

Atmospheric pollution during the Covid-19 pandemics in Slovakia

Zanieczyszczenie atmosfery podczas pandemii Covid-19 na Słowacji

DOI: 10.15199/62.2023.3.5

Oceniono, za pomocą testu t , zmiany zawartości cząstek stałych w 8 regionach (krajach) Słowacji, aby sprawdzić istotność tych zmian podczas, przed i po lockdownach wprowadzonych w 2020 r. w porównaniu z danymi z 2019 r. Stwierdzona poprawa jakości powietrza nie była równomierna i raczej chwilowa. Nie utrzymywała się ona przez cały okres obowiązywania ograniczeń. Znaczne spadki odnotowano tylko w przypadku stężenia NO_2 . Na Słowacji zostały przekroczone ustalone przez Komisję Europejską limity dotyczące zanieczyszczenia pyłami. Przedstawiono również zwięzły przegląd literatury przedmiotu.

Słowa kluczowe: zanieczyszczenie powietrza ditlenkiem azotu na Słowacji, zanieczyszczenie powietrza pyłem zawieszonym $\text{PM}_{2.5}$ i PM_{10} na Słowacji

The changes in the particle pollution in eight Slovak regions were evaluated by a paired t -test to verify the significance of the concn. changes during, before and after the lockdowns introduced in 2020 as compared with those of 2019. The obsd. air quality improvement was not flat-rate and rather momentary, and it did not last even through the whole restriction period. Significant decreases were recorded only for NO_2 concn. The European Commission limits of particulate pollution were exceeded in Slovakia. A concise literature rev. was also included.

Keywords: nitrogen dioxide air pollution in Slovakia, $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} air pollution in Slovakia

Zwiększająca się urbanizacja niesie ze sobą wiele problemów, które wpływają na jakość życia w miastach. Jednym z najpoważniejszych jest zanieczyszczenie środowiska, zwłaszcza powietrza. Zanieczyszczenia komunikacyjne stanowią duży problem w miastach na całym świecie, w tym na Słowacji. W związku z pandemią Covid-19 i związanymi z nią lockdownami, już w 2020 r. zaczęto uwzględniać wpływ zastosowanych środków na zmniejszenie zanieczyszczenia powietrza. Niektóre wstępne badania wykazały, że nastąpiło znaczne ograniczenie korzystania z transportu publicznego, jak również mobilności osób w pobliżu węzłów komunikacyjnych¹⁾. W związku z rozprzestrzenianiem się na Słowacji wirusem, w marcu 2020 r. rząd słowacki zarządził lockdown, co oznaczało ograni-

The current trend of growing urbanization brings with it a number of problems that affect the quality of life in cities. One of the most serious is environmental pollution, especially air pollution. Transport pollution is a big problem in cities all over the world including Slovakia. In connection with the Covid-19 pandemic and in connection with the adoption of measures, particularly lockdowns, the impact of these measures on the reduction of air pollution began to be considered as early as 2020. Some initial studies have shown that there has been a significant reduction in the use of public transport as well as the mobility of people near the transport centre¹⁾. In March 2020, the Slovak government ordered the lockdown in response to the Slovakia-penetrating virus, which meant restricting the movement of people, including traveling to work. The first



Ing. Kristína BACULÁKOVÁ, PhD. (ORCID: 0000-0002-0143-7541) graduated in 2012 from the Faculty of International Relations, University of Economics in Bratislava, Slovak Republic. In 2016 she obtained a PhD degree in international economic relations at the same Faculty. She is currently working as an Assistant Professor and Vice-Dean for Development at the Faculty of International Relations, University of Economics in Bratislava. Her research interests include cultural and creative industries, smart city solutions, air quality.

Dr inż. Kristína BACULÁKOVÁ (ORCID: 0000-0002-0143-7541) w roku 2012 ukończyła studia na Wydziale Stosunków Międzynarodowych Uniwersytetu Ekonomicznego w Bratysławie (Słowacja). W 2016 r. na tym samym wydziale uzyskała stopień doktora w zakresie międzynarodowych stosunków gospodarczych. Obecnie pracuje jako adiunkt i prodziekan ds. rozwoju na Wydziale Stosunków Międzynarodowych Uniwersytetu Ekonomicznego w Bratysławie. Specjalność – przemysł kulturowy i kreatywny, rozwiązania smart city, jakość powietrza.



Doc. PhD. Rudolf KUCHARČÍK, PhD. (ORCID: 0000-0002-6131-9491) graduated from the Faculty of Political Science and International Relations of Matej Bel University. Currently working as an Associate professor at Faculty of International Relations, University of Economics, Bratislava, Slovakia. He is a Dean of this faculty. He is an author of more than 100 research papers and publications with about 70 citations. His research areas include International Relations, Culture in International Relations and Geopolitics.

Doc. dr Rudolf KUCHARČÍK (ORCID: 0000-0002-6131-9491) ukończył studia na Wydziale Politologii i Stosunków Międzynarodowych Uniwersytetu Mateja Bela. Obecnie pracuje jako profesor nadzwyczajny na Wydziale Stosunków Międzynarodowych Uniwersytetu Ekonomicznego w Bratysławie (Słowacja), którego jest dziekanem. Jest autorem ponad 100 prac naukowych i publikacji z ok. 70 cytowaniami. Specjalność – stosunki międzynarodowe, kultura w stosunkach międzynarodowych i geopolityka.

* Address for correspondence/Adres do korespondencji:

Faculty of International Relations, Dolnozemska cesta 1, 852 35 Bratislava, e-mail: kristina.baculakova@euba.sk

czenie ruchu ludzi, w tym podróży do pracy. Pierwszy lockdown trwał mniej więcej do początku maja 2020 r., ale jesienią 2020 r. przepisy dotyczące przemieszczania się osób zostały ponownie zaostrzone ze względu na pogarszającą się sytuację epidemiologiczną. Prezentowana praca jest wynikiem długoterminowych badań nad zanieczyszczeniem powietrza w wybranych ośrodkach miejskich na Słowacji. W badaniach tych wzięto pod uwagę zanieczyszczenie ditlenkiem azotu (NO_2) i pyłem zawieszonym (cząstki $\text{PM}_{2.5}$ i PM_{10} , czyli cząstki stałe o średnicy do 2,5 μm i 10 μm), aby porównać ich stężenia w okresach lockdownu ustanowionego na Słowacji.

Źródłem ditlenku azotu w powietrzu są głównie środki transportu. Jest on jednym z największych sprawców zanieczyszczenia powietrza na świecie. W Europie prawie jedna czwarta emisji pochodzi ze środków transportu. Tlenki azotu oddziałują na układ oddechowy, podrażniają oczy, nos i gardło, a także wpływają na wątrobę, śledzionę i krążenie krwi. Alergicy, szczególnie astmatycy, ale także dzieci i osoby z obniżoną odpornością, mogą mieć problemy z ich wysokimi stężeniami w powietrzu. Rozprzestrzenianie się emitowanych tlenków azotu zależy od siły wiatru i temperatury. Stężenie ultradrobnych cząstek maleje wraz ze wzrostem wilgotności względnej, a także zależy od temperatury i prędkości wiatru. Dlatego mierząc stężenie wszystkich tych substancji w powietrzu i porównując je w czasie, należy uwzględnić dane pogodowe, zwłaszcza roczne wahania prędkości wiatru lub anomalie termiczne.

Praca może przyczynić się w wielu aspektach do wzbogacenia istniejącej wiedzy zawartej w literaturze. Badanie potwierdza w warunkach słowackich wyniki badań światowych dotyczących spadku zawartości NO_2 , który jednak nie odpowiada spadkowi zanieczyszczeń cząstkami stałymi²⁻⁵. Z drugiej strony, przyniosło ono inne wnioski niż te, które przedstawili słowaccy politycy. Założyli oni, że spadek zanieczyszczenia powietrza nie był raczej powszechny ani długotrwały. Wyniki są zatem istotne dla procesu tworzenia rozwiązań politycznych, mających na celu długoterminowe, skuteczne zmniejszenie zanieczyszczenia powietrza na Słowacji.

lockdown lasted until about the beginning of May 2020, but in the autumn of 2020 the rules on the movement of persons were tightened again due to the deteriorating epidemiological situation. The presented contribution is a result of a long-term study on air pollution in selected municipal cities in Slovakia. In the study, the pollution with nitrogen dioxide (NO_2) and particulate matter (further as $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} particles) was taken into consideration to compare their concentrations in the periods of the established lockdown in Slovakia.

The nitrogen dioxide comes mainly from transport. It is one of the biggest air polluters in the world. In Europe, almost quarter of the emissions comes from transport. Nitrogen oxides generally affect the respiratory system, irritate the eyes, nose and throat, and also affect the liver, spleen and blood circulation. Allergy sufferers, specifically asthmatics, but also children and immunocompromised individuals can have problems with high concentrations in the air. In addition to transport, the emissions of nitrogen oxides depend on wind force and temperature. Conversely, the concentration of ultra-fine particles decreases as the relative humidity increases and also depends on temperature and wind speed. Therefore, when measuring the concentration of all these substances in the air and comparing them over time, it is necessary to consider weather data, especially annual fluctuations in wind speed or thermal anomalies.

The paper can contribute in more aspects to existing literature. The study confirms, under Slovak conditions, the results of several global studies on the decrease of NO_2 , which, however, does not correspond to the decrease of particulate pollution²⁻⁵. On the other hand, it brought different conclusions than those presented by Slovak politicians. They assumed that the decrease in air pollution was rather not general or long-term. The results, are therefore, significant for the policy making process with the aim of long-term effective reduction of air pollution in Slovakia.

Literature review

A number of studies have addressed the effects of anti-epidemic measures on the atmosphere immediately since



Mgr. Tetyana ZUBRO, PhD. (ORCID: 0000-0002-6173-170X) graduated in 1999 from the Faculty of Social Sciences and Humanities of the National Pedagogical Dragomanov in Kiev. In 2010 she obtained a PhD degree in Theory of Politics, at the Faculty of Arts, Comenius University in Bratislava. She is an Assistant Professor at University of Economics in Bratislava, Faculty of International Relations. Specialty – International Relations.

