



# Zmiany czasowe budżetu energetycznego nad Polską w ubiegłych czterech dekadach.

Krzysztof M. Markowicz,

Instytut Geofizyki, Wydział Fizyki,  
Uniwersytet Warszawski

[kmark@igf.fuw.edu.pl](mailto:kmark@igf.fuw.edu.pl)

[www.igf.fuw.edu.pl/~kmark/stacja/](http://www.igf.fuw.edu.pl/~kmark/stacja/)

I. Okrasa, M.T. Chiliński, P. Makuch, K. Nurowska,  
M.A. Posyniak, A. Rozwadowska, P. Sobolewski, O. Zawadzka-Mańko

# Plan wykładu

- Wstęp i motywacja do badań
- Metodologia
- Budżet energetyczny nad Polską
- Zmiany budżetu radiacyjnego nad Polską
- Przyczyny zmian i konsekwencje
- Podsumowanie i wnioski

# Zmiany budżetu radiacyjnego Ziemi – przegląd literatury

Zaburzenie bilansu energii na górnej granicy atmosfery (**Earth Energy Imbalance, EEI**)

$$EEI = RF - \frac{\Delta T}{\lambda}$$

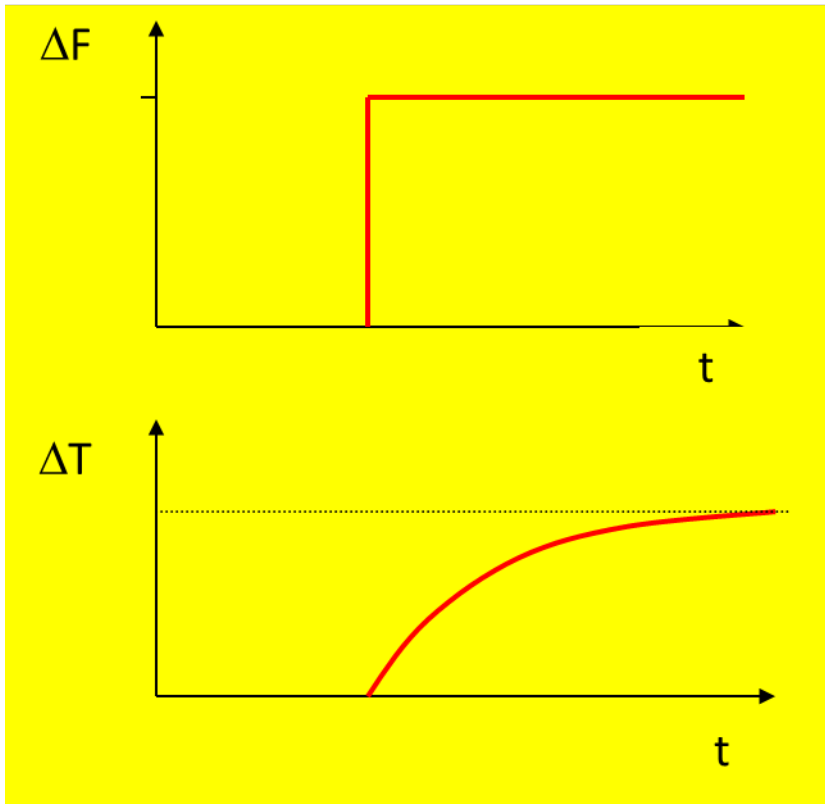
$\lambda$ - współ. wrażliwości klimatycznej, RF- wymuszenie radiacyjne

- Kiehl and Trenberth (1997), EEI=0 (Earth Radiation Budget Experiment, 1985-1989)
- Trenberth et al., 2009, EEI= 0.9 W/m<sup>2</sup> (Clouds and the Earth's Radiant Energy System –CERES, 2000-2004)
- Raghuraman et al., 2021, EEI= 0.38 W/m<sup>2</sup> (CERES i symulacje Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 -CMIP6, 2001-2020)
- Stephens et al. (2022) przedstawił pozytywny trend EEI w oparciu o pomiary CERES i modele klimatu

# Zmiany budżetu radiacyjnego Ziemi – przegląd literatury

- Loeb et al. (2021),  $EEI=0.50 \pm 0.47 \text{ W/m}^2/10\text{yr}$  (2005-2019 w oparciu o pomiar satelitarne i pomiary in-situ), ok. 90% tej nadwyżki energii jest gromadzona w oceanach (von Schuckmann et al., 2022),
- Johnson et al. (2016)  $EEI=0.71 \pm 0.10 \text{ W/m}^2$  z czego  $0.61 \pm 0.09 \text{ W/m}^2$  przypada na ogrzewanie oceanu 0-1800 m,  $0.07 \pm 0.04 \text{ W/m}^2$  na ogrzewanie głębin oceanicznych, zaś  $0.03 \pm 0.01 \text{ W/m}^2$  na topnienie lodowców.
- Marti et al. (2022)  $EEI=0.74 \text{ W/m}^2$  (topografia oceanu i pole grawitacyjne, 2002-2016).
- Dübal and Vahrenholt, (2020)  $EEI=0.8 \text{ W/m}^2$  (CERES, 2001-2020)
- Goode et al. (2021)  $EEI= 0.5 \text{ W/m}^2$  (w oparciu o pomiary albedo 1998-2017)

# Odpowiedz systemu na zaburzenie

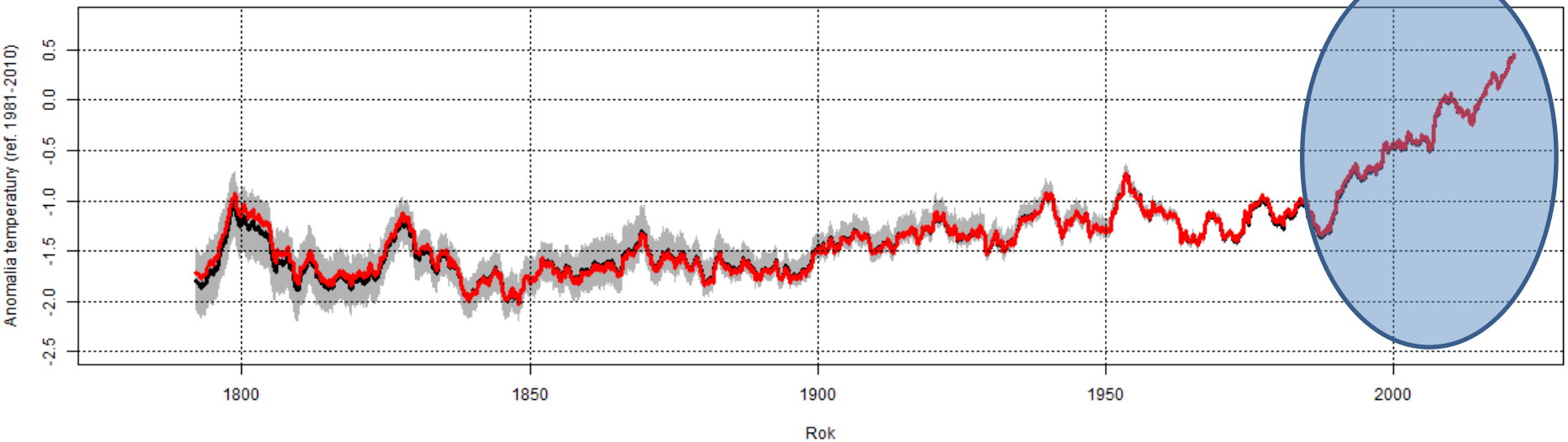


W przypadku nagłego zaburzenia w systemie klimatycznym odpowiedz systemu dana jest wzorem

$$\begin{aligned}\Delta T_m(t) &= \frac{\Delta F}{C_m} e^{-t/\lambda C_m} \int_0^t e^{t'/\lambda C_m} dt' \\ &= \lambda \Delta F e^{-t/\lambda C_m} [e^{t'/\lambda C_m}]_0^t \\ &= \lambda \Delta F [1 - e^{-t/\lambda C_m}]\end{aligned}$$

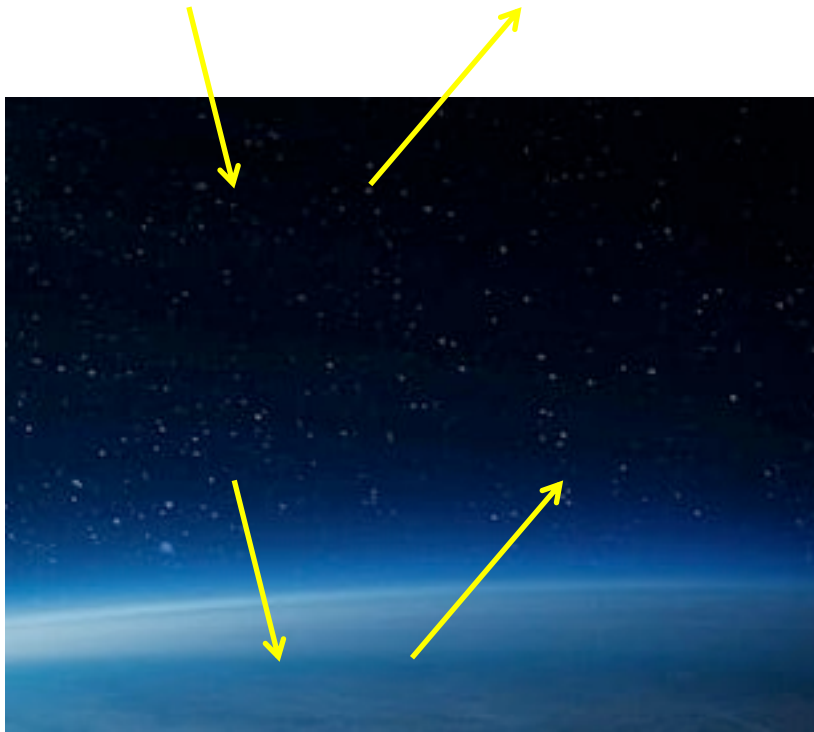
# Zmiany klimatu w Polsce

11. letnia średnia ruchoma anomalia temperatury z 100 rekonstrukcji wykonanych za pomocą CLIMATOL 3.1.2  
cieniowany zakres: 5-95 pct



<https://meteomodel.pl/klimat/poltemp/1.0H8/plot.png>

# Budżet radiacyjny



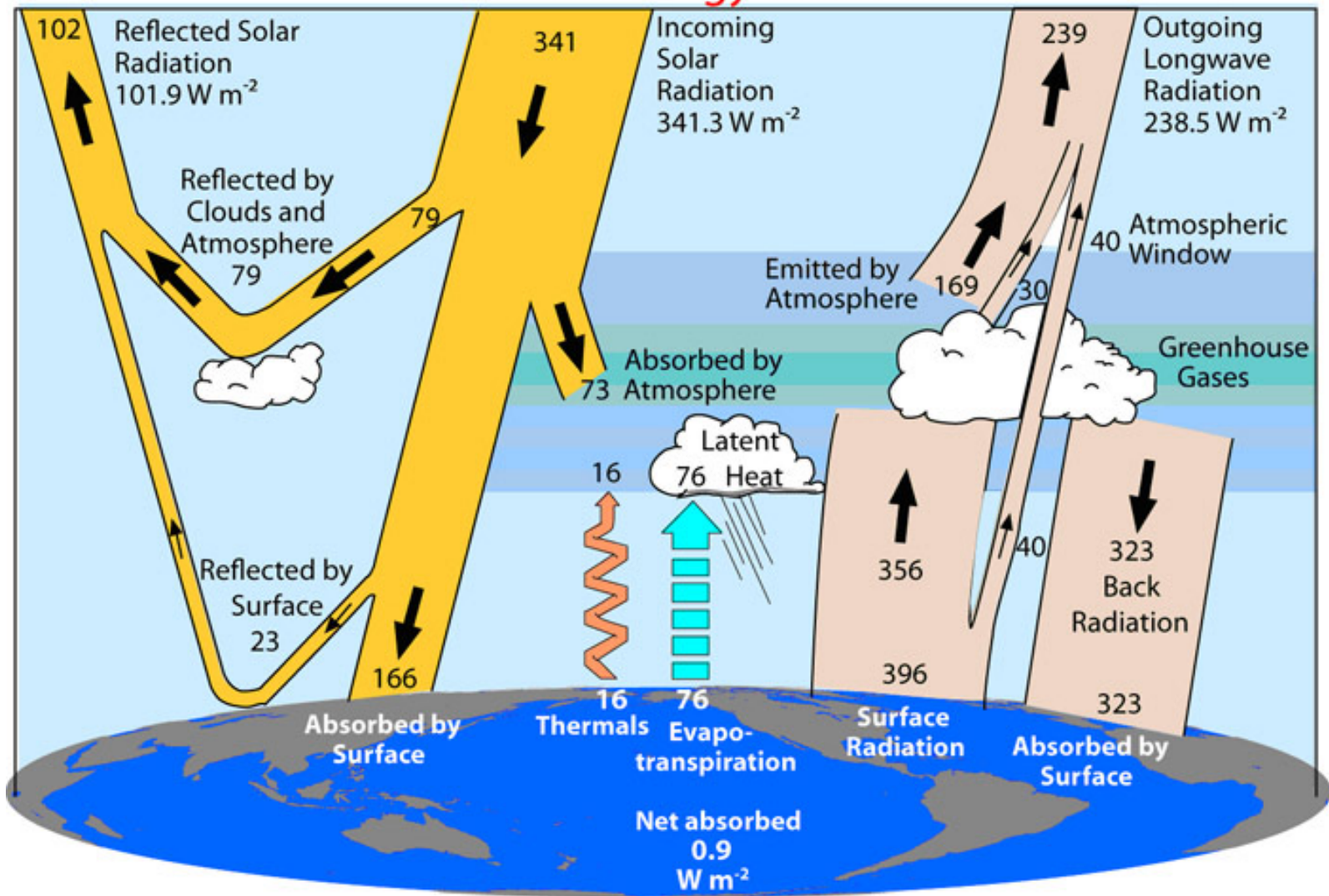
$$\text{TOA} = F_t^{\downarrow} - F_t^{\uparrow}$$

