazuje wyraźną tendencję wzrostową – w latach 1995-2019 wzrósł o 77%, z 124,2 do 219,6 Mt CO_2e, przy czym wzrost ten był w znacznym stopniu napędzany przez Stany Zjednoczone i Chiny (26).

Kolejnym źródłem emisji związanych z sektorem ochrony zdrowia są gazy stosowane w procedurach medycznych (28). Zalicza się do nich przede wszystkim podtlenek azotu, który jest powszechnie stosowany jako środek znieczulający i przeciwbólowy np. w anestezjologii, stomatologii, ginekologii itp. Podtlenek azotu obok dwutlenku węgla i metanu zaliczany jest do grupy gazów cieplarnianych najistotniej przyczyniających się do mechanizmu ocieplenia klimatu. Innym przykładem gazu medycznego wpływającego na globalne ocieplanie jest izofluran, który jest powszechnie wykorzystywany w chirurgii oraz anestezji. Ze względu na fakt, że ilość wykonywanych procedur medycznych stale rośnie, wzrasta również wykorzystywanie wspomnianych gazów medycznych (28).

Emisja gazów cieplarnianych związana z funkcjonowaniem przemysłu farmaceutycznego i całego sektora ochrony zdrowia ma znaczenie nie tylko z perspektywy środowiskowej, ale również zdrowia publicznego. Zwiększające się stężenie gazów cieplarnianych w atmosferze przyczynia się do globalnego ocieplenia, którego jednym z następstw jest wzrost częstości i intensywności ekstremalnych zjawisk pogodowych, w tym fal upałów (7). Zmieniający się klimat bezpośrednio może wpływać na zdrowie i życie ludzi, a przykładem takiego oddziaływania jest udar cieplny czyli taki stan organizmu w którym nie może on już kontrolować temperatury. W 2022 roku w trakcie trwania lata w Europie aż 61 672 osoby zmarły w wyniku działania upałów. Prognozy wskazują, że w nadchodzących dekadach częstość występowania ekstremalnych zjawisk pogodowych w Europie będzie wzrastać. Konsekwencją tego trendu będzie rosnące znaczenie śmiertelności związanej z ekspozycją na wysokie temperatury jako istotnego problemu zdrowia publicznego, co może prowadzić do zahamowania, a nawet odwrócenia dotychczasowego trendu wydłużania się średniej długości życia. Ponadto, wzrost temperatury otoczenia wiąże się ze zwiększonym ryzykiem występowania zaburzeń rytmu serca, zawału mięśnia sercowego oraz choroby wieńcowej (29).

Tym samym emisje gazów cieplarnianych związane z działalnością przemysłu farmaceutycznego oraz szerzej rozumianego sektora ochrony zdrowia, mogą tworzyć pośrednią zależność pomiędzy funkcjonowaniem systemu ochrony zdrowia a zdrowiem populacji. Sektor, którego podstawowym celem jest ochrona i poprawa zdrowia człowieka, jednocześnie przyczynia się do emisji substancji wpływających na klimat. Ograniczanie tego oddziaływania, m.in. poprzez zwiększanie efektywności energetycznej, wykorzystanie odnawialnych źródeł energii, optymalizację łańcuchów dostaw oraz ograniczanie wykorzystania materiałów i surowców pochodzenia kopalnego, stanowi zatem jeden z istotnych elementów działań na rzecz bardziej zrównoważonego systemu ochrony zdrowia.

WNIOSKI

Rozwój przemysłu farmaceutycznego, choć korzystny dla zdrowia ludzi, stanowi czynnik generujący istotne zagrożenia dla środowiska, a w dalszej perspektywie może stanowić również czynnik ryzyka zdrowotnego dla społeczeństwa. Substancje farmaceutyczne i ich metabolity trafiają do wód, gleby oraz powietrza zanieczyszczając poszczególne komponenty środowiska, wpływając na różne organizmy oraz na całe ekosystemy. Włączenie tych związków do łańcucha pokarmowego sprawia, że ostatecznie mogą trafić do organizmu człowieka wywołując szereg zaburzeń stanu zdrowia. Przemysł farmaceutyczny jest także branżą charakteryzującą się istotnymi emisjami gazów cieplarnianych do atmosfery, znacząco przyczyniając się do ocieplenia klimatu, czego konsekwencje środowiskowe, zdrowotne, społeczne i ekonomiczne będą coraz bardziej odczuwalne przez społeczeństwo. Stąd też, przemysł farmaceutyczny powinien przywiązywać coraz większą wagę do zasady zrównoważonego rozwoju, optymalizacji i poprawy efektywności procesu produkcji, ograniczając zużycie surowców kopalnych, a także poszukując wraz z innymi branżami rozwiązań umożliwiających skuteczną i bezpieczną utylizację odpadów, oczyszczanie środowiska z pozostałości farmaceutyków i ich metabolitów. W związku z coraz większym zanieczyszczeniem środowiska farmaceutykami istnieje ogromna potrzeba ograniczenia przedostawania się ich do środowiska oraz zwiększenia stopnia oczyszczania ścieków z tego rodzaju zanieczyszczeń. Kolejną ważną sprawą jest wprowadzenie obowiązku podczyszczania ścieków szpitalnych.

