

JAKUB ZAWIESKA¹⁾

ANALYSIS OF EXTERNAL COSTS OF TRANSPORT WITHIN THE SCOPE OF EMISSIONS OF AIR POLLUTION AND NOISE

ANALIZA PROBLEMATYKI KOSZTÓW ZEWNĘTRZNYCH TRANSPORTU W ZAKRESIE EMISJI ZANIECZYSZCZEŃ I HAŁASU

STRESZCZENIE. Celem artykułu jest przedstawienie przeglądu najważniejszych zagadnień związanych z emisją zanieczyszczeń przez sektor transportu oraz dostępnej wiedzy na temat wyceny kosztów zewnętrznych emisji zanieczyszczeń. Opisano podstawowe kategorie zanieczyszczeń oraz przeanalizowano udział sektora transportu w globalnych oraz krajowych emisjach. W ramach artykułu opisano także zagrożenia i rodzaje kosztów zewnętrznych związanych z tymi emisjami. Praca zawiera przegląd metodologii szacowania zewnętrznych kosztów emisji dla poszczególnych kategorii zanieczyszczeń oraz prezentuje dostępne wyniki szacunków dotyczących wysokości tych kosztów wykonywane w ostatnich latach w Europie.

SŁOWA KLUCZOWE: emisja zanieczyszczeń, koszty zewnętrzne transportu, zrównoważony transport.

ABSTRACT. The paper aims to present a review of the most important issues related to air pollution emissions from the transport sector and an accessible knowledge of their external costs assessment. The main categories of pollution are described, and a contribution of the transport sector to global and domestic emissions is analysed. Additionally, as a part of this paper, various threats and types of external costs related to those emissions are discussed. The paper also contains the review of methodologies for evaluation of emissions external costs for individual categories of pollution. Furthermore, it demonstrates available results of estimations concerning those costs performed over recent years in Europe.

KEYWORDS: air pollution emission, external transport costs, sustainable transport.

DOI: 10.7409/rabdim.015.015

¹⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa; jzawieska@ibdim.edu.pl

1. WSTĘP

W ostatnich latach na całym świecie nastąpił wyraźny wzrost wiedzy i świadomości na temat szkodliwych skutków działalności człowieka dla środowiska naturalnego. Równoległe można zaobserwować wzrost deklarowanych chęci do redukcji emisji i zanieczyszczeń. Pojęcie „zrównoważonego transportu” (ang. *sustainable transport*) występuje obecnie jako podstawowy element właściwie wszystkich dokumentów strategicznych i planistycznych dotyczących transportu. Poniższy artykuł przedstawia rodzaje zanieczyszczeń środowiska naturalnego generowanego przez transport, udział tego sektora w globalnych emisjach tych zanieczyszczeń, a także metodologie szacowania ich kosztów i efektów.

2. UDZIAŁ SEKTORA TRANSPORTU W ZANIECZYSZCZANIU ŚRODOWISKA NATURALNEGO

2.1. EMISJE Z SEKTORA TRANSPORTU

W przypadku emisji z sektora transportu wyróżnia się trzy podstawowe rodzaje zanieczyszczeń [1]:

- lokalne zanieczyszczenia powietrza,
- emisje gazów cieplarnianych wpływających na zmiany klimatyczne,
- emisje hałasu.

2.2. LOKALNE ZANIECZYSZCZENIA POWIETRZA

Sektor transportu jest jednym z głównych źródeł lokalnego zanieczyszczenia powietrza w Europie, zwłaszcza na terenach gęsto zaludnionych. Główne emitowane substancje to:

- cząstki stałe, tzw. pył zawieszony (ang. *particulate matter*, PM),
- tlenek węgla (CO),
- tlenki azotu (NO_x),
- tlenki siarki (SO_x),
- lotne związki organiczne (LZO).

Cząstki stałe obejmują substancje zawieszone w powietrzu w stanie stałym lub płynnym. Kwalifikuje się je według wielkości, jako PM_{2,5} (średnica do 2,5 mikrometra) lub PM₁₀ (średnica do 10 mikrometrów). Głównym źródłem cząstek stałych są spaliny wydechowe, jednakże są one emitowane także w wyniku zużycia opon i hamulców pojazdów

1. INTRODUCTION

In recent years there has been a noticeable and rapid worldwide growth of knowledge and consciousness about harmful effects of human activity to the natural environment. Similarly, the increase of declared readiness to reduce emissions and pollution can be observed. The notion of sustainable transport appears nowadays as a key element of all strategic and planning documents concerning transportation. The following paper outlines types of pollution generated by transport, the share of that sector in global emissions as well as methodologies for estimating their costs and effects.

2. CONTRIBUTION OF THE TRANSPORT SECTOR TO THE ENVIRONMENTAL POLLUTION

2.1. EMISSIONS FROM THE TRANSPORT SECTOR

Three distinct types of pollution can be enumerated in case of emissions from the transport sector [1]:

- local air pollution,
- greenhouse gas emissions inducing climatic changes,
- noise emissions.

2.2. LOCAL AIR POLLUTION

The transport sector remains one of the main sources of local air pollution in Europe, particularly in densely populated areas. The main emitted substances are:

- particles, so-called particulate matter (PM),
- carbon monoxide (CO),
- nitric oxides (NO_x),
- sulphur oxides (SO_x),
- volatile organic compounds (VOC).

Particulate matter includes air suspended substances in solid or liquid states. It is classified according to their sizes as PM_{2,5} (up to 2.5 micrometres in diameter) or PM₁₀ (up to 10 micrometres in diameter). The basic source of particulate matter are combustion gases. However, they are also emitted as wear products of tires and brakes of vehicles driving along roads. Volatile organic compounds (VOC) comprise substances with the bubble point lower than or equal to 250°C [2]. Hydrocarbons, oxygen

poruszających się po drogach. Natomiast lotne związki organiczne (LZO) zawierają związki organiczne o temperaturze wrzenia mniejszej lub równej 250°C [2]. Zalicza się do nich węglowodory, związki tlenowe, kwasy organiczne, a także niektóre związki zawierające azot i siarkę. LZO dodatkowo dzieli się na metanowe lotne związki organiczne (MLZO) oraz niemetanowe lotne związki organiczne (NMLZO). Podstawowym źródłem LZO są emisje spalin powstających ze spalania paliwa w komorze silnika samochodu. Związki te uwalniają się także przy wszelkich czynnościach związanych z tankowaniem samochodu, przepompowaniem paliw itp. Rys. 1 przedstawia udział sektora transportu w głównych zanieczyszczeniu powietrza w Europie.

compounds, organic acids and some compounds containing nitrogen and sulphur are among them. Moreover, VOC may be divided into methane volatile organic compounds (MVOC) and non-methane volatile organic compounds (NMVOC). The main source of VOC are emissions of exhaust gases from burning fuel in engines of vehicles. Additionally, those compounds are also released in the middle of all activities related to vehicle refuelling, fuel pumping operations, etc. Fig. 1 presents the contribution of transport sector to total emissions of main air pollutants in Europe.

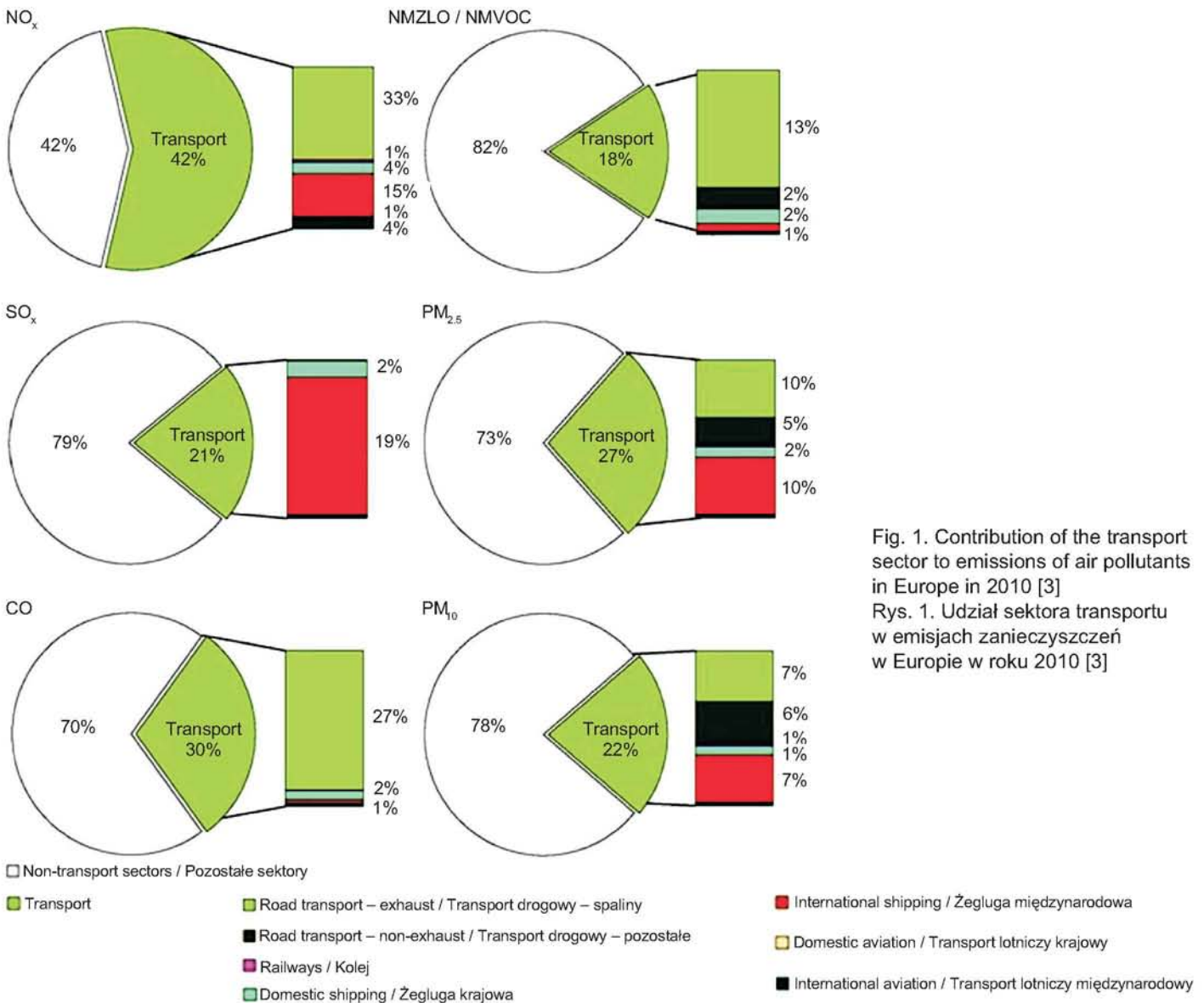


Fig. 1. Contribution of the transport sector to emissions of air pollutants in Europe in 2010 [3]