$$\text{ATM} = \text{TOA} - \text{SURF}$$

$$F = \text{SW} + \text{LW}$$

$$\text{SURF} = F_s^{\downarrow} - F_s^{\uparrow}$$

# Global Energy Flows $W m^{-2}$

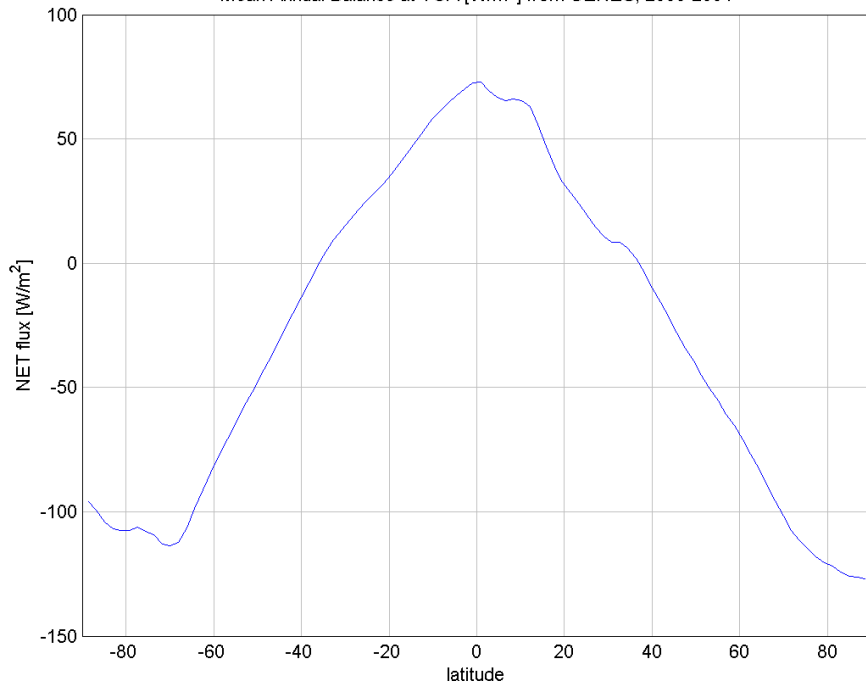


*Bilans promieniowania słonecznego oraz ziemskiego atmosfery (Trenberth, K.E., J.T. Fasullo, and J. Kiehl, 2009).*

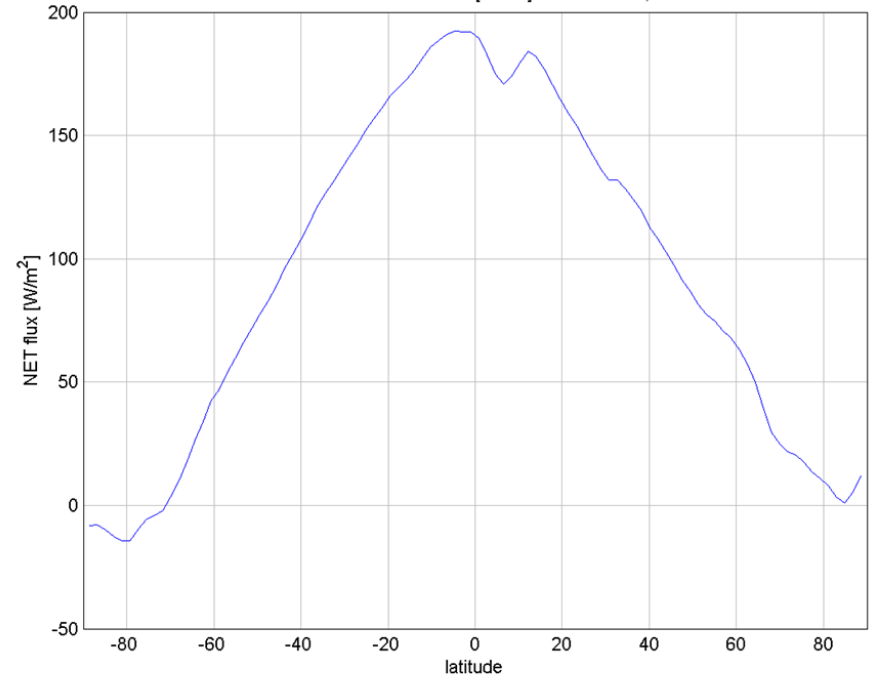


# Zróźnicowanie budżetu radiacyjnego w zależności od szerokości geograficznej

Mean Annual Balance at TOA [ $W/m^2$ ] from CERES, 2000-2004



Mean Annual Balance at Surface [ $W/m^2$ ] from CERES, 2000-2004



# Metody: MERRA-2

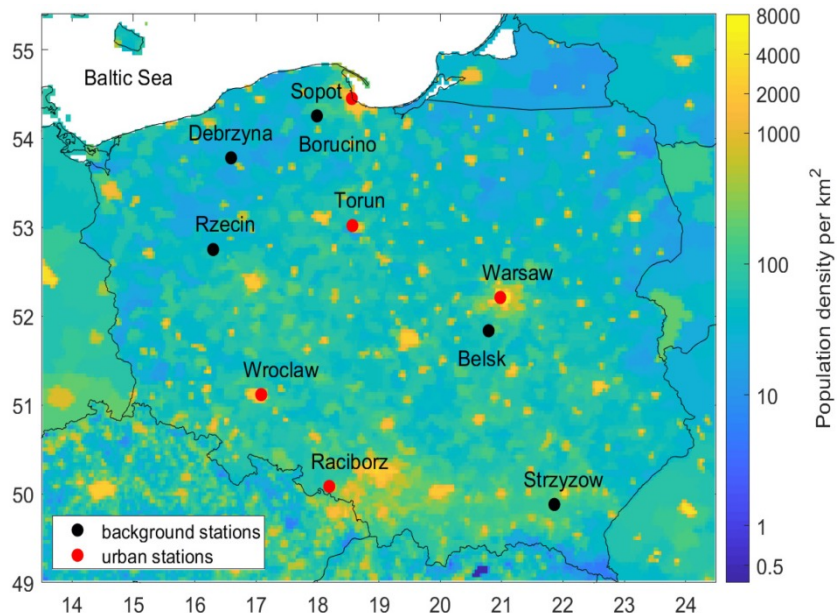
- Re-analiza od 1980 r.
- Rozdzielczość:  $0.5^\circ \times 0.625^\circ$  , 72 hybrid levels do 0.01 hPa
- Moduł asymilacyjny 3DVAR – asymilacja radiancji :
- Moduł aerozolowy- model GOCART (SU, SS, DU, BC, OC), asymilacja AOD na podstawie:
  - reflektancji z AVHRR [1979–2002, tylko nad oceanem],
  - reflektancji z MODIS *Terra* (od 2000), *Aqua* (od 2002)
  - AOD z MISR [od 2000 i tylko dla obszarów pustynnych]
  - AOD z pomiarów AERONET [od 1999].

# Fu-Liou off-line model

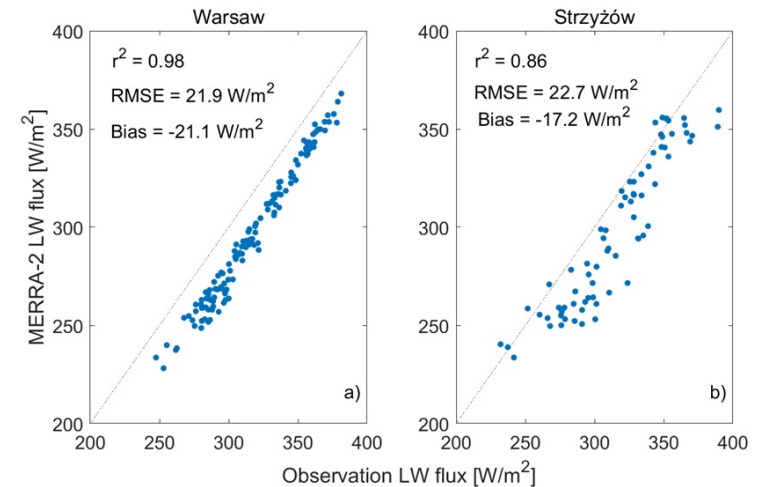
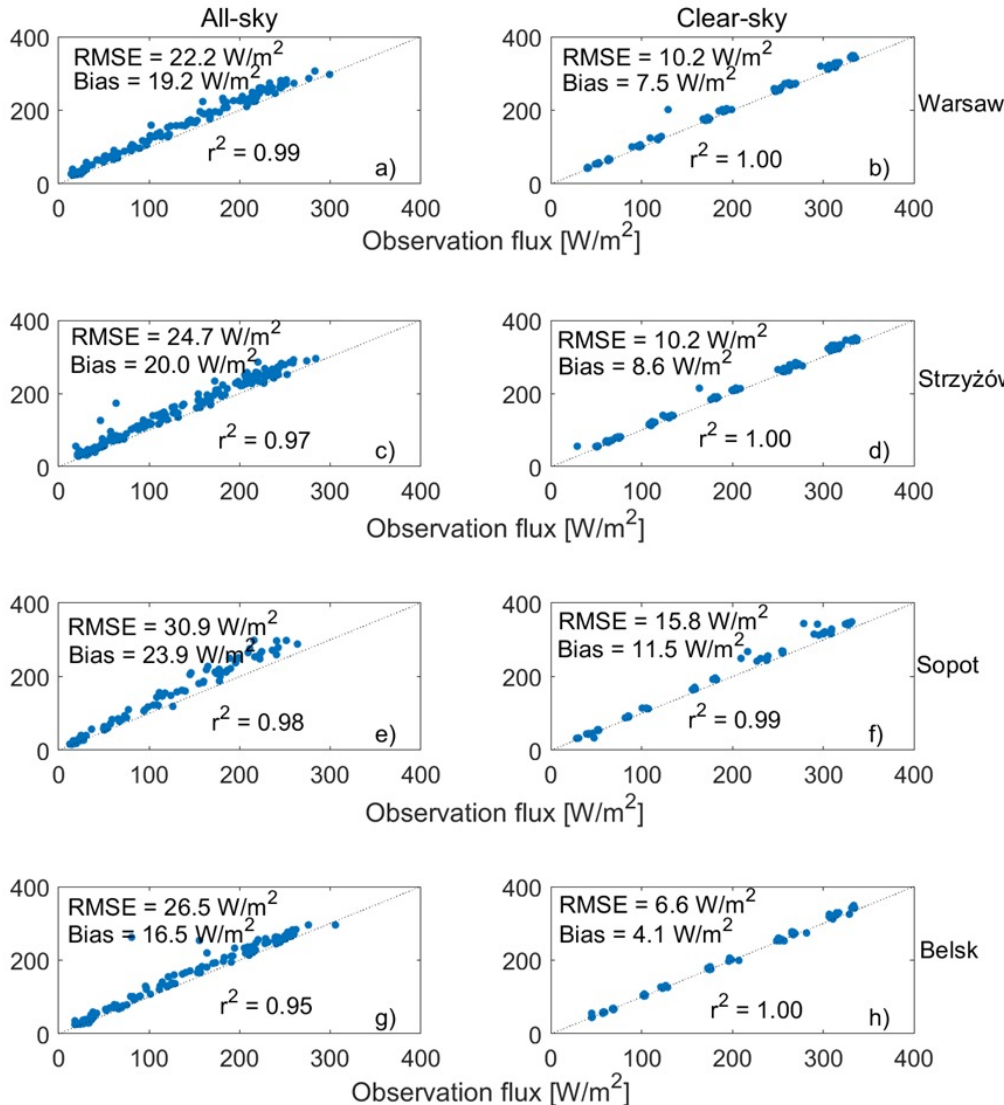
- Model transferu radiacji Fu-Liou
- Aerozole (MERRA-2)
- Chmury (AVHRR sensor – CLARAA2, COMET; Bojanowski et al., 2018)
- Powierzchnia ziemi (AVHRR, CLARA-2)
- Obliczenia wykonane w latach 1982-2015, na siatce 0.25x0.25 stopnia, średnie miesięczne.