Dr Tetyana ZUBRO (ORCID: 0000-0002-6173-170X) w roku 1999 ukończyła studia na Wydziale Nauk Społecznych i Humanistycznych Państwowej Wyższej Szkoły Pedagogicznej im. Dragomanowa w Kijowie. W 2010 r. uzyskała stopień doktora w zakresie teorii polityki na Wydziale Artystycznym Uniwersytetu Komeńskiego w Bratysławie. Jest adiunktem na

Uniwersytecie Ekonomicznym w Bratysławie na Wydziale Stosunków Międzynarodowych. Specjalność – stosunki międzynarodowe.



Doc. Ing. Vladimír BOLEK, PhD. (ORCID: 0000-0003-1144-278X) graduated in 2012 from the Faculty of Business Management, University of Economics in Bratislava, Slovak republic. In 2015 he obtained a PhD degree in economics and management at the same Faculty. He is currently working as an Associate Professor in Department of Information Management and Vice-Dean for Education of Faculty of Business Management, University of Economics in Bratislava, Bratislava, Slovak Republic. His research interests include information technology, information management, ERP systems, information security management, information literacy and information-technologies in education.

Dr inż. Vladimír BOLEK (ORCID: 0000-0003-1144-278X) w roku 2012 studia ukończył studia na Wydziale Zarządzania Biznesem

Uniwersytetu Ekonomicznego w Bratysławie (Słowacja). W 2015 r. uzyskał stopień doktora nauk ekonomicznych i zarządzania na tym samym wydziale. Obecnie pracuje jako profesor nadzwyczajny w Katedrze Zarządzania Informacją i jest prodziekanem ds. kształcenia na Wydziale Zarządzania Przedsiębiorstwem Uniwersytetu Ekonomicznego w Bratysławie (Słowacja). Specjalność – technologie informacyjne, zarządzanie informacją, systemy ERP, zarządzanie bezpieczeństwem informacji, umiejętność korzystania z informacji oraz technologie informacyjne w edukacji.

Wiele opublikowanych prac dotyczyło wpływu działań przeciwepidemicznych na atmosferę bezpośrednio po wybuchu pandemii. W krótkim czasie stacje pomiarowe na całym świecie zaczęły odnotowywać niższe poziomy zanieczyszczenia powietrza, co świadczyło o tym, że lockdowny w krajach na całym świecie znacznie poprawiły jakość powietrza. Podobnie było na Słowacji. Słowacja charakteryzuje się bardzo złą jakością powietrza, nie tylko w dużych miastach. W kwietniu 2020 r. Słowacki Instytut Hydrometeorologiczny opublikował opracowanie poświęcone analizie stężenia wybranych zanieczyszczeń powietrza podczas tzw. pierwszego lockdownu. W pierwszym miesiącu obowiązywania ścisłych ograniczeń zapobiegających rozprzestrzenianiu się Covid-19 (13 marca–13 kwietnia 2020 r.) stężenia NO_2 w 17 stacjach miejskich spadły średnio o 24,5% ($-6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) w porównaniu z wartościami średniej dziesięcioletniej 2010–2019 w monitorowanych miesiącach¹⁾.

W kilku badaniach stwierdzono przejściowy (choć znaczący) spadek zawartości niektórych zanieczyszczeń, ale w niektórych przypadkach paradoksalnie odnotowano wzrost tych zawartości. Donzelli i współpracownicy²⁾ stwierdzili, że zmniejszenie emisji NO_2 pochodzącego ze środków transportu nie zbiegło się z istotnym zmniejszeniem emisji $\text{PM}_{2,5}$ i PM_{10} . Dobson i Semple³⁾ odnotowali podobny wynik. W krajach Unii Europejskiej, które nie wprowadziły twardych lockdownów, takich jak Hiszpania, Włochy, Francja, a nawet Szwecja, również odnotowano spadek poziomu NO_2 , ale nie odnotowano znaczącego spadku zawartości cząstek PM. Autorzy badania tłumaczyli ten wynik niekorzystnymi warunkami geograficznymi dla wariacji⁴⁾. Większość badań potwierdziła spadek stężenia ditlenku azotu^{5–7)}, ale np. w Lublanie stężenie to w niektórych miejscach nawet wzrosło, chociaż warunki meteorologiczne sprzyjały obniżeniu stężenia NO_2 w powietrzu⁸⁾.

W większości badań zastosowano metody analizy regresyjnej, test Manna i Kendalla oraz sparowany test t w celu określenia statystycznej istotności redukcji stężeń lub zależności między stężeniami zanieczyszczeń a innymi parametrami, takimi jak dane dotyczące zdrowia. Wszystkie badania potwierdziły w pewnym stopniu zmniejszenie stężeń

the outbreak of the pandemic. In the short term, measuring stations around the world began to report lower levels of air pollutants, which was a prerequisite for the fact that lockdowns in countries around the world significantly improved air quality. It was similar in Slovakia. Slovakia shows very poor air quality, not only in large cities. In April 2020, the Slovak Hydrometeorological Institute published a study focused on the analysis of the concentration of selected air pollutants during the so-called first lockdown. During the first month (March 13 to Apr 13, 2020) of strict measures to prevent the spread of Covid-19, NO_2 concentrations at 17 urban stations decreased on average by 24.5% ($-6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) compared to the values of the ten-year 2010–2019 average in the monitored months¹⁾.

Several studies have found a temporary significant decrease in some pollutants, but some have paradoxically recorded increased parameters. Donzelli et al.²⁾ found that the reduction in NO_2 emissions from vehicles did not coincide with a significant reduction in $\text{PM}_{2,5}$ and PM_{10} . Dobson and Semple³⁾ recorded a similar result. In EU countries, such as Spain, Italy, France and even Sweden, which have not adopted hard lockdowns, a decrease in NO_2 levels has also been recorded, but not a significant decrease in PM particles. The authors of the study explained this result by unfavourable geographical conditions for variances⁴⁾. Most studies confirmed a decrease in NO_2 ^{5–7)}, but in Ljubljana, for example, these concentrations even increased in some parts, although meteorological conditions were favourable for the decrease in concentrations of NO_2 in the air⁸⁾.

Most studies used regression analysis methods, the Mann-Kendall test, and the paired t-test to determine the statistical significance of concentration reductions or relationships between pollutant concentrations and other parameters such as health data. All the studies confirmed to some extent the reduction of pollutant concentrations and called for the importance of their continuous reduction not due to accidental temporary measures, but a targeted air quality policy to improve the health of the population not only in big cities but also in rural areas, as pollution tended to migrate. The development of pollution concentrations during the Covid-19 pandemic pointed to the seriousness of the problem in Slovakia. In addition, it has been shown that a more polluted environment had a negative effect on preventing the spread of viral respiratory diseases, such as Covid. Ultra-fine dust particles easily transmitted virus particles. So not only did pollution cause chronic and acute respiratory and cardiovascular diseases, but it also affected the spread of pandemics. It was not possible to pay attention to these consequences before the outbreak of the pandemic.

Slovakia is one of the most air-polluted amongst the EU countries (related PM particles)⁹⁾. Bratislava suffers the most. The Environmental Policy Institute reports that the estimated number of premature deaths due to air pollution is 1589.60 for $\text{PM}_{2,5}$ and 2.5 for PM_{10} . Every year, there were about 430 cases of chronic bronchitis in adults due



Dr. František HOCMAN (ORCID: 0000-0002-0137-3728) graduated from Faculty of National Economy, University of Economics in Bratislava in Finance and finished postgraduate studies by dissertation thesis Identification and management of risks of public sector and public finance in 2009. At this time work at the position research fellow at Department of finance at University of Economics. In research he is focused in risk of finance and capital structure. He is coauthor of reviewed publications: Capital structure of companies and Risk in finance and in banking.

Dr František HOCMAN (ORCID: 0000-0002-0137-3728) ukończył studia na Wydziale Gospodarki Narodowej Uniwersytetu Ekonomicznego w Bratysławie na kierunku finanse oraz

ukończył studia podyplomowe na podstawie rozprawy pt. „Identyfikacja i zarządzanie ryzykiem sektora publicznego i finansów publicznych” w 2009 r. Obecnie pracuje na stanowisku pracownika naukowego w Katedrze Finansów Uniwersytetu Ekonomicznego w Bratysławie. Specjalność – ryzyko finansów i struktura kapitału.

nia zanieczyszczeń i zwróciły uwagę na znaczenie ich ciągłego zmniejszania się, nie dzięki przypadkowym działaniom tymczasowym, ale ukierunkowanej polityce jakości powietrza, mającej na celu poprawę zdrowia ludności nie tylko w dużych miastach, ale również na obszarach wiejskich, ponieważ zanieczyszczenia mają tendencję do migracji. Zmiany stężenia zanieczyszczeń podczas pandemii Covid-19 wskazywały na powagę problemu na Słowacji. Ponadto wykazano, że bardziej zanieczyszczone środowisko miało negatywny wpływ na zapobieganie rozprzestrzenianiu się wirusowych chorób układu oddechowego, takich jak Covid. Bardzo drobne cząstki pyłu łatwo przenosiły wirusy. Tak więc zanieczyszczenia powodowały nie tylko przewlekłe i ostre choroby układu oddechowego i sercowo-naczyniowego, ale również wpływały na rozprzestrzenianie się pandemii. Nie można było przewidzieć tych konsekwencji przed wybuchem pandemii.

Słowacja jest jednym z krajów unijnych o najbardziej zanieczyszczonym powietrzu (dotyczy cząstek $PM^{(9)}$). Najpoważniejsza sytuacja jest w Bratysławie. Instytut Polityki Środowiskowej podaje, że szacowana liczba przedwczesnych zgonów z powodu zanieczyszczenia powietrza wynosi 1589,60 w przypadku $PM_{2,5}$ i 2,5 w przypadku PM_{10} . Co roku odnotowywano ok. 430 przypadków przewlekłego zapalenia oskrzeli u dorosłych z powodu zanieczyszczenia cząstkami PM_{10} , przy czym najwięcej zachorowań miało miejsce w Koszycach. Dodatkowe 99 przypadków astmy wystąpiło w grupie wiekowej 5–19 lat, z największą częstotliwością w Koszycach.