Rys. 1. Udział sektora transportu w emisjach zanieczyszczeń w Europie w roku 2010 [3]

Według danych EEA sektor transportu jest jednym z największych emitentów zanieczyszczeń w Europie. W 2009 roku w zależności od rodzaju zanieczyszczeń udział sektora transportu wynosił od 18% do 58%. Transport był największym emitentem tlenków azotu i drugim największym emitentem tzw. prekursorów ozonu, tzn. substancji uczestniczących w powstawaniu ozonu. W zakresie emisji cząstek stałych sektor transportu jest największym emitentem PM_{10} i drugim co do wielkości emitentem $PM_{2,5}$ [3].

W zależności od rodzaju substancji względny udział emisji jest zróżnicowany na terenie Polski. Według danych Krajowego Ośrodka Bilansowania i Zarządzania Emisjami (KOBIZE) za rok 2012, w przypadku emisji NO_x , udział transportu drogowego w Polsce jest porównywalny do danych w Europie i wynosi 33,2% [4]. Z kolei w kategorii emisji NMZLO (ang. NVOC) udział transportu drogowego w Polsce jest znacząco wyższy (ponad 32%) niż średnia europejska (15% dla emisji z transportu drogowego). W przypadku tlenku węgla udział transportu drogowego w Polsce wynosi niewiele ponad 23%, natomiast dla wszystkich państw EEA wskaźnik ten został oszacowany na 27%. Także w przypadku emisji pyłów zawieszonych można zauważyć niewielkie różnice pomiędzy udziałami poszczególnych sektorów na poziomie krajowym i europejskim. W Polsce głównym źródłem emisji poszczególnych rodzajów cząstek są procesy stacjonarnego spalania poza przemysłem (tzw. niska emisja z sektora komunalno-bytowego). Transport drogowy to drugie co do wielkości źródło w emisjach pyłów z 9,6% udziałem emisji PM_{10} oraz 16,6% w przypadku $PM_{2,5}$. Jest to podobny udział do danych szacowanych dla całego kontynentu, wynoszących odpowiednio 13% w przypadku PM_{10} oraz 15% w przypadku $PM_{2,5}$. W Polsce udział transportu drogowego w emisji dwutlenku siarki, podobnie jak w całej Europie, pozostaje na bardzo niskim poziomie [4]. Powyższe dane wykazują, że pomimo istniejących różnic pomiędzy Polską i Europą, udział transportu drogowego w zanieczyszczeniu powietrza jest istotny, a w wielu przypadkach dominujący. Dodatkowo należy zaznaczyć, że przytoczone statystyki dotyczą sumarycznych emisji dotyczących wszystkich rodzajów obszarów emisji. W przypadku terenów zurbanizowanych udział sektora transportu w emisji całkowitej jest znacząco wyższy.

W przypadku emisji lokalnych zanieczyszczeń z sektora transportu należy jednocześnie zauważyć pozytywne i ważne zjawisko – w okresie od 1990 do 2010 emisja głównych substancji szkodliwych z sektora transportu zmalała (Rys. 2). Nie dotyczy to jednak emisji gazów cieplarnianych, opisanych w dalszej części pracy. Wśród substancji zanieczyszczających środowisko lokalnie największy spa-

According to the EEA data, the transport sector is one of the main pollution emitters in Europe. In 2009, depending on the type of pollution, the share of transport sector amounted from 18% to 58%. Transport was the first emitter of nitric oxides and the second emitter of the so-called precursors of ozone, i.e. substances involved in creating ozone. Furthermore, regarding particulate matter emissions the transport sector is the main emitter of PM_{10} , and the second emitter of $PM_{2,5}$ [3].

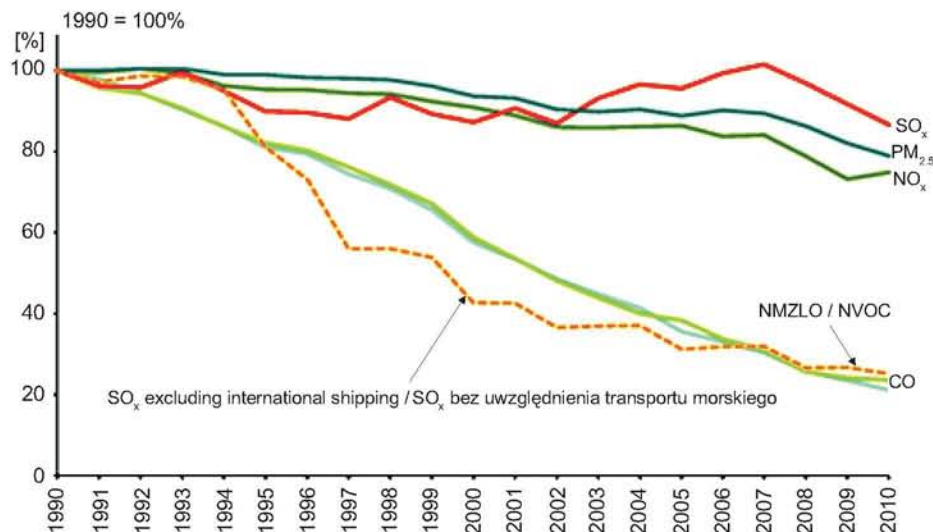
Depending on the type of substance, relative share of emissions is also diversified in Poland. According to the data of the National Centre for Emissions Balancing and Management (KOBIZE) for 2012, in case of the NO_x emission, the share of the road transport in Poland is comparable with data from Europe, and amounts to 33.2% [4]. In the category of NVOC emissions the share of the road transport in Poland is considerably higher (above 32%) than the European average (15% for emissions from the road transport). In case of nitric oxide the contribution of road transport amounts to a little above 23%, while for all EEA countries that index was estimated at 27%. In case of particulate matter emissions some small differences between contributions of separate sectors on the domestic and European level can also be noticed. In Poland the main source of emission of particular types of particles are the processes of stationary out-of-industrial burning (so-called low emission of the council-living sector). The road transport is second in size for PM emission, with the share of PM_{10} at 9.6% and $PM_{2,5}$ at 16.6%. That share is similar to the data assessed for the whole continent coming to 13% and 15% for PM_{10} and $PM_{2,5}$ respectively. The share of road transport in emissions of sulphur dioxide in Poland, likewise in Europe, remains on a very low level [4]. The above data shows this, despite the differences between Poland and Europe, the share of road transport in air pollution is essential and in many cases dominates. Additionally, it should be emphasized that the quoted statistics refer to all types of pollution areas. In case of urbanised areas the share of the transport sector in the total emission is considerably higher.

Both positive and important phenomenon should be noted in case of emissions of local pollution from the transport sector, which is the decrease in the emissions of main harmful substances for the period 1990 - 2010 (Fig. 2). However, it does not concern emissions of greenhouse gases described later in the paper. Among local pollutants the sharpest decrease in emissions of carbon oxygen (76%) and non-methane volatile organic compounds (75%) can be observed. The reduction in share of emissions of sulphur

dek został zaobserwowany dla emisji tlenku węgla (76%) oraz niemetanowych lotnych związków organicznych (75%). Redukcja udziału emisji tlenków siarki z transportu drogowego uległa obniżeniu w wyniku wzrostu emisji z sektora transportu morskiego, odpowiedzialnego za aż 87% wszystkich emisji. Minimalny wzrost emisji tlenków azotu NO_x jest z kolei tłumaczony wzrostem przewozów towarowych po okresie kryzysu ekonomicznego.

oxides from the road sector dropped as a result of an increase in emissions from the sea transport sector, which is responsible for 87% of all emissions. The slight increase in emissions of nitric oxides NO_x is justified by an increase in goods transport following the period of economic crisis.

Fig. 2. Basic emissions from the transport sector over the period 1990-2010 [3]
Rys. 2. Podstawowe emisje z sektora transportu w latach 1990-2010 [3]



2.3. EMISJE GAZÓW CIEPLARNIANYCH

Drugą podstawową kategorią zanieczyszczeń z sektora transportu jest emisja gazów cieplarnianych (GHG). Są to gazowe składniki atmosfery, zarówno naturalne, jak i antropogeniczne, które pochłaniają i reemitują promieniowanie podczerwone [5]. Gazy cieplarnie są naturalnym składnikiem atmosfery i pełnią ważną rolę w jej prawidłowym funkcjonowaniu. Jednakże ich nadmierna koncentracja przynosi negatywne skutki. W uproszczeniu, zbyt duża ilość GHG skutkuje odbijaniem naturalnego promieniowania ciepłego kuli ziemskiej i kierowaniem go z powrotem na powierzchnię Ziemi, co może w efekcie podnosić średnią, globalną temperaturę. Do głównych gazów cieplarnianych zalicza się dwutlenek węgla (CO_2), metan (CH_4), podtlenek azotu (N_2O), chloro- i fluoropochodne węglowodorów (HFCs, CFC), perfluoropochodne związki węgla (PFCs) oraz sześćfluorek siarki (SF_6). Jednakże to dwutlenek węgla stanowi 75% globalnych emisji GHG i jest głównym zagrożeniem dla środowiska [6].