Coraz istotniejszą rolę w tym zakresie odgrywa także wdrażanie koncepcji One Health, zgodnie z którą skuteczne zarządzanie zagrożeniami wymaga integracji wiedzy medycznej, weterynaryjnej i środowiskowej, aby chronić zdrowie ludzi, zwierząt i całego ekosystemu.

PIŚMIENNICTWO

1. Zdrojewicz Z, Jagodziński A, Kowalik-Jagodzińska M, Zielińska E. Stare i nowe oblicze aspiryny Pediatr Med Rodz. 2018: 14(4), 369–375. doi: 10.15557/PiMR.2018.0046
2. Synthetic vs. Natural APIs: Key Considerations for Pharmaceutical Manufacturers 2026. Available from: https://www.pharmasources.com/industryinsights/synthetic-vs-natural-apis-key-considerat-335215.html. Accessed: 30.04.2026
3. Adisasmito WB, Almuhairi S, Behravesh CB, Bilivogui P, Bukachi SA, Casas Net. al. One Health: A new definition for a sustainable and healthy future. PLoS Pathog. 2022; 18(6): e1010537. doi: 10.1371/journal.ppat.1010537.
4. Egaña I, Akhrimenko V, Ayerbe M, Abasolo E, Lertxundi U, Orive G Promoting sustainable pharmacy for tackling environmental pharmaceutical pollution. Drug Discov Today. 2026;31(1):104559 doi: 10.1016/j.drudis.2025.104559.
5. Benítez-Rico A, Pérez-Martínez A, Muñóz-López BI, Martino-Roaro L, Alegría-Baños JA, Vergara-Castañeda A, et al. Medical Household Waste as a Potential Environmental Hazard: An Ecological and Epidemiological Approach. Int J Environ Res Public Health. 2023;20(7):5366 doi:10.3390/ijerph20075366.
6. Äystö L, Vieno N, Fjäder P, Mehtonen J, Nystén T. Hospitals and households as primary emission sources for risk-posing pharmaceuticals in municipal wastewater, Ecotoxicol Environ Saf. 2023; 262: 115149 doi:10.1016/j.ecoenv.2023.115149.
7. Arker G, Miller FA. Tackling Pharmaceutical Pollution Along the Product Lifecycle: Roles and Responsibilities for Producers, Regulators and Prescribers. Pharmacy. 2024; 12(6):173 doi: 10.3390/pharmacy12060173.
8. Świacka K, Maculewicz J, Kowalska D, Caban M, Smolarz K, Świeżak J. Presence of pharmaceuticals and their metabolites in wild-living aquatic organisms – Current state of knowledge. J Hazard Mater. 2022: 424(A), 127350 doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.127350.
9. Turan S. Endocrine disrupting chemicals and bone.Best Pract Res Clin Endocrinol Metab. 2021(5):101495. doi: 10.1016/j.beem.2021.101495
10. Metcalfe CD, Bayen S, Desrosiers M, Muñoz G, Sauvé S, Yargeau V. An introduction to the sources, fate, occurrence and effects of endocrine disrupting chemicals released into the environment. Environ Res. 2022;207:112658. doi: 10.1016/j.envres.2021.