Koszty zanieczyszczenia były znaczne. Obejmowały one koszty opieki zdrowotnej z tytułu uszczerbku na zdrowiu spowodowanego zanieczyszczeniem (koszty bezpośrednie), jak również straty ekonomiczne z powodu niezdolności do pracy lub przedwczesnych zgonów. Koszty społeczno-ekonomiczne na jeden przypadek zależały w dużej mierze od sytuacji gospodarczej danego kraju, a więc były ściśle związane z PKB. Ponadto koszty zanieczyszczeń zależały od położenia geograficznego i koncentracji ludności. W większych miastach koszty te były wyższe, ponieważ była tam większa liczba mieszkańców. Efekty zewnętrzne zależały również w znacznym stopniu od lokalizacji źródeł zanieczyszczeń (np. ich wysokości, która wpływała na rozcieńczenie substancji zanieczyszczających powietrze).

Naukowcy coraz częściej starali się udowodnić, jak kontrola zanieczyszczeń i jej korzyści przeważają nad kosztami związanymi z zanieczyszczeniami. W badaniach zastosowano analizę kosztów i korzyści^(10–12). Jednak korzyści z kontroli zanieczyszczeń były stosunkowo trudne do określenia ilościowego, ponieważ czynnik moralny był również ważnym czynnikiem przy rozpatrywaniu kontroli zanieczyszczeń. Niektóre korzyści związane z kontrolą zanieczysz-

to pollution with PM_{10} particles, with the highest number occurring in Košice. An additional 99 cases of asthma occurred in the age group of 5–19 years, with the highest incidence in Košice.

The costs of pollution were significant. They included health care costs for damaged health caused by pollution (direct costs) as well as economic losses due to incapacity for work or premature deaths. Socio-economic costs per case depended to a large extent on the economic situation of the given country, and therefore were closely related to GDP. In addition, the costs of pollution depended on the geographical location and population concentration. In a larger city, these costs were higher, as there was a higher size of population. Externalities depended significantly also on the location of the pollutant source (for example, its height, which affected the dilution of pollutant substances).

Researchers were increasingly trying to prove how pollution control and its benefits outweigh the costs associated with pollution. In studies, the cost-benefit analysis was used^(10–12). However, the benefits of pollution control were relatively difficult to quantify, as the moral factor was also an important factor when considering pollution control. Some pollution control benefits also did not have any market price and therefore their price was unknown⁽¹³⁾.

Data and methodology

In the analysis, the trends of pollutions concentration, namely NO_2 and PM particles, were compared. For the analysis, 8 regional centres in Slovakia (Fig. 1, Table 1), were selected. In this way, the whole urban territory geographically was covered. The prerequisite for the selection was different weather conditions in individual regions of Slovakia as well as differences in economic activity, which had a significant impact on pollution in the area.

The development of the concentration of the monitored pollutant, specifically NO_2 and $PM_{2,5}$ and PM_{10} particles, were compared. The daily monitored values in 2020 were compared with daily monitored values measured in 2019. Data used were drawn from the European Environment Agency. The goal was to answer the basic question of whether and

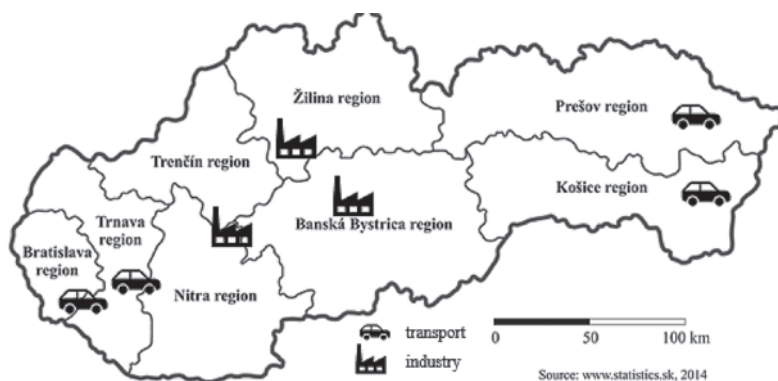


Fig. 1. Map of the Slovak regions and the main sources of air pollution

Rys. 1. Mapa regionów (krajów) Słowacji i głównych źródeł zanieczyszczenia powietrza

czeń również nie miały ceny rynkowej i dlatego ich cena nie była znana¹³⁾.

Dane i metodyka badań

W analizie porównano trendy zmian stężenia NO₂ i cząstek PM. Do analizy wybrano 8 ośrodków regionalnych na Słowacji (rys. 1, tabela 1), pokrywając geograficznie wszystkie obszary miejskie. Warunkiem wyboru były różne warunki pogodowe w poszczególnych regionach Słowacji, a także różnice w działalności gospodarczej, które miały istotny wpływ na zanieczyszczenie środowiska na danym obszarze.

Porównano zmiany stężenia monitorowanych zanieczyszczeń, w szczególności NO₂ oraz cząstek stałych PM_{2,5} i PM₁₀. Dienne wartości monitorowane w 2020 r. zostały porównane z dziennymi wartościami monitorowanymi w 2019 r. Wykorzystane dane pochodziły z Europejskiej Agencji Środowiska. Celem było uzyskanie odpowiedzi na podstawowe pytanie, czy i jak wprowadzone środki przeciwpandemiczne wpłynęły na jakość powietrza. Porównano istotność różnic w stężeniu wybranych zanieczyszczeń w latach 2019 i 2020, wykonując sparowany test *t* w programie STATA. Hipoteza zerowa zakładała, że rzeczywista średnia różnica między sparowanymi próbkami wynosi zero, a hipoteza alter-

how the established lockdowns had affected air quality. The significance of differences in the concentration of selected pollutants in 2019 and in 2020 by performing a paired *t*-test in STATA software were compared. The null hypothesis assumed that the actual average difference between the paired samples was zero, while the alternative hypothesis assumed that the actual average difference between the paired samples was not zero. To determine statistical significance, *p* = 0.05 was chosen.

Five periods during the year: one pre-lockdown period, 2 periods of lockdowns, and 2 periods of post-lockdowns, were taken into consideration during selecting the data (Table 2). The dates of the periods were selected according to the government measures on slowing the spread of Covid-19. The key dates for determining the individual periods were the first announcement of the official lockdown from March 13, 2020 and then the second largest restriction of movement in terms of lockdown in the autumn of 2020. From these dates subsequently emerged the post-lockdown periods.

In terms of dispersion of pollutants in the air, the most important meteorological parameters were wind speed, humidity and thermal stratification of the atmosphere. An increase in the occurrence of weather extremes across the world¹⁴⁾, the parameters (as measured by the Slovak Hydrometeorological

Table 1. Selected cities

Tabela 1. Wybrane miasta

City/ Miasto	Population/ Liczba ludności	Sources of air pollution/Źródła zanieczyszczenia powietrza
Bratislava	440 948	<i>the actual amount of people living in the city during the week is higher due to the fact, that lot of people commute to work and do not have a permanent residence in Bratislava; due to the culminating traffic situation as well as the concentrated industry, the capital has long had huge problems with the quality of the air, which is one of the worst/rzeczywista liczba mieszkańców miasta w ciągu tygodnia jest większa, ponieważ wiele osób dojeżdża do pracy i nie ma stałego miejsca zamieszkania w Bratisławie; ze względu na kulminacyjną sytuację komunikacyjną oraz skoncentrowany przemysł stolica od dawna ma ogromne problemy z jakością powietrza, które należy do najgorszych</i>
Trnava	64 735	<i>the main sources of air pollution in the Trnava region include local heating and road transport/głównymi źródłami zanieczyszczenia powietrza w regionie Trnawy są lokalne ogrzewanie i transport drogowy</i>
Nitra	76 028	<i>the main sources of air pollution is industrial activity in the region mostly polluting water resources/głównym źródłem zanieczyszczenia powietrza jest działalność przemysłowa w regionie, która w większości zanieczyszcza zasoby wodne</i>
Trenčín	55 416	<i>in the more mountainous part of the Trenčín region, the most significant source of air pollution is domestic heating, where firewood is mainly used for heat production, in contrast to larger cities using natural gas as a heat source; in some parts of the region, transport also contributes to the deteriorating air quality/w bardziej górzystej części regionu Trenčyn najbardziej znaczącym źródłem zanieczyszczenia powietrza jest ogrzewanie domowe, gdzie do produkcji ciepła używa się głównie drewna opałowego, w przeciwieństwie do większych miast, w których źródłem ciepła jest gaz ziemny; w niektórych częściach regionu do pogorszenia jakości powietrza przyczynia się również transport</i>
Žilina	80 386	<i>pollution comes from traffic and heating/zanieczyszczenia pochodzą z ruchu drogowego i ogrzewania</i>
Banská Bystrica	77 719	<i>the dominant source of air pollution in the Banská Bystrica region is domestic heating, although the impact of road transport may be more pronounced locally; depending on the meteorological conditions, the influence of heating plants in this region may also manifest itself/dominującym źródłem zanieczyszczenia powietrza w regionie Bańskiej Bystrzycy jest ogrzewanie domowe, chociaż wpływ transportu drogowego może być lokalnie bardziej wyraźny; w zależności od warunków meteorologicznych może się również ujawnić wpływ ciepłowni w tym regionie</i>
Prešov	87 886	<i>pollution comes mostly from traffic and heating/ zanieczyszczenia pochodzą głównie z ruchu drogowego i ogrzewania</i>
Košice	238 138	<i>the air quality in the Košice region, as well as in the city of Košice, is affected by the dominant industrial source of pollution; the traffic situation is complicated due to the low number of motorway sections and city bypasses, as roads of international importance pass through the city and the whole region/na jakość powietrza w regionie Koszyc, jak również w mieście Koszycy, ma wpływ dominujące źródło zanieczyszczeń przemysłowych; sytuacja komunikacyjna jest skomplikowana z powodu małej liczby odcinków autostrad i obwodnic miasta, więc przez miasto i cały region przebiegają drogi o znaczeniu międzynarodowym</i>

natywna zakładała, że rzeczywista średnia różnica między sparowanymi próbkami jest różna od zera. Do określenia istotności statystycznej wybrano $p = 0,05$.

