

Samolotem, statkiem, samochodem a może pociągiem - czym podróżować aby zminimalizować zmiany klimatyczne?

dr Krzysztof Markowicz
Instytut Geofizyki
Uniwersytet Warszawski
kmark@igf.fuw.edu.pl
www.igf.fuw.edu.pl/meteo/stacja/

Projekt Fizyka kształcenie dla gospodarki opartej na wiedzy współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Motywacja i cele

- W ramach wykładu omawiany będzie wpływ transportu na klimat Ziemi
- Część emitowanych przez różne gałęzie systemu transportu zanieczyszczeń atmosferycznych prowadzi do ogrzewania, a część do ochładzania klimatu.
- Odpowiemy na pytanie czy wybierając rodzaj transportu możemy efektywnie wpływać na zmiany klimatyczne.
- Dyskutowany będzie aspekt emisji gazów cieplarnianych oraz aerozoli atmosferycznych przez transport morski, lądowy oraz powietrzny na tle stanu obecnego oraz możliwe scenariusze zmian w XXI wieku.

Zużycie energii na różne gałęzie systemu transportu.

Table 5.1: *World transport energy use in 2000, by mode*

Mode	Energy use (EJ)	Share (%)
Light-duty vehicles (LDVs)	34.2	44.5
2-wheelers	1.2	1.6
Heavy freight trucks	12.48	16.2
Medium freight trucks	6.77	8.8
Buses	4.76	6.2
Rail	1.19	1.5
Air	8.95	11.6
Shipping	7.32	9.5
Total	76.87	100

Source: WBCSD, 2004b.

1 EJ = 10^{18} J

kmark@igf.fuw.edu.pl
www.igf.fuw.edu.pl/meteo/stacja

Energia zużywana przez różne gałęzie transportu oraz emisja CO₂

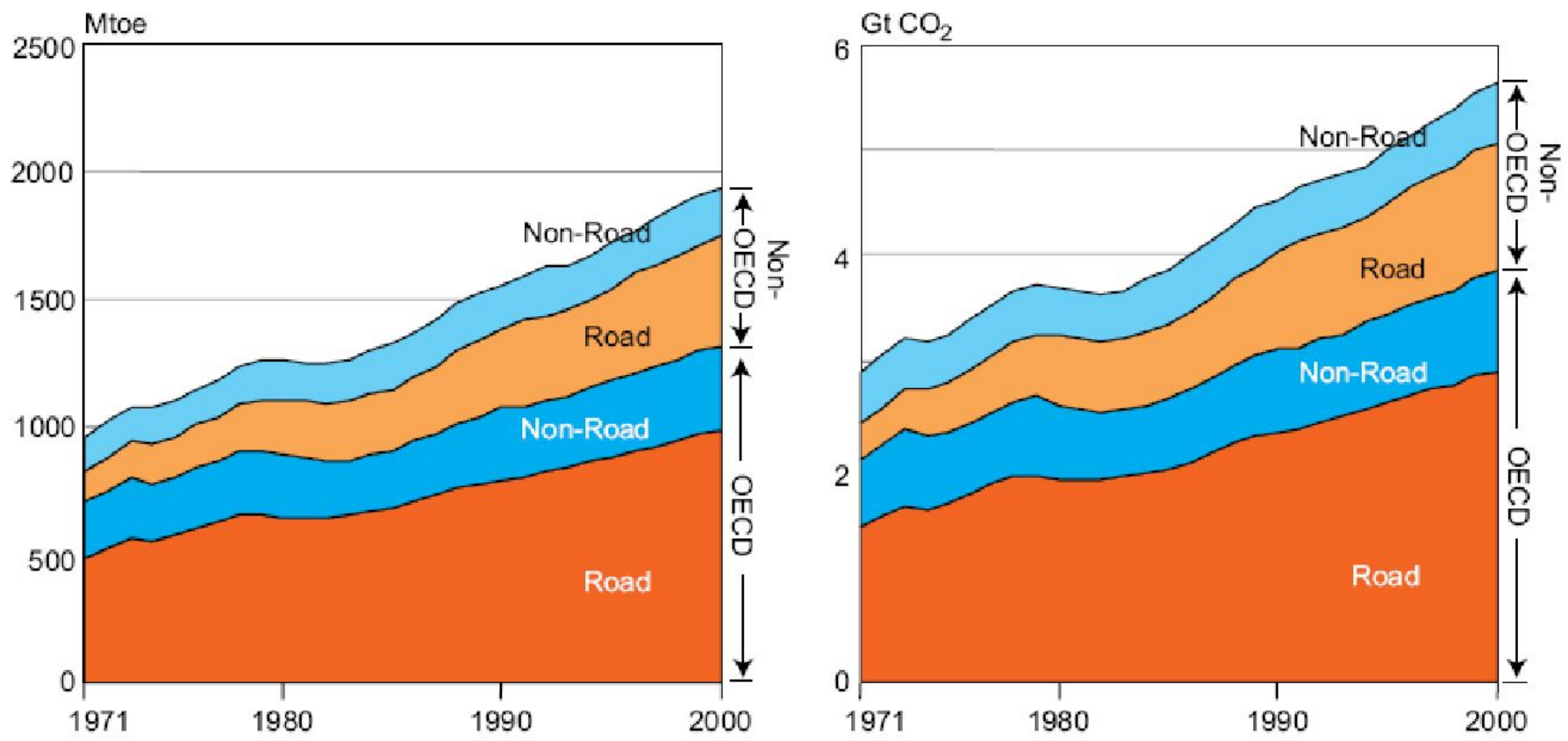


Figure 5.1: Energy consumption and CO₂ emission in the transport sector
Source: IEA, 2006c,d

Emisja zanieczyszczeń przez system transportu

- gazy cieplarniane (para wodna, dwutlenek węgla, ozon, metan, podtlenek azotu)
- inne gazy (NO_x , SO_x)
- pyły związane z niepełnym spalaniem (np. sadza)

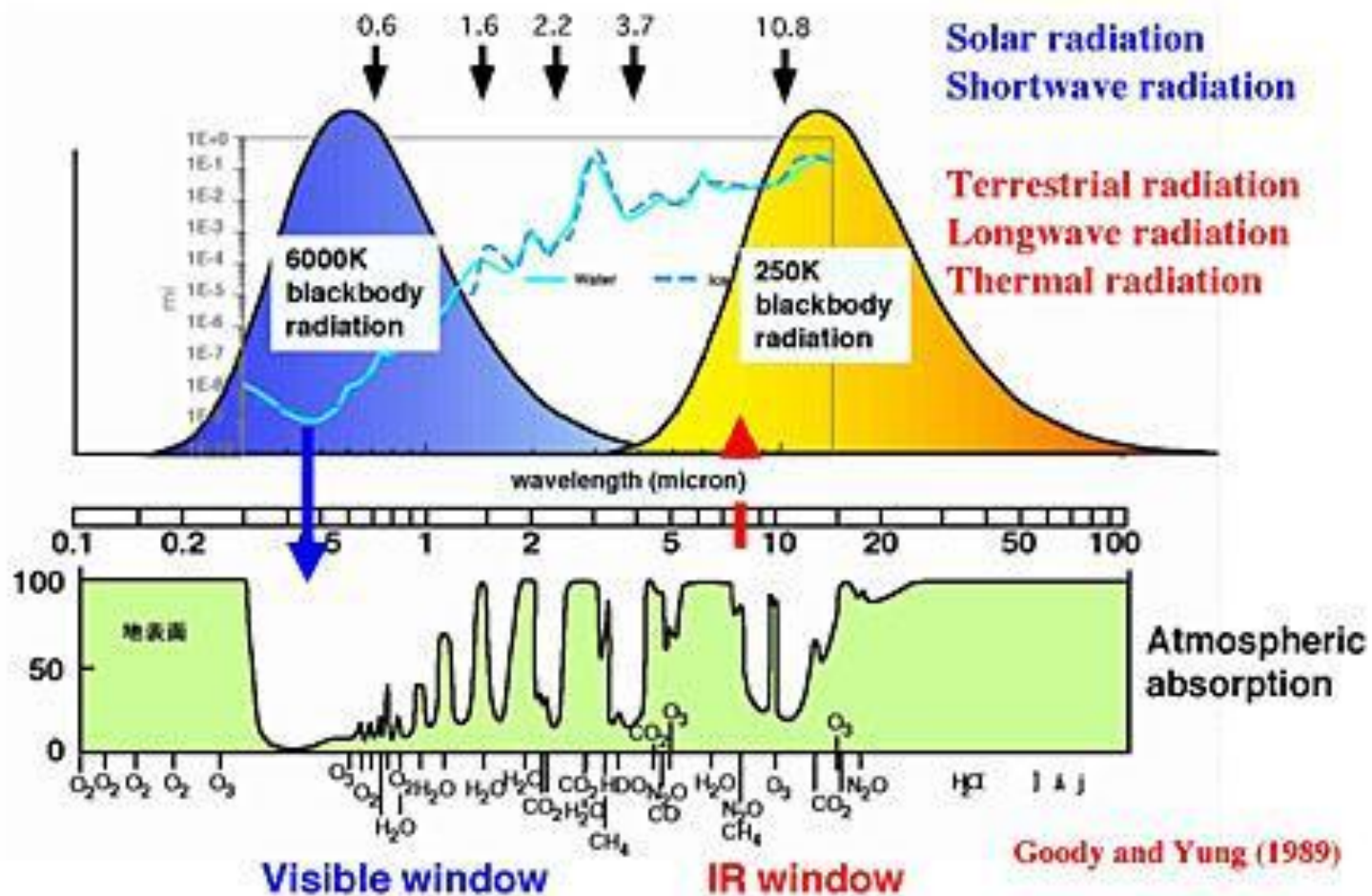
Związki NO_x , SO_x podlegają w atmosferze konwersji tworząc aerozol.^x Do związków tych zaliczamy również różnego rodzaju pyły.

Oddziaływanie gazów cieplarnianych i aerozoli na klimat jest odmienne.

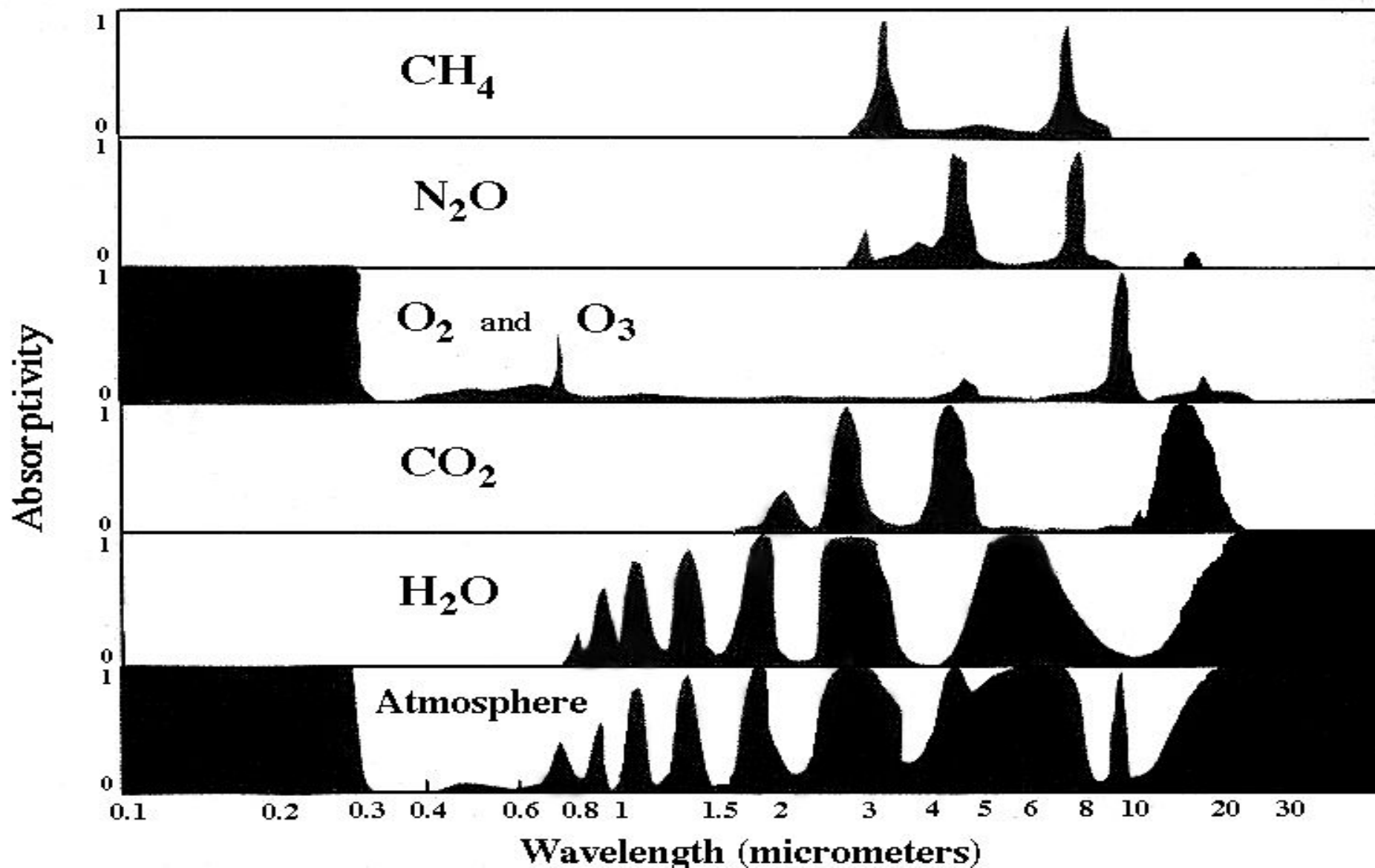
Cztery mechanizmy oddziaływania emisji systemu transportu na klimat

- Bezpośrednia emisja gazów cieplarnianych (głównie CO_2)
- Emisja prekursorów gazów cieplarnianych (NO_x)
- Emisja aerozoli oraz ich prekursorów
- Oddziaływanie aerozoli na własności fizyczne chmur

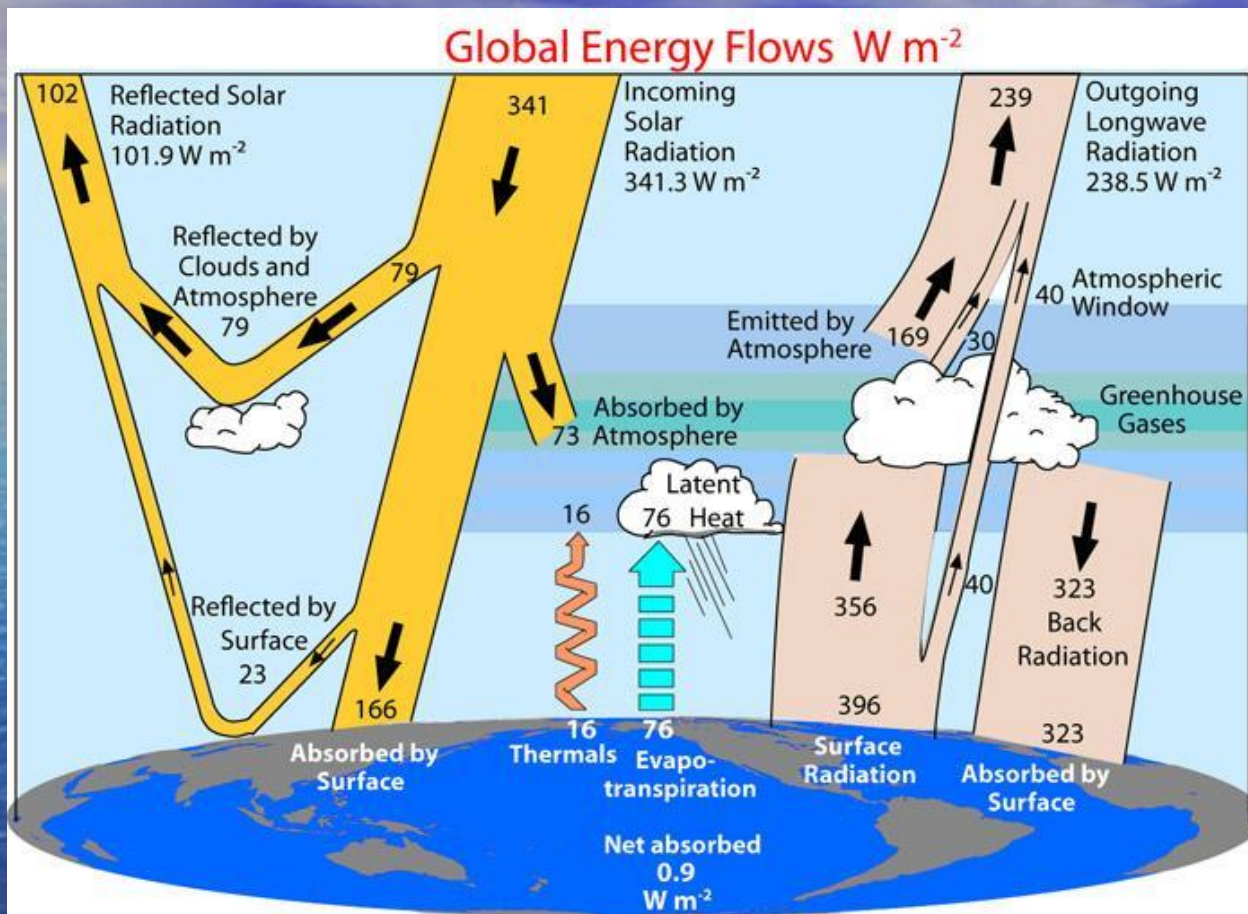
Fizyczne podstawy promieniowania



Absorpcja promieniowania przez poszczególne gazy zawarte w atmosferze.