# Pomiary radiacji i AOD w ramach sieci Poland-AOD

- Strumień promieniowania krótko i długofalowego (pyranometry i pyrgeometry)
- AOD i inne parametry optyczne (fotometry słoneczne)

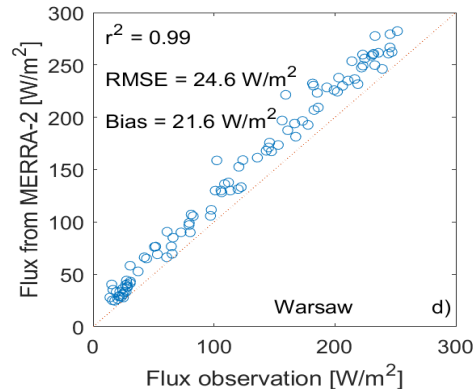
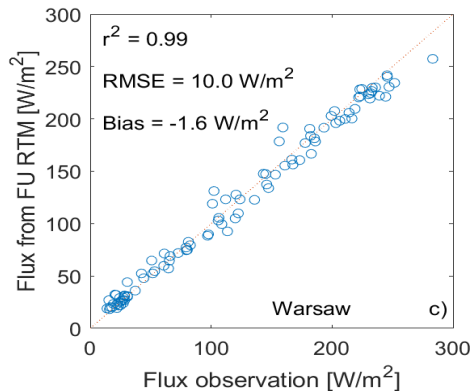
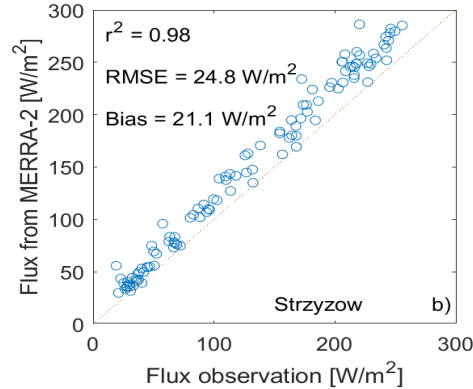
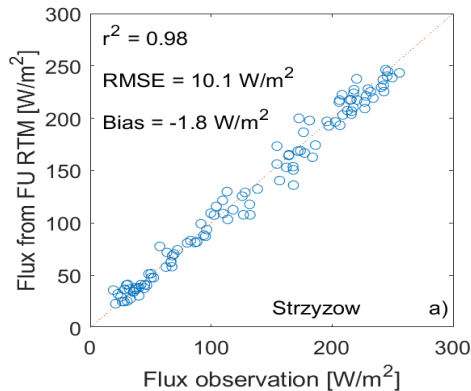


# Walidacja strumieni radiacyjnych MERRA-2



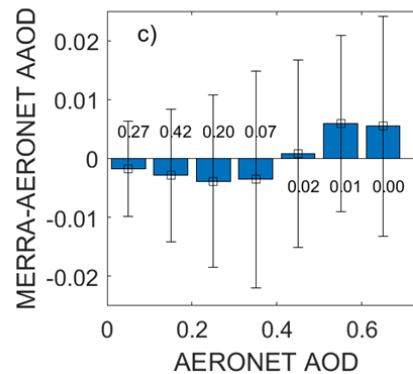
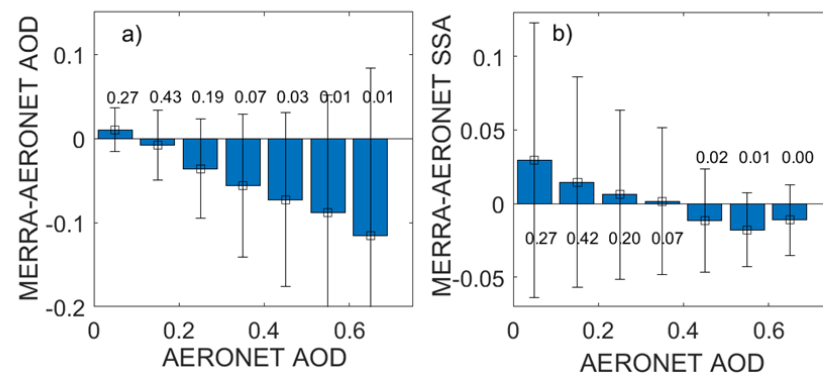
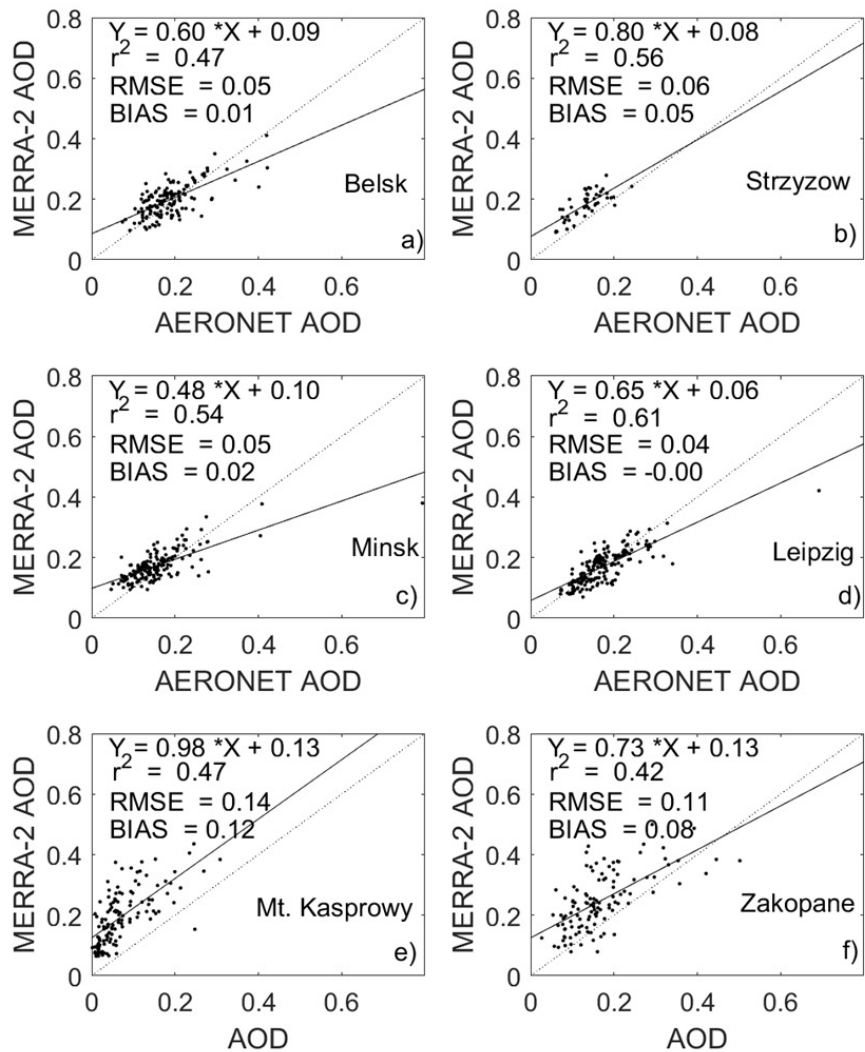
- Strumienie SW są przeszacowane, zaś LW niedoszacowane w MERRA-2. Natomiast całkowity strumień (SW+LW) jest w przybliżeniu ( $\pm 2\text{W/m}^2$ ) zgodny z obserwacjami.
- Atmosfera w MERRA-2 jest zbyt transparentna

# Walidacja MERRA-2 i modelu Fu-Liou

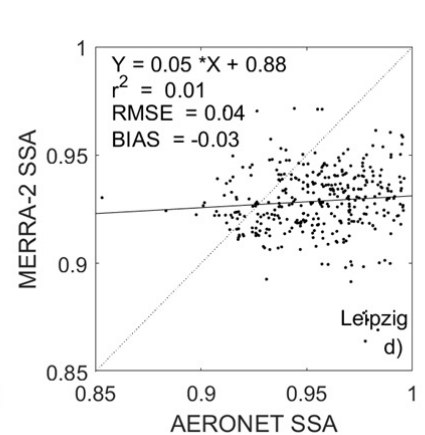
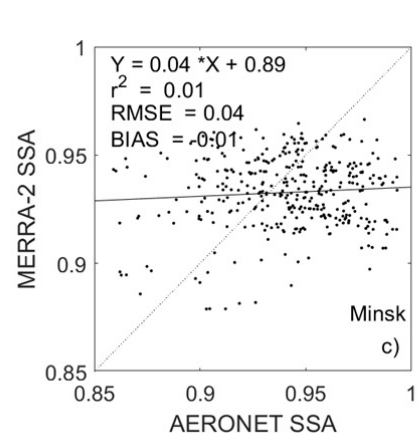
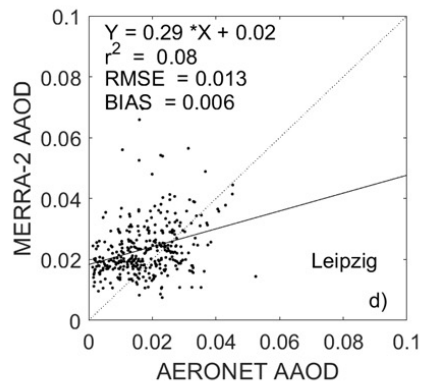
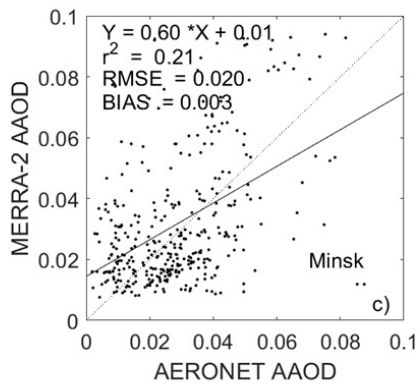
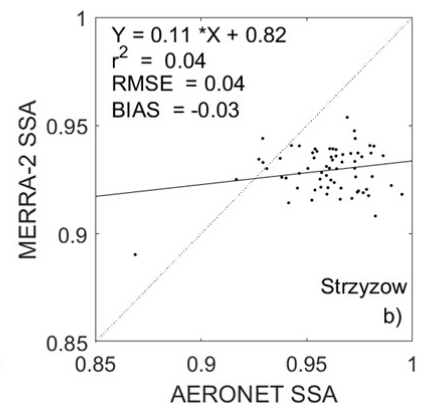
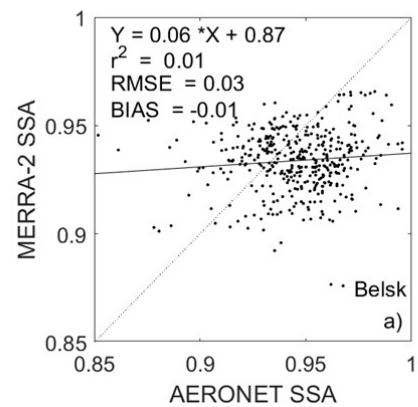
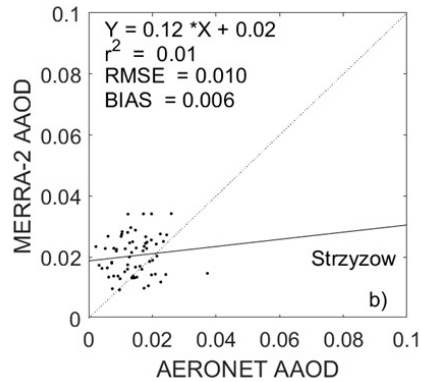
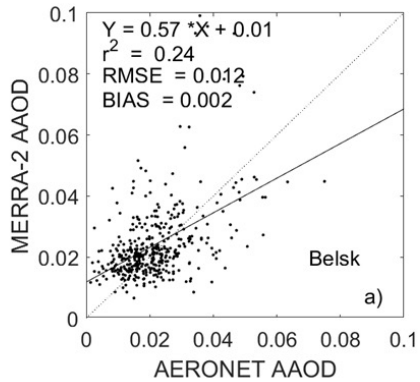