Przy wyborze danych wzięto pod uwagę 5 okresów w ciągu roku: jeden okres przed lockdownem, 2 okresy lockdownów i 2 okresy po lockdownach (tabela 2). Daty okresów zostały wybrane zgodnie z rządowymi działaniami na rzecz spowolnienia rozprzestrzeniania się pandemii Covid-19. Kluczowymi datami dla określenia poszczególnych okresów było pierwsze ogłoszenie oficjalnego lockdownu od 13 marca 2020 r., a następnie drugie największe ograniczenie ruchu w postaci lockdownu jesienią 2020 r. Z tych dat wyłoniły się następnie okresy po lockdownach.

Pod względem rozproszenia zanieczyszczeń w powietrzu najważniejszymi parametrami meteorologicznymi były prędkość wiatru, wilgotność powietrza i stratyfikacja termiczna atmosfery. W związku ze wzrostem występowania ekstremalnych zjawisk pogodowych na świecie¹⁴⁾, parametry (zmierzone przez Słowacki Instytut Hydrometeorologiczny) zostały porównane z warunkami pogodowymi w latach 2019 i 2020, aby móc oddzielić analizę jakości powietrza od możliwych wpływów meteorologicznych. Porównując średnie temperatury, jak również wiatr i wilgotność w latach 2019 i 2020, nie odnotowano znaczących odchyśleń, które sugerowałyby odchylenia mierzonych poziomów zanieczyszczeń. Porównanie wskaźników między latami nie wykazało istotności statystycznej na poziomie $p = 0,05$.

Wyniki

Zanieczyszczenie ditlenkiem azotu

Ditlenek azotu dostaje się do powietrza przede wszystkim ze spalania paliw, głównie w ruchu drogowym. Reaguje on z innymi związkami chemicznymi w powietrzu, tworząc zarówno PM, jak i O_3 . Wykazuje poważny wpływ na układ oddechowy, powodując trudności w oddychaniu i zaostrzając takie choroby, jak astma czy alergia. Test t potwierdził znacznie niższe stężenie NO_2 w powietrzu wśród większości monitorowanych miast na Słowacji. W pierwszym okresie po lockdownie wyniki wskazały na statystycznie istotne ($p < 0,05$) zmniejszenie tego stężenia we wszystkich 8 monitorowanych miastach. Znaczący spadek zaobserwowano aż w 32 z 40 pomiarów. W okresie przed lockdownem było to 27 pomiarów na 40.

Jak wynika z danych zestawionych w tabeli 3, w 2020 r. stężenie NO_2 w powietrzu było znacznie niższe niż w 2019 r., nawet przed lockdownem. Wahania stężenia podczas lockdownu były jednak większe i można było wnioskować, że zmniejszenie ruchu kołowego pozytywnie wpłynęło na jakość powietrza. Ograniczenie ruchu związane z działaniami przeciwpandemicznymi miało zatem pozytywny wpływ na obniżenie stężenia NO_2 na terenie całej Słowacji, niezależnie od koncentracji działalności przemysłowej czy natężenia ruchu.

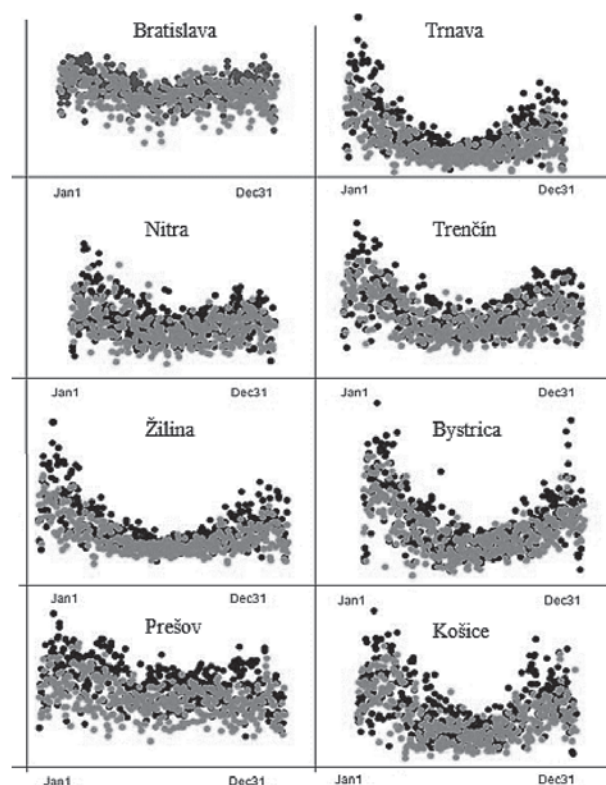


Fig. 2. The trend of concentration of NO_2 in $\mu g/m^3$ in selected cities of Slovakia in 2019 (black) and 2020 (grey). Data source: European Environmental Agency

Rys. 2. Trend stężenia NO_2 , $\mu g/m^3$, w wybranych miastach Słowacji w 2019 r. (czarny) i 2020 r. (szary). Źródło danych: Europejska Agencja Środowiska

Institute) were compared with weather conditions in 2019 and 2020 in order to be able to distinguish air quality analysis from possible meteorological impacts. When comparing average temperatures as well as wind or humidity in 2019 and 2020, no significant deviations were recorded which would suggest deviations of the measured pollution levels. Comparison of indicators between years did not show statistical significance at $p = 0.05$.

Results

Nitrogen dioxide (NO_2)

Nitrogen dioxide primarily get in the air from burning fuel, mostly from the traffic. It reacted with other chemicals in the air to form both PM and O_3 . It had a serious impact on the respiratory system causing breathing difficulties and worsening diseases such as asthma or allergy. The t -test confirmed significantly lower concentration of NO_2 among most the monitored cities in Slovakia. During the first post-lockdown period, the results indicated the statistically significant ($p < 0.05$) reduction among all 8 monitored cities. The significant decrease was observed in up to 32 measurements out of 40. In the period before the lockdown, there were 27 measurements out of 40.

Spadek miał charakter trwały. Na rys. 2 przedstawiono linię trendu stężenia NO₂ w 5 okresach monitorowania w latach 2019 i 2020, określonych w metodyce (przed lockdownem, lockdown N¹, po lockdownie N¹, lockdown N², po lockdownie N²).

Wyniki były zgodne z innymi badaniami zmian stężenia NO₂ w różnych krajach, takich jak Włochy^{2, 15}, Hiszpania¹⁶, Kazachstan¹⁷, Malta¹⁸) lub na całym świecie^{19–21}). Jeśli chodzi o poszczególne miasta, to największe całkowite zmniejszenie zawartości NO₂ w powietrzu zaobserwowano w Preszowie i Koszycach. Dość znaczny spadek odnotowano również w Trnawie, gdzie wyraźnie zmniejszyła się mobilność osób dojeżdżających do pracy do Bratisławy. Pozostałe miasta regionalne odnotowały średni spadek w przedziale 1–4 jednostek miary.

Table 2. The dates of the periods

Tabela 2. Terminy okresów

Period/Okres	2019	2020
Pre-lockdown/ Przed lockdownem	Jan 1 st –March 12 th / 1 stycznia–12 marca	Jan 1 st –March 12 th / 1 stycznia–12 marca
Lockdown N ¹	March 13 th –May 5 th / 13 marca–5 maja	March 13 th –May 5 th / 13 marca–5 maja
Post-lockdown N ¹ / Po lockdownie N ¹	May 6 th –Oct 23 rd / 6 maja–23 października	May 6 th –Oct 23 rd / 6 maja–23 października
Lockdown N ²	Oct 24 th –Nov 30 th / 24 października–30 listopada	Oct 24 th –Nov 30 th / 24 października–30 listopada
Post-lockdown N ² / Po lockdownie N ²	Dec 1 st –Dec 31 st / 1 grudnia–31 grudnia	Dec 1 st –Dec 31 st / 1 grudnia–31 grudnia

As shown in Table 3, the NO₂ concentration during 2020 was significantly lower than that of 2019, even before the lockdown. However, the variations during the lockdown were higher and someone could deduce that the decrease in vehicular road traffic positively affected the air quality. It can therefore be stated that the restriction of movement associated with anti-pandemic measures had a positive effect on the reduction of NO₂ concentrations throughout Slovakia, regardless of the concentration of industrial activity or traffic density. The decline was observed as a lump sum. On Fig. 2, the trendline of NO₂ concentration during the five monitored periods in the 2019 and 2020 specified in the methodology (pre-lockdown, lockdown N¹, post-lockdown N¹, lockdown N², post-lockdown N²) was shown.

The results were in line with other studies measuring the change in concentration of NO₂ in different countries, such as in Italy^{2, 15}, Spain¹⁶, Kazakhstan¹⁷, Malta¹⁸) or across the globe^{19–21}). As for particular cities, the highest overall reduction in NO₂ concentrations was seen in Prešov and Košice. Trnava also recorded a fairly significant decrease, where the mobility of people commuting to Bratislava for work had significantly

Table 3. Paired t-test of NO₂ concentration in µg/m³

Tabela 3. Sparowany test t dla stężenia NO₂, µg/m³

Region/ Region	Pre-lockdown/ Przed lockdownem	Lockdown N ¹	Post-lockdown N ¹ /Po lockdownie N ¹	Lockdown N ²	Post-lockdown N ² / Po lock- downie N ²
Bratislava	P value/ Wartość P 0.04 *42.41/37.84	P value/ Wartość P 0.00 36/23.65	P value/ Wartość P 0.00 26.19/21.88	P value/ Wartość P 0.00 37.27/21	P value/ Wartość P 0.00 36/19.01
Trnava	P value/ Wartość P 0.00 37.64/60.87	P value/ Wartość P 0.00 33.5/26.11	P value/ Wartość P 0.00 33.52/26.37	P value/ Wartość P 0.023 31.15/26.21	P value/ Wartość P 0.00 33.52/26.37
Nitra	P value/ Wartość P 0.00 26.19/21.8	P value/ Wartość P 0.08 20.12/17.51	P value/ Wartość P 0.00 18.31/14.86	P value/ Wartość P 0.29 20.78/19.15	P value/ Wartość P 0.83 19.1/18.74
Trenčín	P value/ Wartość P 0.07 36.78/33.58	P value/ Wartość P 0.055 25/21.68	P value/ Wartość P 0.00 21.54/17.83	P value/ Wartość P 0.035 29.83/25.17	P value/ Wartość P 0.00 29.83/21.84
Žilina	P value/ Wartość P 0.00 36.41/26.51	P value/ Wartość P 0.00 19.7/14.79	P value/ Wartość P 0.00 14.62/10.76	P value/ Wartość P 0.00 22.44/16.38	P value/ Wartość P 0.00 25.20/14.69
Banská Bystrica	P value/ Wartość P 0.00 26.19/21.8	P value/ Wartość P 0.08 20.12/17.51	P value/ Wartość P 0.00 18.31/14.86	P value/ Wartość P 0.29 20.78/19.15	P value/ Wartość P 0.83 19.1/18.74
Prešov	P value/ Wartość P 0.00 45.67/37.84	P value/ Wartość P 0.00 43.65/ 32.41	P value/ Wartość P 0.00 36.27/28.69	P value/ Wartość P 0.00 36.83/26.10	P value/ Wartość P 0.00 36.83/26.10
Košice	P value/ Wartość P 0.17 38.09/35.87	P value/ Wartość P 0.00 25.91/19.44	P value/ Wartość P 0.00 21.18/16.64	P value/ Wartość P 0.00 33.75/24.01	P value/ Wartość P 0.30 29.97/27.74