Według szacunków Międzynarodowej Agencji Energii (IEA) sektor transportu odpowiada za 14% światowych emisji GHG [7]. W Europie udział ten jest jeszcze większy i wyniósł w 2012 roku 19,7% [8], natomiast w Polsce szacuje

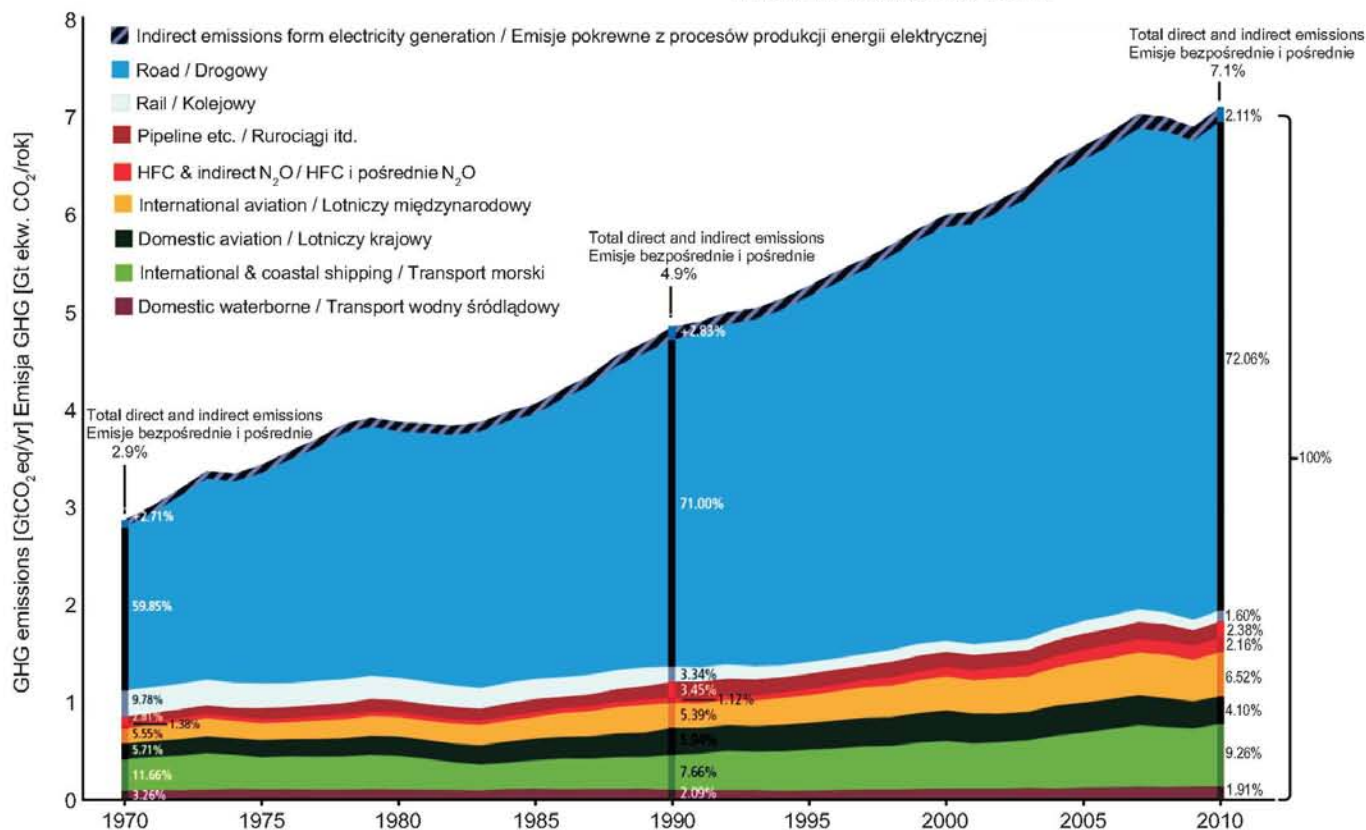
2.3. GREENHOUSE GASES EMISSIONS

The second major category of pollution from the transport sector is the emission of greenhouse gases (GHG). They are gaseous components of the atmosphere, both natural and anthropogenic, which absorb and reemit infrared radiation [5]. Greenhouse gases are natural components of the atmosphere and play a vital role in its proper functioning. However, their excessive concentration can cause damaging effects. In other words, too high volume of GHG results in a reflection of natural thermal radiation of the terrestrial globe and re-directing it to the surface of Earth. As a consequence, it may increase the average global temperature. Carbon dioxide (CO_2), methane (CH_4), nitric sub-oxide (N_2O), chlorine- and fluorine-derivatives of hydrocarbons (HFCs, CFC), per-fluorine derivatives of carbon compounds (PFCs), as well as sulphur hexafluoride (SF_6), are listed among the main greenhouse gases. However, carbon dioxide is responsible for 75% of global GHG emissions, and it constitutes the main threat to the environment [6].

According to estimations of the International Energy Agency IEA, the transport sector is responsible for 14% of the GHG global emissions [7]. In Europe that share is

się go na 14,1% [9]. Transport drogowy jest największym emitentem zarówno zanieczyszczeń lokalnych, jak i gazów cieplarnianych spośród wszystkich rodzajów transportu. Jego udział w emisjach transportu dla GHG sięga 75% na świecie, 71,9% w Europie i aż 98% w Polsce [9, 10]. Co więcej, w przeciwieństwie do zanieczyszczeń lokalnych, emisje GHG z sektora transportu stale wykazują trend rosnący od roku 1970 (Rys. 3). Według szacunków IPCC, od roku 1970 światowe emisje GHG z sektora transportu wzrosły aż o 250%.

even higher, as it amounted to 19.7% in 2012 [8], whereas in Poland it is assessed at 14.1% [9]. Among all types of transport the road transport is the main emitter of both local pollution and greenhouse gases. Its share in transport emissions of GHG reaches globally 75%, in Europe 71.9% and in Poland 98%. [9, 10]. Moreover, by contrast with local pollution, GHG emissions from the transport sector establish the continuously growing trend since 1970 (Fig. 3). According to estimations of IPCC, global GHG emissions from the transport sector increased as much as 250% since 1970.



Rys. 3. Global trends in GHG emissions from the transport sector over the period 1970-2010 [11]

Rys. 3. Globalne trendy w emisjach GHG z sektora transportu w latach 1970-2010 [11]

W krajach UE-27, w odróżnieniu od lokalnych zanieczyszczeń powietrza, od początku lat 90-tych XX wieku do roku 2010 bezpośrednie emisje gazów cieplarnianych z sektora transportu wzrosły średnio o około 20,5%. Od roku 2008 można zauważyć spadek tych emisji, częściowo spowodowany kryzysem ekonomicznym, jednakże w dalszym ciągu osiągnięcie celów polityki transportowej UE będzie wymagało redukcji emisji o 67%.

Analizując dane dotyczące Unii Europejskiej należy także zauważyć, że emisje GHG z sektora lotniczego rosną najszybciej spośród wszystkich środków transportu i stają się

In the EU-27 countries, as opposed to local air pollution, since the beginning of 1990s till 2010 direct greenhouse emissions from the transport sector increased on average by about 20.5%. Small decrease in those emissions can be observed since 2008. Partially it is caused by the economic crisis. However, reaching aims of the UE transport policy will still need the reduction of emissions by 67%.

Analysing data concerning the European Union, one should also notice that GHG emissions from the aviation sector increase in the fastest way out of all transport means and constitute the biggest (apart from emissions

największym wyzwaniem dla polityków obok emisji z transportu drogowego. Dodatkowo, emisje gazów cieplarnianych z samolotów, z uwagi na dużą wysokość wydalania spalin, są dużo bardziej szkodliwe niż np. emisje z pojazdów lądowych.

2.4. EMISJA HAŁASU PRZEZ SEKTOR TRANSPORTU

Hałas emitowany przez środki transportu jest również uznawany za zanieczyszczenie środowiska naturalnego. Według definicji Komisji Europejskiej hałas to „niepożądany lub szkodliwy dźwięk w środowisku naturalnym, wytworzony przez działalność człowieka, włączając w to hałas komunikacyjny drogowy, kolejowy i lotniczy, a także działalność przemysłową” [12]. W technicznym ujęciu hałasem są „wszelkie niepożądane, nieprzyjemne, dokuczliwe lub szkodliwe drgania mechaniczne ośrodka sprężystego, działające za pośrednictwem powietrza na organ słuchu i inne zmysły oraz elementy organizmu człowieka” [13]. Problem zanieczyszczenia hałasem narasta wraz z rozwojem sektora transportu. Według przeprowadzonych w 2000 roku badań około 44% populacji Unii Europejskiej było narażonych na hałas komunikacyjny przekraczający 55dB(A) [14] (Rys.4). Ta wartość jest uznawana przez Światową Organizację Zdrowia (WHO) za próg szkodliwości hałasu.

Źródła emisji hałasu różnią się w zależności od środka transportu. W transporcie drogowym hałas jest generowany przez pracę silnika oraz opony pojazdu toczącego się po nawierzchni drogi. W transporcie kolejowym głównym źródłem hałasu są dźwięki powstające na styku koła pociągu i szyny. Poziom hałasu zależy także od prędkości pociągu i jego właściwości (rodzaju wagonów, długości składu) oraz od rodzaju i stanu technicznego szyn. Natomiast w przypadku transportu lotniczego najbardziej szkodliwe dla otoczenia poziomy hałas tworzą się w fazie lądowania i startu samolotów. Głównymi czynnikami wpływającymi na poziom tego hałasu są wielkość samolotu oraz rodzaj stosowanych silników.

3. KOSZTY ZEWNĘTRZE EMISJI ZANIECZYSZCZEŃ

3.1. KOSZTY ZEWNĘTRZNE W TRANSPORCIE

Przedstawione rodzaje zanieczyszczeń środowiska naturalnego generują wymierne koszty finansowe i efekty społeczno-ekonomiczne kwalifikowane jako koszty zew-

from the road transport) challenge for politicians. Additionally, greenhouse gases emissions from airplanes, due to a great height of exhaust gases emissions, are much more harmful than e.g. emissions from passenger cars.