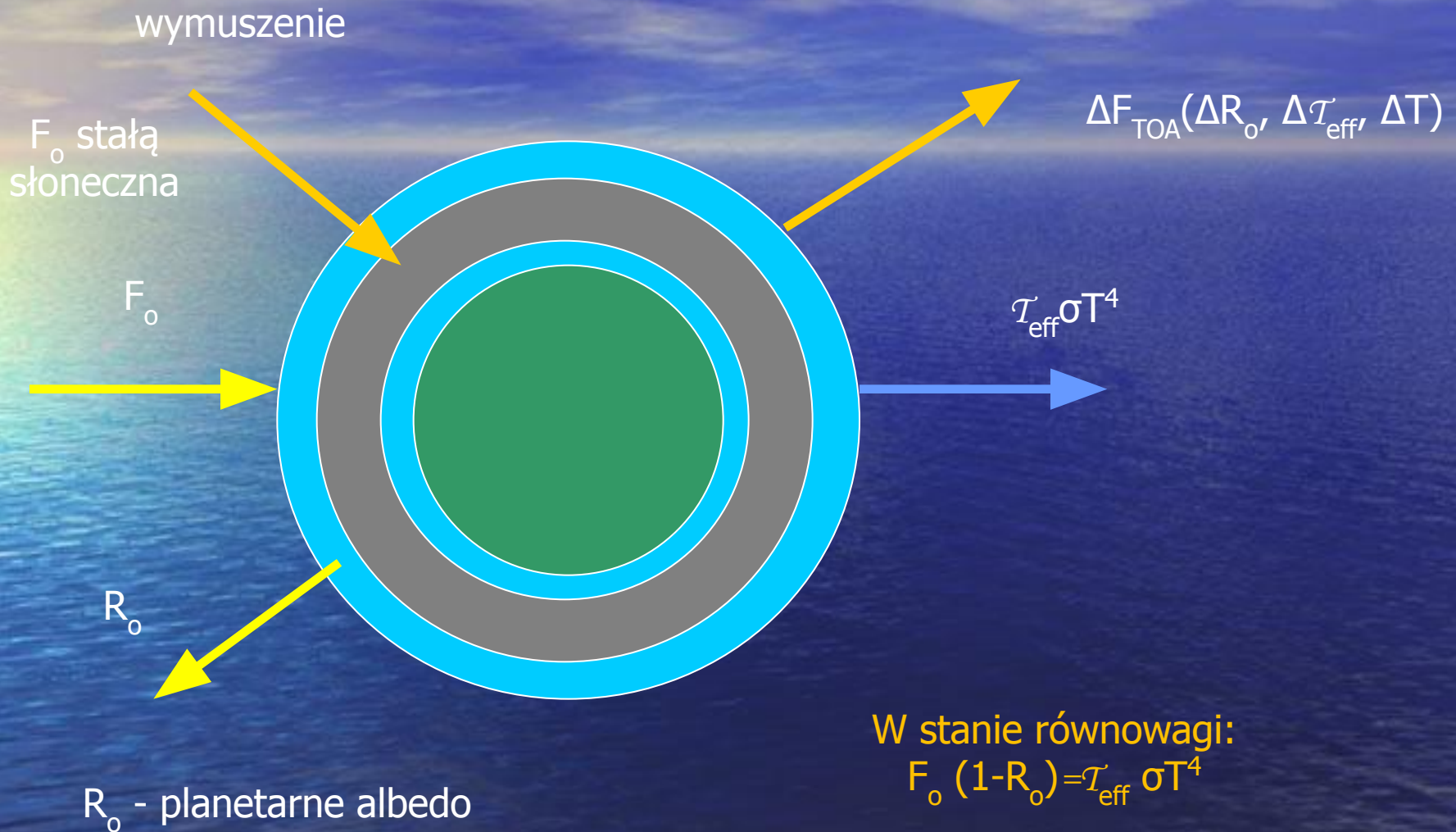


Bilans energii w atmosferze



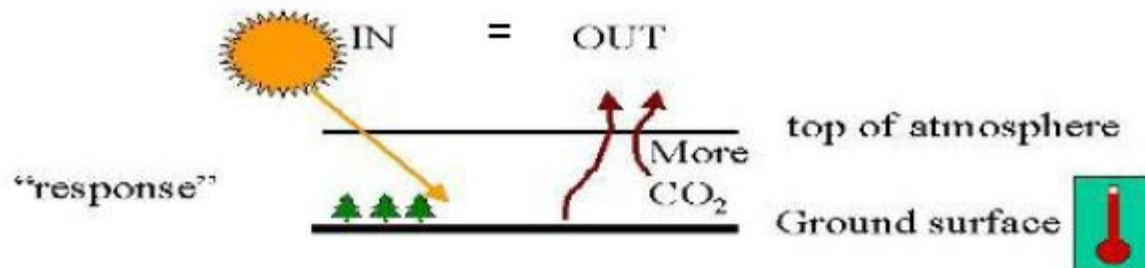
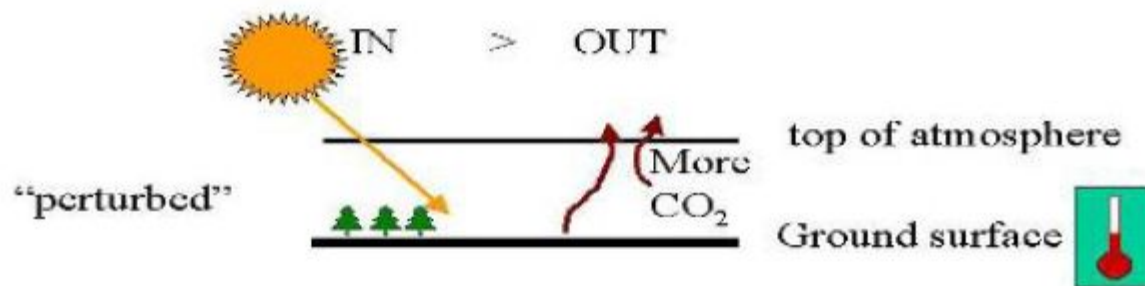
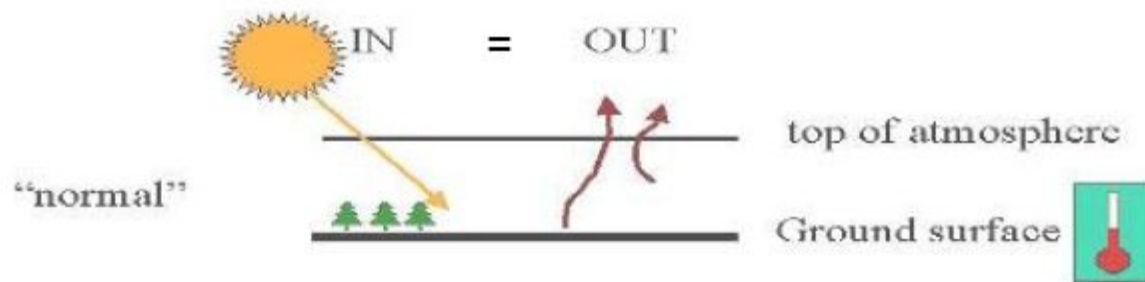
- Bilans promieniowania słonecznego oraz ziemskiego w atmosferze (Trenberth, K.E., J.T. Fasullo, and J. Kiehl, 2009).

Wymuszenie radiacyjne- zmiana bilansu radiacyjnego



*

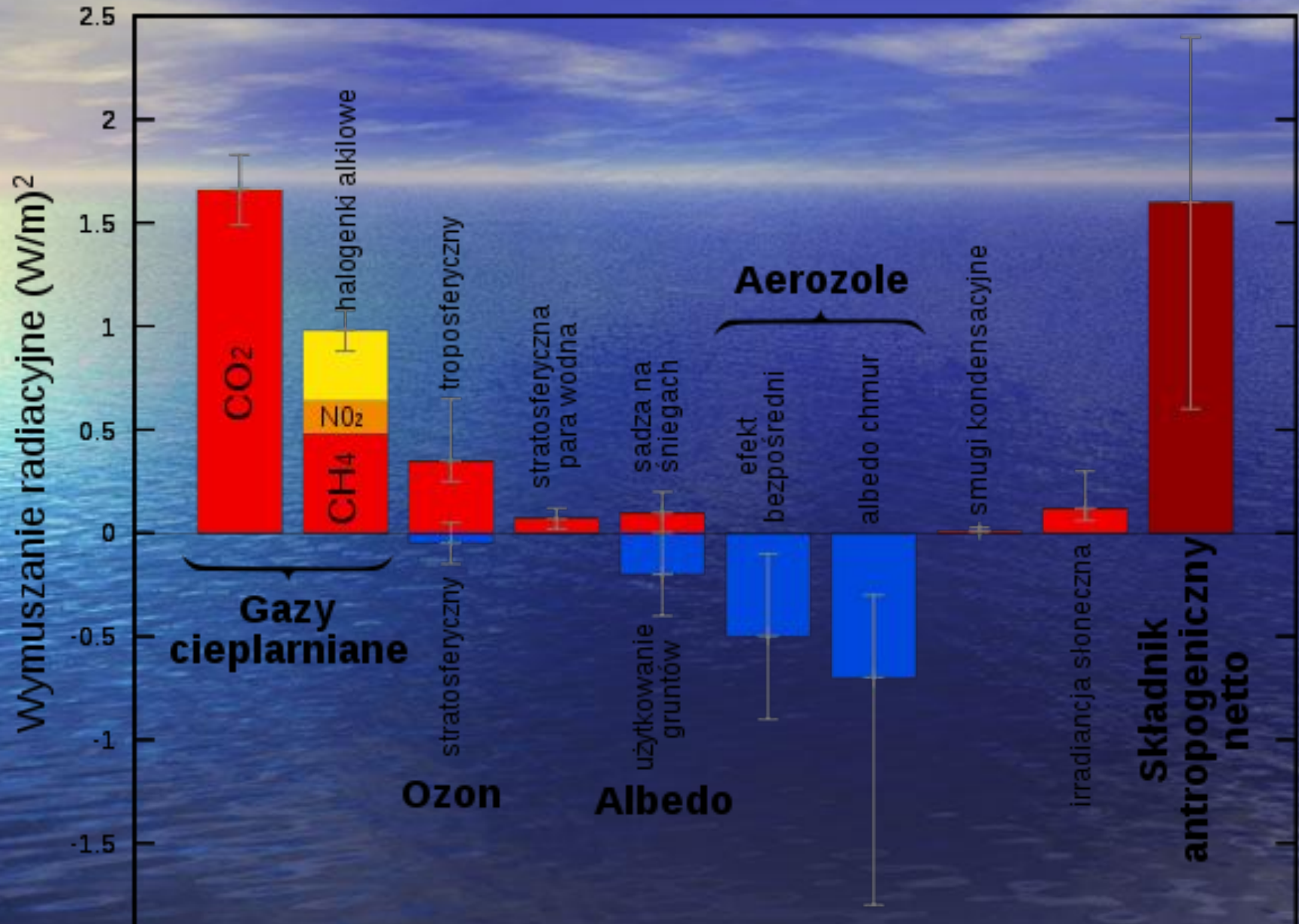
Wymuszanie radiacyjne



Wymuszanie radiacyjne c.d.

- W przypadku gazów cieplarnianych wymuszanie radiacyjne jest dodatnie. Oznacza to, że Ziemia otrzymuje więcej energii niż emituje w kosmos. Gazy cieplarniane redukują emisję promieniowania emitowanego przez powierzchnię ziemi.
- Aerozole atmosferyczne prowadzą na ogół do ochładzania klimatu poprzez redukcję promieniowania słonecznego dochodzącego do powierzchni ziemi.

Składniki wymuszania radiacyjnego



Wymuszanie radiacyjne a zmiany klimatu

$$dT_s = \lambda dF$$

dT_s – zmiana średniej temperatury przy powierzchni ziemi [K]

dF – wymuszanie radiacyjne [W/m^2]

λ - współczynniki wrażliwości klimatycznej [$\text{K}/\text{W}/\text{m}^2$]

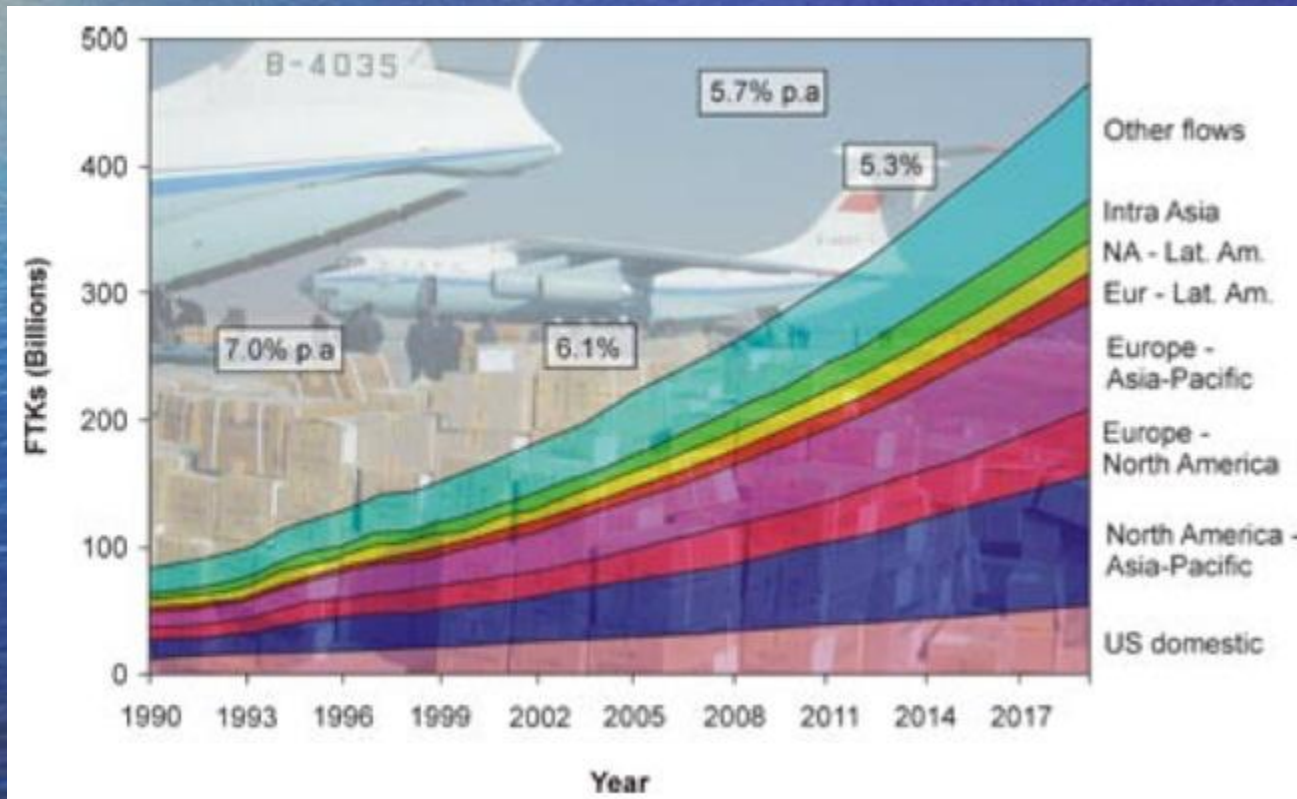
Transport lotniczy

- Lotnictwo jest jednym z najszybciej rozwijających się gałęzi systemu transportu. Średni roczny wzrost wynosi około 5% dla transportu pasażerskiego oraz 6% dla transportu towarowego.
- Emisja CO₂ związana z transportem lotniczym wynosi około 2% antropogenicznej emisji tego gazu. Przewiduje się, że udział CO₂ z transportu lotniczego wzrośnie do 3% w 2050 roku.
- Wpływ transportu lotniczego na zmiany klimatyczne został oszacowany obecnie na poziomie 3-3.5%. Wartość ta wzrośnie do około 5% w 2050 roku. Wartości te są obciążone dużą niepewnością ze względu na problemy z oszacowaniem wpływu niektórych czynników.