*Mean 19/Mean 20, µg/m³/Średnia 19/średnia 20, µg/m³

Zanieczyszczenie cząstkami PM_{2,5}

W porównaniu z tym samym okresem w 2019 r., stężenia PM_{2,5} w okresie przed lockdownem nie różniły się znacząco pomiędzy stacjami monitoringu powietrza w monitorowanych miastach. Jest bardzo prawdopodobne, że reakcja środowiska, mierzona jako obniżenie stężenia PM, była zróżnicowana w zależności od dominującego źródła emisji w każdym kraju i ze względu na specyficzne warunki meteorologiczne. Na zawartość PM_{2,5} znaczny wpływ miał również przepływ atmosferyczny na duże odległości (transgraniczny) i dlatego lokalne skutki działalności gospodarczej nad Europą zostały złagodzone lub nawet zniwelowane²²⁾. Znaczący spadek odnotowano tylko w 7 z 40 pomiarów, natomiast w niektórych przypadkach średnia wartość stężenia PM_{2,5} w 2020 r. była większa niż w poprzednim 2019 r. Powodem było również to, że ludzie spędzali znacznie więcej czasu w domu z powodu lockdownu. W miesiącach zimowych, szczególnie na terenach górskich, ogrzewanie było wykorzystywane przez długi czas. Jednocześnie te obszary Słowacji najbardziej ucierpiały z powodu zanieczyszczenia wynikającego z sezonu grzewczego, co znalazło odzwierciedlenie w wynikach. Można to było zaobserwować zwłaszcza w rejonie Bańskiej Bystrzycy lub Żyliny (tabela 4).

Największy udział w zanieczyszczeniu PM na Słowacji miały regiony Bańska Bystrzyca i Żylina, a najbardziej zanieczyszczone miasta to Turčianske Teplice, Žarnovica, Brezno i Námestovo. Transport i produkcja przemysłowa były jednak tylko w niewielkim stopniu przyczyną zanieczyszczenia środowiska w tych regionach, a głównym źródłem było ogrzewanie gospodarstw domowych, gdzie do produkcji ciepła używa się

decreased. Other regional cities recorded an average decrease in the range of 1–4 measured units.

Particle pollution (PM_{2,5})

Compared to the same period in 2019, PM_{2,5} concentrations during the pre-lockdown period were not significantly different between the air-monitoring stations across the monitored cities. It was very likely that the environmental response, measured as the reduction in PM concentrations, varied according to the dominant source of emission in each country and because of the specific meteorological conditions. Also, PM_{2,5} was significantly influenced by long distance atmospheric transport, and, therefore, the local effects of economic activity over Europe were diluted or even counteracted²²⁾. A significant decrease was recorded in only 7 out of 40 measurements, while in some cases the average value of PM_{2,5} concentration in 2020 was higher than in the previous year 2019. The reason was also that people spent much more time at home due to lockdowns. In the winter months, especially in mountainous areas, heating was going on for a long time. At the same time, these areas of Slovakia suffered the most from heating pollution, which was reflected in the results. This can be observed especially in the region of Banská Bystrica or Žilina (Table 4).

Banská Bystrica and Žilina regions had the largest share of PM pollution in Slovakia, with the most polluted cities like Turčianske Teplice, Žarnovica, Brezno and Námestovo. Transport and industrial production were, however only marginally involved in pollution in these regions, as the major source was heating of households, where firewood is

Table 4. Paired t-test of PM_{2,5} concentration in µg/m³

Tabela 4. Sparowany test t dla stężenia PM_{2,5}, µg/m³

Region/ Region	Pre-lockdown/ Przed lockdownem	Lockdown N ¹	Post-lockdown N ¹ /Po lockdownie N ¹	Lockdown N ²	Post-lockdown N ² / Po lockdownie N ²
Bratislava	P value/ Wartość P 0.26 31.41/37.84	P value/ Wartość P 0.2 22.41/27.84	P value/ Wartość P 0.46 23.84/21.8	P value/ Wartość P 0.9 22.57/26.9	P value/ Wartość P 0.52 23.8/19.54
Trnava	P value/ Wartość P 0.00 23.36/16.88	P value/ Wartość P 0.01 17.07/21.37	P value/ Wartość P 0.77 12.29/12.47	P value/ Wartość P 0.41 19.23/21.54	P value/ Wartość P 0.83 16.08/16.65
Nitra	P value/ Wartość P 0.00 23.83/17.13	P value/ Wartość P 0.25 16.37/14.63	P value/ Wartość P 0.72 10.75/10.57	P value/ Wartość P 0.00 15.22/22.11	P value/ Wartość P 0.01 16.377/21.84
Trenčín	P value/ Wartość P 0.00 29.43/18.8	P value/ Wartość P 0.84 19.65/19.95	P value/ Wartość P 0.03 12.51/10.21	P value/ Wartość P 0.43 16.17/17.95	P value/ Wartość P 0.12 16.03/12.07
Žilina	P value/ Wartość P 0.03 31.69/25.37	P value/ Wartość P 0.18 17.9/20.07	P value/ Wartość P 0.0611.96/10.71	P value/ Wartość P 0.2217.85/20.88	P value/ Wartość P 0.07 22.85/17.12
Banská Bystrica	P value/ Wartość P 0.00 26.19/21.8	P value/ Wartość P 0.08 20.12/17.51	P value/ Wartość P 0.00 18.1/14.5	P value/ Wartość P 0.29 2078/.19.15	P value/ Wartość P 0.83 19.1/18.74
Prešov	P value/ Wartość P 0.00 28.19/21.97	P value/ Wartość P 0.15 17.13/15.32	P value/ Wartość P 0.0 13.25/11.42	P value/ Wartość P 0.93 21.8/21.63	P value/ Wartość P 0.48 20.54/19.11
Košice	P value/ Wartość P 0.01 26.98/22.4	P value/ Wartość P 0.3 29.97/27.74	P value/ Wartość P 0.01 10.44/11.74	P value/ Wartość P 0.02 16.39/20.58	P value/ Wartość P 0.31 19.97/17.91

*Mean 19/Mean 20, µg/m³/Średnia 19/średnia 20, µg/m³

głównie drewna opałowego, w przeciwieństwie do większych miast, w których jako źródło ciepła wykorzystywany jest gaz ziemny. W grę wchodziło również spalanie węgla i biomasy (zwłaszcza drewna niewysuszonego). Problem złej jakości powietrza był oczywisty na terenach wiejskich. Świadczą o tym wioski spowite zimą gęstym dymem. W wielu przypadkach były to miejscowości położone z dala od przemysłu i ruchliwych arterii komunikacyjnych, które poza sezonem grzewczym miały wyjątkowo dobrą jakość powietrza.

Poziomy $PM_{2.5}$ były bardzo wysokie i niektóre badania potwierdziły ich bezpośredni wpływ na rozprzestrzenianie się koronawirusa. To właśnie badanie Kotsiou i współpr.²³⁾, potwierdziło, że $PM_{2.5}$ przyczynił się bezpośrednio do rozprzestrzeniania się Covid 19 we Włoszech, które miały jedno z najwyższych zanieczyszczeń powietrza w Europie. Li i współpr.²⁴⁾ stwierdzili, że stężenie $PM_{2.5}$ uległo zmniejszeniu podczas lockdownów w 2020 r. w rejonie delty rzeki Jangcy (YRD) w Chinach. Na rys. 3 przedstawiono linię trendu stężenia $PM_{2.5}$ w 5 okresach monitorowania w latach 2019 i 2020 określonych w metodycie (przed lockdownem, lockdown N¹, po lockdownie N¹, lockdown N², po lockdownie N²).

Zanieczyszczenie cząstkami PM_{10}

W porównaniu z tym samym okresem w 2019 r., stężenia PM_{10} w okresie przed lockdownem nie różniły się znacząco pomiędzy stacjami monitoringu powietrza w monitorowanych miastach. Jedynie w 2 pomiarach z 40 zaobserwowano znaczący spadek średnich dziennych wartości stężenia PM_{10} . Co ciekawe, w 2 przypadkach zaobserwowano znaczny wzrost stężenia cząstek PM_{10} (Bańska Bystrzyca i Trenčyn). Cząstki $PM_{2.5}$ i PM_{10} pochodziły nie tylko z sektora energetycznego lub z przemysłu, ale także z gospodarstw domowych. Dlatego wynik badania ponownie udowodnił, że duża część zwiększonego stężenia tych cząstek w powietrzu na Słowacji wynikała ze zwiększonego zużycia energii, zwłaszcza ogrzewania w gospodarstwach domowych. Słowacki Instytut Hydrometeorologiczny regularnie zwracał uwagę na sytuację smogową spowodowaną pyłem zawieszonym, szczególnie w rejonie Bańskiej Bystrzycy, gdzie jakość powietrza była bardzo zła (tabela 5).