2.4. NOISE EMISSIONS FROM THE TRANSPORT SECTOR

The noise emitted by different means of transport is also regarded as an environmental pollution. According to the definition of the European Commission the noise is “an unwanted or harmful sound in the natural environment, produced by human activities including roads/railways/aviation and industry” [12]. Technically speaking, noises are “any undesirable, unpleasant, irritating or harmful mechanical vibrations of an elastic medium acting by way of air on the hearing organ and other human senses and elements of a human organism” [13]. The problem of noise pollution has been growing along with the development of transport sector. According to the studies performed in 2010 about 44% of the EU population was exposed to the traffic noise exceeding 55 dB(A) [14] (Fig. 4). That value has been recognized by the World Health Organization as a threshold of noise harmfulness.

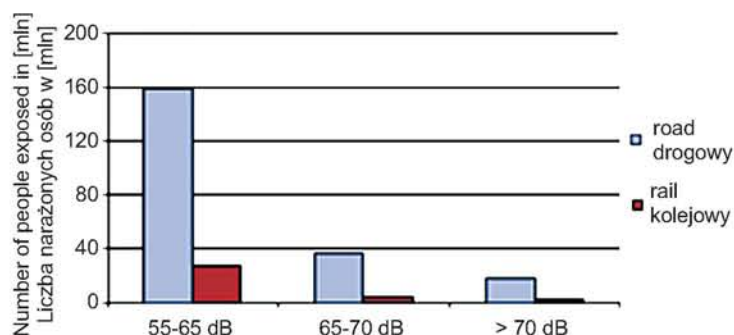


Fig. 4. Number of people exposed to the excessive rail and road traffic noise in EU in 2000 [14]

Rys. 4. Liczba ludzi narażonych na nadmierne poziomy hałas z sektora transportu w UE w roku 2000 [14]

Sources of noise emission differ between each other depending on a mean of transport. In the road transport, noise is generated by an engine operation and vehicle tires rolling along road pavements. In the railway transport, the main source of noise produces sounds generated at the junction of train wheels and rails. The noise level depends also on the train speed and its characteristics (the type of carriages, the length of drafts), as well as the type and technical condition of rails. Whereas in case of the air

nętrzne transportu. Efekty zewnętrzne mogą być definiowane jako „takie skutki działalności gospodarczej wytwórców, w tym i producentów usług transportowych oraz załadowców – konsumentów tych usług, które oddziałują, w sposób niezamierzony lub czasami zamierzony, na pozostałych, nieuczestniczących w tej działalności członków społeczności” [15]. Są to zatem efekty wytworzone przez użytkownika systemu transportowego wpływające na otoczenie tego systemu – środowisko naturalne i ludzi. Każda z wymienianych kategorii emisji wytwarza takie efekty wewnętrzne i dla każdej z nich można dokonać próby kalkulacji wysokości tych kosztów. Dane na temat wielkości powstałych strat społeczno-ekonomicznych są wykorzystywane m.in. w procesie oceny efektywności inwestycji drogowych i mostowych, a także przy internalizacji kosztów (włączeniu kosztów do własnego rachunku ekonomicznego ich sprawcy) i ustalaniu opłat ponoszonych przez użytkowników usług transportowych.

3.2. KOSZTY LOKALNEGO ZANIECZYSZCZENIA POWIETRZA

Zanieczyszczenie powietrza generowane przez transport ma istotny wpływ na jakość ludzkiego życia [16]. Obecność cząstek stałych w powietrzu prowadzi do szeregu problemów zdrowotnych, uzależnionych od fizycznych i chemicznych właściwości cząstek. Wdychanie ozonu (O_3), powstającego w wyniku chemicznych reakcji substancji emitowanych przez pojazdy, objawia się problemami z układem oddechowym oraz układem wzrokowym. Tlenki azotu (NO_x) to drażniące i silnie toksyczne gazy szkodliwe dla zdrowia. Dodatkowo przyczyniają się do powstawania kwaśnych deszczy, powodujących znaczne straty ekonomiczne poprzez niszczenie roślin i materiałów, a także wzrost zakwaszenia wód i gleby. Tlenki siarki (SO_x) generują przede wszystkim straty materialne. Wchodząc w reakcję z tlenkami azotu oraz parą wodną powracają na ziemię pod postacią tzw. kwaśnego deszczu, który uszkadza budynki i materiały, a także powoduje straty na zbiorach rolnych. Natomiast lotne związki organiczne stanowią bezpośrednie zagrożenie dla życia człowieka przez oddziaływanie toksyczne – w zależności od składu chemicznego powodują m.in. podrażnienia układu wzrokowego, oddechowego, bóle głowy, nudności.

W celu lepszego skwantyfikowania szkód wyrządzanych przez wymieniane emisje wyróżnia się cztery podstawowe kategorie kosztów [17]:

1. Koszty zdrowotne – koszty związane z efektami zdrowotnymi wywołanymi poprzez wdychanie opisywanych substancji.

transport levels of noise generated during landing and take-off are the most harmful for surroundings. The main factors shaping that noise level are the size of an aircraft and the type of applied engines.

3. EXTERNAL COSTS OF POLLUTION EMISSIONS

3.1. EXTERNAL COSTS IN TRANSPORT

The described types of pollution of the natural environment generate measurable financial costs and socio-economic effects qualified as external costs of transport. The external effects may be defined as “such results of economic activity of manufacturers including producers of transport services and loaders – consumers of those services, who have an intended or sometimes unintended impact on the remaining and not participating in that activity members of a community” [15]. Therefore, these are the effects generated by the user of the transport system which influence surroundings of that system – the natural environment and people. Each of the mentioned categories of the disclosed emissions creates those external effects and for each of them an attempt to estimate amount of those costs can be made. Data on the amount of resulting socio-economic losses are used, among others, in the assessment process of effectiveness of the road and bridge investments, as well as in the internalisation of costs (including costs into the economic account of their perpetrator), and establishing charges incurred by users of transport services.

3.2. COSTS OF THE LOCAL AIR POLLUTION

Air pollution generated by transport exerts a considerable impact on human life value [16]. The presence of particulate matter in the air leads to a series of health problems depending on physical and chemical properties of particles. Inhaling ozone (O_3), created as a result of chemical reactions of substances emitted by vehicles, results in problems with respiratory and visual systems. Nitric oxides (NO_x) are irritating and strongly toxic gases harmful to health. Furthermore, they contribute to producing acid rains which generate substantial economic losses through destruction of plants and materials, as well as an increase in acidification of waters and soils. Sulphur oxides (SO_x) produce mainly material losses. They react with nitric oxides and water vapour, returning to the ground in the form of acid rains which damage buildings and materials, and

2. Koszty niszczenia budynków i materiałów – obejmują dwa elementy: koszty zanieczyszczania materiałów i fasad budynków, głównie przez cząstki PM oraz koszty zapobiegania i usuwania skutków procesów korozyjnych wywołanych przez kwaśne deszcze.
3. Koszty strat w uprawach rolnych i wpływu na biosferę – koszty wpływu jaki wywierają emisje zanieczyszczeń, głównie w formie kwaśnych deszczy, na wysokość zbiorów rolnych oraz inne elementy ekosystemów, np. lasy.
4. Koszty wpływu na bioróżnorodność i zmiany w ekosystemach – w odróżnieniu od poprzedniej kategorii, odnoszącej się do strat powstających na różnego typu roślinności, ta kategoria reprezentuje straty spowodowane zanieczyszczeniem gleb oraz wód. Zanieczyszczenia metalami ciężkimi są także wliczane do tej kategorii.

Aktualnie najbardziej wiarygodną metodą szacowania wysokości strat związanych z zanieczyszczeniem powietrza generowanym przez transport jest analiza ścieżki oddziaływań (ang. *impact pathway approach*, IPA). Została pierwotnie opracowana w latach 90-tych w ramach projektu ExternE, ale od tamtego momentu była kilkakrotnie aktualizowana. Ostatnia aktualizacja pochodzi z roku 2005. IPA to narzędzie reprezentujące oddolne podejście (ang. *bottom-up approach*) do szacowania wpływu zanieczyszczenia na środowisko. Podstawowymi elementami rachunku są krańcowe efekty zewnętrzne analizowanego zjawiska, np. emisji spalin oraz wskaźniki i funkcje służące do szacowania tych efektów w jednostkach pieniężnych. Koszty krańcowe (marginalne) w teorii ekonomii oznaczają wzrost kosztów całkowitych wywołany wzrostem produkcji o jednostkę. W przypadku szacowania efektów środowiskowych wzrostem produkcji będzie wzrost emisji zanieczyszczeń wywołanych przez wybrany pojazd. W celu uzyskania kosztów krańcowej emisji danej substancji, wyemitowanej przez konkretny pojazd włączający się do ruchu, przeprowadza się kalkulację według metody IPA dla dwóch scenariuszy. Scenariusz bazowy obejmuje obliczenie kosztów emisji dla danego natężenia ruchu i wielkości emisji. Scenariusz dodatkowy obejmuje przeprowadzenie tych samych obliczeń dla scenariusza bazowego po dodaniu emisji podmiotu będącego przedmiotem ewaluacji, np. samochodu osobowego. Różnica w poniesionych szkodach oraz kosztach jest kosztem generowanym przez badany obiekt. Rys. 5 obrazuje podstawowe fazy szacowania kosztów według metody IPA.

cause losses in agricultural crops. Whereas organic volatile compounds remain the direct threat to human life because of their toxic influence. Depending on the chemical composition, they may cause, among others, irritation to visual and respiratory systems, headaches, nausea.