kmark@igf.fuw.edu.pl

www.igf.fuw.edu.pl/meteo/stacja

Wzrost ruchu lotniczego



Emisja zanieczyszczeń

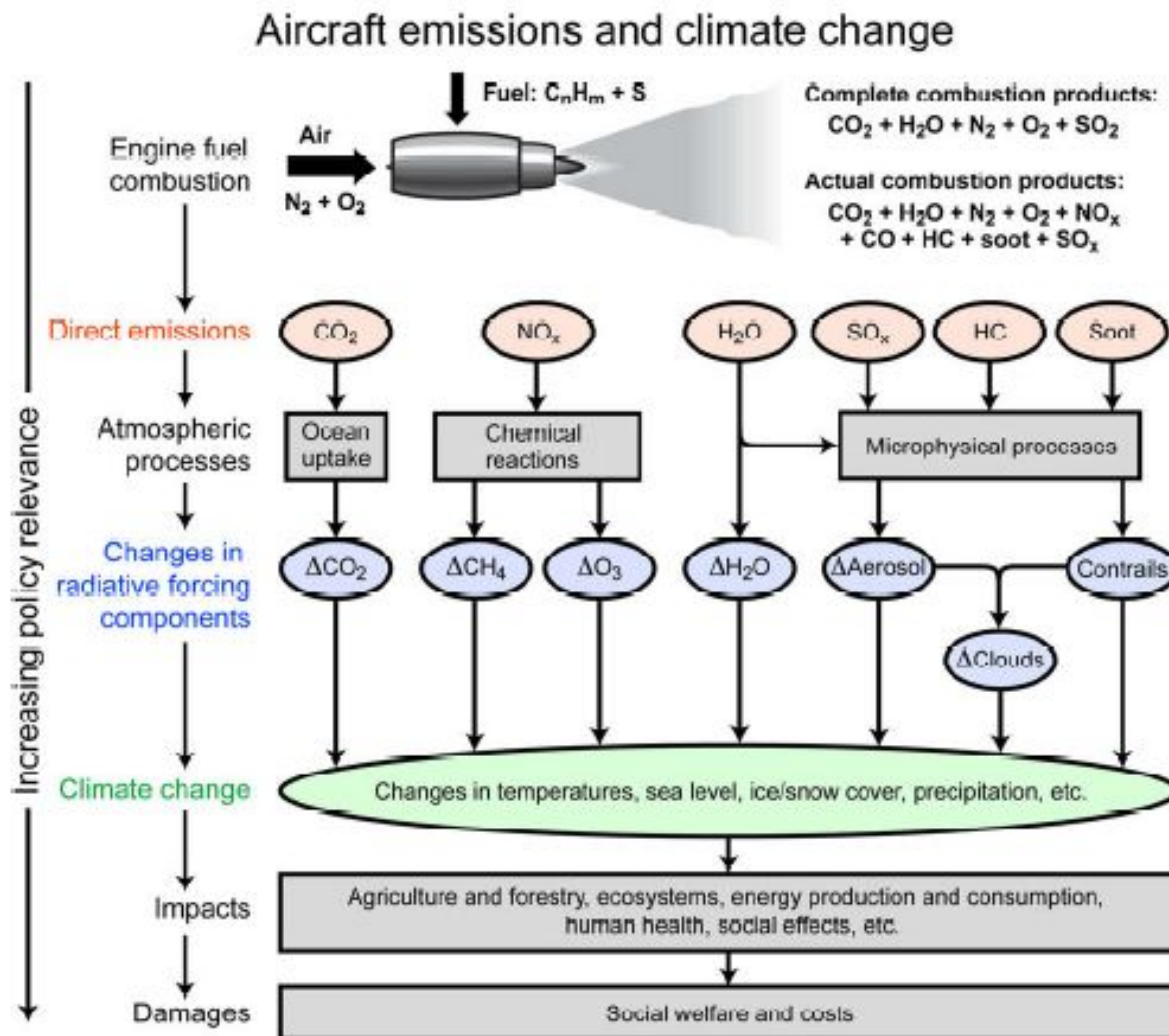


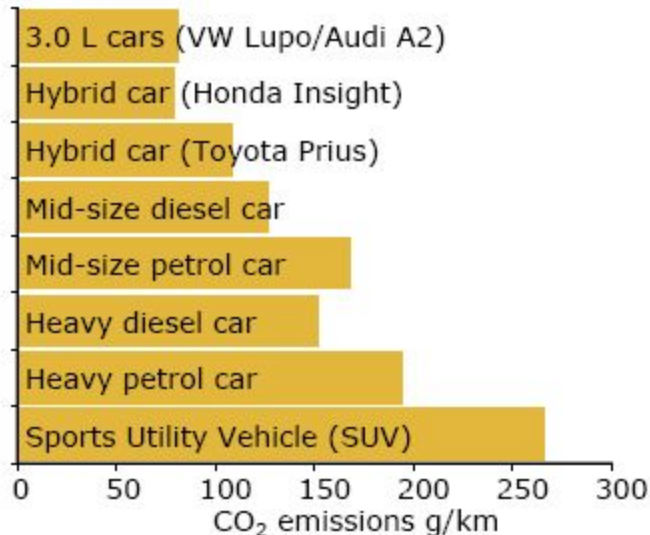
Fig. 1. Schema showing the principal emissions from aviation operations and the atmospheric processes that lead to changes in radiative forcing components. Radiative forcing changes lead to climate change as measured by temperatures and sea levels, for example. Climate change creates impacts on human activities and ecosystems and can lead to societal damages. Adapted from Prather et al. (1999) and Wuebbles et al. (2007).

Globalna emisja zanieczyszczeń przez transport lotniczy



Table 1. Yearly Global Total Fuel Burn and Emissions

Year	Flights	Distance (nm)	Fuel Burn (Tg)	NO _x (Tg)	CO (Tg)	HC (Tg)	CO ₂ (Tg)	H ₂ O (Tg)	SO _x (Tg)
2000	29706287	1.80E+10	181	2.51	0.541	0.0757	572	224	0.145
2001	27673927	1.72E+10	170	2.35	0.464	0.0630	536	210	0.136
2002	28477399	1.76E+10	171	2.41	0.480	0.0639	539	211	0.137
2003	28780037	1.86E+10	176	2.49	0.486	0.0617	557	218	0.141
2004	30378593	2.00E+10	188	2.69	0.511	0.0625	594	233	0.151



Porównanie emisji CO₂ z samochodów i samolotów.

Route

From (Origin)	Oslo International Airport (OSL)
To (Destination)	Rome Ciampino Apt (CIA)
Distance, GCD	2048 km

Operator & aircraft type SAS Braathens 737-800 176

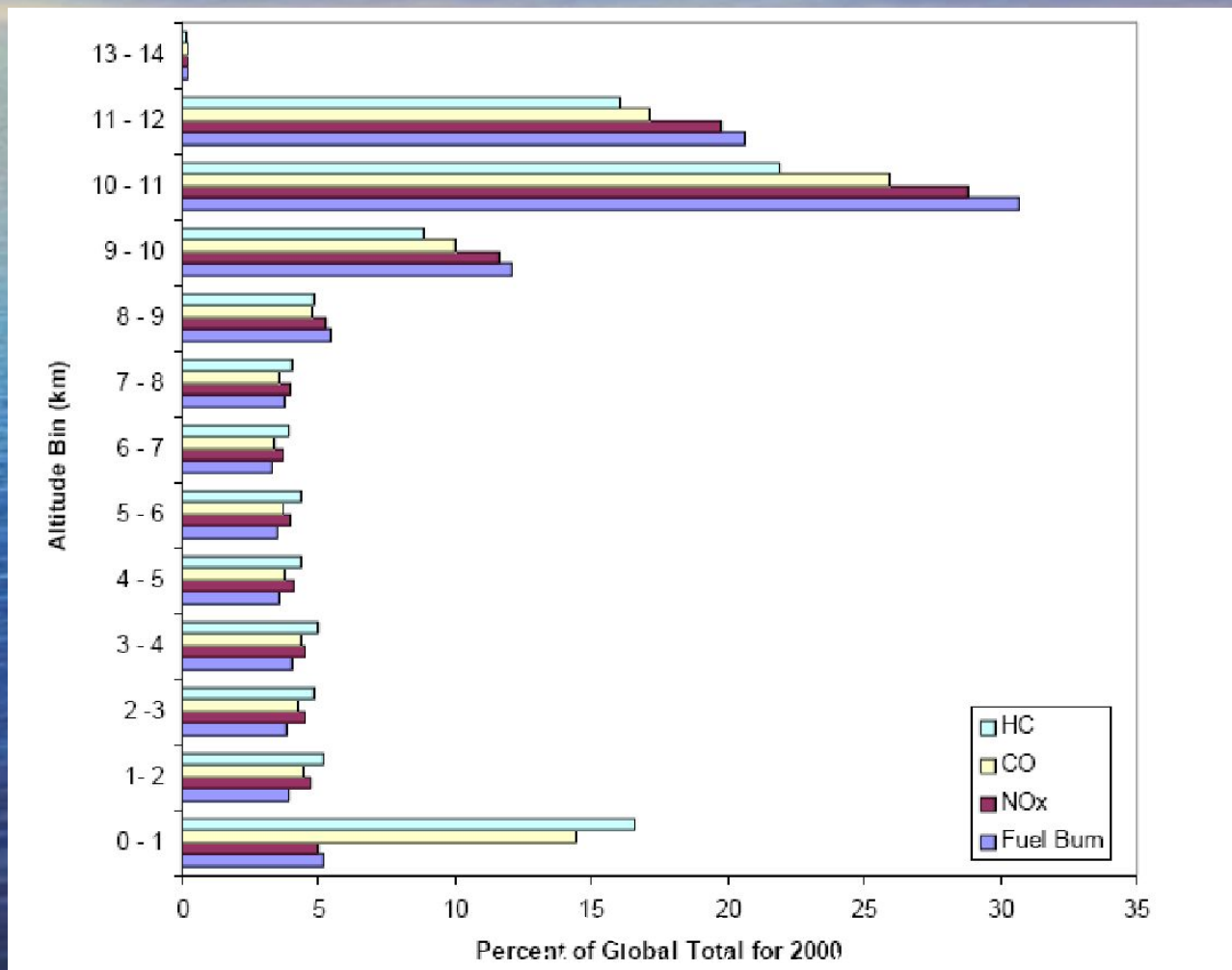
Max take-off weight	79 ton
Engines	2 CFM56-7B26 DAC
Passenger capacity	176
Average cabin factor	70 %
Max range	4400 km



Fuelburn & emissions results

	Aircraft total	Per passenger	Per passenger-km (pkm)
Fuelburn	6803 kg	55.2 kg/passenger	0.027 kg/pkm
Fuelburn	8504 litre	69 litre/passenger	0.034 litre/pkm
CO ₂	21488 kg	174.4 kg/passenger	0.085 kg/pkm
H ₂ O	8409 kg	68.3 kg/passenger	0.033 kg/pkm
SO ₂	6.8 kg	0.06 kg/passenger	0.027 g/pkm
NO _x	61.4 kg	0.5 kg/passenger	0.243 g/pkm
HC	12.7 kg	0.1 kg/passenger	0.051 g/pkm
CO	105.1 kg	0.85 kg/passenger	0.416 g/pkm

Emisja zanieczyszczeń w zależności od wysokości.



Emisja zanieczyszczeń na różnych kontynentach

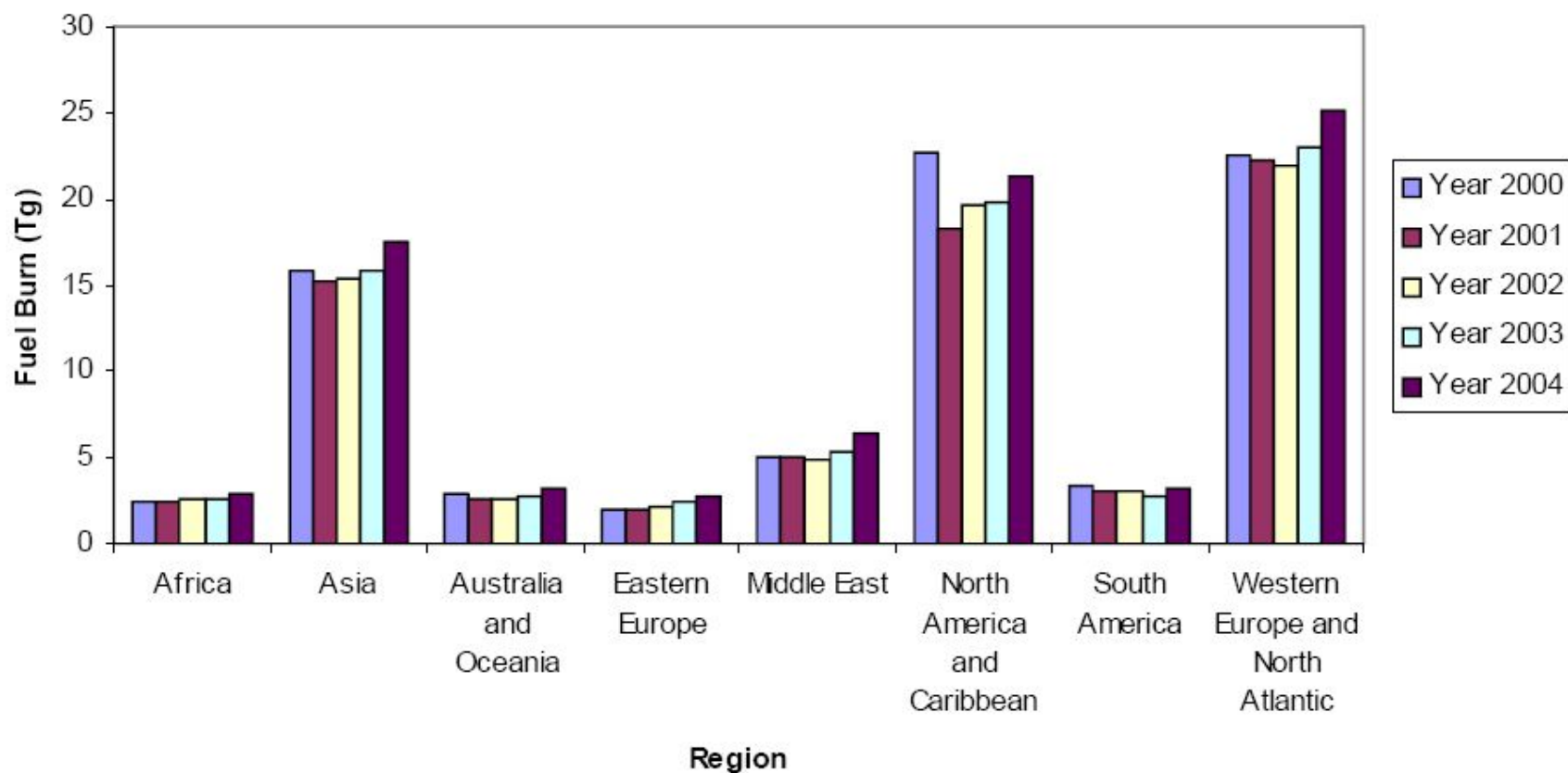


Figure 5. Comparison of Regional International Fuel Burn

Spalanie paliwa lotniczego

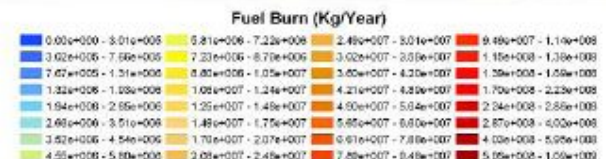
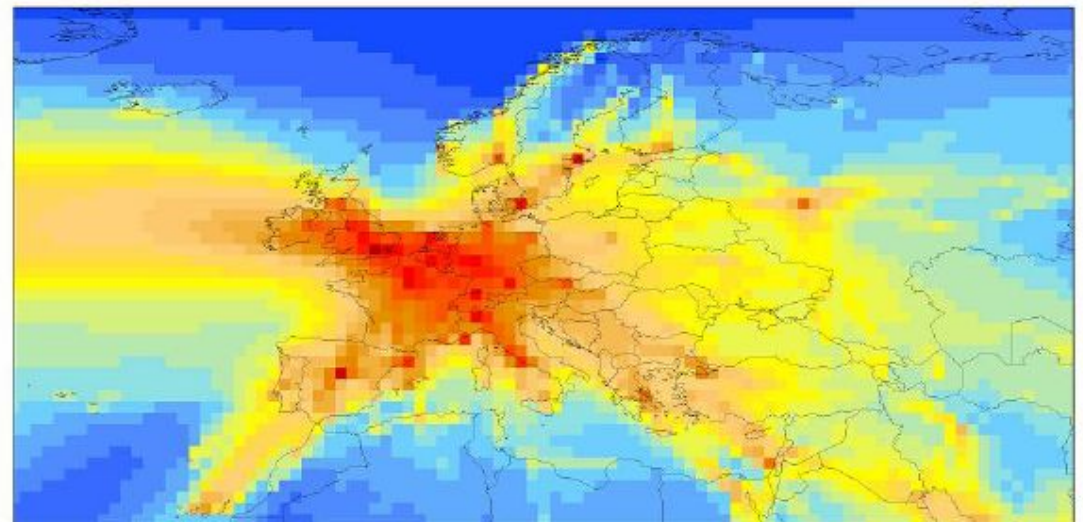
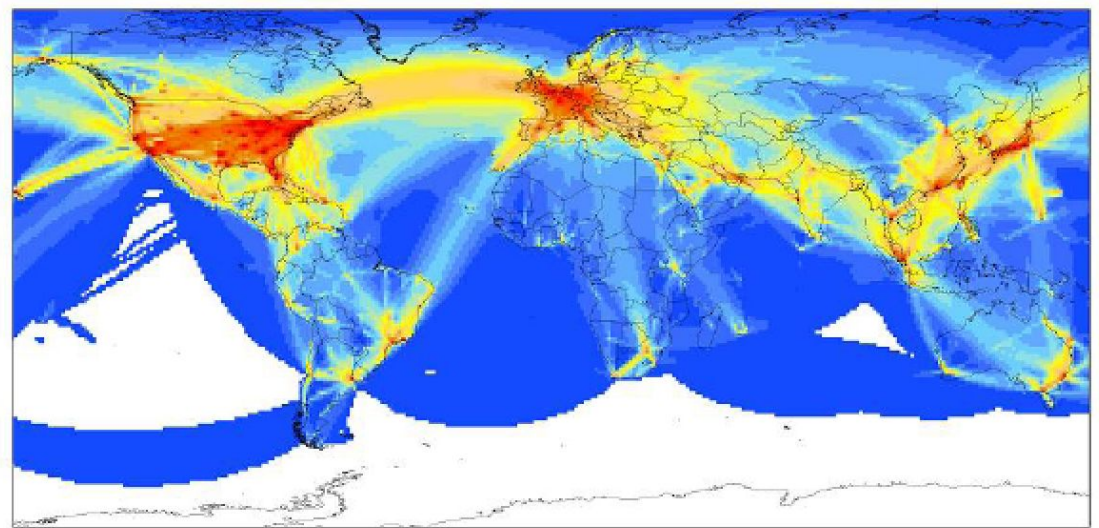