- Wyniki z model Fu-Liou mają praktycznie zerowy bias i ok. 2 razy mniejszy błąd średniokwadratowy

# Walidacja aerozolu w MERRA-2



# Walidacja aerozolu c.d.

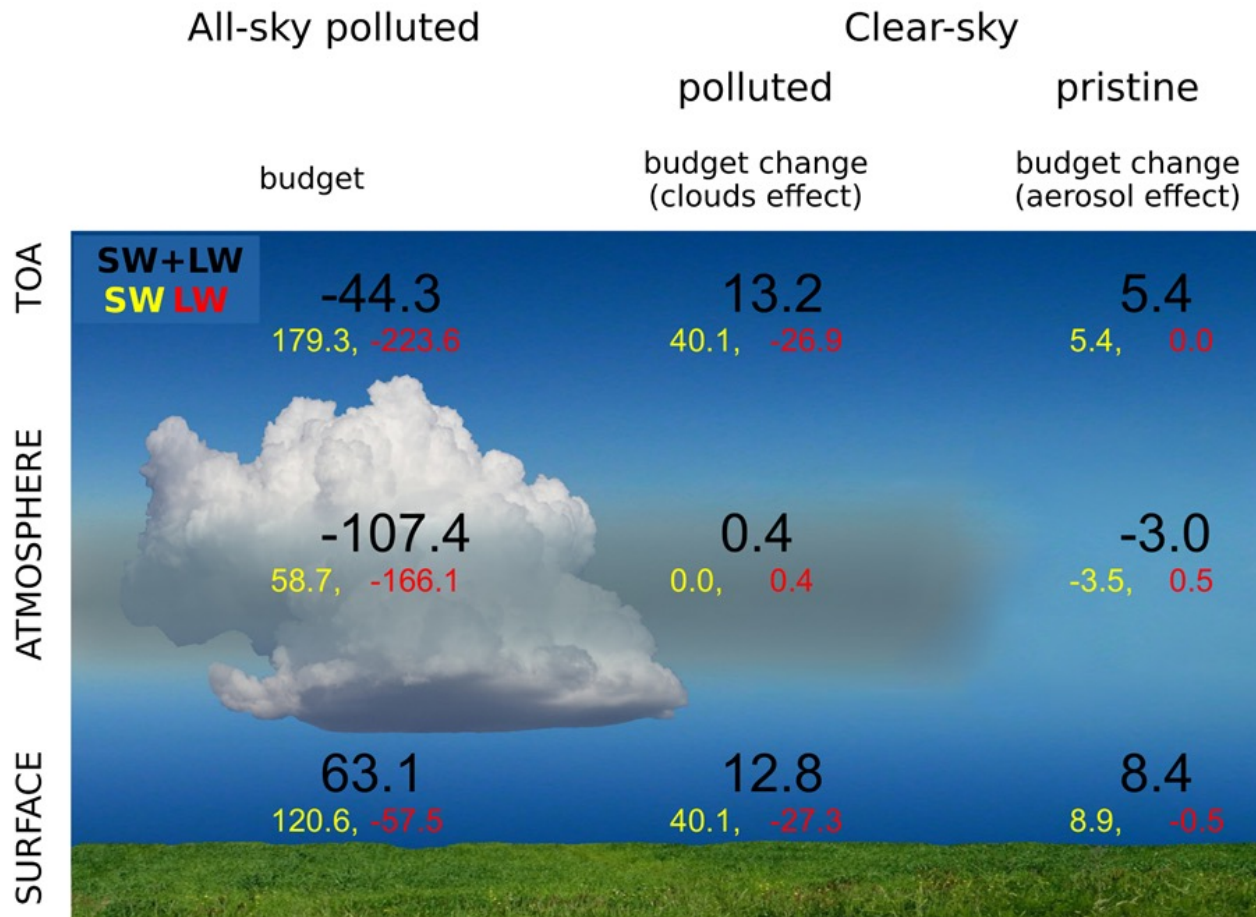


Absorpcyjna grubość optyczna aerozolu

Albedo pojedynczego rozpraszania



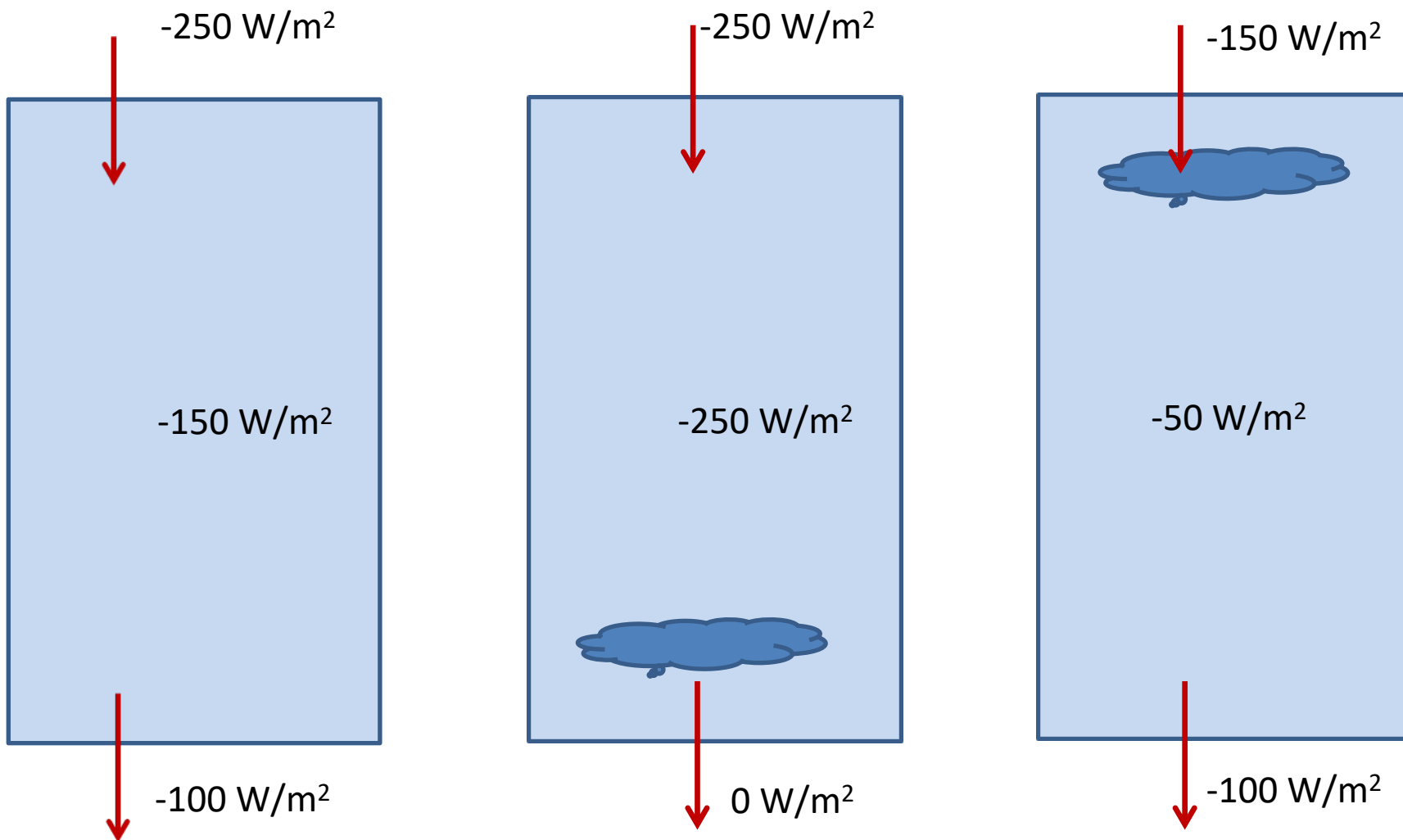
# Budżet radiacyjny dla Polski (średnia 1980-2021)



SW – promieniowanie krótkofalowe  
 LW – promieniowanie długofalowe  
 SW+LW promieniowanie całkowite

Średni strumień ciepła odczuwalnego:  
 16.2 W/m<sup>2</sup> utajonego: 45.9 W/m<sup>2</sup>

# Wpływ chmur budżet energii radiacyjnej w atmosferze

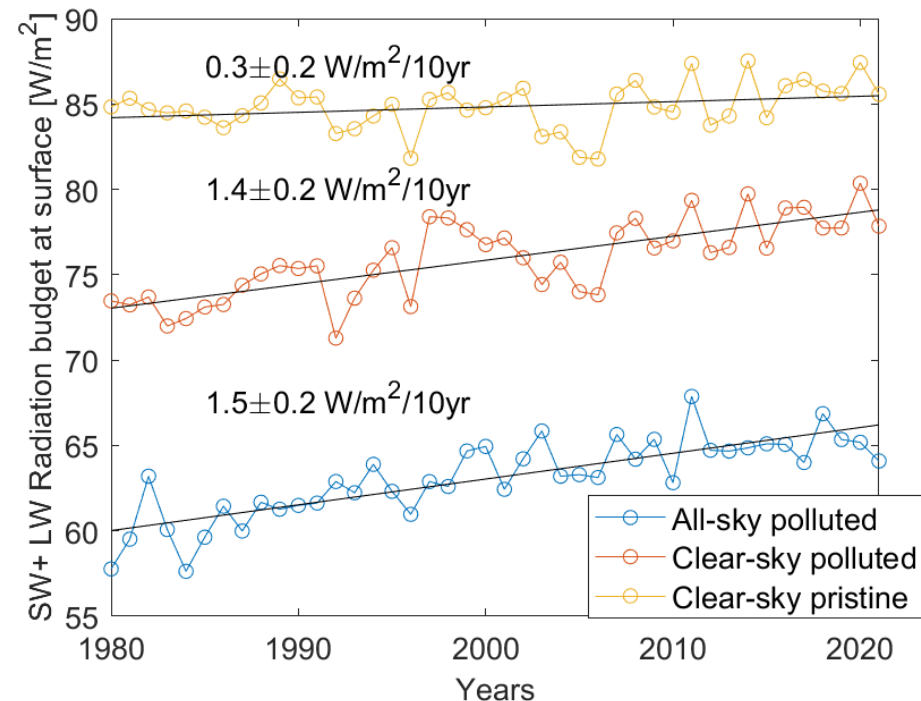
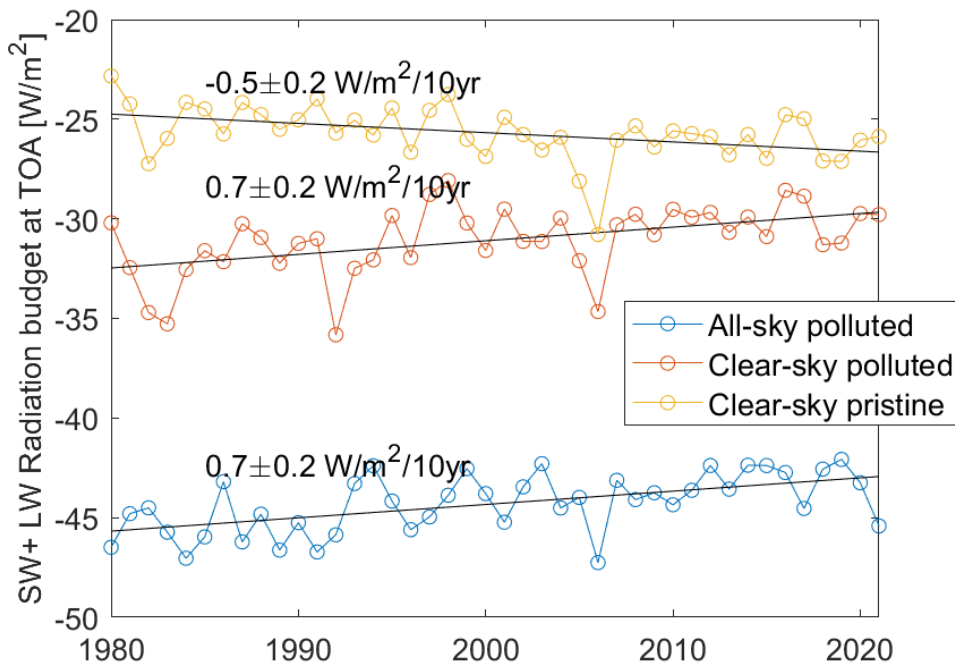