Four basic categories of costs are listed in order to quantify better losses caused by the mentioned emissions [17]:

1. Health costs – costs related to health effects caused by inhaling the described substances.
2. Costs of destructed buildings and materials including two elements: costs of polluted materials and building facades induced mainly by PM particles, as well as costs of removing the effects of corrosion processes caused by acid rains.
3. Costs of losses in agricultural crops and the impact on biosphere – the costs of influence of pollution emissions, mainly in a form of acid rains, on the levels of agricultural crops and other elements of ecosystems, e.g. forests.
4. Costs of the impact on biodiversity and changes to the ecosystems – that category represents losses caused by water and soil pollution, as opposed to the previous category concerning losses generated in various types of flora. Contaminations with heavy metals are also included in that category.

Currently, the analysis of impact pathway approach (IPA) is the most reliable method for evaluating the amount of losses related to the air pollution caused by transport. It was created in the 1990s as a part of the ExternE project and was updated several times since then. The latest updating dates from 2005. The IPA method represents a bottom-up approach to estimating the pollution impact on the environment. The key elements of the calculation are marginal external effects of the analysed phenomenon, e.g. emissions of exhaust gases next to indicators and functions for assessing those effects in monetary units. In the theory of economy marginal costs mean an increase in total costs caused by an increase in production by one unit. In case of assessments of environmental effects a growth in production will be an increase in pollution produced by a given vehicle. In order to obtain costs of the final emission of a given substance emitted by a specific vehicle entering the traffic, the calculation according to the IPA method for two scenarios should be performed. The basic scenario includes calculations of emission costs for given traffic and emission volumes. The additional scenario comprises conducting the same calculations for

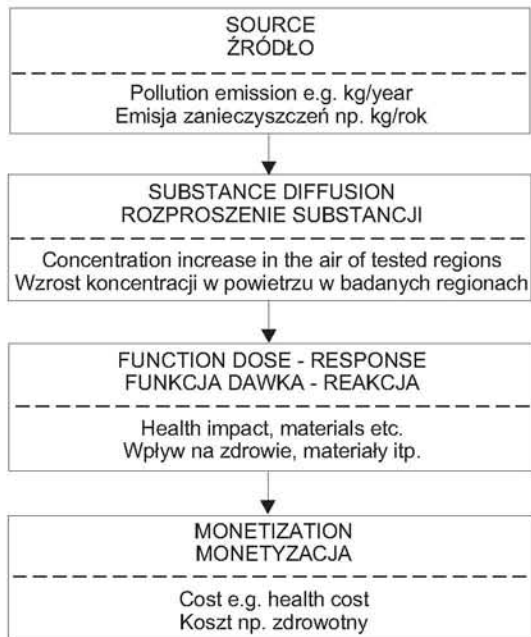


Fig. 5. Decisive phases of the cost estimation according to the IPA methodology [1]

Rys. 5. Podstawowe fazy szacowania kosztów według metody IPA [1]

Oszacowanie kosztów metodą IPA przeprowadza się w czterech następujących etapach [18]:

1. Identyfikacja poziomów emisji u źródła.
Przeprowadzana odrębnie dla każdej szacowanej substancji, np. zawartość tlenków azotu w gramach emitowana na litr paliwa spalonego przez dany środek transportu.
2. Oszacowanie rozproszenia danej substancji w powietrzu.
Obejmuje analizę możliwości rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń, uwzględniając warunki geograficzne i meteorologiczne analizowanego obszaru.
3. Oszacowanie efektu wywołanego przez daną substancję.
Wykonywane za pomocą funkcji dawka - reakcja (ang. *dose-response functions*, DRF), która określa fizyczny wpływ danego stężenia danej substancji na otoczenie, np. zdrowie człowieka. To bardzo istotny element całego procesu szacowania, mający znaczący wpływ na końcowe rezultaty obliczeń. Istnieje kilka źródeł takich funkcji – najpopularniejsze to opracowania Światowej Organizacji Zdrowia oraz Europejskiej Agencji Środowiska.

the basic scheme after adding emissions of an item being the subject of evaluation, e.g. a vehicle. The difference in incurred losses and costs constitutes the generated cost by the examined object. Fig. 5 presents basic stages of cost assessments according to the IPA method.

Cost assessment with the use of the IPA method is conducted in the following stages [18]:

1. Identification of emission levels at its source.
It is performed individually for each assessed substance, e.g. the contents of nitric oxide in grams emitted per one litre of fuel burnt by a given mean of transport.
2. Evaluating the air dispersion of a given substance.
It covers the analysis of possible propagation of pollutants taking into account geographical and meteorological conditions of an analysed area.
3. Estimating the effects caused by a given substance.
Conducting tests by means of dose-response functions (DRF) in order to determine an impact of a given substance with a given concentration on the environment, e.g. human health. It is a significant element of the whole evaluation process, influencing the final results of calculations. There are several sources of those functions and the most popular are the studies of the World Health Organization and the European Environment Agency.
4. Calculating the financial value (cost) of received effects.
The monetization of estimated losses, e.g. an increased probability of falling ill with pneumonia, follows the DRF evaluation. Similarly to the previous stage, estimations concerning losses in the human health are the most demanding and complex issues. They are analysed with two basic indicators - incidence and mortality. The basis for both of them is a value of statistical life (VSL), in the specialist literature also called a value of prevented fatality (VPF). The index VSL is used for estimation of years of life lost (YOLL), when a value of a life year (VOLY) is applied to calculate financial "health" losses [19].

Evaluation of non-material aspects is another complicated issue of the estimation of environmental losses. The quality of environment, e.g. the cleanness of air out of the window or a low noise level, constitutes a non-material and non-marketable good. Consequently, it cannot be bought on the market and has no definite price. However,

4. Obliczenie finansowej wartości (kosztu) uzyskanego efektu.

Po oszacowaniu DRF dokonuje się monetyzacji oszacowanych strat, np. kosztu zwiększonego prawdopodobieństwa na zachorowanie na zapalenie płuc. Podobnie jak w poprzednim kroku, szacunki dotyczące strat na ludzkim zdrowiu są najbardziej wymagającym oraz złożonym aspektem. Dokonuje się tego za pomocą dwóch podstawowych wskaźników – zachorowalności i śmiertelności. Podstawą dla obu wskaźników jest wskaźnik „statystycznej wartości życia” (ang. *value of statistical life*, VSL), w naukowej literaturze nazywanego także „wartością unikniętej śmierci” (ang. *value of prevented fatality*, VPF). Wskaźnika VSL jest wykorzystywany do obliczania wartości „utraconych lat życia” (ang. *years of life lost*, YOLL) oraz „wartości roku życia” (ang. *value of a life year*, VOLY), także wykorzystywanych do obliczania „zdrowotnych” strat finansowych [19].

Kolejnym istotnym i niezwykle złożonym aspektem w wycenie szkód środowiskowych jest wycena dóbr niematerialnych. Jakość środowiska, np. czystość powietrza za oknem czy niski poziom hałasu, jest dobrem niematerialnym i nierynkowym. To znaczy, że nie może zostać zakupiona na rynku i nie posiada swojej określonej ceny. Niemniej jednak ta wartość musi zostać określona na potrzeby rachunków strat. W tym celu stosuje się metody szacowania dóbr nierynkowych. Jest to bardzo rozbudowana grupa narzędzi, stosujących wiele technik waluacji opartych na badaniu preferencji ludzi dotyczących danego dobra. Podstawowy podział tych sposobów obejmuje następującą klasyfikację [20]:

- metody wyceny bazujące na preferencjach ujawnionych,
- metody wyceny bazujące na preferencjach wyrażonych.

Metody wyceny bazujące na preferencjach ujawnionych (ang. *revealed preference methods*, RP) opierają się na analizie i obserwacji zachowań konsumentów w rzeczywistym świecie na prawdziwym rynku. Zakładają, że wybory konsumentów odzwierciedlają użyteczność, a zatem ukrytą wartość poszczególnych dóbr dla jednostek. Do tej grupy metod należy między innymi metoda cen hedonicznych (MCH) czy metoda kosztu podróży (MKP). Metodę kosztu podróży stosuje się głównie do badania wartości różnych obiektów naturalnych, jak np. parki narodowe, rezerwy przyrody itp. MKP opiera się na założeniu, że ludzie ujawniają ukrytą wartość dobra środowiskowego poprzez faktyczną konsumpcję, w tym przypadku przez wydatki

it has to be defined to meet the requirements of loss account. That is the reason why the methods of non-material goods estimations are applied. It is a very complex group of tools using various valuation techniques based on the study of human preferences for a given good. The basic division of those methods includes the following classification [20]:

- evaluation methods based on revealed preferences,
- evaluation methods based on expressed preferences.

Revealed preference methods (RP) are based on disclosed preferences and analysis of consumer behaviour patterns in the real world and on a real market. They assume that consumer's choices reflect usefulness; therefore a hidden value of distinctive goods for an individual. The hedonic pricing method (HPM) and the travel cost method (TCM), among others, belong to that group. The travel cost method is mainly used for estimation of values of various natural objects, such as national parks, nature reserves, etc. The TCM is based on the assumption that people reveal the hidden value of an environmental good by the real consumption, in this case by trip expenses. Costs of reaching ecologically attractive places determine the value attributed by the people to the quality of environment.

On the other hand, the hedonic pricing method (HPM) is most frequently applied for evaluations of external costs related to air pollution and noise levels. The HPM is based on the observation of consumer behaviour patterns on the real estate market. The value of environmental goods is evaluated through the values of substitute goods, which are values of real estate. The evaluation performed according to that method consists in an analysis of differences in prices of real estate and determining the impact of the environment quality on their levels. The hedonic pricing function is determined taking into consideration the parameters illustrating a given real estate (e.g. physical parameters, surroundings limitations). It reflects the dependence of its price on each of the parameters. It is possible to define the hidden value of environmental attributes owing to determining the relationship between the price of a real estate and characteristics of the environmental surroundings. The HPM is relatively frequently applied, however it requires a huge database and complicated statistical analyses. Aside from the mentioned methods, estimations based on revealed preferences cover additionally methods based on the function of a household production, the method of reversed costs or the cost-of-illness method.

związane z podróżą. W tej metodzie koszty dotarcia do miejsc atrakcyjnych pod względem ekologicznym wyznaczają wartość, jaką przypisują ludzie jakości środowiska.