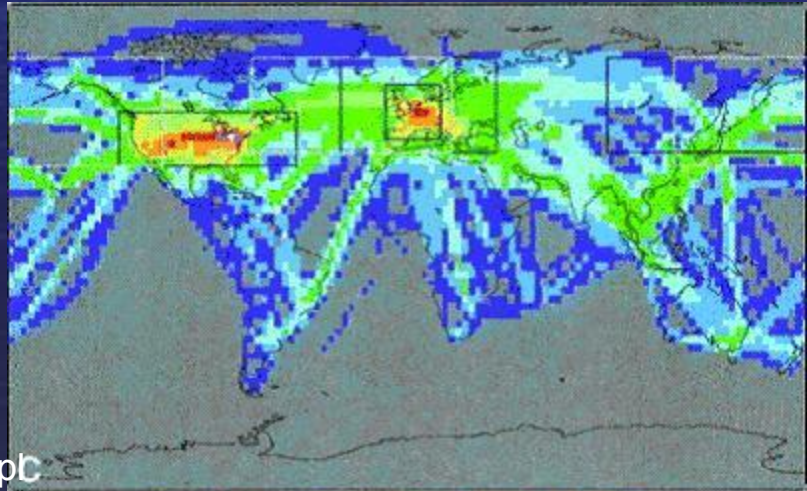
Figure 13. Gridded Plot European Fuel Burn for 2000 with all Altitudes Aggregated

Smugi kondensacyjne



Photo by Louis Nguyen

1. 26. 2001



mark@igf.fuw.edu.pl
www.igf.fuw.edu.pl/meteo

0 0.02 0.05 0.1 0.5 1.0 2.0 3.0 4.0 5.0 5.0+
Contrail Coverage (%)

Jak powstają smugi kondensacyjne?

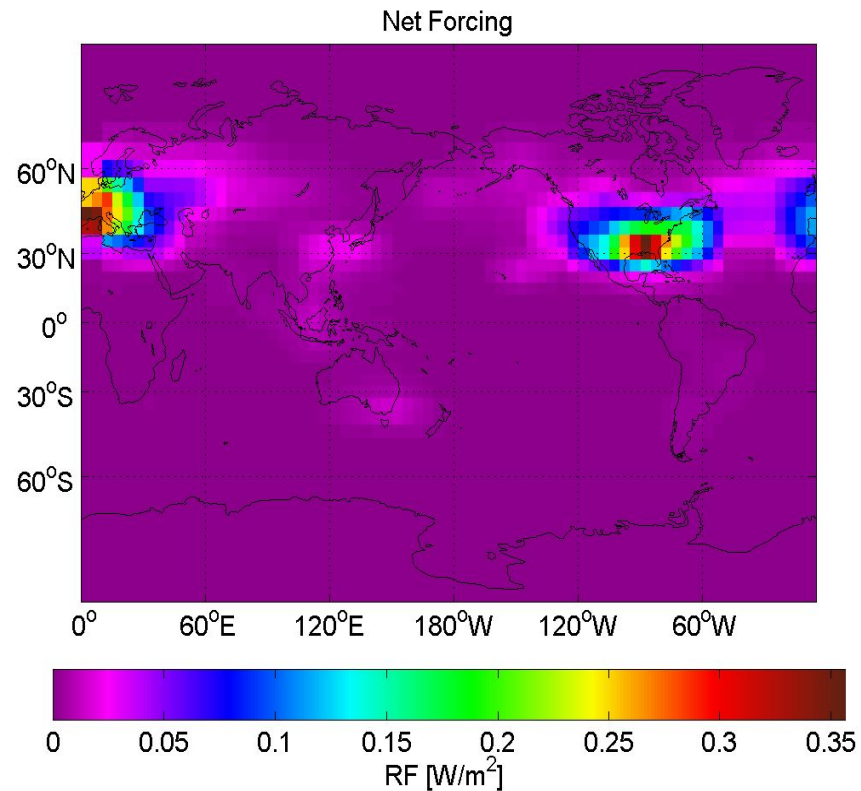
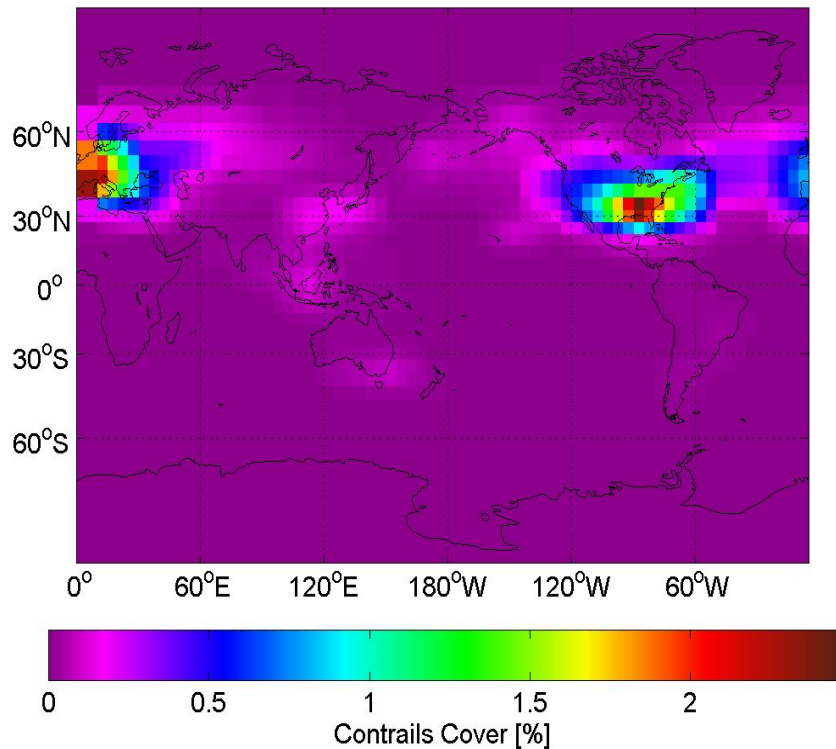
- Smuga kondensacyjna powstaje poprzez skroplenie pary wodnej utrzymującej się w powietrzu w stanie przechłodzonym na wysokości kilku kilometrów nad ziemią. Dzięki aerozolowi, jakim są spaliny, a ściślej jądom kondensacji, para wodna wytrąca się w postaci kropelek, po czym natychmiast zamarza.
- Skraplanie pary wodnej odbywa się w procesie mieszania spalin samolotowych zawierających parę wodną oraz powietrza atmosferycznego. Smuga powstaje jedynie w przypadku gdy powietrze jest odpowiednio zimne i wilgotne.

Różne struktury smug kondensacyjnych



- Struktura smugi kondensacyjnej zależy od warunków termodynamicznych powietrza atmosferycznego (temperatura i wilgotność)
- W suchym powietrzu smuga może nie pojawić albo bardzo szybko zanika wskutek sublimacji kryształów lodu.

Zachmurzenie oraz wymuszenie radiacyjne smug kondensacyjnych



Średnie wymuszenie radiacyjne około $+10 \text{ mW/m}^2$

Dlaczego smugi kondensacyjne ogrzewają system klimatyczny?

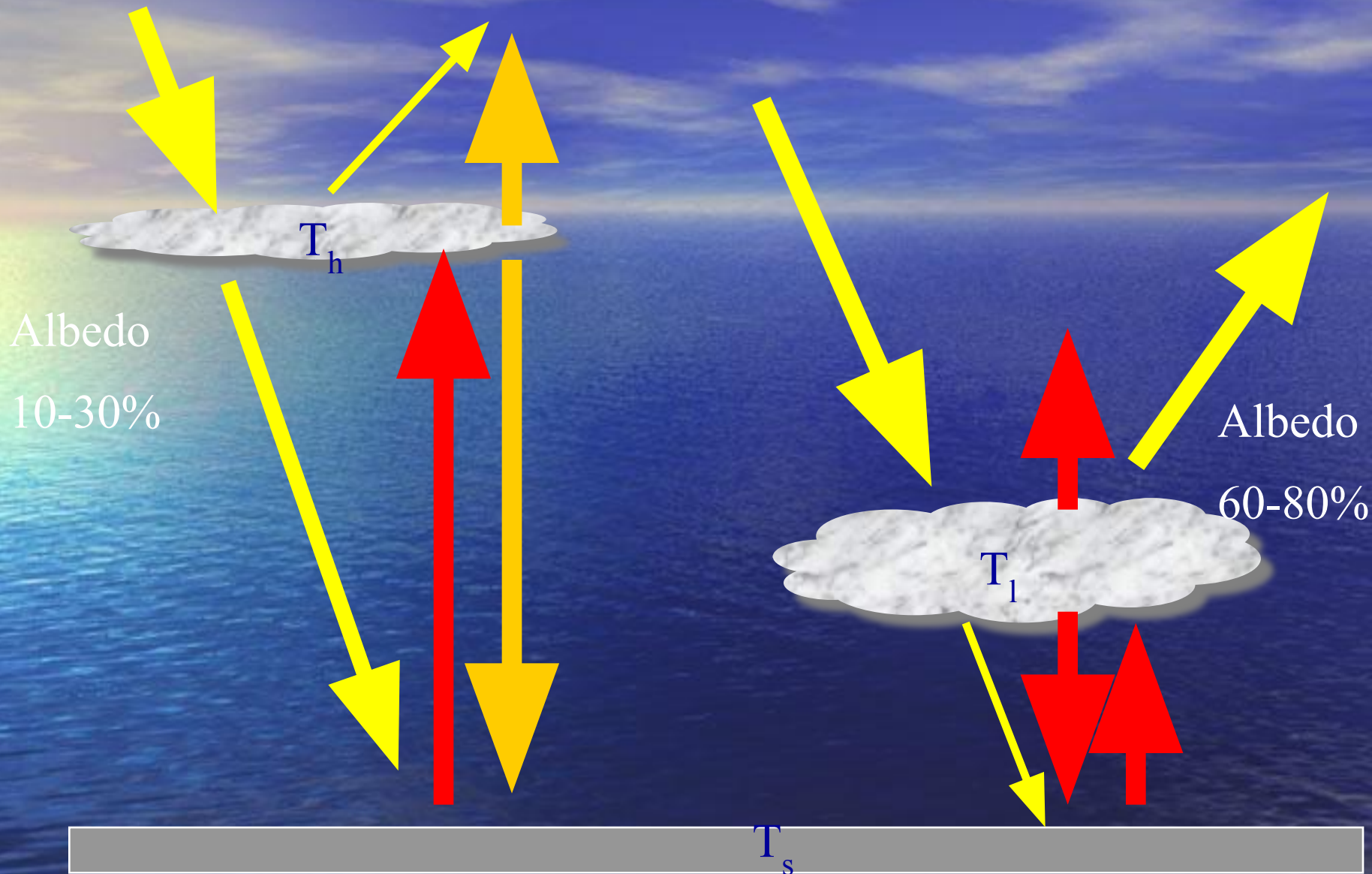
Chmury niskie:

- Mają zbliżoną temperaturę do powierzchni ziemi więc mają niewielki wpływ na promieniowanie długofalowe emitowane przez powierzchnie Ziemi
- Silnie odbijają promieniowanie słoneczne.
- Efekt netto jest ochładzający – ujemne wymuszanie radiacyjne.

Chmury wysokie:

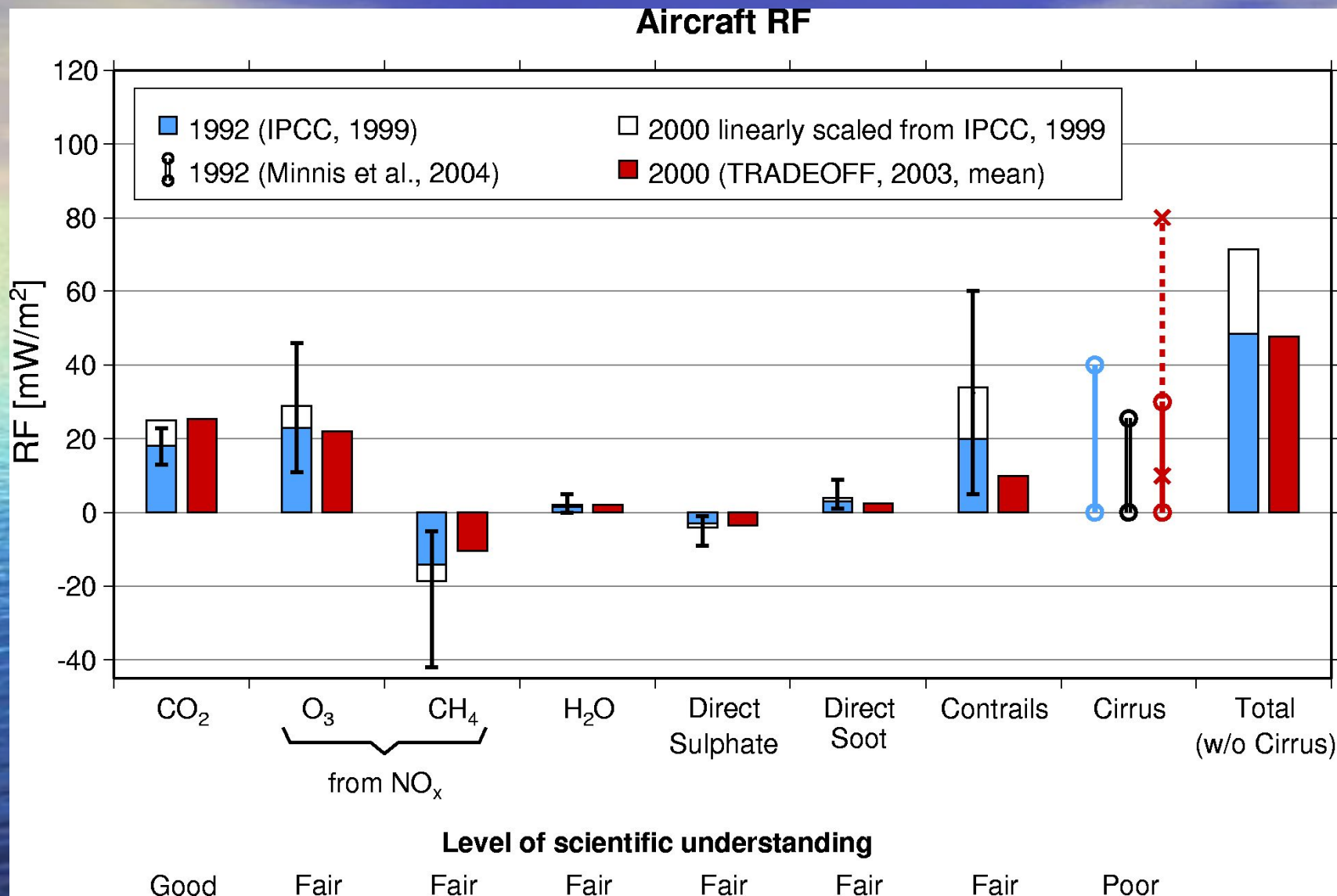
- Mają znacznie niższą temperaturę w stosunku do powierzchni ziemi więc znacząco redukują promieniowanie długofalowe emitowane przez powierzchnie Ziemi
- Słabo odbijają promieniowanie słoneczne.
- Efekt netto jest ogrzewający – dodatnie wymuszanie radiacyjne.