# Średnie wartości budżetu radiacyjnego w różnych porach roku

Altitude	Conditions	SW plus LW radiation budget [W/m <sup>2</sup> ]				
		Winter	Spring	Summer	Autumn	Annual
TOA	All-sky Polluted	-149.0	6.4	63.9	-98.3	-44.3
	Clear-sky Polluted	-153.2	33.3	90.5	-95.0	-31.1
	Clear-sky Pristine	-151.0	40.5	98.2	-90.5	-25.7
SURF	All-sky Polluted	-8.8	93.6	140.2	27.3	63.1
	Clear-sky Polluted	-30.8	122.7	182.3	29.3	75.9
	Clear-sky Pristine	-27.2	134.8	195.5	36.3	84.3
ATM	All-sky Polluted	-140.3	-87.2	-76.4	-125.7	-107.4
	Clear-sky Polluted	-122.4	-89.4	-91.8	-124.3	-107.0
	Clear-sky Pristine	-123.8	-94.2	-97.3	-126.7	-110.0

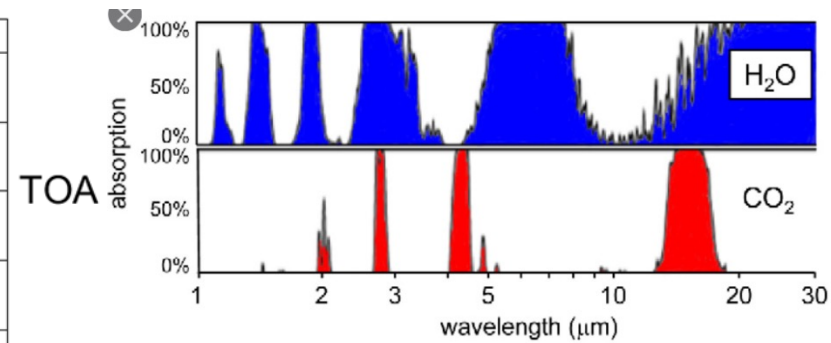
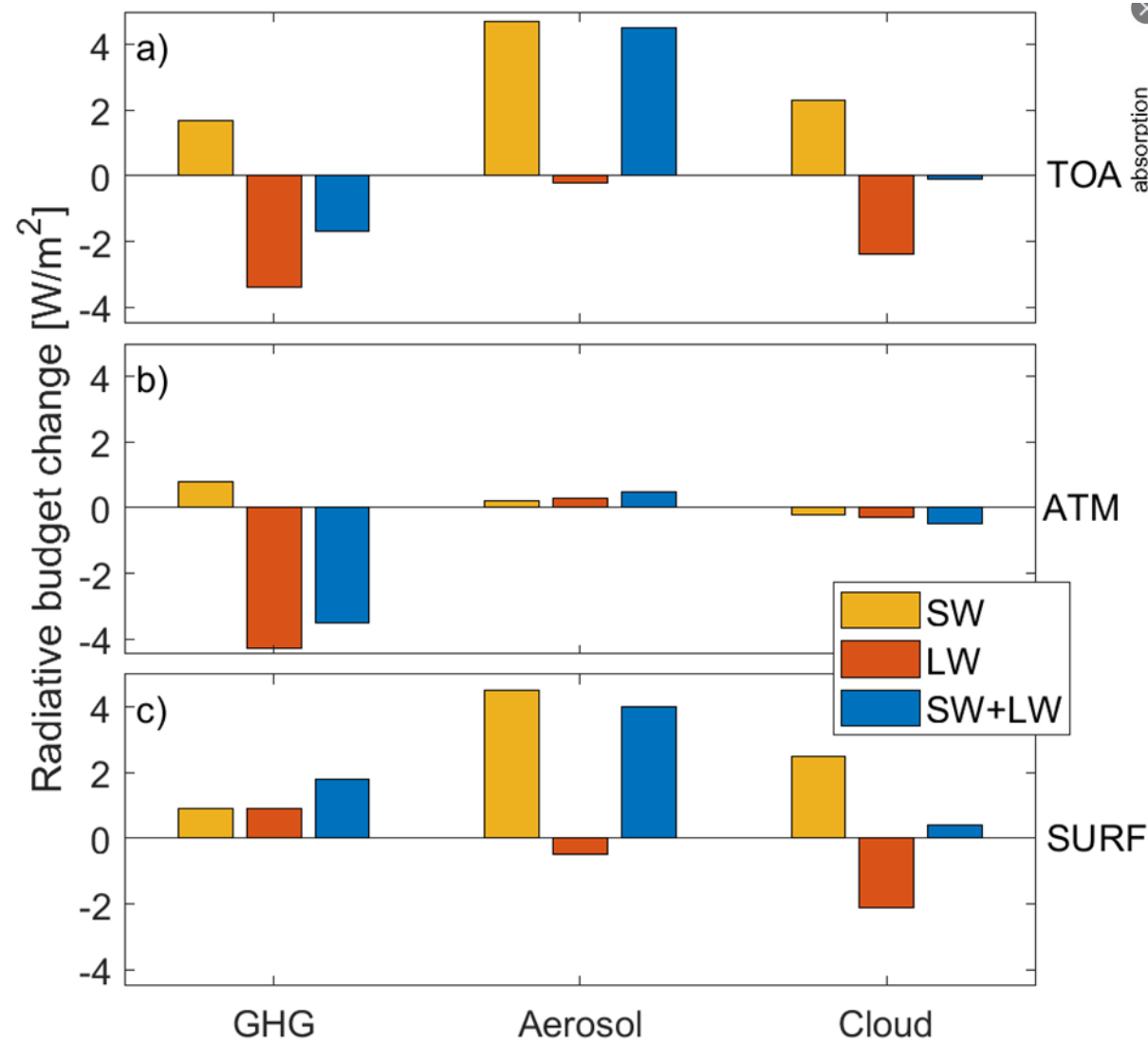
# Zmiany czasowe budżetu radiacyjnego

Dodatnie trendy w przypadku warunków rzeczywistych oraz bezchmurnych z aerozolem, ujemny trend dla warunków bez aerozolu i bez chmur



Dodatnie trendy we wszystkich przypadkach. Niezależnie od warunków stale rośnie strumień promieniowania docierający do powierzchni ziemi.

# Zmiany składowych budżetu radiacyjnego pomiędzy 2021 a 1980 r.



# Zmiany składowych budżetu radiacyjnego pomiędzy 2021 a 1980 r.

Spectral range	Category	Change of radiation budget between 1980 and 2021 in [W/m <sup>2</sup> ]		
		TOA	Surface	Atmosphere
SW	All-sky polluted	8.7 (4.8)	7.9 (6.5)	0.8 (1.3)
	Clear-sky polluted	6.4 (2.9)	5.3 (3.3)	1.0 (1.7)
	Clear-sky pristine	1.7 (0.7)	0.9 (0.5)	0.8 (1.3)
LW	All-sky polluted	-5.9 (-2.6)	-1.7 (-2.9)	-4.2 (-2.6)
	Clear-sky polluted	-3.6 (-1.3)	0.4 (0.5)	-4.0 (-2.4)
	Clear-sky pristine	-3.4 (-1.4)	0.9 (1.1)	-4.3 (-2.6)
SW+LW	All-sky polluted	2.7 (6.2)	6.2 (9.8)	-3.4 (-3.2)
	Clear-sky polluted	2.8 (9.0)	5.8 (7.6)	-3.0 (-2.8)
	Clear-sky pristine	-1.7 (-7.4)	1.8 (1.5)	-3.5 (-2.9)

# Zmiany czasowe wybranych parametrów optycznych atmosferycznych

Parameters	Category	Trends per decades				
		Winter	Spring	Summer	Autumn	Annual
AOD	Total	-0.04 (-22)	-0.06 (-22)	-0.06 (-21)	-0.04 (-19)	-0.05 (-21)
AOD	Sulfates	-0.04 (-31)	-0.06 (-32)	-0.06 (-33)	-0.04 (-28)	-0.05 (-31)
AOD	Dust	1.5 <sup>1</sup> (11.8)	1.1 <sup>1</sup> (2.7)	2.1 <sup>1</sup> (9.2)	0.7 <sup>1</sup> (4.1)	1.3 <sup>1</sup> (5.6)
AOD	OC	-1.7 <sup>1</sup> (-10.2)	-1.3 <sup>1</sup> (-4.9)	3.5 <sup>1</sup> (10.9)	1.5 <sup>1</sup> (7.6)	0.5 <sup>1</sup> (2.0)
AOD	BC	-0.8 <sup>1</sup> (-9.5)	-0.5 <sup>1</sup> (-4.5)	0.1 <sup>1</sup> (0.8)	-2.5 <sup>1</sup> (-2.5)	-0.4 <sup>1</sup> (3.5)
AOD	Sea Salt	-1.0 <sup>1</sup> (-6.5)	0.2 <sup>1</sup> (2.2)	0.5 <sup>1</sup> (6.8)	-0.4 <sup>1</sup> (-3.9)	-0.2 <sup>1</sup> (-1.7)
AE	Total	-0.07 (-7.1)	-0.07 (-7.2)	-0.05 (-5.0)	-0.05 (-4.9)	-0.06 (-6.0)
SSA	Total	-6.4 <sup>1</sup> (0.7)	-8.2 <sup>1</sup> (-0.0)	-9.6 <sup>1</sup> (-1.0)	-7.5 <sup>1</sup> (-0.8)	-7.9 <sup>1</sup> (-0.8)
AAOD	Total	-0.48 <sup>1</sup> (-6.6)	-0.32 <sup>1</sup> (-2.9)	0.27 <sup>1</sup> (2.4)	-0.11 <sup>1</sup> (-1.3)	-0.16 <sup>1</sup> (-1.7)
COD	Total	0.4 (1.7)	0.1 (0.2)	-0.8 (-1.8)	-0.9 (-3.3)	-0.3 (-1.0)
COD	High	0.004 (1.0)	0.005 (0.7)	0.36 (15.5)	0.001 (0.1)	0.09 (8.6)
COD	Middle	0.06 (2.2)	0.3 (4.6)	0.9 (6.6)	0.06 (1.4)	0.3 (4.8)
COD	Low	0.3 (1.6)	-0.3 (-1.2)	-1.9 (-8.2)	-0.9 (-4.3)	-0.7 (-3.2)
Cloud cover	Total	0.3 (0.4)	-2.1 (-3.5)	-2.1 (-4.1)	-0.4 (-0.7)	-1.1 (-1.8)
Cloud cover	High	0.3 (0.8)	-1.9 (-5.2)	-1.5 (-4.3)	-0.1 (-0.3)	-0.8 (-2.2)
Cloud cover	Middle	0.07 (0.3)	-1.2 (-4.6)	-0.9 (-5.9)	-0.5 (-2.2)	-0.6 (-2.7)
Cloud cover	Low	0.1 (0.3)	-0.9 (-3.4)	-0.8 (-5.6)	-0.2 (-0.8)	-0.5 (-1.6)