Trend zmian stężenia PM_{10} (rys. 4) pokazywał do pewnego stopnia spadek głównie podczas pierwszego lockdownu w marcu 2020 r. i ostatniego lockdownu w grudniu 2020 r. Spadek stężenia PM_{10} był bardziej widoczny w takich miastach, jak Preszów, Koszyce, Nitra lub Trnawa, gdzie za zanieczyszczenie NO_x odpowiedzialny był przede wszystkim główny sprawca zanieczyszczeń (transport). Z drugiej strony, wysokie stężenia PM_{10} utrzymywały się w rejonie Bańskiej Bystrzycy. Głównym źródłem zanieczyszczeń, podobnie jak w przypadku cząstek $PM_{2.5}$, było ogrzewanie gospodarstw domowych. W miesiącach zimowych był to również transport (zimny start). Jeśli chodzi o smog, najgorsza sytuacja spowodowana wyłącznie emisją PM_{10} miała miejsce w Jelšavie, gdzie w miesiącach zimowych regularnie osiągała ona wartość krytyczną.

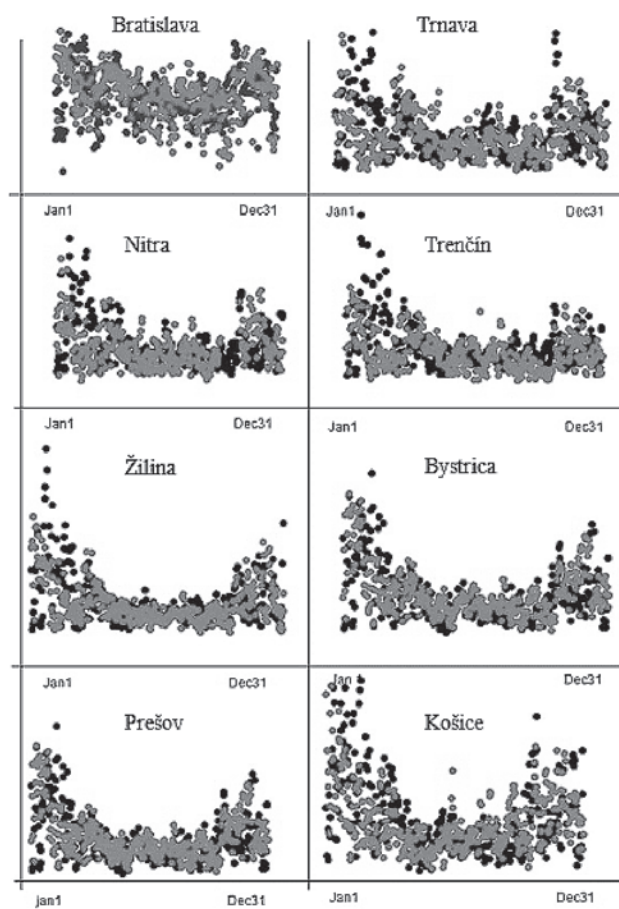


Fig. 3. The trend of concentration of $PM_{2.5}$ in $\mu g/m^3$ in Bratislava, Trnava, Nitra, Trenčín, Žilina, Bystrica, Prešov, Košice in 2019 (black) and 2020 (grey). Data source: European Environmental Agency

Rys. 3. Trend zmian stężenia $PM_{2.5}$, $\mu g/m^3$, w Bratysławie, Trnawie, Nitrze, Trenčynie, Żylinie, Bystrzycy, Preszowie i Koszycach w latach 2019 (czarny) i 2020 (szary). Źródło danych: Europejska Agencja Środowiska

mainly used for heat production, in contrast to larger cities that used natural gas as a heat source. The burning of coal and biomass (especially non-dried wood) was also involved. The problem of air quality was obvious in the countryside. The villages themselves, shrouded in thick smoke in winter, testify to this. In many cases, these were villages situated in the bosom of nature, far from industry and busy traffic arteries, which had exceptionally good air quality outside the heating season.

The $PM_{2.5}$ levels were very crucial and some studies confirmed a direct effect on coronavirus spread. It was the study of Kotsiou et al.²³⁾ that confirmed that $PM_{2.5}$ contributed directly to the spread of Covid 19 in Italy, which had one of the highest air pollutions in Europe. Li et al.²⁴⁾ found that the concentration of $PM_{2.5}$ was reduced during lockdowns in 2020 in the Yangtze River Delta (YRD) region in China. On Fig. 3, the trendline of $PM_{2.5}$ concentration during the five monitored periods in the 2019 and 2020 specified in the methodology (pre-lockdown, lockdown N¹, post-lockdown N¹, lockdown N², post-lockdown N²) was shown.

Chociaż badania nie potwierdziły prawie żadnego spadku stężenia cząstek PM_{10} , w niektórych, głównie silnie zanieczyszczonych, obszarach miejskich na świecie odnotowano bardziej znaczący spadek stężenia cząstek PM_{10} podczas lockdownu, np. w Indiach²⁵⁾ lub Chinach²⁶⁾, gdzie zanieczyszczenie to było bardziej związane z produkcją przemysłową. Zmniejszenie było bardziej widoczne również z tego powodu, że poziom zanieczyszczeń w tych najbardziej zaludnionych krajach znacznie przekraczał granice szkodliwości.

Omówienie wyników i wnioski

Oceniono stan i zmiany stężenia cząsteczek NO_2 oraz cząstek $PM_{2.5}$ i PM_{10} w 8 regionach Słowacji. Zmiany stężenia w 2020 r. zostały porównane z wartościami z 2019 r. Rok 2020 podzielono na 5 okresów zgodnie z terminami wprowadzenia środków przeciwpandemicznych, co stwarzało wyjątkową okazję do zmniejszenia mobilności mieszkańców.

Wyniki badania były przekonujące. Jedynie zmniejszenie stężenia NO_2 okazało się statystycznie istotne. To statystycznie istotne zmniejszenie stężenia związane było przede wszystkim z ograniczeniem mobilności, a tym samym z ograniczeniem ruchu drogowego jako takiego. Była to jedna z największych korzyści wynikających ze wszystkich badań, w których oceniano wpływ lockdownów na jakość powietrza, i została ona potwierdzona tym badaniem również dla Słowacji. W rezultacie potwierdzono, że duża część zanie-

Particle pollution (PM_{10})

Compared to the same period in 2019, PM_{10} concentrations during the pre-lockdown period were not significantly different between the air-monitoring stations across the monitored cities as well. Only in 2 measurements out of 40, a significant decrease in the average daily values of PM_{10} concentration was observed. Interestingly, in 2 cases a significant increase in PM_{10} particle concentrations was observed, specifically in Banská Bystrica and Trenčín. The $PM_{2.5}$ and PM_{10} particles came mainly from the energy sector, whether industry, and even more from households. Therefore, the result of the test again proved that a large share of the increased concentration in Slovakia was due to increased energy consumption, especially heating in households. The Slovak Hydrometeorological Institute regularly drew attention to the smog situation caused by particulate matter, especially in the region of Banská Bystrica, where air quality was very poor (Table 5).

The trend of concentration of PM_{10} shown in Fig. 4 moderated to some extent the decrease mainly during the first lockdown in March 2020 and the last lockdown in December 2020. The decrease in PM_{10} concentrations was more visible in cities like Prešov, Košice, Nitra or Trnava, where the main polluter (transportation) was mostly responsible for NO_x pollution. On the other hand, high concentrations of PM_{10} persisted in the region of Banská Bystrica. The main source of pollution, similar to $PM_{2.5}$ particles, was household heating. In the winter months, it was also transport

Table 5. Paired t-test of PM_{10} concentration in $\mu g/m^3$

Tabela 5. Sparowany test t dla stężenia PM_{10} , $\mu g/m^3$

Region/ Region	Pre-lockdown/ Przed lockdownem	Lockdown N ¹	Post-lockdown N ¹ / Po lockdownie N ¹	Lockdown N ²	Post-lockdown N ² / Po lockdownie N ²
Bratislava	P value/ Wartość P 0.41 34.32/28.14	P value/ Wartość P 0.59 28.05/26.14	P value/ Wartość P 0.03 24.1/23.14	P value/ Wartość P 0.13 25.02/26.14	P value/ Wartość P 0.3 23.86/24.14
Trnava	P value/ Wartość P 0.00 32.33/23.14	P value/ Wartość P 0.6 24.89/26.14	P value/ Wartość P 0.10 19.9/18.66	P value/ Wartość P 0.30 25.64/28.921	P value/ Wartość P 0.48 23.09/21.20
Nitra	P value/ Wartość P 0.02 28.9/23.42	P value/ Wartość P 0.60 24.78/23.52	P value/ Wartość P 0.37 17.76/17.15	P value/ Wartość P 0.21 23.7/27.6	P value/ Wartość P 0.10 22.31/26.83
Trenčín	P value/ Wartość P 0.00 37.37/28.1	P value/ Wartość P 0.37 26.21/ 24.96	P value/ Wartość P 0.96 21.54/ 17.83	P value/ Wartość P 0.02 18.42/18.45	P value/ Wartość P 0.44 26.71/35.25
Žilina	P value/ Wartość P 0.03 35.66/28.03	P value/ Wartość P 0.37 21.76/23.89	P value/ Wartość P 0.91 17.77/17.71	P value/ Wartość P 0.11 23.46/28.22	P value/ Wartość P 0.83 24.61/23.83
Banská Bystrica	P value/ Wartość P 0.06 31.79/27.35	P value/ Wartość P 0.74 20.76/20.14	P value/ Wartość P 0.61 15.98/15.65	P value/ Wartość P 0.01 22.03/28.66	P value/ Wartość P 0.12 24.43/19.61
Prešov	P value/ Wartość P 0.18 35.98/32.71	P value/ Wartość P 0.36 26.64/ 27.60	P value/ Wartość P 0.00 22.58/20.37	P value/ Wartość P 0.24 35.54/31.4	P value/ Wartość P 0.56 26.81/25.18
Košice	P value/ Wartość P 0.12 36.84/33.19	P value/ Wartość P 0.22 27.02/24.20	P value/ Wartość P 0.64 19.33/19.7	P value/ Wartość P 0.25 29.42/32.88	P value/ Wartość P 0.12 28.27/23.75