Chmury wysokie ogrzewają a niskie chłodzą...



$$T_s \approx T_l \quad T_s \gg T_h$$

Wymuszanie radiacyjne związane z transportem lotniczym.



Sausen et al., 2005

19.07.2005

Aviation Radiative Forcing Components in 2005

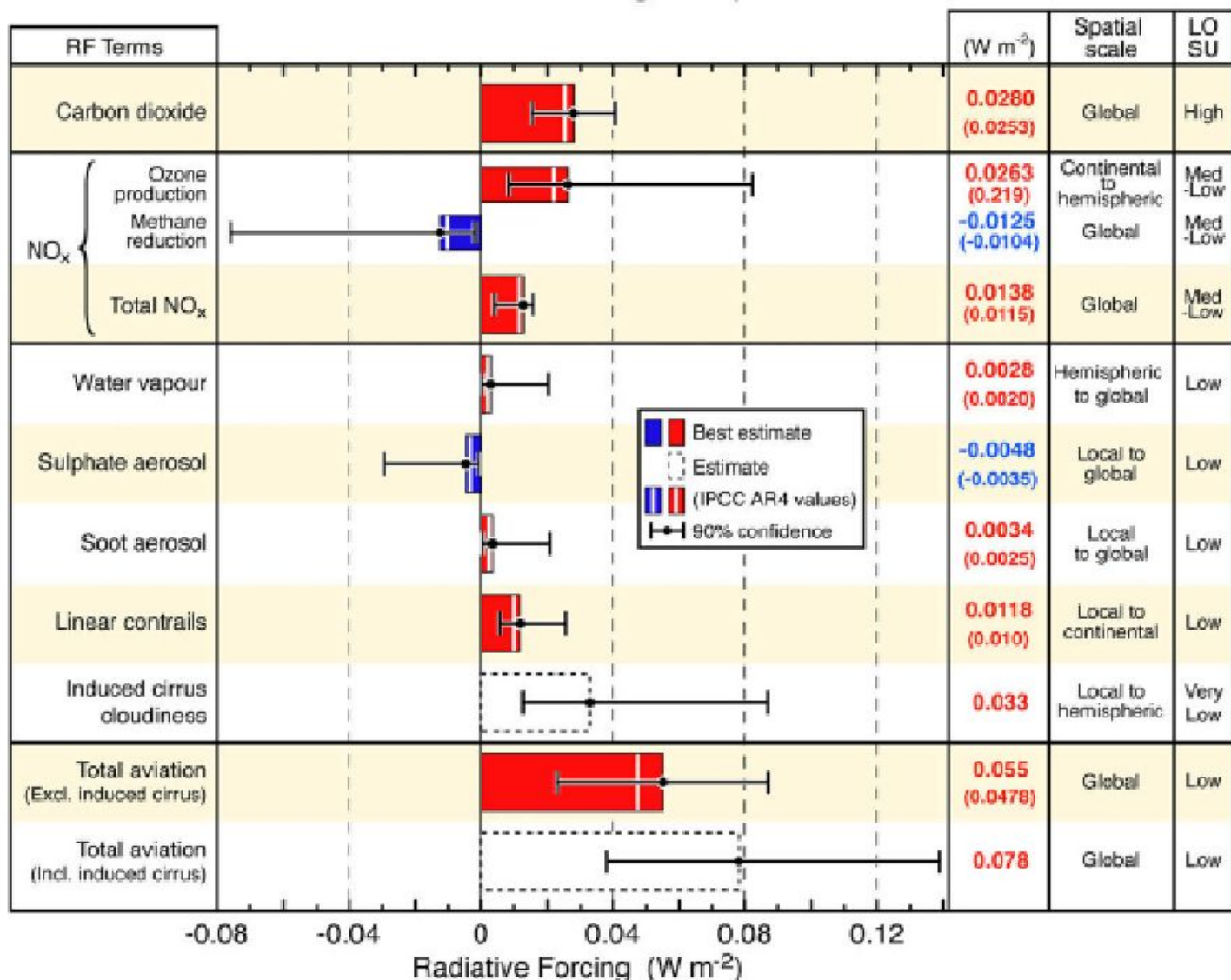


Fig. 4. Radiative forcing components from global aviation as evaluated from preindustrial times until 2005. Bars represent updated best estimates or an estimate in the case of aviation-induced cloudiness (AIC) as listed in Table 2. IPCC AR4 values are indicated by the white lines in the bars as reported by Forster et al. (2007a). The induced cloudiness (AIC) estimate includes linear contrails. Numerical values are given on the right for both IPCC AR4 (in parentheses) and updated values. Error bars represent the 90% likelihood range for each estimate (see text and Tables 2 and 3). The median value of total radiative forcing from aviation is shown with and without AIC. The median values and uncertainties for the total NO_x RF and the two total aviation RPs are calculated using a Monte Carlo simulation (see text). The Total NO_x RF is the combination of the CH₄ and O₃ RF terms, which are also shown here. The AR4 value noted for the Total NO_x term is the sum of the AR4 CH₄ and O₃ best estimates. Note that the confidence interval for "Total NO_x" is due to the assumption that the RPs from O₃ and CH₄ are 100% correlated; however, in reality, the correlation is likely to be less than 100% but to an unknown degree (see text). The geographic spatial scale of the radiative forcing from each component and the level of scientific understanding (LOSU) are also shown on the right.

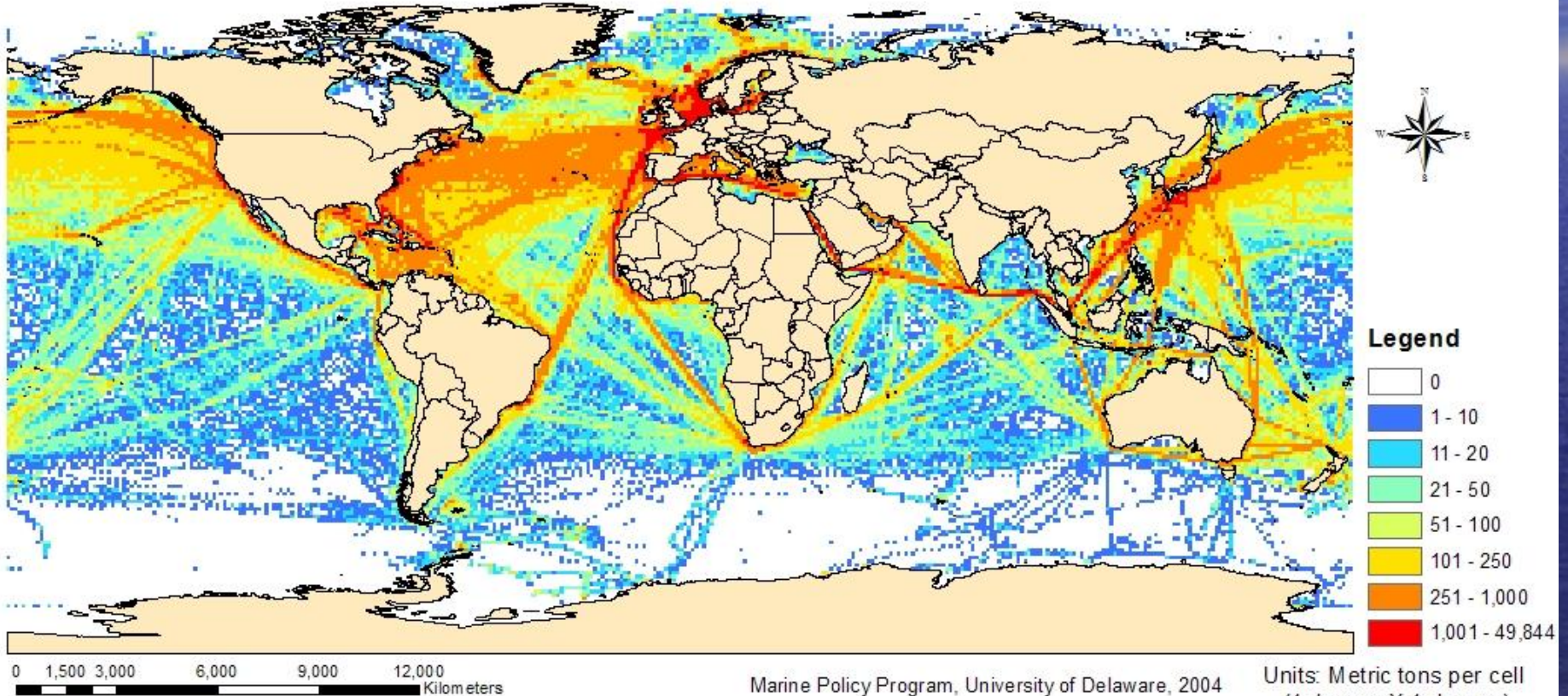
Transport morski

- Statki emitują do atmosfery następujące związki: NO_x , SO_x , CO_2 , CO , sadzę oraz POM (związki organiczne)
- Globalna emisja przez statki pasażerskie i transportowe

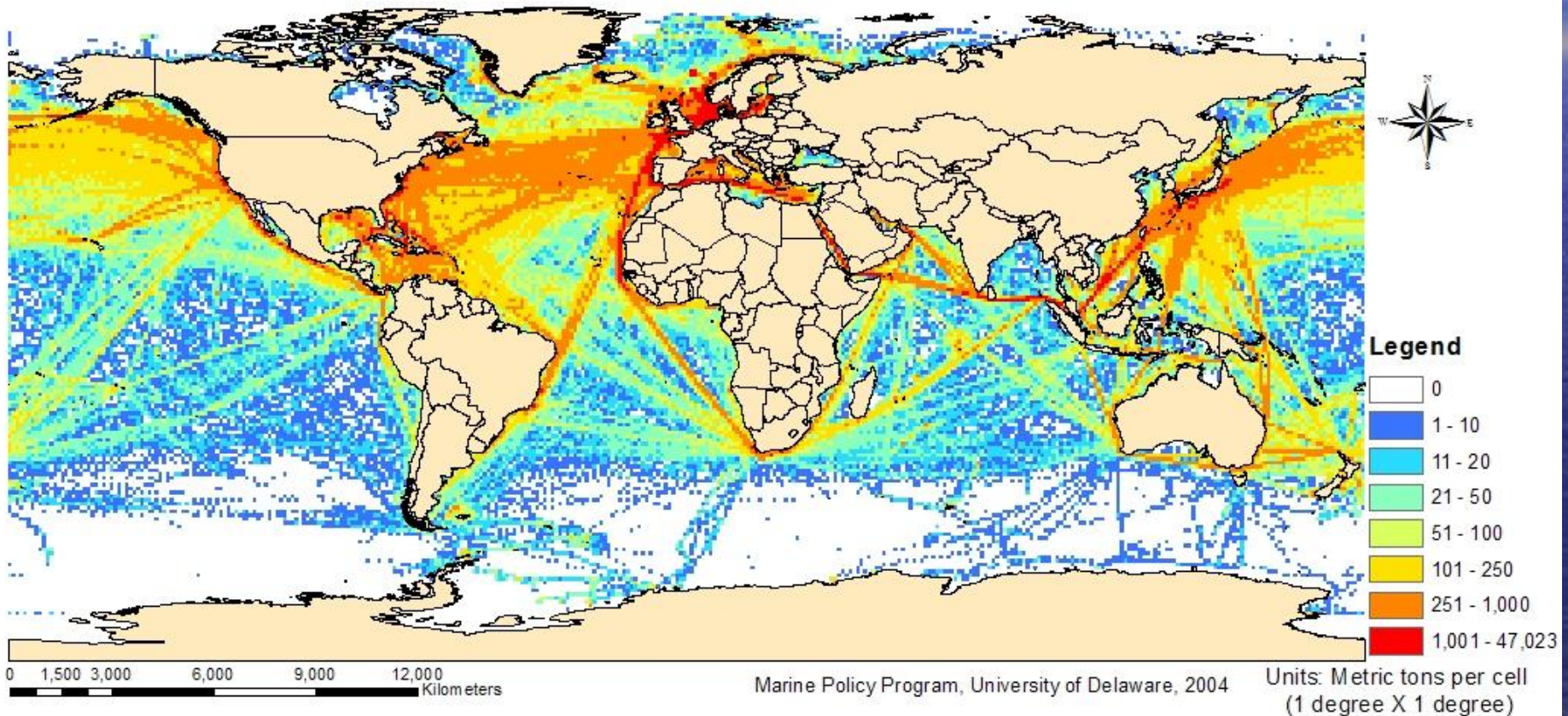
TABLE 1. Annual Emission Totals of Particulate Matter and Trace Gases from Shipping in Tg/yr for the Three Different Inventories Considered in This Study

	Inventory A for 2002 (Corbett et al., 2007 (4))	Inventory B for 2001 (Eyring et al., 2005 (11))	Inventory C for 2012 (this study)
spatial ship traffic proxy	ICOADS	AMVER	ICOADS
fuel consumption in million tonnes	200 (cargo and passengers only)	280 (world fleet including auxiliary engines)	299 (cargo and passengers only)
NO_x	16.4	21.3	24.5
SO_x	9.2	11.7	13.7
primary SO_4	0.35	0.77	0.50
CO	1.08	1.28	1.61
BC	0.07	0.05	0.10
POM	0.71	0.13	1.06

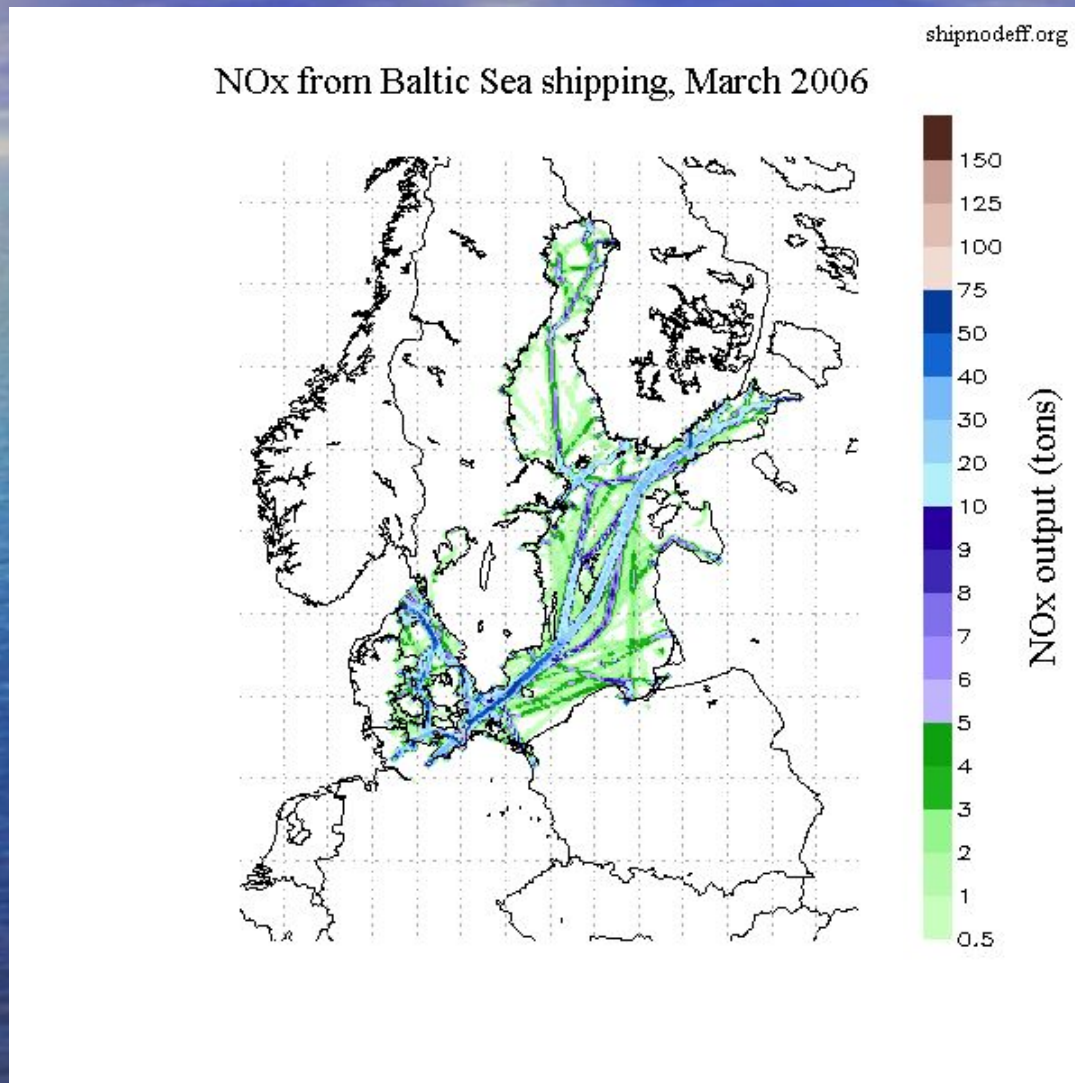
NOx Emissions from Ships for 1997



SOx Emissions from Ships for 1997



Emisja NO_x na Bałtyku



Roczna emisja CO₂ w perspektywie historycznej i prognoza do 2050 r.