11. Kock A, Glanville HC., Law AC, Stanton, T Carter, LJ, Taylor, JC. Emerging challenges of the impacts of pharmaceuticals on aquatic ecosystems: A diatom perspective. Sci Total Environ. 2023:878:162939. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.162939
12. Danovaro R, Cocozza di Montanara A, Corinaldesi C, Dell'Anno A, Illuminati S, Willis T.J et al. Bioaccumulation and biomagnification of heavy metals in marine micro-predators. Commun Biol. 2023; 27;6(1):1206 doi:10.1038/s42003-023-05539-x.
13. Fitzgerald ND, Cottler LB, Palamar JJ. Public health surveillance of new psychoactive substances: recent developments. Curr Opin Psychiatry. 2024;37(4):270-276 doi: 10.1097/YCO.0000000000000938.
14. Jaunay E.L, Bade R, Paxton K.R, Nadarajan D, Barry D.C, Zhai Y, et al. Monitoring the use of novel psychoactive substances in Australia by wastewater-based epidemiology. Sci Total Environ. 2024: 919:170473. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.170473
15. Rodrigues F, Durães L, Simões NEC, Pereira AMPT, Silva LJG, João Feio M. Pharmaceuticals in urban streams: A review of their detection and effects in the ecosystem. Water Res. 2025;268(Pt B):122657. doi: 10.1016/j.watres.2024.122657.
16. Chen J, Sun R, Pan C, Pereira AMPT, Silva LJG, Feio MJ. Antibiotics and Food Safety in Aquaculture. J Agric Food Chem. 2020; 68(43):11908-11919 doi: 10.1016/j.watres.2024.122657.
17. Wang Z, Pu D, Zheng J, Li P, Lü H, Wei X, et al. Hypoxia-induced physiological responses in fish: From organism to tissue to molecular levels. Ecotoxicol Environ Saf. 2023; 267: 115609 doi:10.1016/j.ecoenv.2023.115609.
18. Saeed H, Padmesh S, Singh A, Nandy A, Singh SP, Deshwal RK. Impact of veterinary pharmaceuticals on environment and their mitigation through microbial bioremediation. Front Microbiol. 2024:15 1396116 doi: 10.3389/fmicb.2024.1396116.
19. Medycyna Praktyczna. Indeks Leków MP: Diklofenak. Available from: https://indeks.mp.pl/leki/subst.php?id=227. Accessed: 29.09.2026
20. Nosek K, Zhao D. Transformation products of diclofenac: Formation, occurrence, and toxicity implication in the aquatic environment. Water Res. 2024: 266, 122388 doi: 10.1016/j.watres.2024.122388.
21. Jan-Roblero J, Cruz-Maya JA. Ibuprofen: Toxicology and Biodegradation of an Emerging Contaminant. Molecules. 2023, 23;28(5):2097 doi: 10.3390/molecules28052097

22. Marchlewicz A, Guzik U, Wojcieszyńska D. Over-the-Counter Monocyclic Non-Steroidal Anti-Inflammatory Drugs in Environment—Sources, Risks, Biodegradation. Water Air Soil Pollut 226, 355 (2015) doi: 10.1007/s11270-015-2622-0.
23. Kodešová R, Grabic R, Kočárek M, Klement A, Golovko O, Fér M et al. Pharmaceuticals' sorptions relative to properties of thirteen different soils. Sci Total Environ. 2015;511:435-43. doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.12.088.
24. Wydro U, Wołejko E, Struk-Sokołowska J, Puchlik M. Pozostałości farmaceutyków w środowisku oraz możliwości ich usuwania Interdyscyplinarne zagadnienia w inżynierii i ochronie środowiska [Dokument elektroniczny]. 2016, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej,
25. Osiński Z, Patyra E. Nawozy naturalne i organiczne jako źródło zanieczyszczenia środowiska substancjami przeciwbakteryjnymi. Med Weter. 2022: 78 (4): 173-183 doi:10.21521/mw.6638.
26. Hagenaars RH, Heijungs R, de Koning A, Tukker A, Wang R. The greenhouse gas emissions of pharmaceutical consumption and production: an input-output analysis over time and across global supply chains. Lancet Planet Health. 2025 Mar;9(3):e196-e206. doi: 10.1016/S2542-5196(25)00028-2.
27. Hess J, Bednarz D, Bae J, Pierce J. Petroleum and health care: evaluating and managing health care's vulnerability to petroleum supply shifts. Am J Public Health. 2011;101(9): 1568-79 doi:10.2105/AJPH.2011.300233.
28. Bara M, Janczak A. Toxicity of anesthetic gases: exposure in operating rooms and influence on the environment. Prospects in Pharmaceutical Sciences. 2023; 21(3): 1–5 doi:10.56782/pps.157.
29. Komitet Problemowy ds. Kryzysu Klimatycznego przy Prezydium PAN. Komunikat 04/2024 na temat wpływu zmiany klimatu na zdrowie, Warszawa 21.05.2024

Received: 05.06.2026
Accepted for publication: 05.11.2026
Otrzymano: 05.06.2026 r.
Zaakceptowano do publikacji: 05.11.2026 r.

Address for correspondence:
Adres do korespondencji:
Marta Wiejak-Giza
Szkoła Doktorska Śląskiego Uniwersytetu Medycznego w Katowicach
email: mwiejak3@gmail.com