*Mean 19/Mean 20, $\mu g/m^3$ /Średnia 19/średnia 20, $\mu g/m^3$

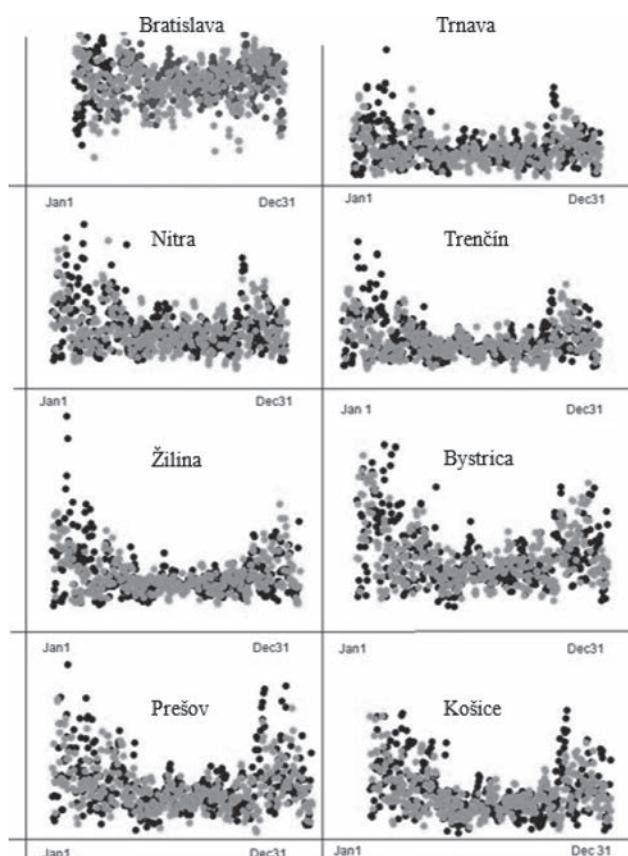


Fig. 4. The trend of concentration of PM_{10} in $\mu g/m^3$ in Bratislava, Trnava, Nitra, Trenčín, Žilina, Bystrica, Prešov, Košice in 2019 (black) and 2020 (grey). Data source: European Environmental Agency

Rys. 4. Trend zmian stężenia PM_{10} , $\mu g/m^3$, w Bratysławie, Trnawie, Nitrze, Trenčynie, Żylinie, Bystrzycy, Preszowie i Koszycach w 2019 r. (kolor czarny) i 2020 r. (kolor szary). Źródło danych: Europejska Agencja Środowiska

czyszczeń powietrza może być wyeliminowana przez nowe rozwiązania w zakresie mobilności, dzięki czemu zmniejszy się nieefektywne ekonomicznie i środowiskowo korzystanie z prywatnych samochodów. Pandemia nie pomogła jednak systemom komunikacyjnym miast, z których ludzie bali się korzystać z powodu rozprzestrzeniania się epidemii.

Z drugiej strony, wyniki jakości powietrza zależały również od głównego lokalnego źródła zanieczyszczeń. Jeśli chodzi o cząstki $PM_{2.5}$ i PM_{10} , to wiele badań z całego świata potwierdziło, że stężenie tych cząstek w powietrzu nie zmniejszyło się mimo lockdownów. Wynikało to z faktu, że emisje ze źródeł naturalnych (kurz, pyłki), gospodarstw domowych (ogrzewanie) oraz wynikające z innych podstawowych usług, które nadal istniały, mogły mieć znaczący udział w emisji. Trzeba było zdać sobie sprawę, że na Słowacji ogrzewanie gospodarstw domowych przyczynia się do zanieczyszczenia cząstkami $PM_{2.5}$ aż w 79% całkowitej emisji⁹⁾. W czasie lockdownów duża część ludności pracowała w domu, a więc większość gospodarstw domowych emitowała jeszcze więcej ultradrobnych cząstek. Można zatem stwierdzić, że pomimo podjętych działań nie nastąpiła znacząca ogólna poprawa jakości powietrza. Po wprowadzeniu środków przeciwpandemicznych niektóre wskaźniki jakości powietrza uległy

(cold start). The worst smog situation caused exclusively by PM_{10} emissions was in Jelšava, where it regularly reached a critical value in the winter months.

Although the study did not confirm almost any decrease in the concentration of PM_{10} particles, in some, mostly heavily polluted urban areas of the world, there was a more significant decrease in PM_{10} particles during the lockdown, such as in India²⁵⁾ or China²⁶⁾, where this pollution was more related to industrial production. The reduction was also more visible due to the very fact that the level of pollution in these most populous countries far exceeded the limits of harm.

Discussion and conclusion

The state and change in the concentration of NO_2 , $PM_{2.5}$ and PM_{10} particles in the eight regional municipalities in Slovakia were evaluated. The change in the concentration in 2020 were compared with the values from 2019. The year 2020 was divided into five periods according to the time of the adoption of anti-pandemic measures, which offered a unique opportunity to reduce mobility.

The results of the study were convincing. Only a reduction in the NO_2 concentration proved to be statistically significant. This statistically significant reduction in concentrations was mainly related to a reduction in mobility and thus, a reduction in traffic as such. It was one of the biggest benefits of all studies, which investigated the effect of lockdowns on air quality, and it has been confirmed with this study for Slovakia as well. The result was a confirmation that a large part of air pollution can be eliminated by new mobility solutions so that the economically and environmentally inefficient use of private cars will be reduced. However, the pandemic did not help the city's transportation systems, which people were afraid to use because of the spread of the infection.

On the other hand, air quality results also depended on the main local pollutant. As for $PM_{2.5}$ and PM_{10} particles, several studies from around the world confirmed that the concentration of these particles in the air did not decrease despite the lockdowns. It was because the emissions from natural sources (dust, pollens), households (heating) and other essential services that were still there could have a significant portion of emissions. It was necessary to realize that in Slovakia household heating contributed to pollution with dust particles ($PM_{2.5}$) up to 79% of the total emissions⁹⁾. During the lockdowns, a large part of the population worked from home, and thus most households produced even more emissions of ultra-fine particles. It could therefore be stated that, despite the measures in place, there has been no significant overall improvement in air quality, or this statement can be modified. After the introduction of anti-pandemic measures, some air quality indicators were improved in the short term. It was therefore impossible to accept the claims that the overall air quality was improved significantly during the first wave of pandemic.

krótkotrwałej poprawie. Dlatego nie można było zaakceptować twierdzenia, że ogólna jakość powietrza uległa znacznej poprawie podczas pierwszej fali pandemii.

Faktem jest, że lockdown nie może być stałym lub długoterminowym rozwiązaniem dla zmniejszenia poziomu zanieczyszczenia powietrza w jakimkolwiek obszarze geograficznym. Ponadto badanie ponownie wskazało, że jakość powietrza w słowackich miastach wymaga intensywniejszych działań. Stężenia zanieczyszczeń były alarmujące, a nawet najbardziej znaczące restrykcje na całym świecie nie zdołały trwale obniżyć poziomów tych zanieczyszczeń. W niektórych najbardziej zaludnionych obszarach miejskich na świecie, po wprowadzeniu środków przeciwpandemicznych nastąpiło pogorszenie wskaźnika jakości powietrza²⁷⁾. Słowacja już dawno przekroczyła ustalone limity stężenia zanieczyszczeń cząsteczkowych, a ponadto, w związku z zanieczyszczeniem powietrza, ma obecnie do czynienia z pozwem Komisji Europejskiej. Zanieczyszczone powietrze miało istotny negatywny wpływ na zdrowie ludzi, co wiązało się również z kosztami ekonomicznymi leczenia tzw. chorób cywilizacyjnych.

Długotrwałe narażenie na pył zwiększało częstość występowania astmy, problemów sercowo-naczyniowych, chorób płuc, a w niektórych przypadkach prowadziło do przedwczesnej śmierci. Według Instytutu Polityki Środowiskowej tym zgonom można by zapobiec, gdyby stężenie zanieczyszczeń spadło do wartości zalecanej przez Światową Organizację Zdrowia ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dla $\text{PM}_{2.5}$ i $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dla PM_{10}). Wysokie stężenia $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} i NO_2 były na Słowacji przyczyną ok. 1600 przedwczesnych zgonów rocznie. Oznacza to, że gdyby stężenie zostało obniżone do wartości zalecanej przez Światową Organizację Zdrowia, każdego roku na Słowacji umierałoby przedwcześnie ok. 1600 osób mniej⁹⁾. Główną przyczyną było narażenie na cząstki $\text{PM}_{2.5}$, następnie na cząstki PM_{10} i cząsteczki ditlenku azotu.

Bardzo niepokojący jest również fakt, że samo stężenie zanieczyszczeń ma bezpośredni wpływ na tempo rozprzestrzeniania się i występowania Covid 19^{11, 28, 29)}. Dotychczas dynamika przenoszenia Covid-19 wydawała się być uzależniona głównie od jakości powietrza. Ponadto, długotrwałe zanieczyszczenie powietrza pogarszało objawy samej choroby. Dotyczyło to również wszystkich podobnych chorób wirusowych przenoszonych drogą powietrzną. Dlatego, jeżeli celem była poprawa jakości życia ludzi, zwłaszcza w obszarach miejskich, pandemia dała impuls do poprawy jakości powietrza w przyszłości. Biorąc pod uwagę obecną sytuację, konieczne były interwencje polityczne w celu ograniczenia źródeł zanieczyszczenia powietrza i promowania alternatywnych środków w celu zmniejszenia emisji. Sugerowane działania mogą być skoordynowanym podejściem powiązanych sektorów, w tym przyjęciem polityki i technologii w celu zmniejszenia zanieczyszczenia powietrza, np. poprzez zwiększenie pokrycia zielenią, wykorzystanie zielonych technologii i zasobów odnawialnych, takich jak energia słoneczna. Ponadto, powinno się promować wykorzystywanie w miastach niezmotywowanych środków transportu dla

It is a fact; the lockdown cannot be a permanent or long-term solution for reducing air pollution levels in any geographical area. Moreover, the study again pointed to the fact that air quality in our cities still needed to be addressed more intensively. Pollutant concentrations were alarming, and even the most significant restrictions around the world have failed to permanently reduce levels of these pollutants. In some of the most inhabited urban areas in the world, the air quality index event worsened after the release of anti-pandemic measures²⁷⁾. Slovakia had long exceeded the set limits for the concentration of particle pollution, and in addition, in connection with air pollution, it was currently facing a lawsuit by the European Commission. The polluted air had a significant negative impact on human health, which also entailed economic costs for the treatment of so-called diseases of civilization.