<sup>1</sup>=10<sup>-3</sup>

# Zmiany czasowe wybranych parametrów atmosferycznych

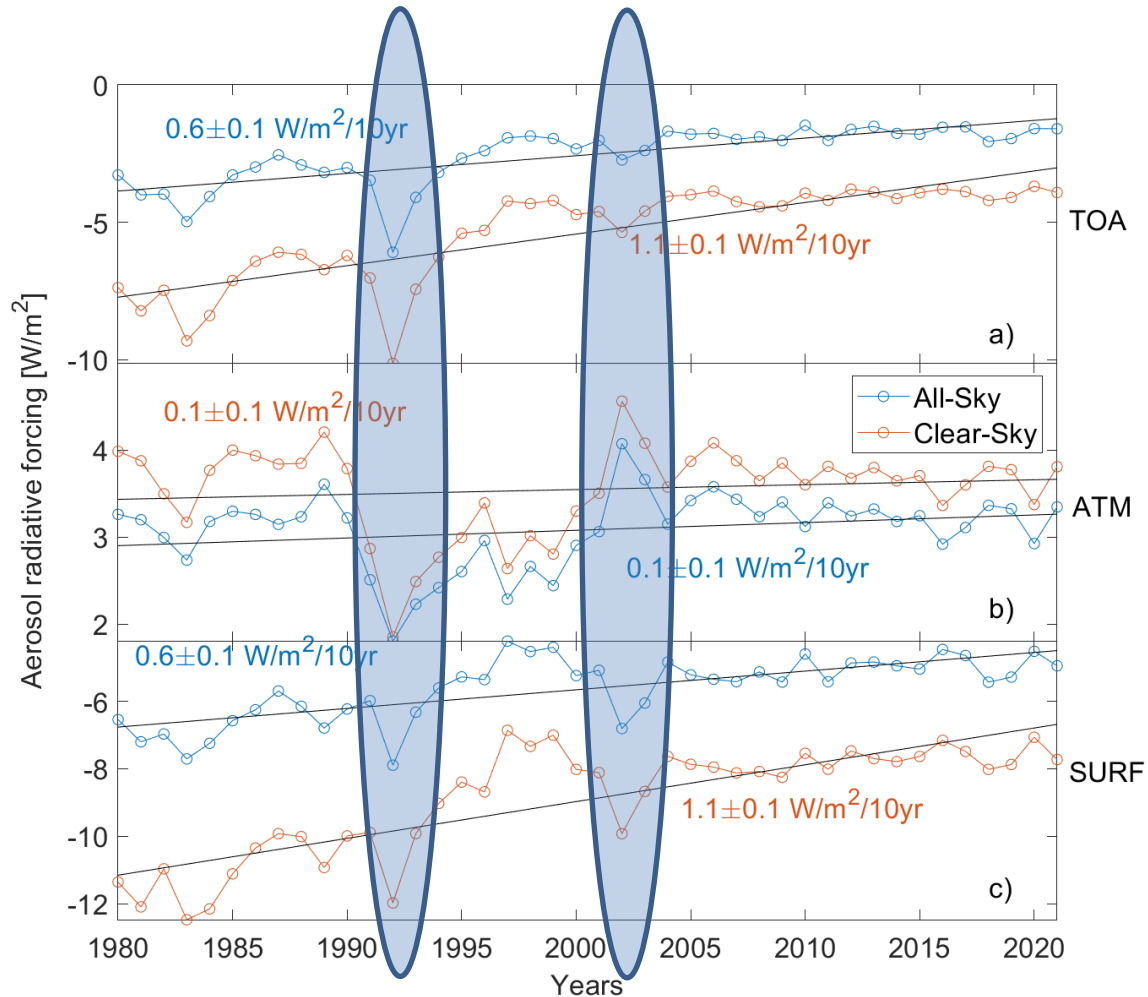
Parameters	Category	Trends per decades				
		Winter	Spring	Summer	Autumn	Annual
Surface albedo	total	-0.01 (-4.1)	-0.003 (-1.4)	0.001 (0.3)	-0.001 (-0.9)	-0.004 (-1.9)
PW [g/cm <sup>2</sup> ]	total	0.1 (1.4)	1.6 (10.7)	0.3 (1.0)	-1.1 (-6.9)	0.2 (1.3)
O <sub>3</sub> [DU]	total	-2.4 (-0.7)	-4.8 (-1.3)	-4.4 (-1.3)	-1.9 (-0.7)	-3.4 (-1.0)
CO <sub>2</sub> [ppm]	surface	18.9 (4.9)	18.8 (4.9)	18.0 (4.9)	18.7 (5.0)	18.6 (4.9)
CH <sub>4</sub> [ppb]	surface	55.1 (2.9)	56.4 (3.0)	58.9 (3.2)	56.4 (3.0)	56.7 (3.0)
Temperature [°C]	2 m	0.49±0.24	0.36±0.14	0.65±0.09	0.44±0.11	0.48±0.09
SHF [W/m <sup>2</sup> ]	surface	-2.5 (-41.6)	4.5 (18.7)	1.7 (4.4)	-2.6 (-38.0)	1.5 (9.2)
LHF [W/m <sup>2</sup> ]	surface	2.3 (20.1)	10.0 (16.4)	-3.9 (-4.6)	-5.8 (-22.2)	0.8 (1.7)
HYSPLIT lon	500 m	-0.04 (-0.2)	-0.36 (-1.9)	0.16 (0.9)	0.42 (2.5)	0.05 (0.3)
HYSPLIT lat	500 m	-0.08 (-0.2)	0.22 (0.4)	-0.12 (-0.3)	-0.12 (-0.3)	-0.02 (0.0)



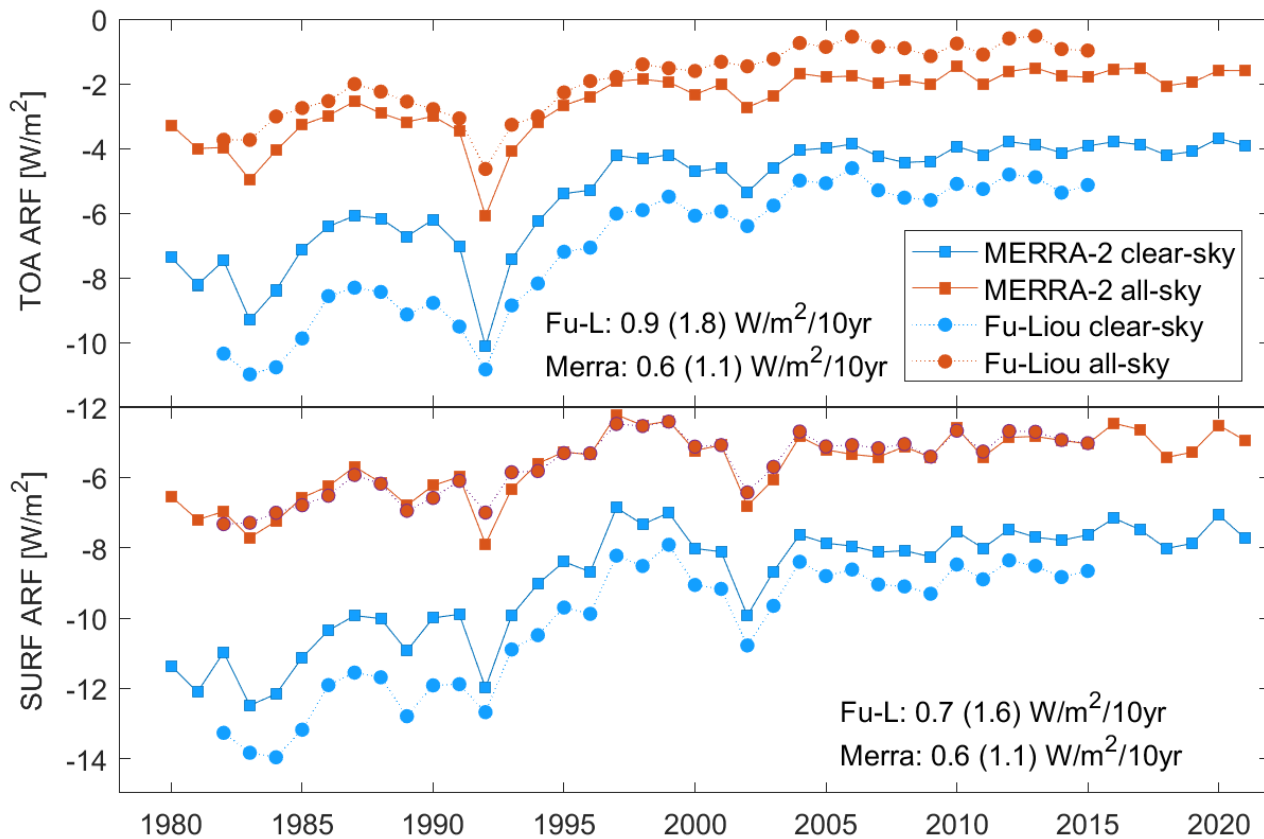
# Porównanie trendów czasowych MERRA-2 i Fu-Liou

Parameter	Sky condition	SW		LW		Total	
		MERRA	Fu-Liou	MERRA	Fu-Liou	MERRA	Fu-Liou
SURF ↓	All-sky	2.0	2.7	1.9	0.9		
	Clear-sky	1.1	2.0		1.8		
	Molecular	0.2	-0.1		1.8		
SURF ↑	All-sky		-0.1	2.3	2.0		
	Clear-sky		-0.5	2.3	2.0		
	Molecular		-1.0	2.3	2.0		
SURF ↓-↑	All-sky	1.9	2.8	-0.4	-1.1	1.5	1.6
	Clear-sky	1.3	2.5	0.1	-0.2	1.4	2.3
	Molecular	0.2	0.9	0.2	-0.2	0.4	0.7
TOA ↓-↑	All-sky	2.1	2.7	-1.4	-0.5	0.7	2.1
	Clear-sky	1.6	2.7	-0.9	-0.9	0.7	1.8
	Molecular	0.4	0.9	-0.8	-1.0	-0.5	-0.1
ATM ↓-↑	All-sky	0.2	-0.1		0.6	-0.8	0.5
	Clear-sky	0.2	0.2		-0.7	-0.7	-0.5
	Molecular		0.0		-0.7	-0.9	-0.7

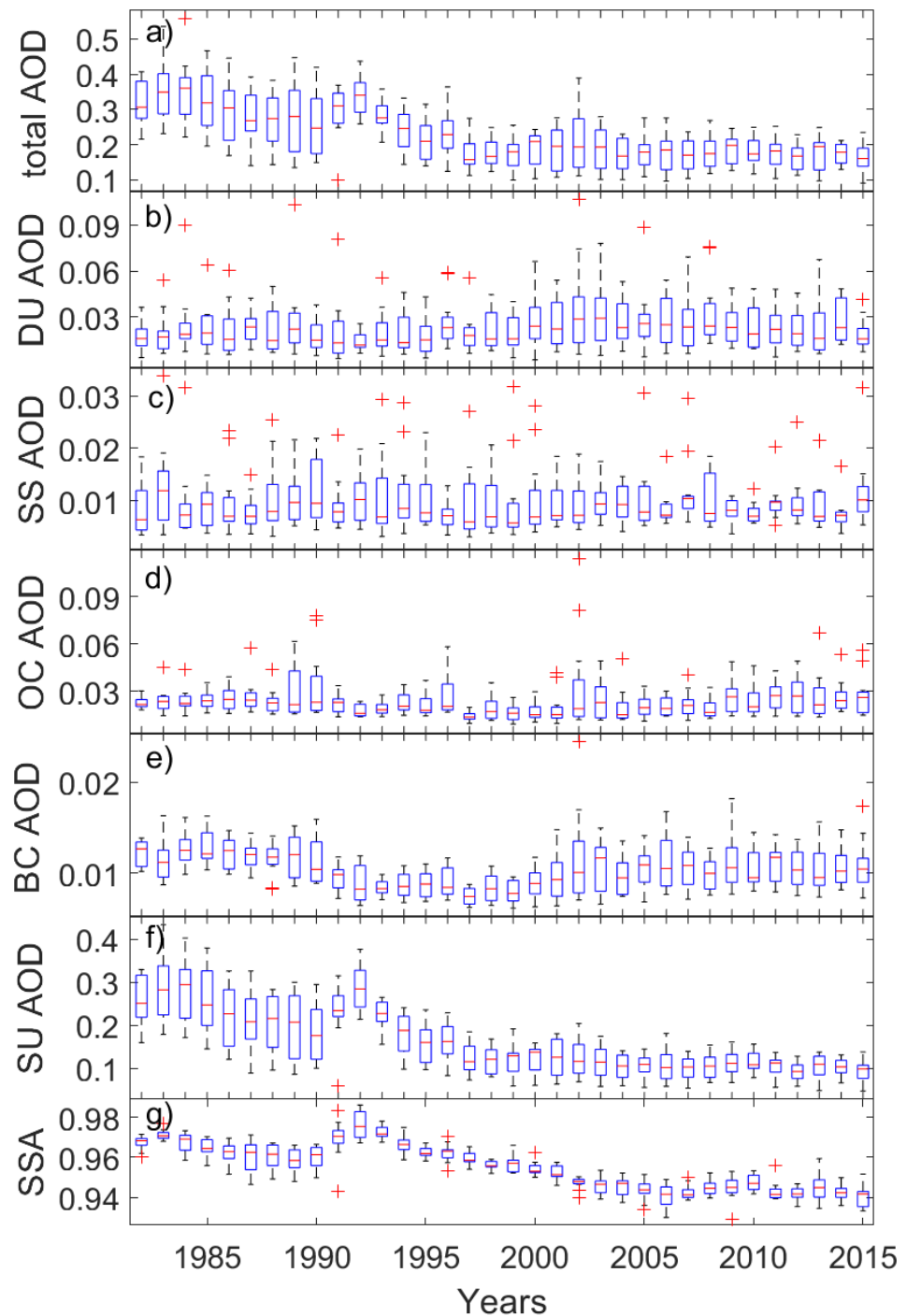
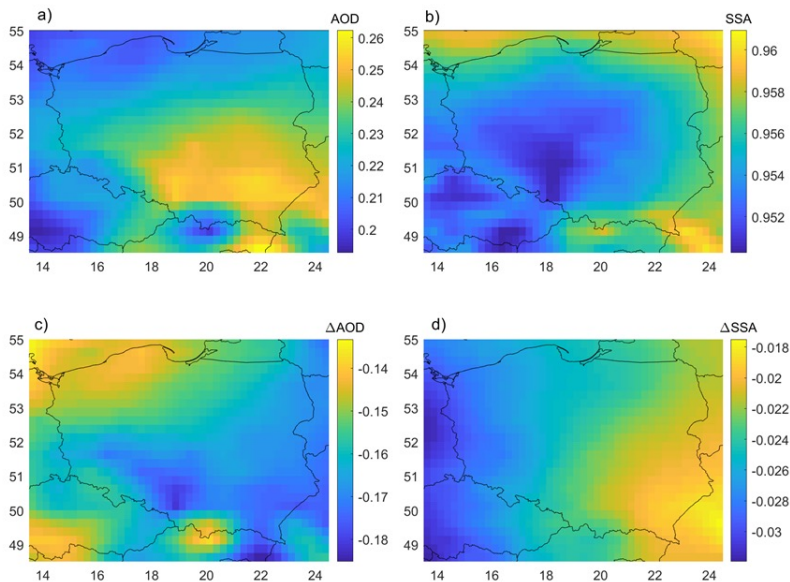
# Wpływ aerozolu