Z kolei metodę cen hedonicznych (MCH) najczęściej stosuje się do badania kosztów zewnętrznych związanych z zanieczyszczeniem powietrza i poziomem hałasu. Metoda MCH opiera się na obserwacji zachowań konsumentów na rynku nieruchomości. Wartość dóbr środowiskowych jest oceniana tutaj za pomocą wartości dóbr zastępczych, którymi są wartości nieruchomości. Wycena prowadzona według tej metody polega na analizie różnic cen nieruchomości i określaniu wpływu jakości środowiska na ich wysokość. Biorąc pod uwagę parametry opisujące daną nieruchomość (np. parametry fizyczne, parametry otoczenia) określa się tzw. funkcję ceny hedonicznej, odzwierciedlającą zależność ceny nieruchomości od każdego z parametrów. Dzięki określeniu związku pomiędzy ceną nieruchomości a cechami środowiska naturalnego w jego otoczeniu jesteśmy w stanie określić ukrytą wartość atrybutów środowiskowych. Metoda MCH jest stosunkowo często stosowana, jednakże wymaga ogromnej bazy danych oraz skomplikowanych analiz statystycznych. Poza wymienionymi metodami, wyceny bazujące na preferencjach ujawnionych obejmują jeszcze m.in. metody oparte na funkcji produkcji gospodarstwa domowego, metodę kosztów odwróconych czy metodę kosztów choroby.

Metody wyceny bazujące na preferencjach wyrażonych (ang. *stated preference methods*, SP) to drugi - główny nurt narzędzi służących do wyceny dóbr niematerialnych. Podobnie jak poprzednia grupa metod, także pozwalają na oszacowanie wartości środowiska na podstawie preferencji konsumentów, ale w tym wypadku są to preferencje wyrażone bezpośrednio przez samych zainteresowanych. Do najpopularniejszej metody z tej grupy należy metoda wyceny warunkowej (ang. *contingent valuation method*, CVM). Opiera się na badaniach ankietowych prowadzonych na reprezentatywnej grupie respondentów, dzięki którym wyniki mogą być ekstrapolowane na całe społeczeństwo. W metodzie CVM respondenci mogą określać dwa wskaźniki „skłonność do zapłaty” (ang. *willingness to pay*, WTP) oraz „skłonność do akceptacji” (ang. *willingness to accept*, WTA). Wskaźnik WTP określa kwotę jaką respondenci byliby gotowi zapłacić za określone dobro lub dany poziom usług dostarczanych przez środowisko. Natomiast WTA określa kwotę jaką respondenci są gotowi przyjąć jako rekompensatę w razie pozbawienia ich możliwości korzystania z określonego dobra, np. za zwiększenie poziomu hałasu o 1 dB. Metoda wyceny warunkowej ma dość szeroki zakres potencjalnych zastosowań i często jest stosowana

The stated preference methods (SP) are the second most important group of tools for evaluating non-material goods. Similarly to the previous group, they also enable estimations of environmental values based on consumer preferences, but in that case directly expressed by the interested themselves. The most popular technique belonging to that group is the contingent valuation method (CVM). It is based on surveys carried out on a representative group of respondents; the results of whom can be extrapolated to the whole society. In the CVM respondents may define two indicators: willingness to pay (WTP) and willingness to accept (WTA). The WTP describes the amount which respondents would be ready to pay for definite goods or services on a given level provided by the environment. Whereas the WTA index refers to the amount which respondents would be ready to accept as a compensation in case of depriving them of possibilities to take advantage of defined goods, e.g. for increasing a noise level by 1 dB. The contingent valuation method has rather wide spectrum of potential applications and is often combined with other techniques of economic evaluation. The similar scheme is the method of choice experiment (CE) which consists in suggesting alternative solutions including appropriate costs and benefits, and asking a respondent for choosing a preferred option. The application of the contingent valuation method meet critical opinions as well. One of its crucial flaws is the potential lack of knowledge among respondents concerning an estimated good, which may influence the declared values. The respondents' answers can depend also on how the question is formed, and on other conditions, e.g. a place and time of day when a research is conducted [21].

Over recent years several significant studies regarding costs of air pollution by the transport sector have been created. Results of those evaluations are available in case of diversified categories of vehicles, engines, standards of emissions, etc. Table 1 presents the most important data concerning evaluation methodologies and types of substances taken into account in calculations of individual projects.

3.3. COSTS OF GHG EMISSIONS

Climatic changes accompanied by the global warming are very complex phenomena. That is why it is difficult to predict not only reliable effects of the temperature growth on Earth, but also costs connected with them. However, over recent years that topic has been discussed in many research centres which have identified the main threats and evaluated possible losses. The following phenomena are numbered among the most serious threats [22]:

Table 1. Selected projects concerning costs of local emissions from the transport sector
 Tablica 1. Wybrane projekty dotyczące kosztów lokalnych emisji z sektora transportu

Project Projekt	Year Rok	Methodology Metodologia	Considered effects Uwzględnione efekty	Emissions Emisje
UIC / INFRAS	2000	Top-down approach Podejście odgórne	<ul style="list-style-type: none"> • Impact on human health / Wpływ na zdrowie ludzkie • Impact on materials and buildings / Wpływ na materiały i budynki • Impact on agriculture / Wpływ na uprawy rolne 	PM ₁₀ , NO _x
UNITE	2002	IPA	<ul style="list-style-type: none"> • Impact on human health / Wpływ na zdrowie ludzkie • Impact on materials and buildings / Wpływ na materiały i budynki • Impact on agriculture / Wpływ na uprawy rolne 	PM _{2.5} , PM ₁₀ , SO ₂ , O ₃ , acid rains kwaśne deszcze
UIC / INFRAS	2004	IPA	<ul style="list-style-type: none"> • Impact on human health / Wpływ na zdrowie ludzkie • Impact on materials and buildings / Wpływ na materiały i budynki • Impact on agriculture / Wpływ na uprawy rolne 	PM ₁₀
CAFE	2004	IPA	<ul style="list-style-type: none"> • Impact on human health / Wpływ na zdrowie ludzkie • Impact on agriculture / Wpływ na uprawy rolne 	PM _{2.5} , SO ₂ , NO _x , NH ₃ , LZO / VOC
HEATCO	2006	IPA	<ul style="list-style-type: none"> • Impact on human health / Wpływ na zdrowie ludzkie • Impact on materials and buildings / Wpływ na materiały i budynki • Impact on agriculture / Wpływ na uprawy rolne 	NO _x , SO ₂ , PM _{2.5} , PM ₁₀
GRACE	2006	IPA	<ul style="list-style-type: none"> • Impact on human health / Wpływ na zdrowie ludzkie • Impact on materials and buildings / Wpływ na materiały i budynki • Impact on agriculture / Wpływ na uprawy rolne 	NO _x , CO ₂ , PM _{2.5} , SO ₂ , NMLZŃ / NVOC
UIC / INFRAS	2011	IPA	<ul style="list-style-type: none"> • Impact on human health / Wpływ na zdrowie ludzkie • Impact on materials and buildings / Wpływ na materiały i budynki • Impact on agriculture / Wpływ na uprawy rolne • Impact on ecosystems / Wpływ na ekosystemy 	PM ₁₀ , PM _{2.5} , NO _x , SO ₂ , NMLZŃ / NVOC

w kombinacji z innymi technikami wyceny ekonomicznej. Podobną metodą jest metoda eksperymentu wyboru (ang. *choice experiment*, CE), która polega na zaproponowaniu alternatywnych rozwiązań wraz z kosztami i korzyściami oraz poproszenie respondenta o wybór preferowanej przez niego opcji. Stosowanie metody wyceny warunkowej spotyka się także z krytycznymi opiniami. Do najważniejszych jej wad zalicza się potencjalny brak wystarczającej wiedzy wśród respondentów na temat wycenianego dobra, co może wpływać na deklarowane wartości. Odpowiedzi respondentów mogą także zależeć od formy postawionego pytania oraz być kształtowane przez inne wskaźniki, np. miejsce i porę dnia przeprowadzania badania [21].

W ostatnich latach powstało kilka znaczących prac badawczych dotyczących kosztów zanieczyszczenia powietrza przez sektor transportu. Rezultaty tych szacunków są dostępne w przypadku zróżnicowanych kategorii pojazdów, silników, norm emisji itp. Tabl. 1 prezentuje najważniejsze

- the rising levels of seas and oceans,
- the impact on agriculture,
- changes in the structure of energy exploitation,
- the impact on the global reserves of water,
- health effects,
- the impact on ecosystems and biodiversity,
- extremal climatic and catastrophic phenomena.

All of the threats listed above should be taken into consideration at estimations of costs resulting from emissions of greenhouse gases. However, in practice individual projects dealing with that subject evaluate costs related only to selected aspects of the global warming. The scale and types of effects of climatic changes comprise many elements of human life and require the analysis of various branches of science. That is why integrated assessment models (IAM) which combine physical, biological, economic and social

dane dotyczące metodologii szacowania oraz rodzaju substancji uwzględnionych w obliczeniach w poszczególnych projektach.

3.3. KOSZTY EMISJI GHG

Zmiany klimatu i towarzyszące mu globalne ocieplenie są bardzo złożonymi zjawiskami. Z tego powodu trudno jest nie tylko przewidzieć wiarygodne efekty wzrostu temperatury na Ziemi, ale także związane z nimi koszty. Niemniej jednak, w minionych latach ten temat znajdował się w centrum uwagi wielu ośrodków badawczych, które zidentyfikowały główne zagrożenia i oszacowały możliwe straty. Do najpoważniejszych zagrożeń związanych z globalnym ociepleniem zalicza się następujące zjawiska [22]:

- podniesienie poziomu mórz i oceanów,
- wpływ na rolnictwo,
- zmiany w strukturze wykorzystania energii,
- wpływ na globalne zasoby wody,
- efekty zdrowotne,
- wpływ na ekosystemy i bioróżnorodność,
- ekstremalne zjawiska klimatyczne i zjawiska katastroficzne.