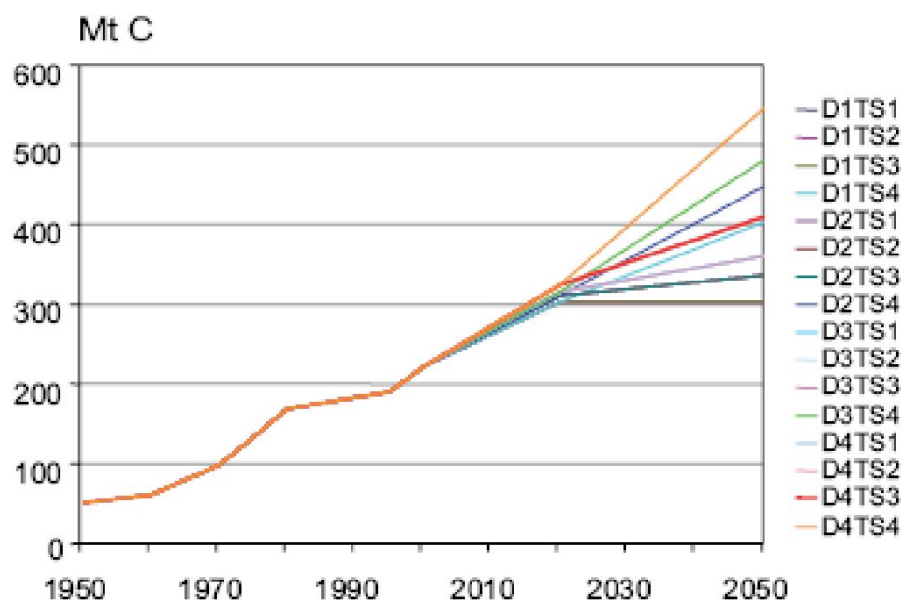


Figure 5.7: Historical and projected CO₂ emissions of seagoing shipping, 1990-2050

„Ślady” statków

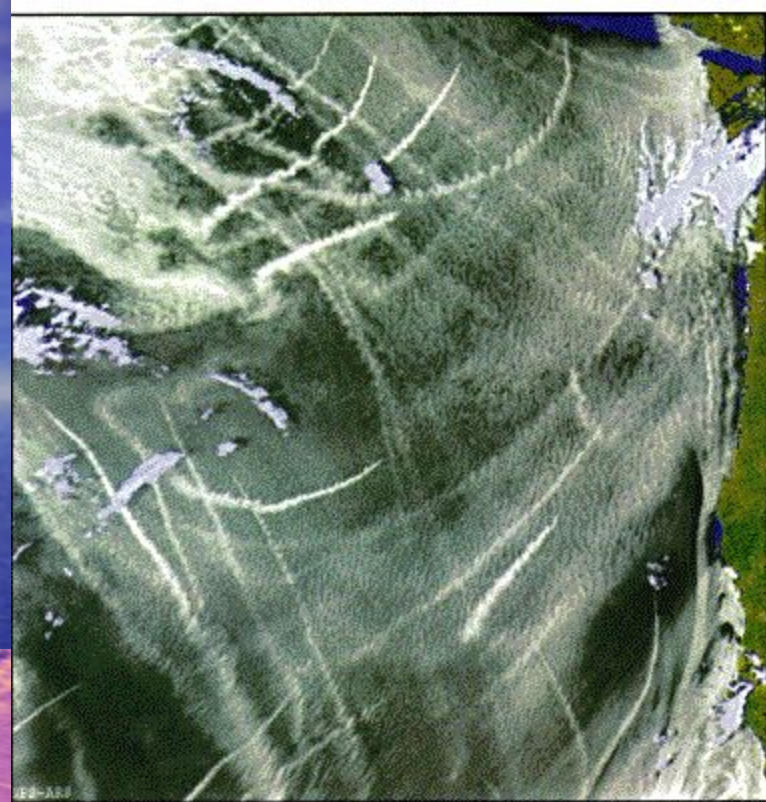
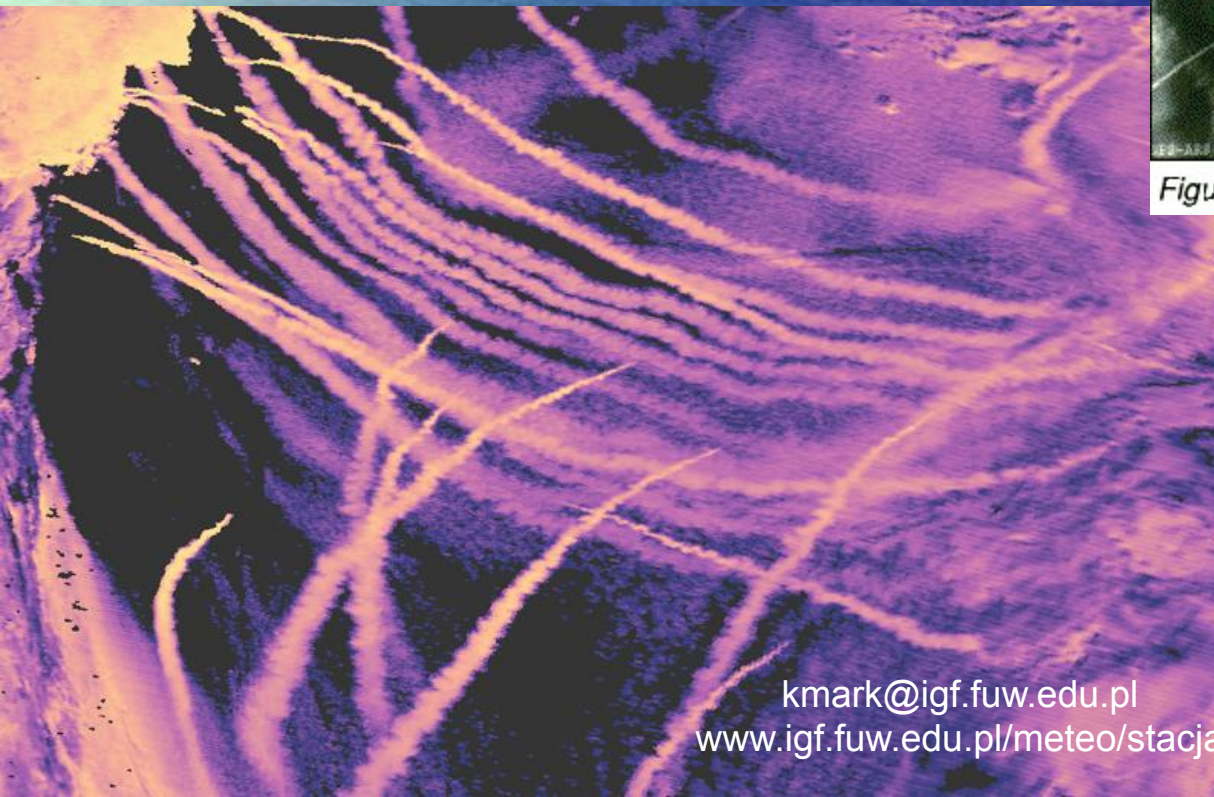
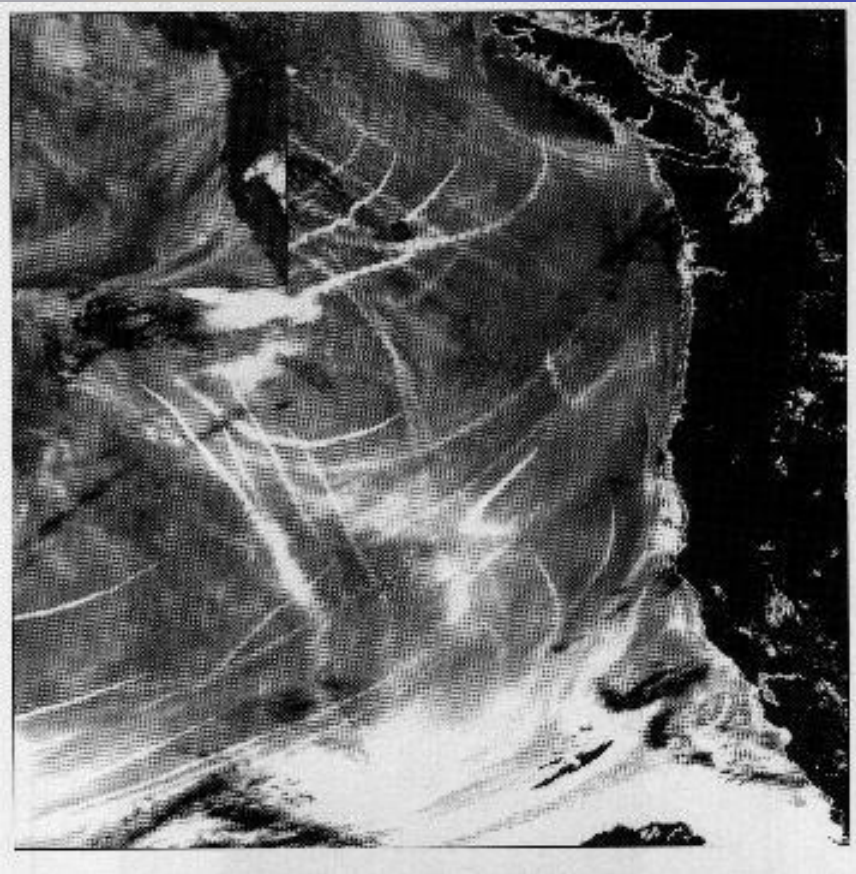


Figure 1: Ship tracks off the coast of Washington

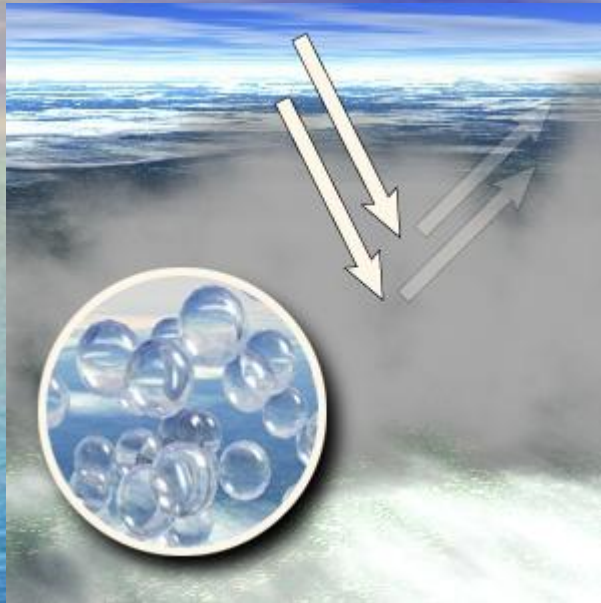


Dlaczego statki zostawiają ślady w chmurach?

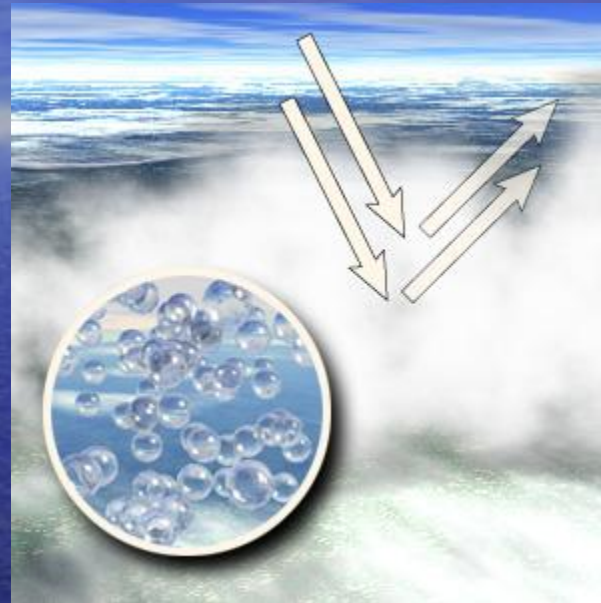


Większa koncentracja
kropel,
Mniejszy promień r_e

Chmury 'czyste' i 'zanieczyszczone'



**Czyste powietrze, mała ilość jąder kondensacji.
Mała koncentracja.
Duże rozmiary kropelek.**



**Zanieczyszczone powietrze, duża ilość jąder kondensacji.
Duża koncentracja.
Małe rozmiary kropelek.**

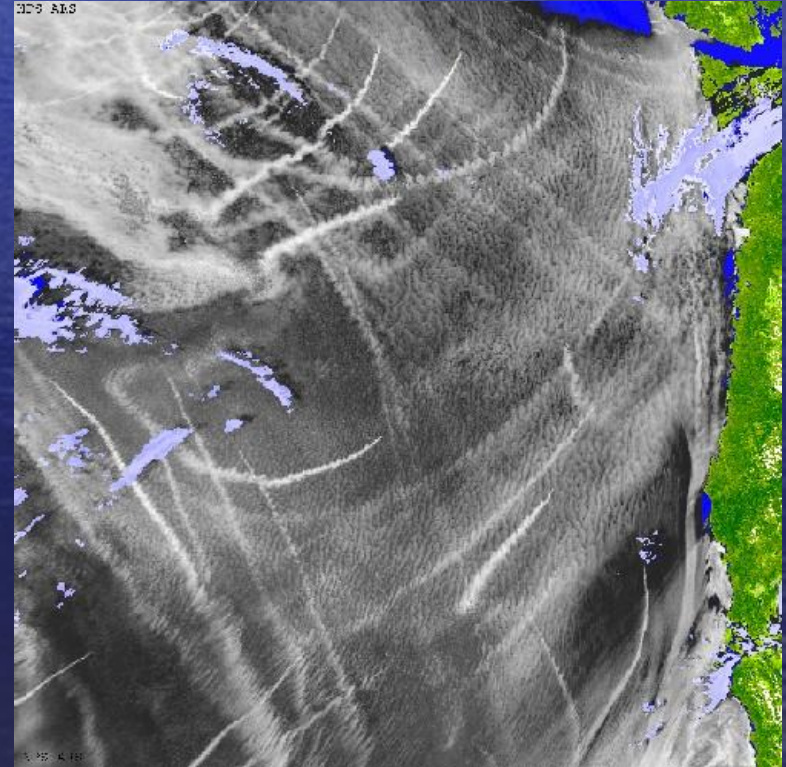
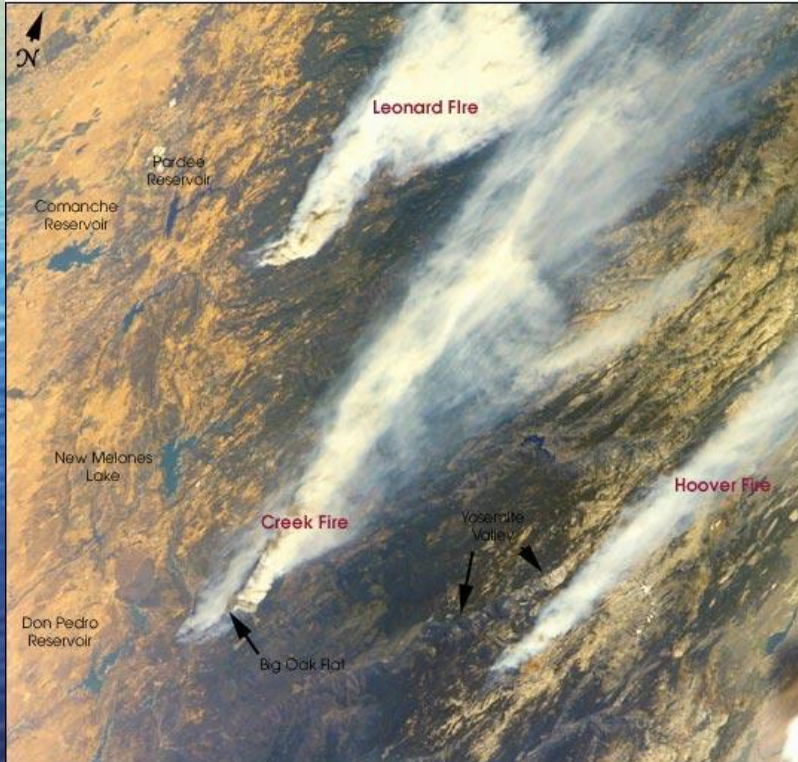
Efekt pośredni na klimat

- Chmury zanieczyszczone mają wyższe albedo a więc odbijają więcej promieniowania słonecznego.
- Tak, więc statki prowadzą do ochładzania klimatu.
- Nasza wiedza na temat stopnia tego ochładzania jest obarczona wysoką niepewnością

Wpływ aerozolu na klimat

- 1) Efekt bezpośredni
poprzez rozpraszanie i
pochłanianie promieniowania
słonecznego dochodzącego do
powierzchni Ziemi.