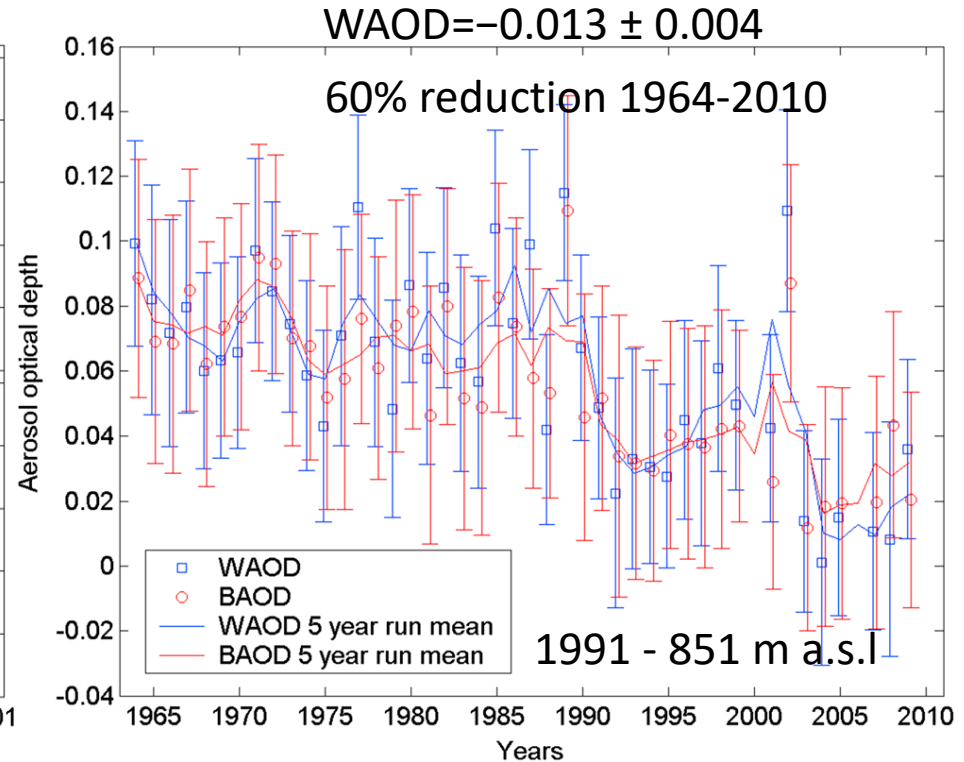
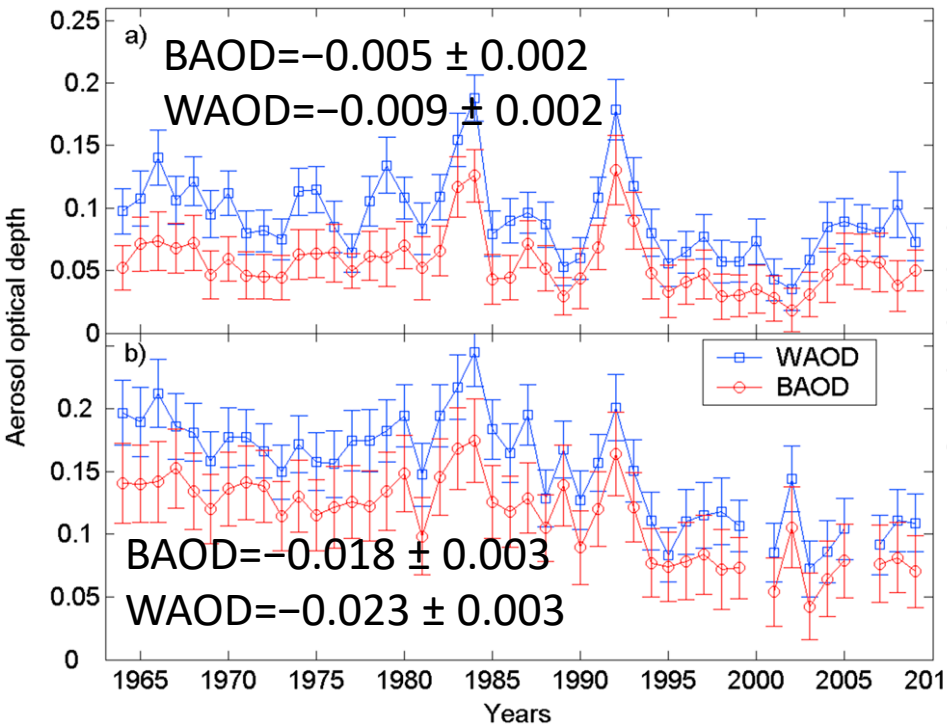
# Porównanie MERRA-2 i Fu-Liou