Long-term exposure to dust increased the incidence of asthma, cardiovascular problems, lung diseases and in some cases led to premature death. According to the Institute of Environmental Policy, these deaths could be prevented if the density of pollutants fell to the value recommended by the World Health Organization ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for $\text{PM}_{2.5}$ and $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for PM_{10}). Current high concentrations of $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} and NO_2 were the cause of about 1,600 premature deaths per year in Slovakia. This means that if concentrations were reduced to the value recommended by the World Health Organization, approximately 1,600 fewer people in Slovakia would die prematurely each year⁹⁾. The main cause was exposure to $\text{PM}_{2.5}$ particles, i.e., solid particles up to 2.5 micrometres in diameter. This was followed by larger solid PM_{10} particles and nitrogen dioxide (NO_2) particles.

It is also a very worrying fact that the concentration of pollution itself has had a direct effect on the rate of spread and incidence of Covid 19^{11, 28, 29)}. To date, Covid-19 transmission dynamics appeared to have been influenced mainly by air quality. In addition, long-term air pollution worsened the symptoms of the disease itself. This also applied to all similar airborne viral diseases. Therefore, if the goal was to improve people's quality of life, especially in urban areas, the pandemic has given an impetus to improve air quality in the future. Considering the current situation, policy interventions were needed to mitigate air pollution sources and promote alternative measures to reduce emissions footprint. The suggested actions may be a coordinated approach of related sectors, including adoption of policies and technologies for reduction of air pollution, e.g., increasing the in green cover, use of green technologies and renewable resources such as solar power. Further, the cities should promote the non-motorized mode of transportation in a town for all ages and populations, including the differently abled community. It is necessary to build infrastructure for this, as the bicycle network in Slovakia is not sufficient, although some cities are actively building it. However, it avoids a better connection

wszystkich grup wiekowych i społecznych, w tym dla społeczności osób niepełnosprawnych. Konieczna jest do tego budowa infrastruktury, ponieważ sieć dróg rowerowych na Słowacji jest wciąż niewystarczająca, chociaż niektóre miasta aktywnie ją budują. Brak jest jednak lepszego połączenia poszczególnych dróg. Z drugiej strony, na obszarach wiejskich konieczne jest rozwiązanie problemu ogrzewania materiałami niskiej jakości, ponieważ jakość powietrza w sezonie grzewczym, który jest stosunkowo długi, ulega istotnemu pogorszeniu, znacznie powyżej poziomów granicznych. Można wzmocnić politykę dotyczącą innych działań, takich jak praca w domu, zajęcia online, wirtualne konferencje czy bankowość cyfrowa. Obecny kryzys energetyczny będzie miał również duży wpływ na wprowadzenie nowych technologii. Z jednej strony, chociaż Unia promuje, powiedzmy, proste rozwiązania, to jednak daje obywatelom wrażenie, że na codziennych czynnościach będą oszczędzać pieniądze lub chronić środowisko. Okazuje się jednak, że te rozwiązania nie są skuteczne, a nawet nie są trwałe w dłuższej perspektywie. Równoległe z oszczędzaniem i ograniczaniem emisji konieczna jest budowa infrastruktury przemysłowej, aby móc lepiej wykorzystywać alternatywne zasoby, w które zainwestowano w ostatnich latach, lub tworzyć nowe. Energia jądrowa jest z pewnością integralną częścią gospodarki niskoemisyjnej, która jednak z powodu niechęci rozwija się bardzo powoli. Ponadto Europa jako całość nie może zbilansować swoich źródeł zaopatrzenia, i to nie tylko w przypadku paliw kopalnych. Widać to również w dziedzinie energii alternatywnej, ponieważ większość akumulatorów, które napędzają bezemisyjne samochody elektryczne, jest produkowana w Chinach.

of individual roads. On the other hand, it is necessary to solve heating with low-quality materials in rural areas, as the air quality during the heating season, which is relatively long, significantly deteriorates well above the limit levels. The policies related to other measures such as work-from-home, online classes, virtual conferences or digital banking may be strengthened. The current energy crisis will also greatly affect the introduction of new technologies. On the one hand, although the Union promotes, let's say, simple solutions, it gives citizens the mental impression that they will save money or protect the environment on everyday activities. However, it turns out that these solutions are not effective and are even not sustainable in the long term. Hand in hand with saving as well as reducing emissions is undoubtedly the building of industrial infrastructure in order to be able to better use alternative resources, which have been invested in in recent years, or to create new ones. Nuclear energy is certainly an integral part of the low-carbon economy, which, however, is progressing very slowly due to reluctance. Moreover, Europe as a whole cannot balance its supply sources, and not only in the case of fossil fuels. This is also shown in the field of alternative energy, because most of the batteries that drive emission-free electric cars are produced in China.

Received/Otrmano: 01-02-2023

REFERENCES/LITERATURA

- [1] J. Beňo, D. Štefánik, *Vplyv opatrení súvisiacich s COVID-19 na kvalitu ovzdušia v SR – prvý mesiac*, Slovenský hydrometeorologický ústav, 2020, <http://www.shmu.sk/sk/?page=2049&id=1054> (accessed May 1, 2021).
- [2] G. Donzelli et al., *Atmosphere* 2020, **11**, 1118, <https://doi.org/10.3390/atmos11101118>
- [3] R. Dobson, S. Semple, *Occup. Environ. Med.* 2020, **77**, 798.
- [4] A.F. Skirienė, Ž. Stasiškienė, *Atmosphere* 2021, **12**, No. 3, 290, <https://doi.org/10.3390/atmos12030290>.
- [5] L.Y.K. Nakada, R.C. Urban, *Sci. Total Environ.* 2020, **730**, 139087, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139087>.
- [6] S. Sannigrahi et al., *Environ. Res.* 2021, **196**, 110927, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110927>.
- [7] J. Carcel-Carrasco, M. Pasqual-Guillamón, J. Langa-Sanchis, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2021, **28**, 36880, <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13301-1>.
- [8] EPHA, *The impact of COVID-19 lockdowns on levels of air pollution in Ljubljana*, 2021, online <https://epha.org/the-impact-of-covid-19-lockdown-on-levels-of-air-pollution-in-ljubljana/covid19> (accessed April 25, 2021).
- [9] Inštitút environmentálnej politiky, *Pričiny a zdravotné dôsledky znečistenia ovzdušia na Slovensku, Diskusná štúdia*, 2021, https://www.minzp.sk/files/iep/2021_2_air_quality_study_sk.pdf.
- [10] O. Enkhtsolmon, T. Matsumoto, E. Tseveen, *Int. J. Environ. Sci. Dev.* 2016, **7**, No. 5, 330, 10.7763/IJESD.2016.V7.794.
- [11] K. Wang, J. Wang, K. Hubacek, Z. Mi, Y.M. Wei, *J. Ind. Ecol.* 2019, **24**, 16, DOI: 10.1111/jiec.12947.
- [12] M.L. Cropper et al., *J. Benefit-Cost Anal.* 2018, **10** (S1), 185, doi:10.1017/bca.2018.27.
- [13] Inštitút environmentálnej politiky, *Oplatí sa čistiť odpadovú vodu? Odhad environmentálnych benefitov čistenia odpadových vôd na Slovensku*, 2018, https://www.minzp.sk/files/iep/2018_04_benefit_cistenia_odpadovych_vod.pdf.
- [14] K.-Q. Deng, C. Azorin-Molina, S. Yang, C.-D. Hu, G.-F. Zhang, L. Minola, S. Vicente-Serrano, D. Chen, *Adv. Clim. Change Res.* 2022, **13**, No. 2, 218, <https://doi.org/10.1016/j.accre.2022.01.008>.
- [15] M.C. Collivignarelli, A. Abbà, G. Bertanza, R. Pedrazzani, P. Ricciardi, M. Carnevale Miino, *Sci. Total Environ.* 2020, **732**, 139280.
- [16] J.M. Baldasano, *Sci. Total Environ.* 2020, **741**, 140353, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140353>.
- [17] A. Kerimray, N. Baimatova, O.P. Ibragimova, B. Bukenov, B. Kenessov, P. Plotitsyn, F. Karaca, *Sci. Total Environ.* 2020, **730**, 139179, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139179>.
- [18] S. Fenech, N.J. Aquilina, *Sci. Total Environ.* 2020, **700**, 134527, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134527.
- [19] M.J. Cooper, R.V. Martin, M.S. Hammer et al., *Nature* 2022, **601**, 380, <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04229-0>.
- [20] F. Dutheil, J.S. Baker, V. Navel, 2020, **263** (Pt A), 114466, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114466. Epub 2020 Apr 9. PMID: 32283458; PMCID: PMC7144597.
- [21] C.A. Keller, M.J. Evans, K.E. Knowland, C.A. Hasenkopf, R.A. Lucchesi, T. Oda et al., *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 2020 [Preprint], doi: 10.5194/acp-2020-685.
- [22] Z.S. Venter, K. Aunan, S. Chowdhury, J. Lelieveld, *Proc. Natl. Acad. Sci.* Aug. 2020, **117**, No. 32, 18984, DOI: 10.1073/pnas.2006853117.
- [23] O.S. Kotsiou, V.S. Kotsios, I. Lampropoulos, T. Zidros, S.G. Zarogiannis, K.I. Gourgoulis, *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2021, **18**, 5088, <https://doi.org/10.3390/ijerph18105088>.
- [24] L. Li et al., *Sci. Total Environ.* 2020, **732**, 13.
- [25] A. Gayen, S.M. Haque, S.V. Mishra, *Urban Climate* 2021, **36**, 100786, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100786>.
- [26] B. Silver et al., *Environ. Res. Lett.* 2020, **15**, 084021.
- [27] K. Ravindra et al., *J. Infect. Public Health* 2022, **15**, 187, <https://doi.org/10.1016/j.jiph.2021.12.001>.
- [28] G. Veronesi et al., *Occup. Environ. Med.* 2022, **79**, 192.
- [29] Y. Yao et al., *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2021, **208**, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111421>.