Wszystkie z powyższych zagrożeń powinny być uwzględniane przy szacowaniu kosztów wynikających z emisji gazów cieplarnianych. Jednakże w praktyce poszczególne projekty zajmujące się tą tematyką szacują koszty związane tylko z wybranymi aspektami globalnego ocieplenia. Skala i rodzaj efektów zmian klimatycznych obejmuje wiele elementów naszego życia i wymaga analizy różnych rodzajów nauki. Z tego powodu do oceny wpływu zmian klimatu, niezbędnego do późniejszego oszacowania kosztów, stosuje się tzw. modele oceny zintegrowanej (ang. *integrated assessment models*, IAM), które łączą nauki fizyczne, biologiczne, ekonomiczne i społeczne. Te specjalistyczne, informatyczne narzędzia służą do analizy m.in. różnych scenariuszy wzrostu gospodarczego, prognoz dotyczących przyszłych emisji gazów cieplarnianych czy potencjalnych zmian technologicznych. Informacje przeanalizowane za pomocą modeli IAM mogą następnie być oszacowane pod kątem związanych z nimi kosztów. Często jest to integralny element modeli IAM. Wyróżnia się dwie podstawowe, choć zasadniczo różniące się metody szacowania kosztów emisji gazów cieplarnianych [23]:

1. metoda szacowania oparta na kosztach szkód (ang. *damage cost approach lub marginal cost approach*, MC),
2. metoda szacowania oparta na kosztach unikania (ang. *mitigation cost approach lub cost - benefit approach*, CBA).

sciences, are applied for the evaluation of the impact of climatic changes. That estimation is essential for the subsequent cost evaluation. Those specialist IT tools have been designed for analyses of, among others, various scenarios of economic growth, forecasts of subsequent emissions of greenhouse gases or potential technological changes. Moreover, the information analysed by means of IAM models can be assessed paying special attention to costs connected with them. Frequently it is an integral element of IAM models. Two basic, though fundamentally different methods of estimating the costs of greenhouse gas emissions can be enumerated [23]:

1. the damage cost approach or marginal cost approach (MC) based on costs of damages,
2. the mitigation cost approach or cost - benefit approach (CBA) based on costs of avoiding.

The first mentioned method calculates marginal costs based on the analysis of environmental losses, economic surroundings, etc. induced by the additional emission of one unit of greenhouse gases. Usually, such a unit is one tonne of carbon dioxide. The second method – CBA is based on costs of avoiding emissions. In that case the cost of decrease in amount of emission to a given level, e.g. by one tonne of carbon dioxide, is assumed as the cost of climatic changes.

In particular cases the impact path approach (IPA) is also applied for assessing costs of GHG emissions. Despite the fact that in recent years relatively high number of studies regarding potential climatic changes and costs combined with them were published, only several of them focused on emissions only from the transport sector. Table 2 presents the results of estimations containing the base year and the applied methodology of assessment. It is worth noting that the obtained results differ significantly from each other because of the complexity of the issue and a relatively high discretion over qualifying potential incomes of climatic changes.

Due to the mentioned complexity of global warming, all estimations regarding that phenomenon are burdened with many uncertainties, which concern practically each stage of evaluations ranging from levels of future emissions to scales of potential effects. The most important of scientific uncertainties concern, among others, measurements of present emissions and predictions for the future, estimations of impacts of emissions on the real concentration of gases in the atmosphere, as well as estimations of climatic changes and effects related to the increase in concentration of GHG. From the other side, the elements loaded with a risk on the side of economic accounts

Table 2. Costs of climatic changes created by the transport sector
 Tablica 2. Koszty zmian klimatycznych generowane przez sektor transportu

Project Projekt	Base year Rok bazowy	Evaluation method Metoda szacowania	Costs of climatic changes ^{*)} [€/tonne CO ₂] Koszty zmian klimatycznych ^{*)} [€/tona CO ₂]
UIC / INFRAS	2000	CBA	20 - 135
UNITE	2002	IPA	5 - 38
UIC / INFRAS	2004	MC and / oraz CBA	20 - 140
HEATCO	2006	IPA	22 - 166
IMPACT	2008	MC and / oraz CBA	7 - 180
UIC / INFRAS	2011	MC and / oraz CBA	25 - 146

Remark / Uwaga

^{*)} The scope of results in presented projects depends on assumptions admitted in each of the studies. It covers both products of low and high scenarios. / Zakres wyników w przedstawionych projektach zależy od założeń przyjętych w każdym z opracowań oraz przedstawia wyniki dla optymistycznych (ang. *low scenario*) i negatywnych (ang. *high scenario*) scenariuszy.

Pierwsza z wymienionych metod kalkuluje koszty krańcowe na podstawie analizy strat w środowisku naturalnym, otoczeniu gospodarczym itp., powstałych przez dodatkową emisję jednej jednostki gazów cieplarnianych. Zazwyczaj na potrzeby obliczeń taką jednostką jest jedna tona dwutlenku węgla. Druga z metod – CBA bazuje z kolei na kosztach unikania emisji. W tym wypadku za koszt zmian klimatycznych przyjmuje się koszt zmniejszenia poziomu emisji do danego poziomu, np. o jedną tonę dwutlenku węgla.

W pojedynczych przypadkach do szacowania kosztów emisji GHG stosuje się także analizę ścieżki oddziaływań (IPA). Pomimo że w ostatnich latach została opublikowana stosunkowo duża liczba prac badawczych dotyczących potencjalnych zmian klimatycznych i związanych z nimi kosztów, tylko kilka z nich koncentruje się na emisjach z sektora transportu. Wyniki szacunków wraz z rokiem bazowym oraz zastosowaną metodologią obliczeń przedstawia Tabl. 2. Warto zauważyć, że z powodu złożoności zagadnienia oraz stosunkowo dużej dowolności przy określaniu potencjalnych wpływów zmian klimatycznych otrzymane wyniki znacząco różnią się między sobą.

Z uwagi na wspomnianą złożoność zjawiska jakim jest globalne ocieplenie wszystkie szacunki dotyczące kosztów z nim związanych są obciążone licznymi niepewnościami pomiarów. Te niewiadome dotyczą praktycznie każdego etapu ewaluacji, poczynając od poziomów przyszłych emisji, a kończąc na skali potencjalnych efektów. Najważniejsze z niewiadomych naukowych dotyczą m.in. pomiarów obecnych emisji oraz prognoz na przyszłość, szacowania wpływu emisji na rzeczywistą koncentrację gazów w atmosferze, a także oszacowanie zmian klimatu i związanych efektów zachodzących w wyniku wzrostu koncentracji GHG.

include estimations of costs related to non-market effects, an appropriate consideration of differences in levels of wealth and income in individual countries and regions, as well as the height of accepted discount rate - the significant index on which depend amount of assessed losses in long-term perspectives in the future [23-25].

3.4. COSTS OF NOISE EMISSIONS

Two basic categories of external costs are listed in case of the noise emission [14, 26]:

1. health costs,
2. annoyance costs.

Traffic noise may produce a lot of health problems, when their costs make the most significant computational element of the external costs of noise. The noise may cause both physical and psychological damage. Exposures to sounds at the level higher than 85 dB(A) can harm the human aural system. Cardiovascular disorders, cognitive disturbances, sleeping disorders, aural buzzing noises and states of annoyance or irritation are among the most important threats to health related to the exposure to excessive noise.

The category of annoyance costs includes losses resulting from disturbances of human physical and mental states caused by too high noise levels. For instance, such losses comprise subjective disturbances in a possibility of resting or working. Methods based on expressed preferences are implemented for assessing that category of costs. They have been described in detail in the part of present paper concerning estimations of air pollution costs.

Z kolei do elementów obciążonych ryzykiem po stronie rachunku ekonomicznego należą szacunki kosztów związanych z efektami nierynkowymi, odpowiednio uwzględnienie w szacunkach różnic w poziomach zamożności i dochodu w poszczególnych krajach i regionach oraz wysokości przyjętej stopy dyskontowej – istotnego wskaźnika, od którego zależy wysokość strat oszacowanych w długoterminowej perspektywie w przyszłości [23-25].

3.4. KOSZTY EMISJI HAŁASU

W przypadku emisji hałasu wyróżnia się dwa podstawowe kategorie kosztów zewnętrznych [14, 26]:

1. koszty zdrowotne,
2. koszty rozdrażnienia (ang. *annoyance costs*).

Hałas komunikacyjny może powodować szereg problemów zdrowotnych, a koszty z nimi związane stanowią najważniejszy element rachunku kosztów zewnętrznych hałasu. Hałas może wyrządzić zarówno szkody fizyczne, jak i psychiczne. Ekspozycja na dźwięki o poziomie powyżej 85 dB(A) może wyrządzić fizyczne szkody w układzie słuchowym człowieka. Do najważniejszych zagrożeń zdrowotnych związanych z ekspozycją na nadmierny hałas zalicza się choroby sercowo-naczyniowe, zaburzenia poznawcze, zaburzenia snu, szum uszny oraz stan rozdrażnienia i irytacji.

Kategoria kosztów rozdrażnienia obejmuje straty wynikające z zaburzeń w samopoczuciu ludzi spowodowanych przez zbyt wysokie poziomy hałasu. Tego typu straty obejmują np. subiektywne zaburzenia możliwości wypoczyniania czy pracy. Do wyceny tej kategorii kosztów najczęściej stosuje się metody wyceny bazujące na preferencjach wyrażonych, szczegółowo opisane w części artykułu dotyczącej szacowania kosztów zanieczyszczenia powietrza.

Najważniejsze aspekty decydujące w rachunku kosztów zewnętrznych hałasu obejmują następujące kategorie danych:

- Przyjęte progi szkodliwości hałasu.

Wybrany próg określa poziom hałasu, powyżej którego jest on uznany za szkodliwy zdrowotnie, a zatem generuje koszty społeczno-ekonomiczne. Zatem wybór tego progu ma bardzo duży wpływ na wysokość ostatecznych szacunków. Przykładowo, podniesienie takiego progu z 50 dB(A) na 55 dB(a) zredukowałoby koszty hałasu transportu drogowego o prawie 50% [1]. Większość z prac szacujących koszty hałasu przyjmuje próg 50 dB(A) lub 55 dB(A), przy czym ten ostatni jest rekomendowany przez Światową Organizację Zdrowia.