# Zmiany czasowe parametrów optycznych aerozolu

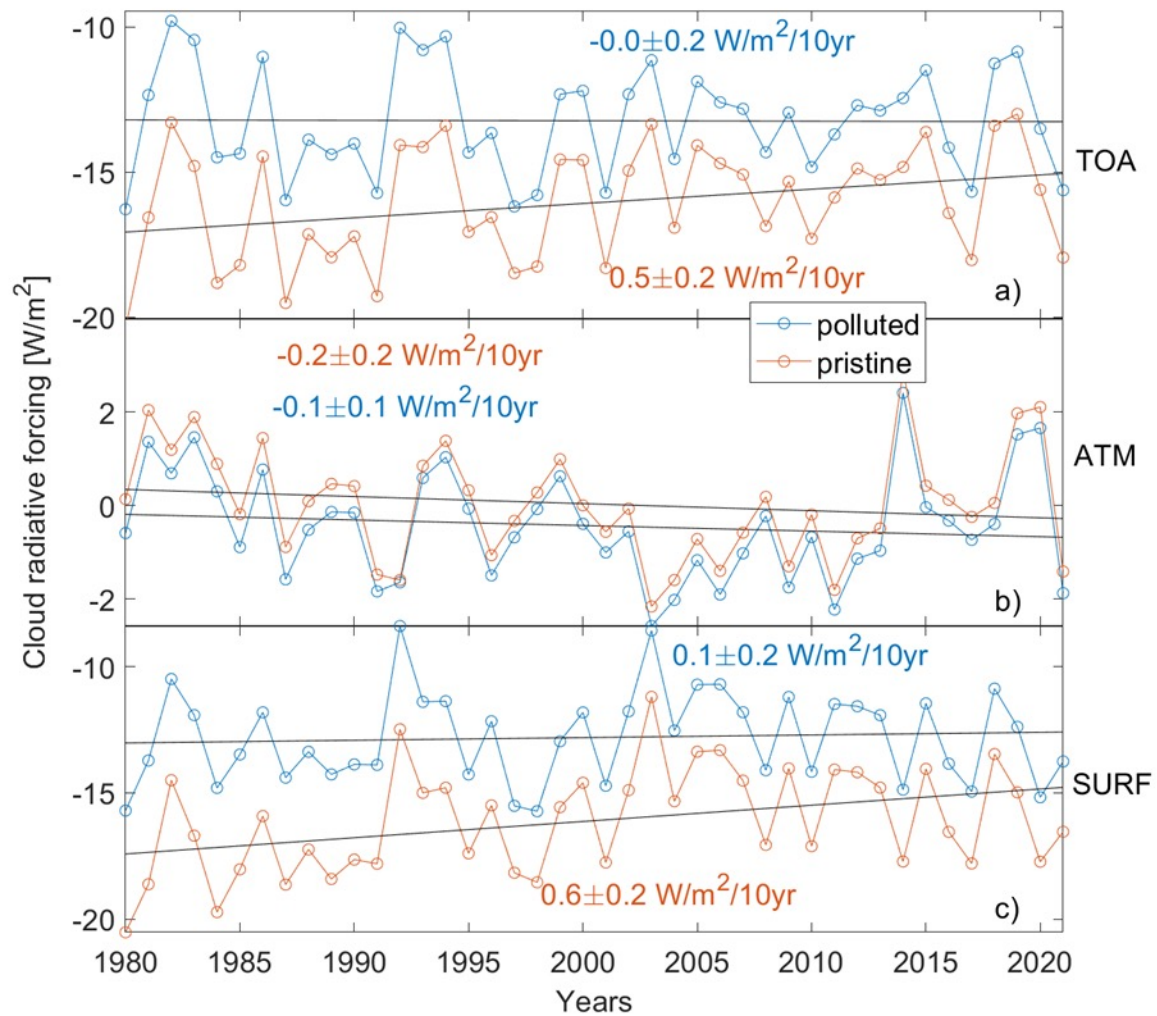


# Zmiany AOD ma Kasprowym i w Zakopanem

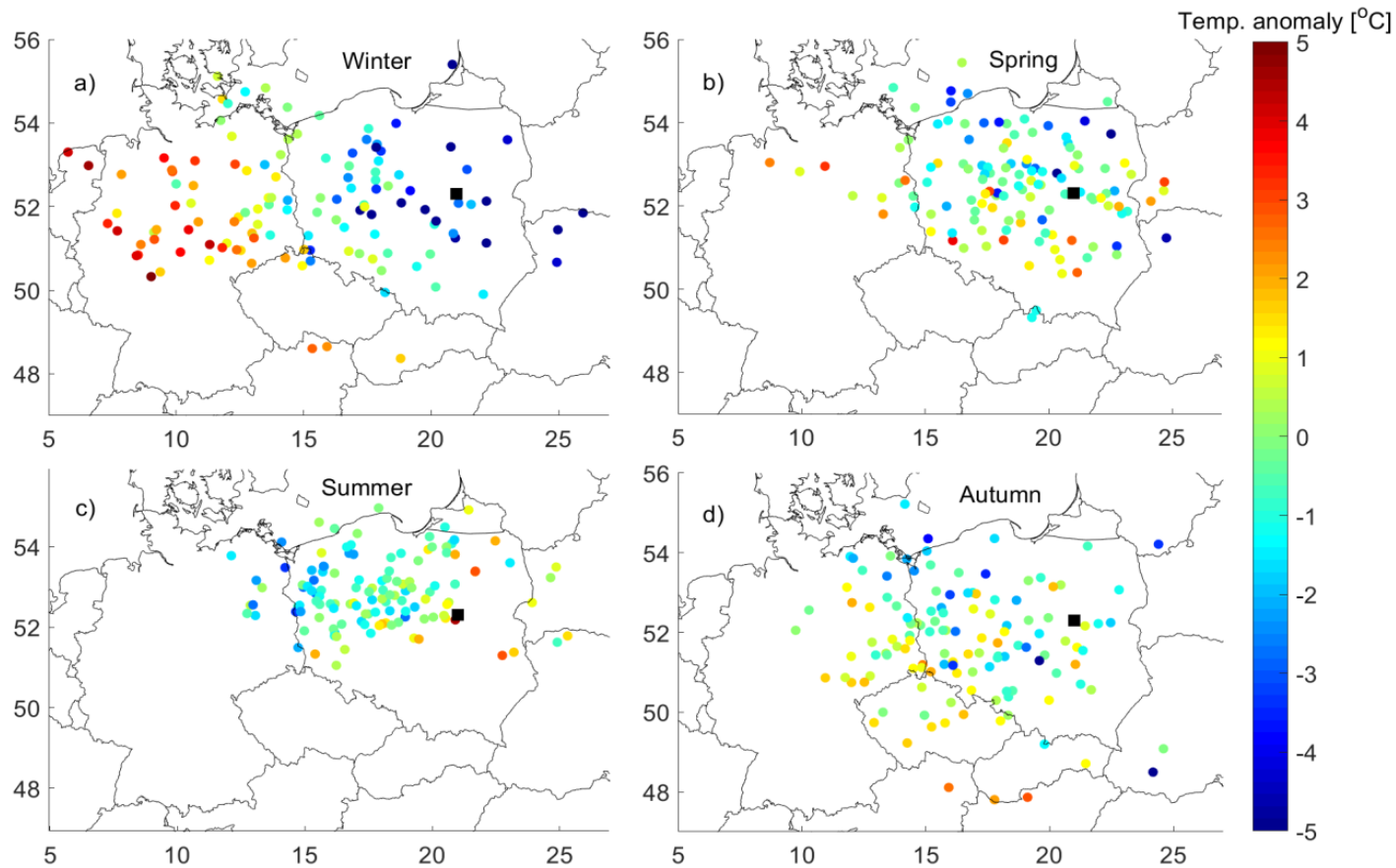


Markowicz et al., 2019

# Wpływ chmur



# Wpływ cyrkulacji atmosferycznej



Średnie miesięczne położenie masy powietrza na 3 doby przed dotarciem do Warszawy (na wysokości 500 m) i wartości miesięcznej anomalii temperatury.

# Relacje statystyczne pomiędzy wybranymi wielkościami fizycznymi

Parameter	Correlation coefficient				
	Winter	Spring	Summer	Autumn	Annual
Surface budget	0.60 (0.55)	0.64 (0.58)	0.81 (0.64)	0.56 (0.38)	0.71 (0.44)
Surface SW flux	-0.31 (-0.32)	0.50 (0.41)	0.69 (0.60)	0.33 (0.22)	0.63 (0.43)
Surface LW flux	0.92 (0.91)	0.71 (0.72)	0.82 (0.60)	0.89 (0.84)	0.84 (0.73)
AOD	-0.28 (-0.09)	-0.30 (0.06)	-0.57 (0.24)	-0.30 (0.26)	-0.53 (0.07)
Cloud Fraction	-0.06 (-0.1)	-0.42 (-0.28)	-0.78 (-0.60)	-0.13 (-0.07)	-0.58 (-0.38)
Longitude HYSPLIT	-0.81 (-0.85)	-0.26 (-0.17)	0.46 (0.56)	0.00 (-0.19)	-0.39 (-0.55)
Latitude HYSPLIT	-0.22 (-0.19)	-0.03 (-0.23)	-0.08 (0.25)	-0.37 (-0.33)	-0.07 (-0.01)



# Prosty model...

- Stosując metodologię Glantz et al. (2022) zmiana temperatury powietrza przy powierzchni ziemi jest szacowana jako odpowiedź na zmianę budżetu radiacyjnego powierzchni ziemi
- Ze względu na fakt, że jedynie część energii radiacyjnej jest użyta na ogrzanie powierzchni ziemi, dlatego należy uwzględnić średni transport ciepła odczuwanego  $H$  i utajonego  $E$ .

$$F_{adj} = \left[ \left( F_{SW}^{\downarrow} - F_{SW}^{\uparrow} \right)_{2021} - \left( F_{SW}^{\downarrow} - F_{SW}^{\uparrow} \right)_{1980} \right] \left[ 1 - \overline{\left( \frac{H+E}{F_{SW}^{\downarrow} - F_{SW}^{\uparrow}} \right)} \right]$$

- Pierwszy człon opisuje zmianę w budżecie radiacyjnym na powierzchni ziemi zakresie krótkofalowym, zaś drugi określa część energii, która nie jest transportowana od powierzchni ziemi do atmosfery.
- Zakładamy, że zmiany a strumieniu ciepła gruntu są zaniedbywalne
- Temperatura przy powierzchni ziemi może być oszacowana na podstawie prawa Stefana Boltzmana zastosowanego nadwyżki energii radiacyjnej na

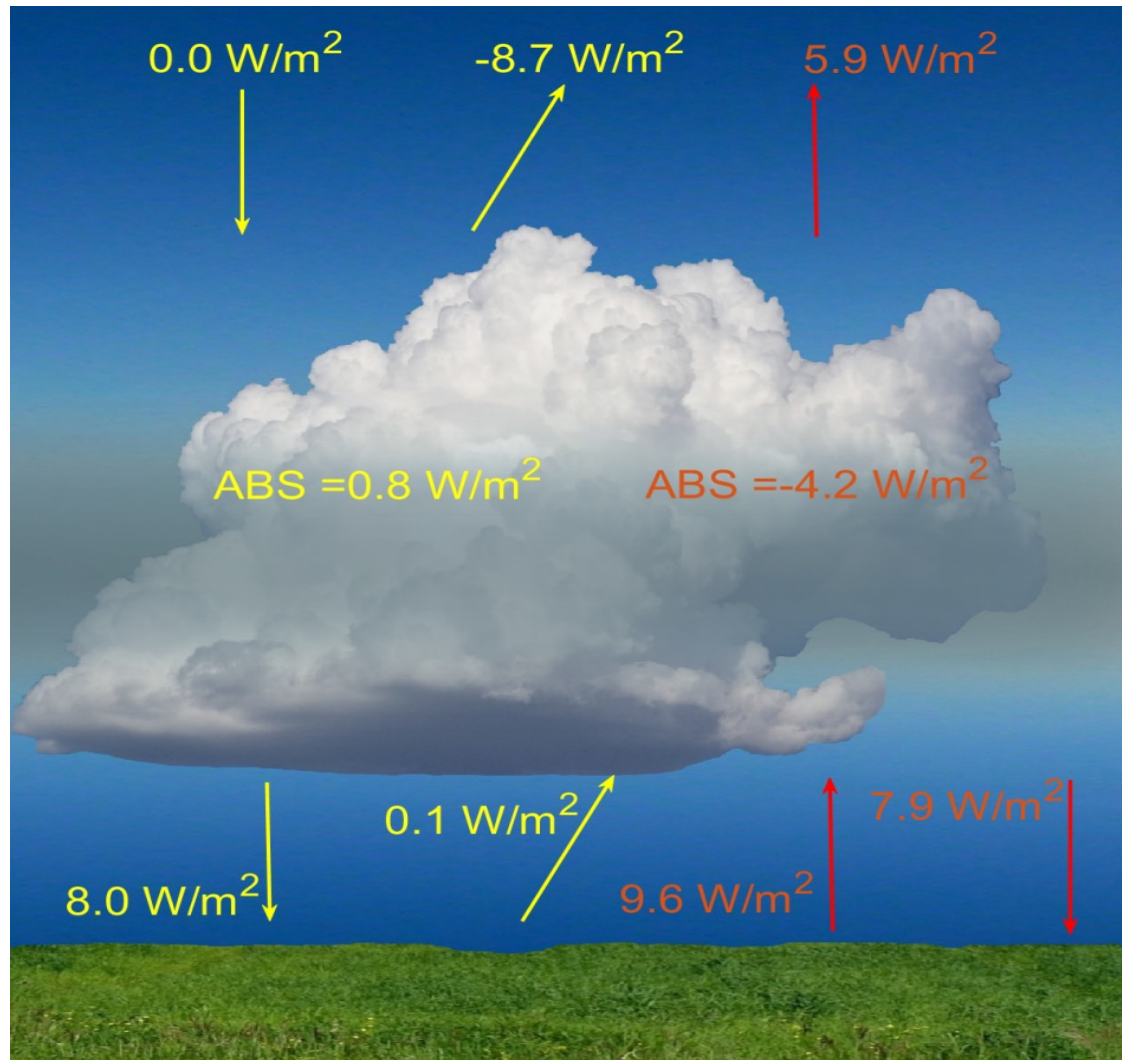
powierzchni ziemi  $\Delta T = \sqrt[4]{\frac{F_{adj}}{\sigma \epsilon} + T_{skin}^4} - T_{skin} \approx \frac{F_{adj}}{4\sigma \epsilon T_{skin}^3}$

gdzie  $\sigma$  stała Stefana Boltzmann,  $\epsilon$  zdolność emisyjna, zaś  $T_{skin}$  jest temperaturą powierzchni ziemi na początku lat 80tych ubiegłego stulecia.

# Prosty model klimatu

Method	Parameter	Air temperature change [°C]				
		Winter	Spring	Summer	Autumn	Annual
Observation	total	2.0	1.5	2.7	1.8	2.0
Simple model	total	0.3	1.3	1.0	0.5	0.8
	aerosol	0.3	0.7	0.5	0.3	0.4
	clouds	-0.4	0.4	0.6	0.2	0.2

# Zmiany strumieni radiacyjnych pomiędzy 1980 a 2021



# Podsumowanie

- Ujemny bilans energii na górnej granicy atmosfery jest w ostatnich latach redukowany w tempie  $0.7 \pm 0.2 \text{ W/m}^2$  na dekadę, równocześnie rośnie dodatni bilans na powierzchni ziemi ( $1.5 \pm 0.2 \text{ W/m}^2$  na 10 lat)
- Zmiany te związane są głównie ze wzrostem dochodzącego do powierzchni ziemi promieniowania słonecznego i redukcją promieniowania słonecznego odbijanego w przestrzeń kosmiczną
- Wzrost promieniowania słonecznego przy powierzchni ziemi jest konsekwencją redukcji aerozolu i zachmurzenia
- Pozytywny trend promieniowania długofalowego opuszczającego atmosferę to konsekwencja wzrostu temperatury powierzchni ziemi.
- Rosnąca koncentracja gazów cieplarnianych powoduje spadek transmisji promieniowania długofalowego atmosferze, który jednak nie jest w stanie zbilansować efektu związane z nagrzewanie powierzchni ziemi.

# Podsumowanie c.d.

- W ciągu ostatnich 4 dekad obserwujemy w Polsce bardzo szybkie ogrzewanie klimatu  $0.48 \pm 0.09^{\circ}\text{C}/10\text{yr}$  (około dwa razy szybsze niż średnio dla całego globu)
- Można to tłumaczyć pozytywnym trendem budżetu energii, w szczególności w cieplej porze roku dodatni budżet jest silnie skorelowane z pozytywną anomalią temperatury.
- W wyniku silnego ogrzewania powierzchni ziemi i coraz silniejszego ochładzania atmosfery rośnie strumień ciepła odczuwalnego ( $4.7\%/10\text{yr}$ ) i utajonego ( $1.7\%/10\text{yr}$ ) do atmosfery, co może częściowo odpowiadać za wzrost procesów głębokiej konwekcji podczas cieplej pory roku
- Podczas chłodnej pory roku głównym czynnikiem odpowiedzialnym za anomalie temperatury jest adwekcja, zaś promieniowanie słoneczne ma zaniedbywalny wpływ.
- Oszacowano, że wzrost strumienia promieniowania słonecznego przy powierzchni ziemi spowodował ogrzewanie klimatu w Polsce w latach 1980-2021 o  $0.8^{\circ}\text{C}$  (całościowo  $2^{\circ}\text{C}$ ), z czego  $0.4^{\circ}\text{C}$  wynika z redukcji aerozolu, zaś  $0.2^{\circ}\text{C}$  z redukcji zachmurzenia.