- 2) Efekt pośredni
oddziaływanie aerozolu na
własności chmur oraz ich
czas życia



Aerozole chłodzą klimat!

Wymuszanie radiacyjne związane z transportem morskim

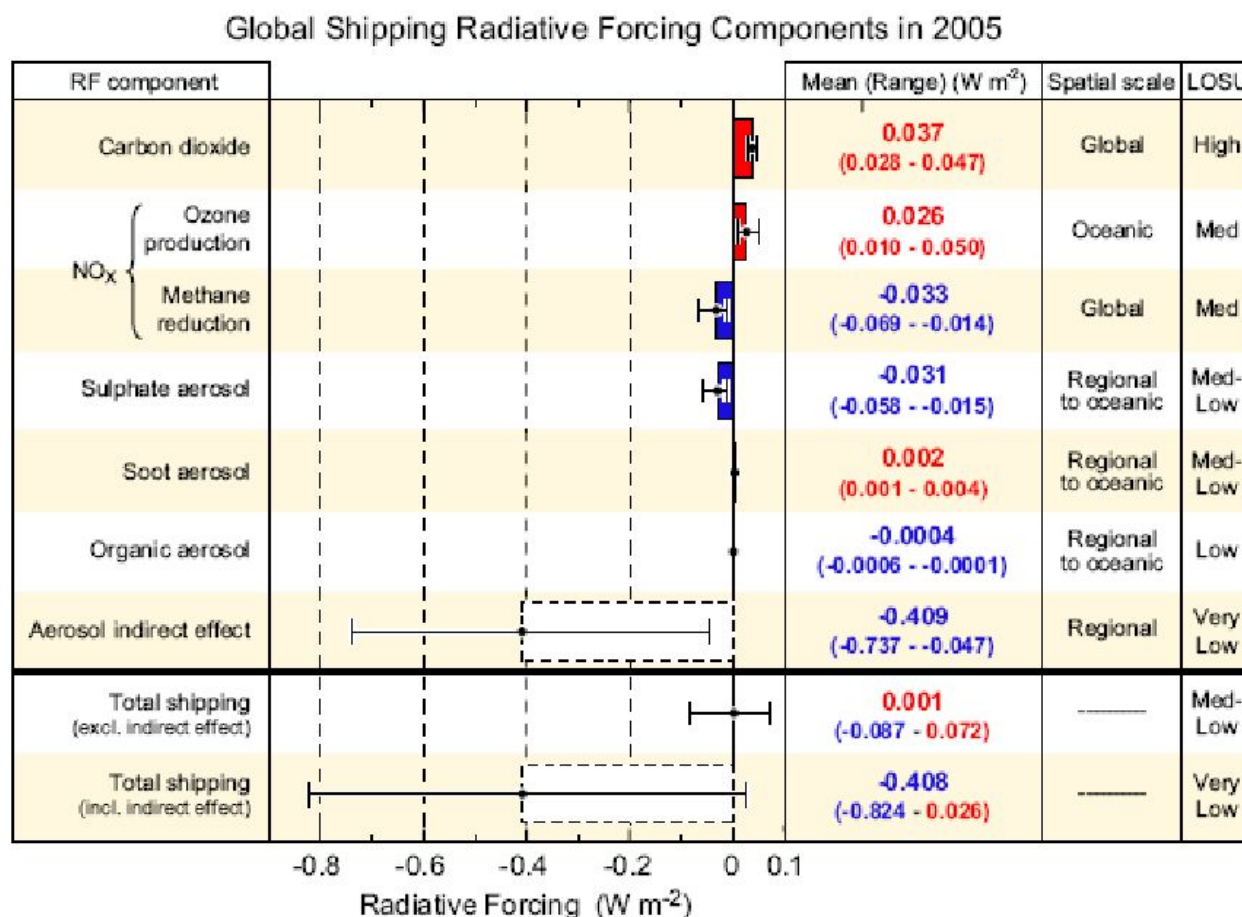


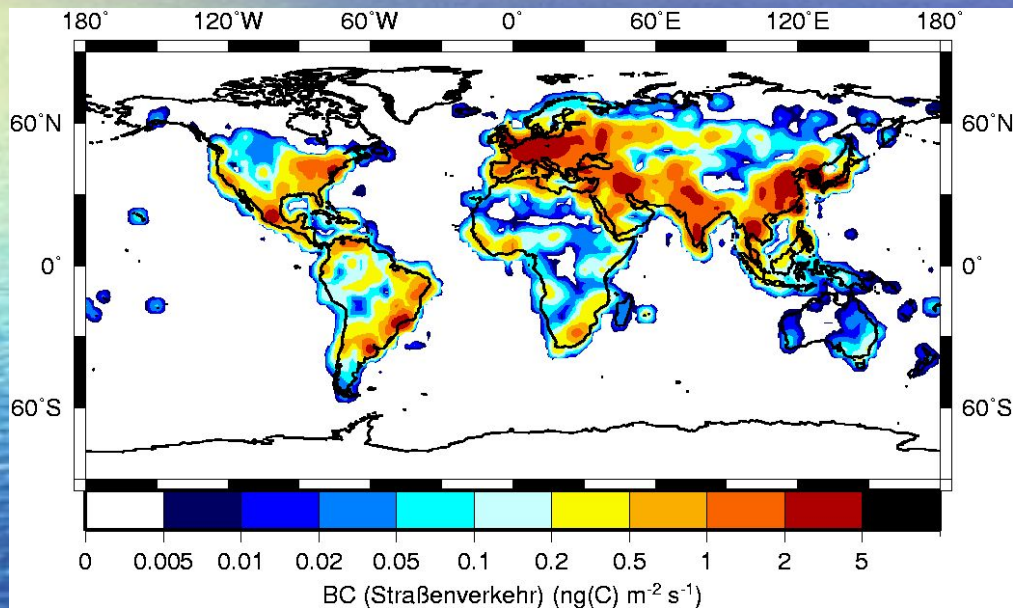
Fig. 14. Global average annual mean radiative forcing (RF) and literature ranges due to emissions from oceangoing shipping in $W m^{-2}$ for 2000 (upper panel) and for 2005 (lower panel). The boxes show the mean of the lower and upper estimate reported in the literature and the whiskers show the range of literature values given by the highest and lowest estimate (see Table 7). The typical geographical extent (spatial scale) of the RF and the level of scientific understanding (LOSU) is given in addition. The RF contributions with very low LOSU are displayed in dashed lines. The figure does not include the positive RF that could possibly occur from the interaction of BC with snow which has so far not been investigated for ships.

Transport lądowy

- Ruch kolejowy
- Ruch samochodowy

CO2 emissions per passenger ...			
Journey:	Out & back by plane...	Out & back by train...	%
<u>London to Paris by Eurostar</u>	3.5 hours, 244 Kg/CO2	2.75 hours, 22 Kg/CO2	= 91% less
<u>London to Edinburgh</u>	3.5 hours, 193 Kg/CO2	4.5 hours, 24 Kg/CO2	= 87% less
<u>London to Nice</u>	4 hours, 250 Kg/CO2	8 hours by Eurostar+TGV, 36 Kg/CO2	= 85% less
<u>London to Barcelona</u>	4.5 hours, 277 Kg/CO2	Eurostar then overnight sleeper, 40 Kg/CO2	= 85% less
<u>London to Amsterdam</u>	4 hours, 136 Kg/CO2	Overnight by Dutch Flyer train & ferry, 27.2 Kg/CO2	= 80% less
<u>London to Dublin</u>	4 hours, 174.8 Kg/CO2	8 hours by train & ferry, 46.8 Kg/CO2	= 73% less
<u>London to Tangier</u>	5 hours, 435 Kg/CO2	48 hours by Eurostar, sleeper trains & ferry, 63 Kg/CO2	= 85% less

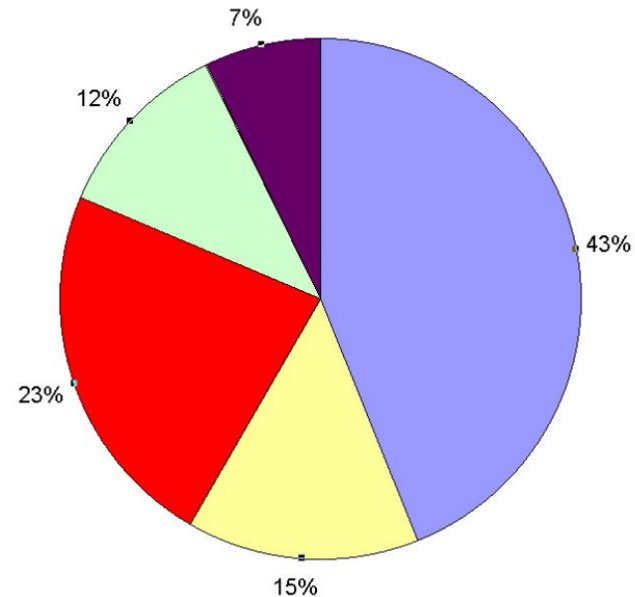
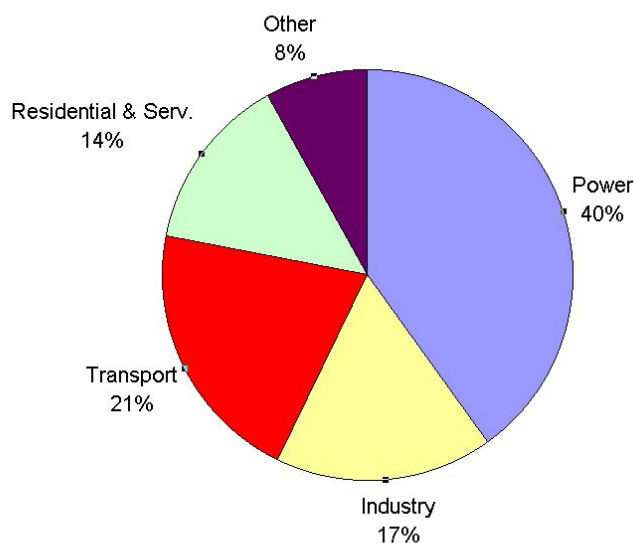
Emisja sadzy z transportu samochodowego



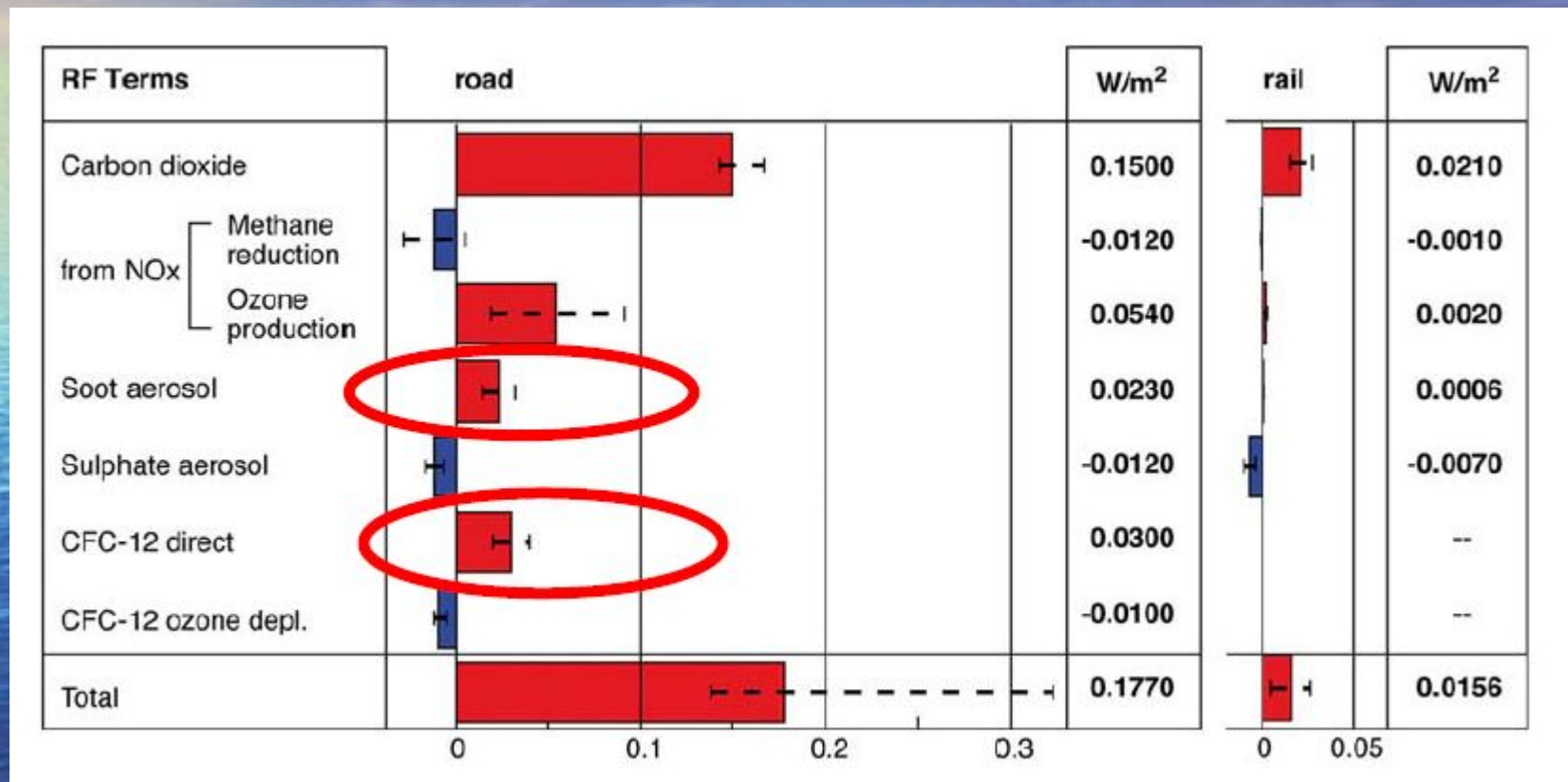
Region	Source strength	Contribution
Europe	0.4 TgC/a	16%
North America	0.2 TgC/a	8%
Asia	0.9 TgC/a	38%
rest	0.9 TgC/a	38%
total	2.4 TgC/a	100%

Köhler et al., 2001

- Jak wiadomo spalanie benzyny i oleju napędowego prowadzi do emisji CO₂.
- Dzięki stosowaniu katalizatorów w samochodach zmniejszono emisję toksycznych substancji jednak emisja CO₂ w zasadzie nie uległa zmianie.
- Międzynarodowa Agencja Energii oszacowała, że w 2002 roku całkowita emisja CO₂ wyniosła 4.9 miliardów ton co stanowi 21% światowej emisji dwutlenku węgla.
- Jeśli nie nastąpi radykalna zmiana trendu w 2030 roku emisja CO₂ wyniesie około 8.7 miliarda ton co będzie stanowić 23% emisji CO₂.
- Przeciętny obywatel emituje co roku około jedną tonę CO₂ tylko za sprawą transportu.