The most significant aspects determining the assessment of external costs of noise include the following data:

- The adopted thresholds of noise harmfulness.

The adopted threshold determines the level of noise that can be found harmful to health when exceeded and, therefore, generating socio-economic costs. That is the reason why the choice of that threshold has very significant influence on the level of final estimations. As an example, raising that threshold from 50 dB(A) to 55 dB(a) would reduce costs of road transport by 50% [1]. Most studies estimating costs of noise have approved the threshold of 50 dB(A) or 55 dB(A). Moreover, the last one is recommended by the World Health Organization.

- Methodology of cost estimations.

The value of a silent environment has no market equivalent, therefore research methods analysing consumer preferences are applied for determining the costs. The hedonic pricing method and the conditional choice (CE) method are the most frequently applied assessment tools for the valuation of external costs of noise. The adopted calculation method considerably influences the final value of estimated costs.

Despite a relatively high number of research studies on estimating the external costs of noise, a reliable comparison of their results remains impossible. The level of obtained external costs depends on local parameters of an examined area. First of all, the noise harmfulness of all means of transport is a function of a distance between the source of noise and its recipient. The noise levels depend largely on spatial characteristics of the terrain which is different for every location and research. The second significant factor makes the level of external health costs strictly dependent on the number of people exposed to the harmful influence of noise level. Population density was also different in the performed assessments, so the results are not comparable. At the same time, some typically local factors, e.g. a level of background noise etc., have influence on the final value of external costs, making impossible the reliable comparison of results of the performed researches. Among accessible results, external costs of noise emission depending on means of transport being the source of noise, location and a time of the day, fluctuate between 0.01 up to 171.06 €/vehicle-kilometre [1].

– Metodologia szacowania kosztów.

Wartość cichego otoczenia jest dobrem bez odpowiednika na rynku, dlatego do określenia kosztów stosuje się metody badawcze analizujące preferencje konsumentów. Do najczęściej stosowanych metod przy szacowaniu kosztów zewnętrznych hałasu należy metoda cen hedonicznych oraz metoda warunkowego wyboru. Przyjęta metoda obliczeniowa w znaczący sposób wpływa na ostateczną wysokość oszacowanych kosztów.

Pomimo stosunkowo dużej liczby prac i badań szacujących koszty zewnętrzne hałasu wiarygodne porównanie ich rezultatów jest niemożliwe. Wysokość uzyskiwanych kosztów zewnętrznych jest uzależniona od lokalnych parametrów badanego obszaru. Szkodliwość hałasu ze wszystkich środków transportu jest przede wszystkim zależna od odległości odbiorcy hałasu od jego źródła. Poziomy hałas są w dużej mierze uwarunkowane charakterystyką przestrzenną terenu, różną dla każdej z lokalizacji i badania. Drugim ważnym czynnikiem jest fakt, iż wysokość zewnętrznych kosztów zdrowotnych jest ściśle zależna od liczby ludzi narażonych na jego szkodliwe oddziaływanie. W przeprowadzonych szacunkach gęstość zaludnienia była także bardzo różna, a zatem wyniki nie są porównywalne. Dodatkowo, także typowo lokalne czynniki, np. poziom hałasu w tle, dominujący rodzaj transportu itp., również wpływają na ostateczną wysokość kosztów zewnętrznych i uniemożliwiają wiarygodne porównanie wyników przeprowadzonych badań. Wśród dostępnych wyników, koszty zewnętrzne emisji hałasu, w zależności od środka transportu będącego źródłem hałasu, lokalizacji oraz pory dnia, wahają się od 0,01 do 171,06 €/pojazdokilometr [1].

4. WNIOSKI

Zanieczyszczenie środowiska naturalnego stanowi poważny problem współczesnego świata, a sektor transportu odgrywa istotną rolę w emisji zanieczyszczeń. W zależności od rodzaju substancji udział sektora transportu w emisjach wynosi od kilkunastu do kilkudziesięciu procent, a zdecydowanie największym emitentem pozostaje sektor transportu drogowego. Zanieczyszczenie środowiska naturalnego generuje także wymierne zagrożenia i koszty ekonomiczne. W celu lepszego zrozumienia i ograniczenia tego problemu, w minionych latach opracowano szereg metod szacowania kosztów związanych z emisjami z sektora transportu. Założenia dotyczące najważniejszych z nich zostały przedstawione w przedstawionym artykule. Przeprowadzona analiza dostępnych metod oraz wyników prac badawczych z ich wykorzystaniem pozwala na wyciągnięcie następujących wniosków:

4. CONCLUSIONS

The environmental pollution constitutes the substantial problem of the contemporary world, when the transport sector plays a significant role in pollution emissions. Depending on a type of substance, the share of transport sector in emissions amounts from a dozen to several dozen per cent, while the road transport sector remains the biggest emitter. Moreover, the environmental pollution provokes notable threats and measurable economic costs. Series of evaluation methods for assessing costs related to emissions from the transport sector have been created in the past years in order to attain the better understanding and limitation of that problem. The assumptions about the most significant emissions are demonstrated in the present article. The performed analysis of available methods and results of researches with their application enables drawing the following conclusions:

- emissions from the transport sector have become increasingly popular objects of researches and analyses, signifying the growth of global consciousness of threats related to them;
- accessible estimation methods of costs emission enable relatively precise assessment of selected emissions of the transport sector, especially in the local pollution category;
- the greatest threats and the potential costs are related with the emission of greenhouse gases, but that category of estimations is also burdened with the highest risk and margin for error.

- emisje z sektora transportu są coraz częściej przedmiotem badań i analiz, co świadczy o wzroście globalnej świadomości na temat zagrożeń płynących z tego tytułu;
- dostępne metody szacowania kosztów emisji w stosunkowo dokładny sposób są w stanie oszacować koszty wybranych emisji z sektora transportu, zwłaszcza w kategorii zanieczyszczeń lokalnych;
- największe zagrożenia, a także potencjalne koszty są związane z emisją gazów cieplarnianych, jednakże ta kategoria szacunków jest także obciążona największym ryzykiem i marginesem błędu.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Maibach M., Schreyer C., Sutter D., Van Essen H.P., Boon B.H., Smokers R., Schroten A., Doll C., Pawłowska B., Bak M.: Handbook on estimation of external costs in the transport sector. CE Delft, 2008
- [2] Dyrektywa 2004/42/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie ograniczeń emisji lotnych związków organicznych. Bruksela, 2004
- [3] Transport emissions of air pollutants (TERM 003). European Environmental Agency (EEA), 2014, <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/transport-emissions-of-air-pollutants-8/transport-emissions-of-air-pollutants-2>, 16.04.2015
- [4] Krajowy Bilans Emisji SO₂, NO_x, CO, NH₃, NMZLO pyłów, metali ciężkich i TZO za lata 2011-2012, KOBIZE, Warszawa, 2014
- [5] Ramowa Konwencja Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu. UNFCCC, Nowy Jork, 1992
- [6] Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change Fifth Assessment Report. IPCC, Cambridge University Press, Nowy Jork, 2014
- [7] CO₂ emissions from fuels combustion 2014 edition. OECD/ IEA, Paryż, 2014
- [8] Total greenhouse gas (GHG) emission trends and projections. EEA, 2014, <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/greenhouse-gas-emission-trends-5/assessment-1>, 11.04.2015
- [9] Krajowy Raport Inwentaryzacyjny. KOBIZE, Warszawa, 2014
- [10] EU Transport in Figures: Statistical Pocketbook 2014. Eurostat, Luksemburg, 2014
- [11] Climate Change 2014: Synthesis Report. IPCC, Geneva, Szwajcaria, 2014
- [12] Position paper on dose response relationships between transportation noise and annoyance. European Communities, Luksemburg, 2002
- [13] Malecki I., Engel Z., Lipowczan A., Sadowski J.: Problem of noise control in Poland on the way to European integration. 10th International Conference on noise control, Warszawa, 1995
- [14] Den Boer L.C., Schroten A.: Traffic noise reduction in Europe. CE Delft, 2007
- [15] Szczepaniak T.: Transport i spedycja w handlu zagranicznym. PWE, Warszawa, 2002
- [16] Krzyżanowski M., Kuna-Dibbert B., Schneider J.: Health effects of transport-related air pollution. WHO Europe, Kopenhaga, 2005
- [17] Van Essen H., Schroten A., Otten M., Sutter D., Schreyer Ch., Zandonella R., Maibach M., Doll C.: External Costs of Transport in Europe. Update Study for 2008, CE Delft, 2011
- [18] Bickel P., Friedrich R.: ExternE. Externalities of Energy. European Communities, Luksemburg, 2005
- [19] Jażdżik-Osmólska A.: The value of human life: a comparative analysis of evaluation methods for costs of road occurrences. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **13**, 4, 2014, 321-336
- [20] Bockstael N.B., McConnell K.E.: Environmental and resource valuation with revealed preferences. Springer, Nowy Jork, 2007
- [21] Hausman J.A.: Contingent Valuation: A critical assessment. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1993
- [22] Watkiss P., Downing T., Handley C., Butterfield R.: The Impacts and Costs of Climate Change. AEA Technology Environment, Londyn, 2005
- [23] Clarkson R., Heyes K.: Estimating the Social Cost of Carbon Emissions. DEFRA Working Paper 140, Londyn, 2002
- [24] Tol S.J.: The marginal damage costs of carbon dioxide emissions: an assessment of the uncertainties. Energy Policy, **33**, 16, 2005, 2064-2074
- [25] Watkiss P., Downing E.T.: The social cost of carbon. Valuation estimates and their use in UK policy. The Integrated Assessment Journal, **8**, 1, 2008, 85-105
- [26] Burden of disease from environmental noise. WHO Europe/JRC, Kopenhaga, 2011