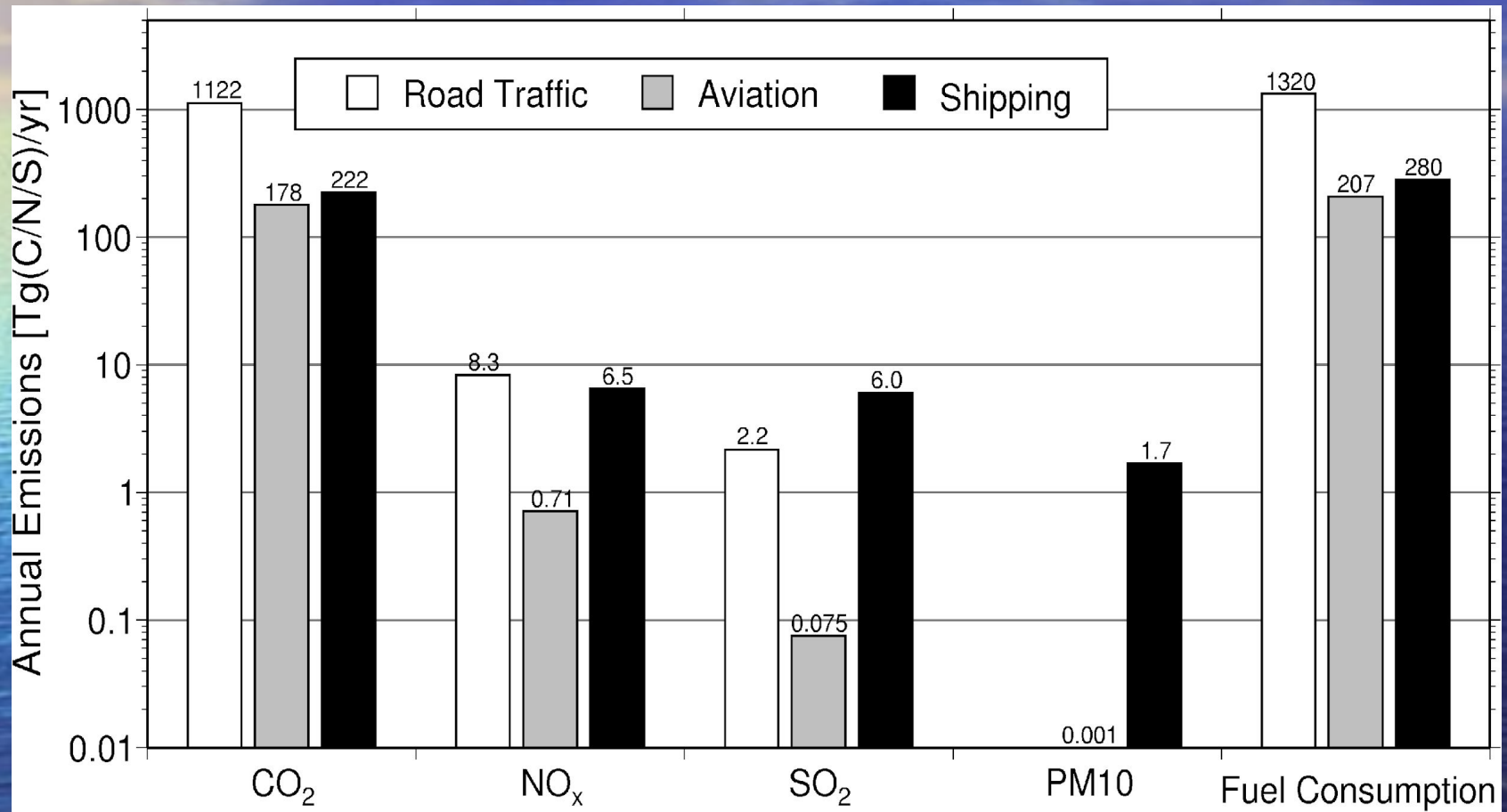


Wymuszanie radiacyjne związane z transportem lądowym

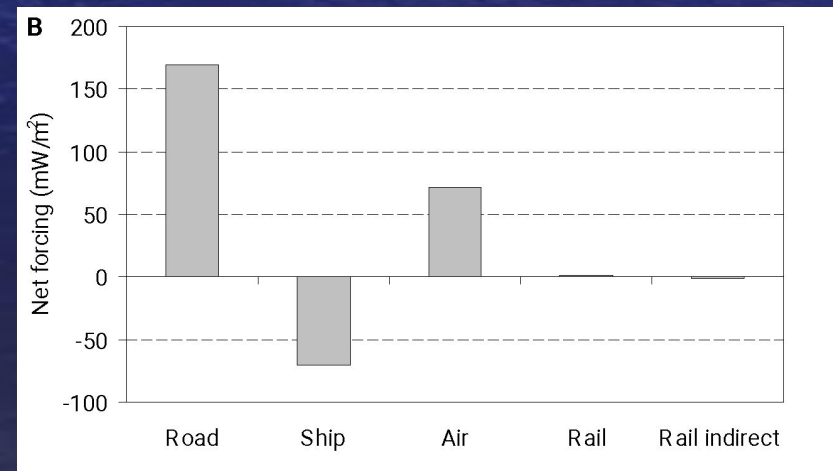
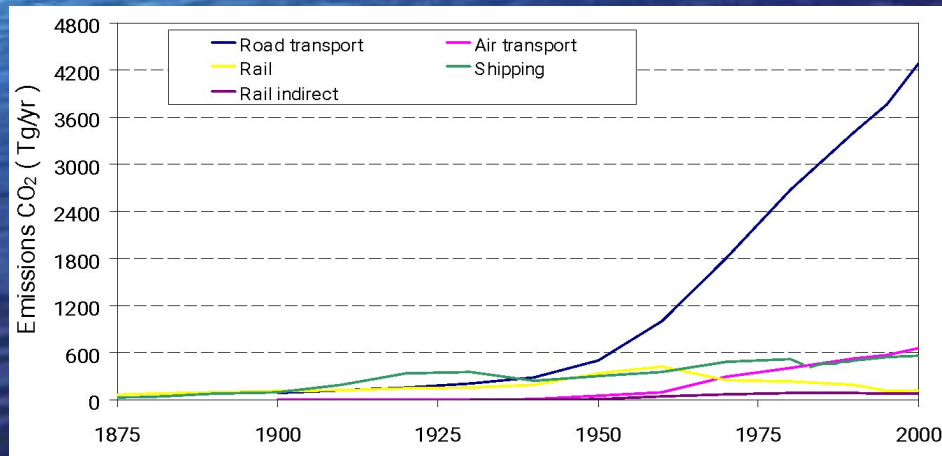
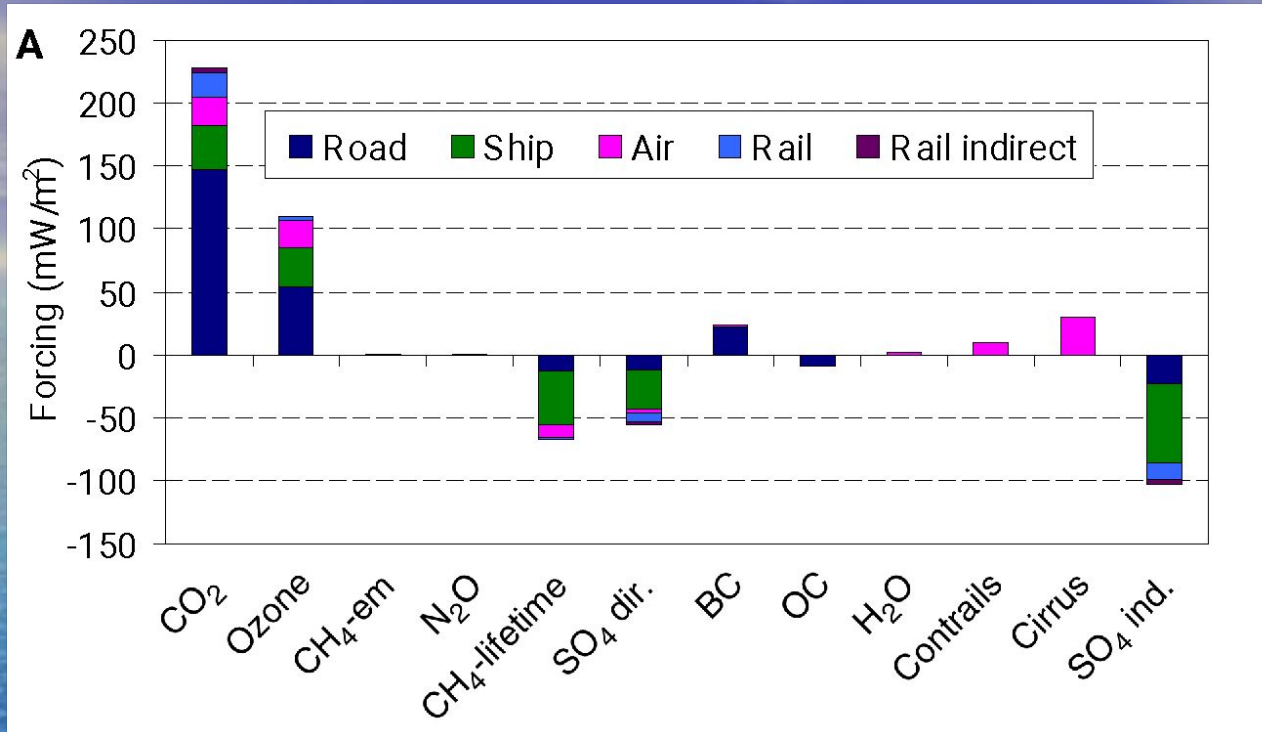


Uherek, 2010

Emisja z różnych systemów transportu



Wymuszanie radiacyjne systemu transportu w 2000 roku



Prognoza rozwoju transportu

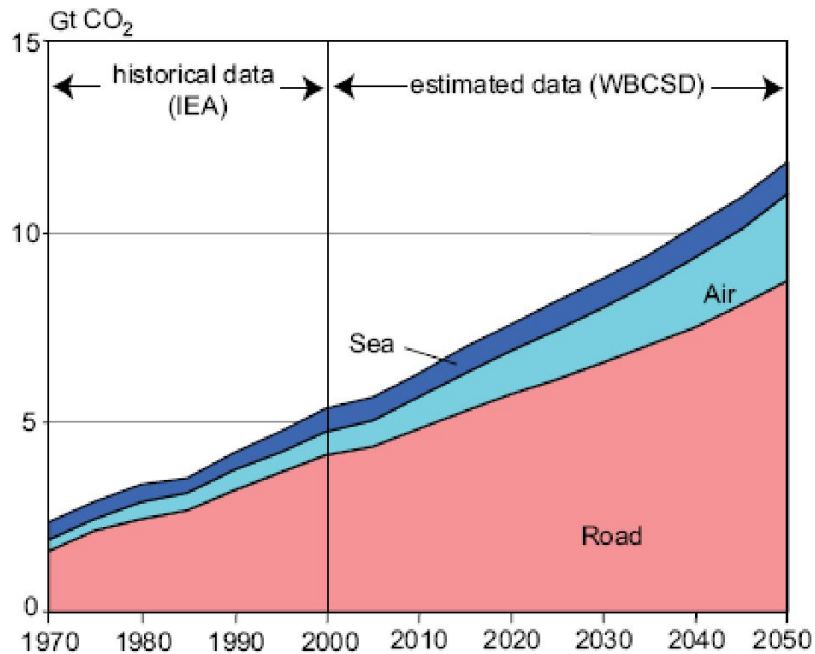


Figure 5.4: Historical and projected CO₂ emission from transport by modes, 1970–2050

Source: IEA, 2005; WBCSD, 2004b.

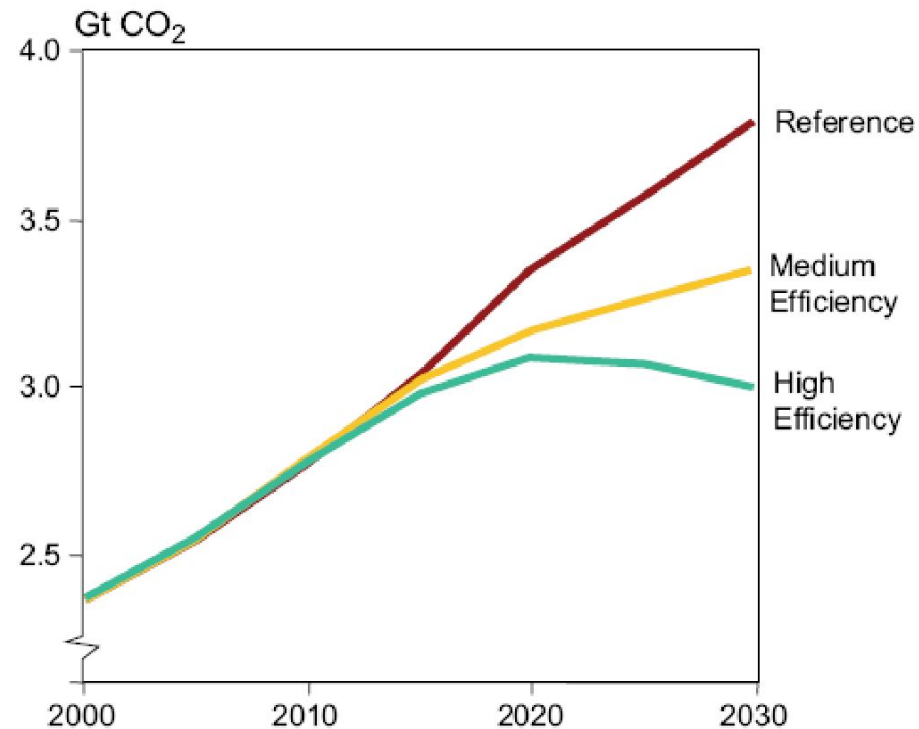


Figure 5.16: Light-duty vehicle CO₂ emissions for three scenarios

Podsumowanie

Transport jest obecnie odpowiedzialny za 23% emisji gazów cieplarnianych z czego 74% pochodzi z transportu samochodowego.

Udział transportu w zużycia paliwa stale rośnie, z 33% w 1971 r. do 47% w 2002 r. Przewiduje wzrost do 54% w roku 2030. Olej obejmuje 35% naszego zapotrzebowania na energię. Oznacza to, że transport zużywa już ponad 15% światowej produkcji energii oraz może osiągnąć 20% w ciągu najbliższych 30 lat.

Wzrost emisji gazów cieplarnianych przez system transportu postępuje w najszybciej tempie spośród wszystkich gałęzi przemysłu produkujących energię. Tempo wzrostu jest największe w transporcie towarowym.

transport lądowy:

- wysokie, dodatnie wymuszenie radiacyjne
- głównie za sprawą CO_2 , fluoropochodnych oraz sadzy
- największą niepewnością jeśli chodzi o wpływ klimatyczny jest rola sadzy.

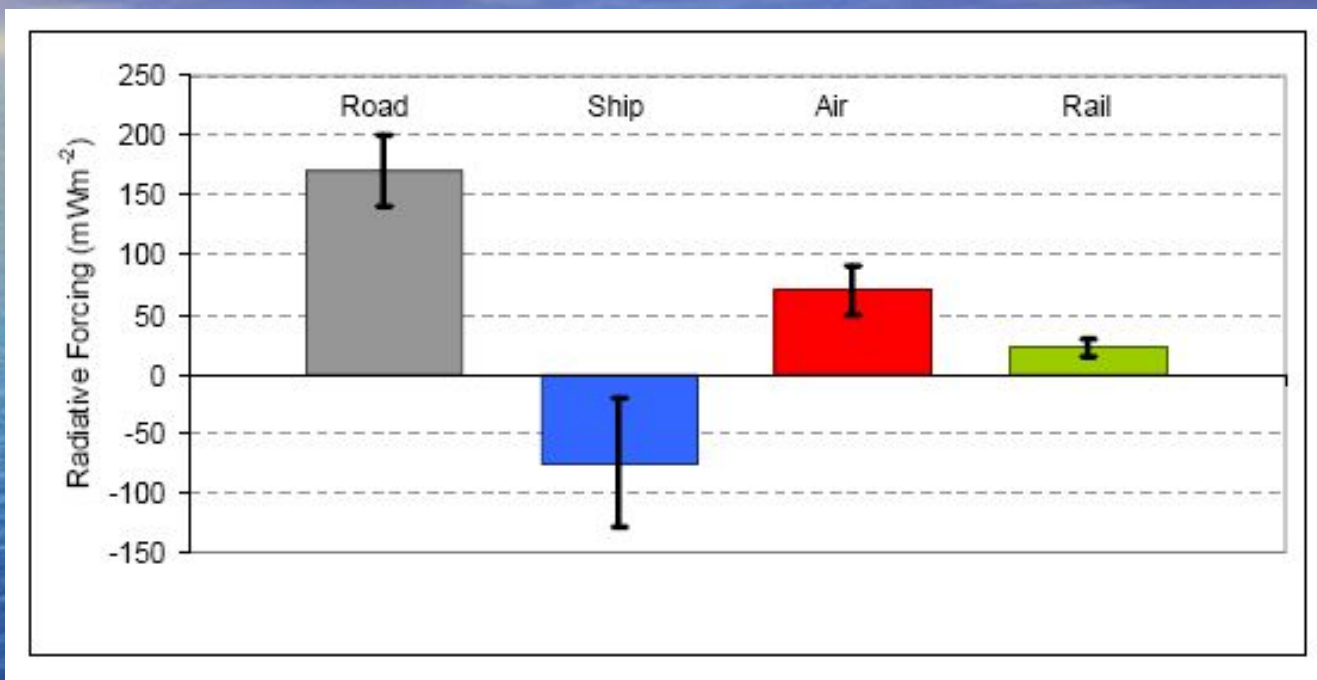
transport lotniczy

- wymuszanie radiacyjne jest dodatnie
- CO_2 , ozon oraz smugi kondensacyjne ogrywiają najważniejszą rolę w ogrzewaniu klimatu.
- największą niepewnością są smugi kondensacyjne oraz modyfikacja chmur cirrus

transport morski

- wymuszanie radiacyjne jest ujemne
- dodatnie wymuszanie przez CO_2 i ozon nie jest w stanie zbilansować roli siarczanów.
- największa niepewność to wpływ aerozolu na chmury.

Stan wiedzy na temat wpływu transportu na klimat na rok 2010.



Projekt Fizyka kształcenie dla gospodarki opartej na wiedzy współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY

