



Modelowanie współczesnego zlodzenia Bałtyku i w okresie małej epoki lodowej

Marek Kowalewski^{1,3}, Halina Kowalewska-Kalkowska², Jan Jędrasik¹, Rajmund Przybylak⁴,

Piotr Oliński⁴, Mirosława Ostrowska³

1) Uniwersytet Gdański, 2) Uniwersytet Szczeciński, 3) Instytut Oceanologii Polskiej Akademii Nauk,

4) Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

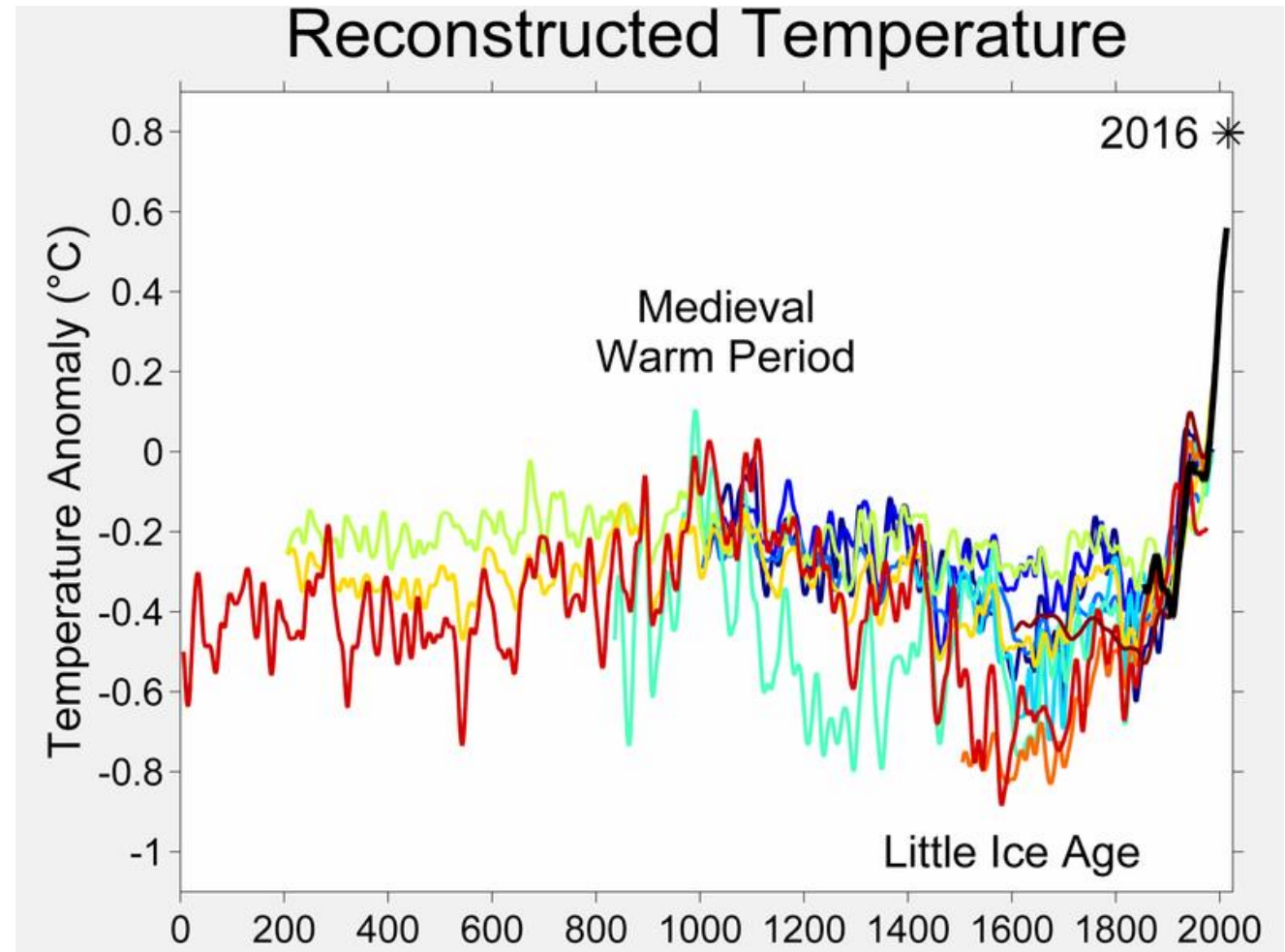
V Pomorska Konferencja Open Science - Usługi oparte na współpracy

1 - 3 grudnia 2021



Mała epoka lodowa

- Po ciepłym okresie średniowiecznym, który w Basenie Morza Bałtyckiego trwał od 900 do 1350 r. (średniowieczne optimum klimatyczne) nastąpiło stopniowe ochładzanie nazwane małą epoką lodową (MEL), które swoje maksimum osiągnęło w okresie 1550-1850 (Niedźwiedź et al. 2015).
- Na obszarze Europy średnie roczne wartości temperatury powietrza w okresie MEL były niższe o ok 1,5 °C, zaś w skrajnie chłodnych okresach nawet o 2 °C od obecnie notowanych (PAGES 2k Network 2013).



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2000_Year_Temperature_Comparison.png

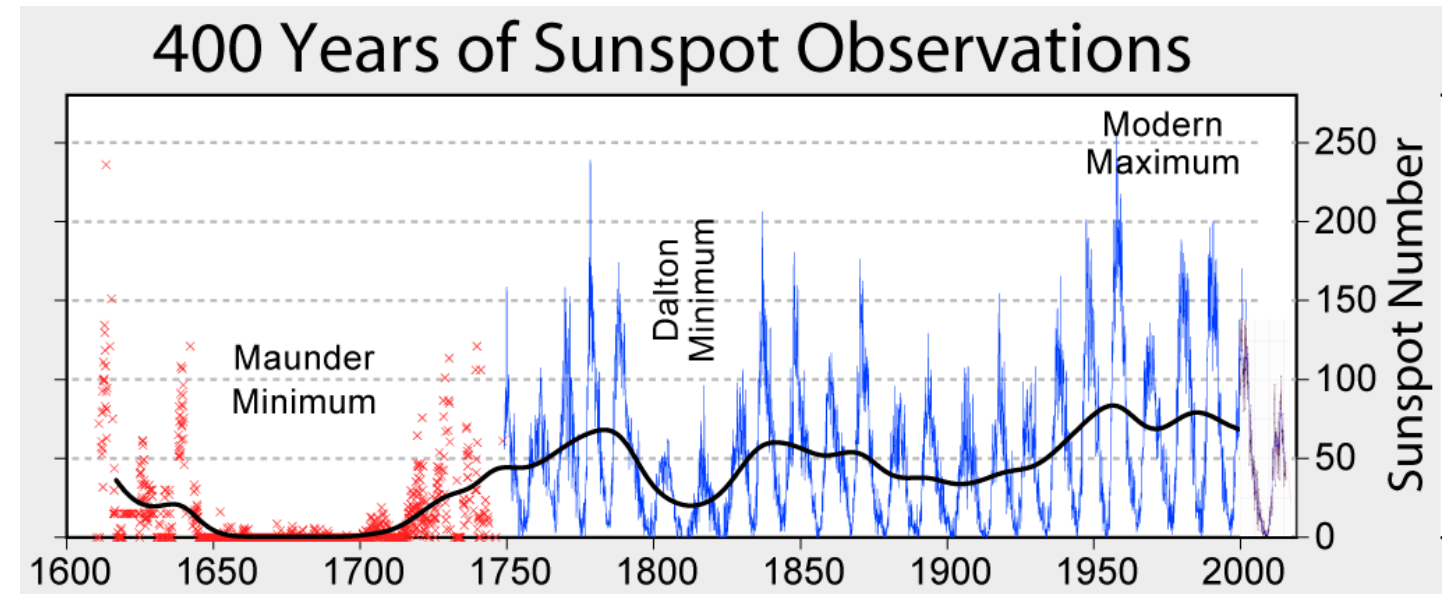
Niedźwiedź T., Glaser R., Hansson D., Helama S., Klimenko V., Łupikasza E., Małarzewski, Ł., Nordli Ø., Przybylak R., Riemann D., Solomina O., 2015, The Historical Time Frame (Past 1000 Years), w: The BACC II Author Team, Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin, Regional Climate Studies, Springer Open, 51-65, DOI 10.1007/978-3-319-16006-1_3

PAGES 2k Consortium (2013), Continental-scale temperature variability during the past two millennia. *Nature Geosci* 6, 339–346. <https://doi.org/10.1038/ngeo1797>

Mała epoka lodowa

Możliwe przyczyny:

- ▶ Mniejsza aktywność słoneczna
- ▶ Aktywność wulkaniczna
- ▶ Cyrkulacja oceaniczna
- ▶ Zmniejszona populacja ludzkości



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sunspot_Numbers.png

Mała epoka lodowa

Liczne wzmianki historyczne:

- zamarzająca Tamiza
- przemarsze wojsk (np. marsz armii Karola X z Jutlandii do Zelandii w lutym 1658 roku)
- karczmy na Bałtyku



Zamarznięta Tamiza, 1677 rok

https://en.wikipedia.org/wiki/Little_Ice_Age

Karczmy na Bałtyku

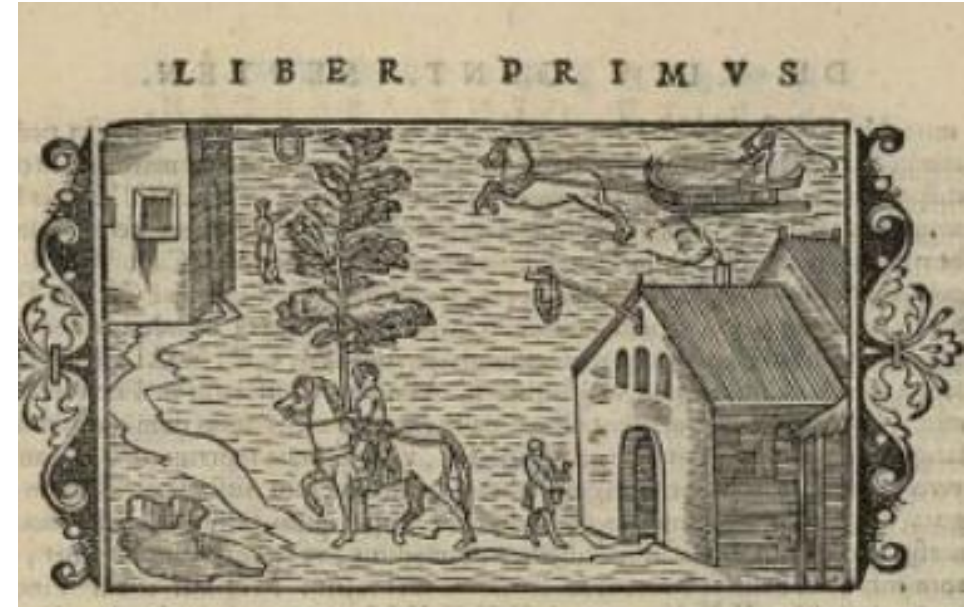


Carta Marina (Olaus Magnus, 1539).
Retrieved from the Library of Congress,
<https://www.loc.gov/item/2021668418/>

Karczmy na Bałtyku

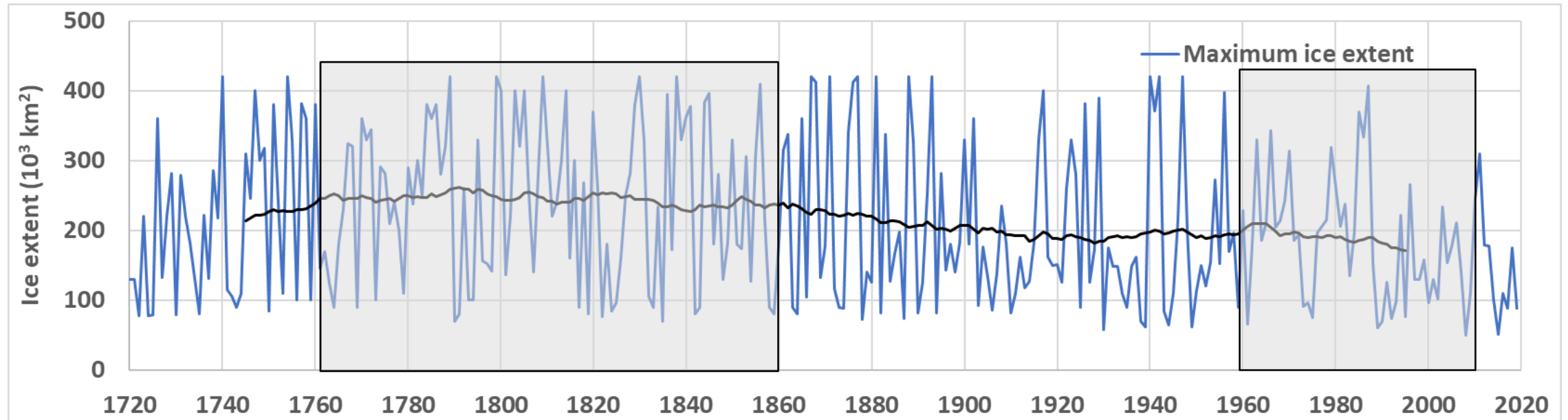
Ilustracja z „Historii ludów północnych” Magnusa

Olaus Magnus (1555): Historia de Gentibus Septentrionalibus



Fragment mapy Magnusa *Carta Marina* (Olaus Magnus, 1539)

Maksymalny zasięg pokrywy lodowej na Bałtyku



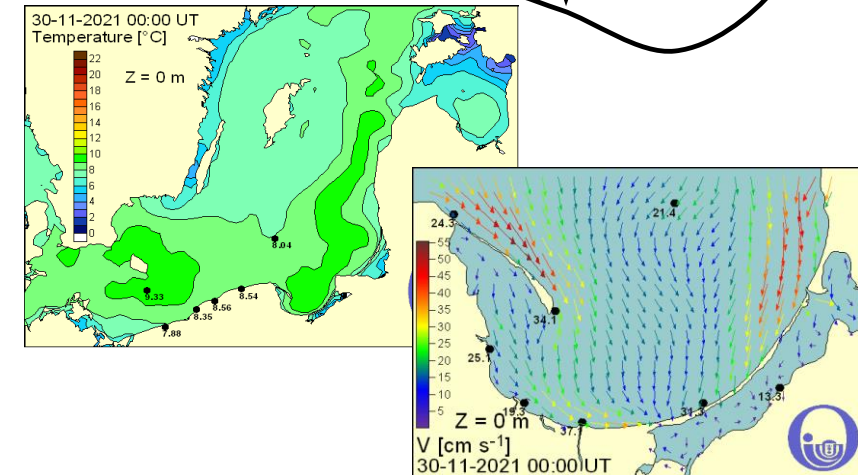
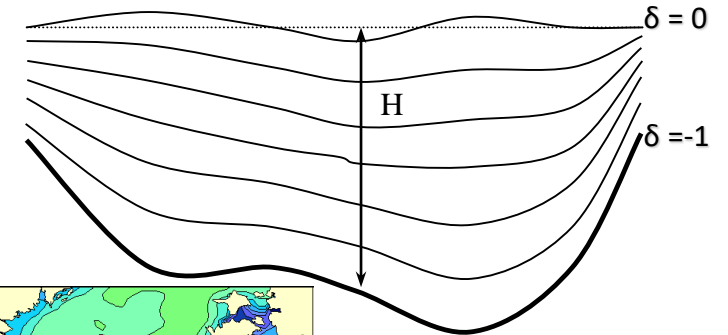
Zmiany maksymalnego zasięgu lodu w Morzu Bałtyckim w latach 1720-2020 i 50-letnia średnia ruchoma; na wykresie zaznaczono okresy analizy i walidacji modelu (FMI, Seinä i Palosuo 1996; Seinä et al. 2001, (<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/maximum-extent-of-ice-cover-3>))

Cele pracy

- Walidacja wyników długookresowej (1958-2007) symulacji modelu lodu morskiego sprzężonego z modelem hydrodynamicznym (PM3D)
- Zastosowanie modelu do próby odtworzenia warunków klimatycznych jakie występowały w okresie małej epoki lodowej

Model hydrodynamiczny M3D/PM3D

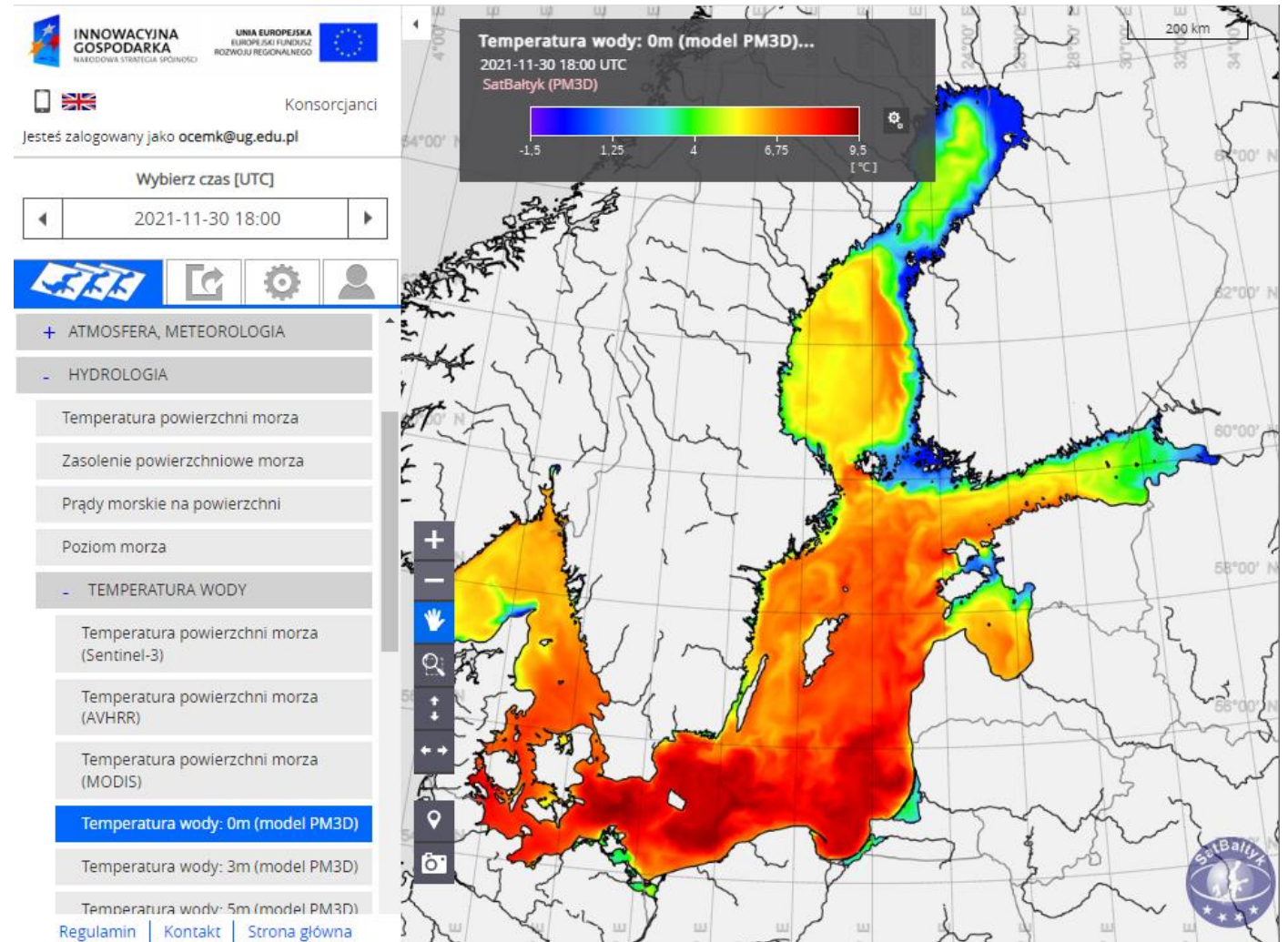
- Model M3D powstał w latach 1995-1997 w Instytucie Oceanografii UG (Kowalewski, 1997) jako zmodyfikowana wersja POM (Princeton Ocean Model); analogicznie jak w POM zastosowano tzw. σ -transformację
- Od 1999 roku M3D działa w wersji operacyjnej (<http://model.ocean.univ.gda.pl/>) wykorzystując numeryczne prognozy pogody z modelu UM (ICM)



Kowalewski M., 1997, *A three-dimensional, hydrodynamic model of the Gulf of Gdansk*, Oceanol. Stud., 26 (4), 77–98

Model hydrodynamiczny M3D/PM3D

- Nowa zrównoleglona wersja modelu PM3D opracowana została w ramach projektu SatBałtyk <http://satbaaltyk.iopan.gda.pl/>



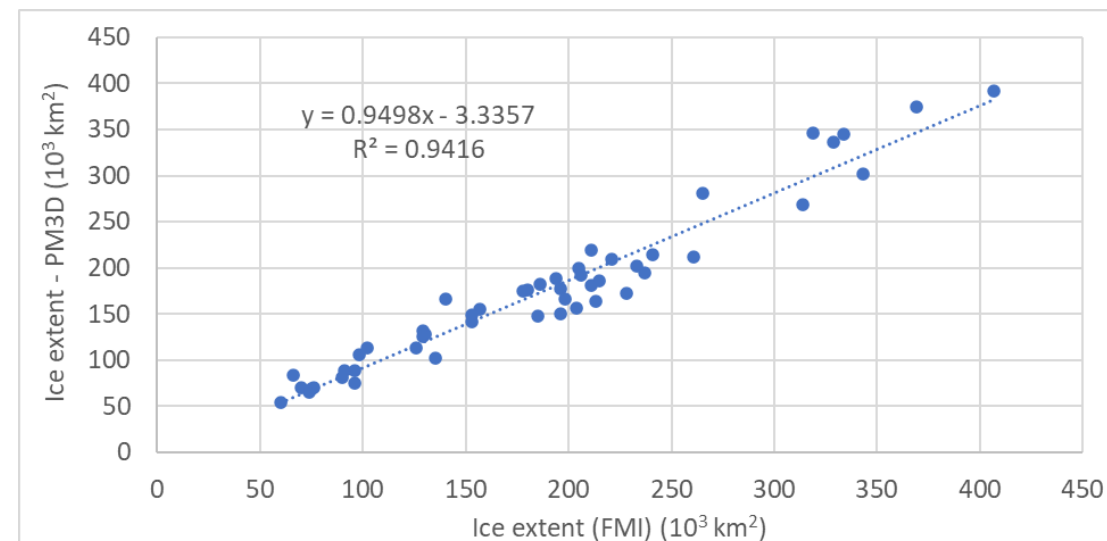
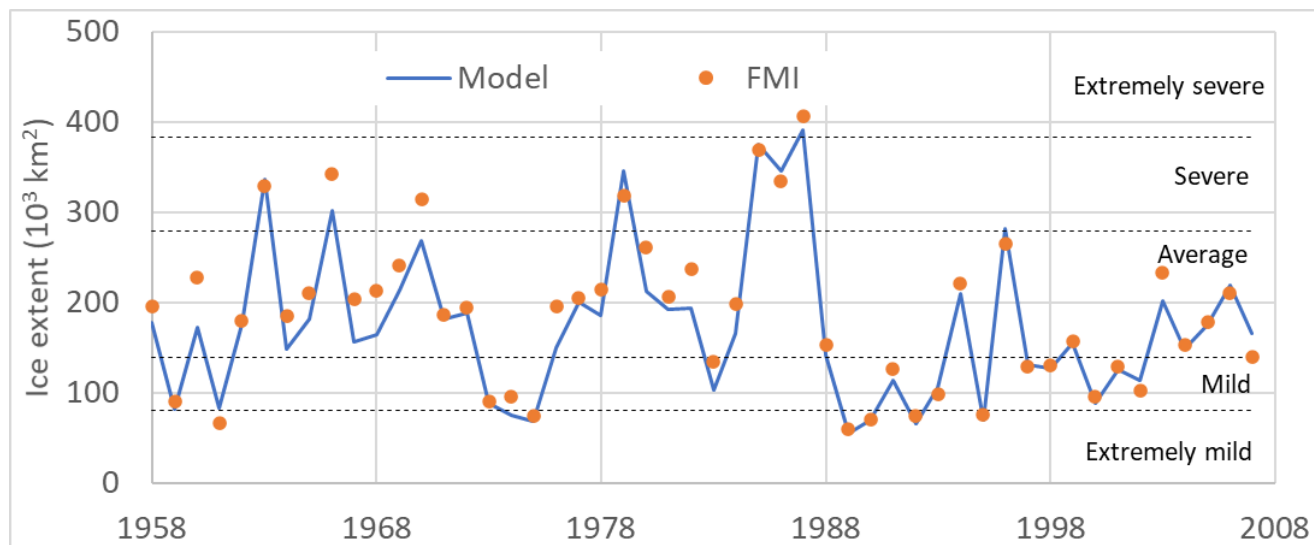
Model lodu morskiego

- Do symulacji zastosowano model termodynamiki i dynamiki lodu morskiego (Herman et al., 2011) sprzężony z modelem hydrodynamicznym PM3D.
- Długookresową symulację (1958-2007) przeprowadzono w rozdzielczości 3 mil morskich (ok. 5.5 km) analogicznie jak wcześniejszą symulację hydrodynamiczną (Jędrasik i Kowalewski, 2019).
- Wymuszenie atmosferyczne na powierzchni morza zadano w oparciu o wyniki reanalizy modelu REMO (REgional MOdel) z krokiem 1 godziny w okresie 1958-2007.

Herman, A., Jedrasik, J., Kowalewski, M., 2011, *Numerical modelling of thermodynamics and dynamics of sea ice in the Baltic Sea*. Ocean Sci. 7, 257–276)

Jędrasik J., Kowalewski M., 2019, *Mean annual and seasonal circulation patterns and long-term variability of currents in the Baltic Sea*, J. Mar. Syst., 193, 1-26

Walidacja modelu - maksymalny zasięg lodu

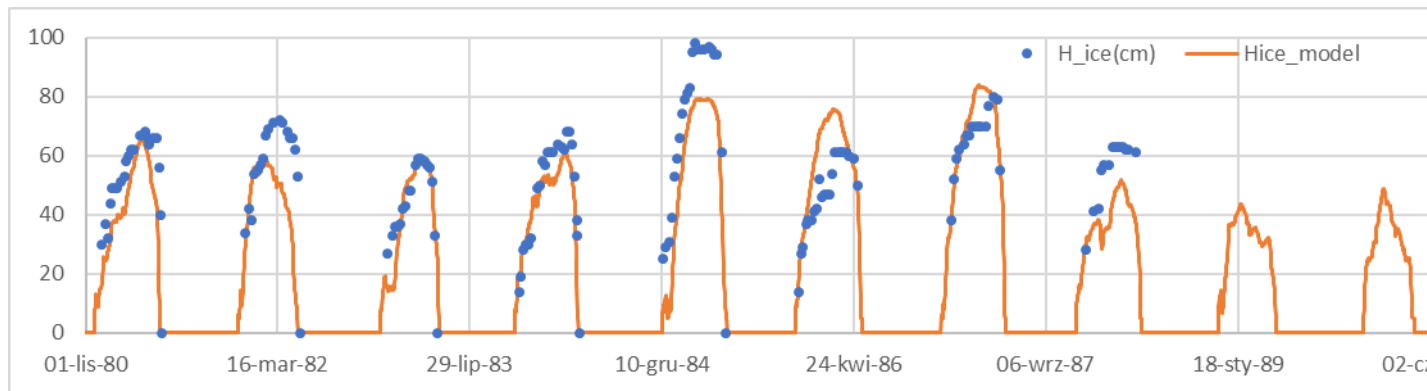
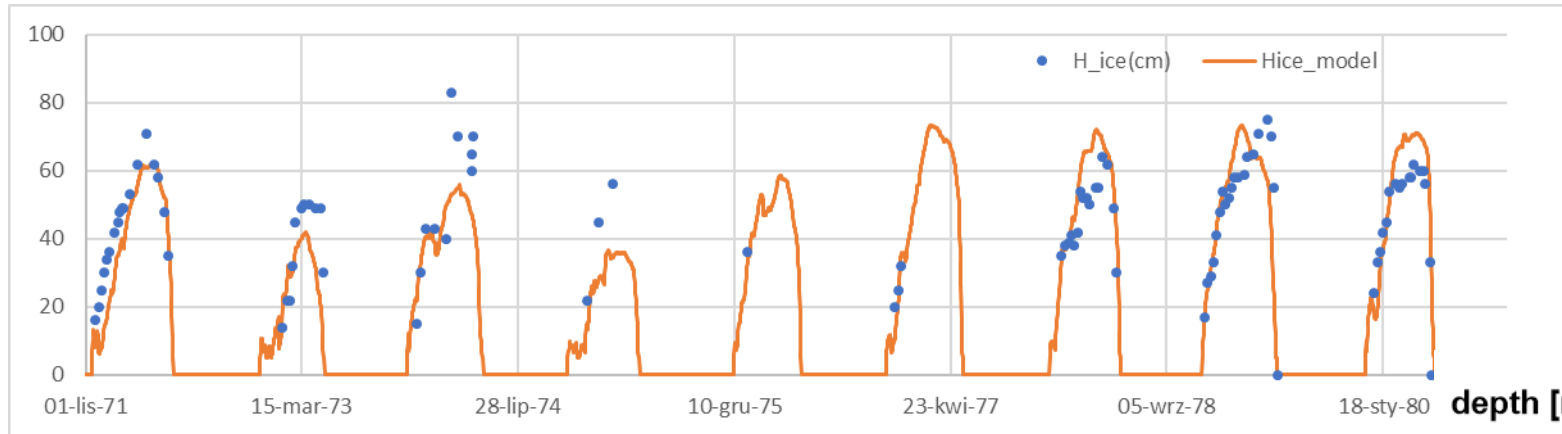


Maksymalny zasięg lodu na Bałtyku w okresie 1958 – 2007 otrzymany w wyniku symulacji modelem w porównaniu do obserwacji (FMI) oraz stopień surowości zim wg. Seinä i Palosuo (1996).

Porównanie maksymalnych rocznych zasięgów lodu na Bałtyku obliczonych za pomocą modelu (PM3D) z obserwacjami (FMI).

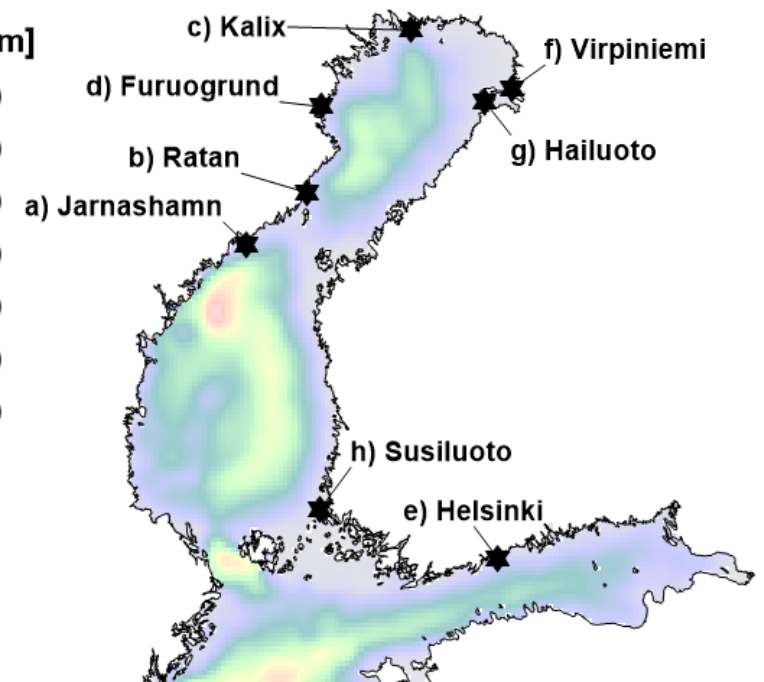
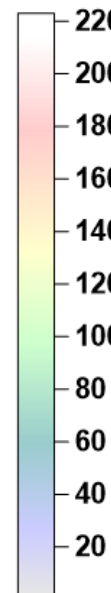
Seinä, A., and E. Palosuo (1996): *The classification of the maximum annual extent of ice cover in the Baltic Sea 1720-1995*. Report Series of the Finnish Institute of Marine Research, No. 27, 79-91

Walidacja modelu – grubość lodu

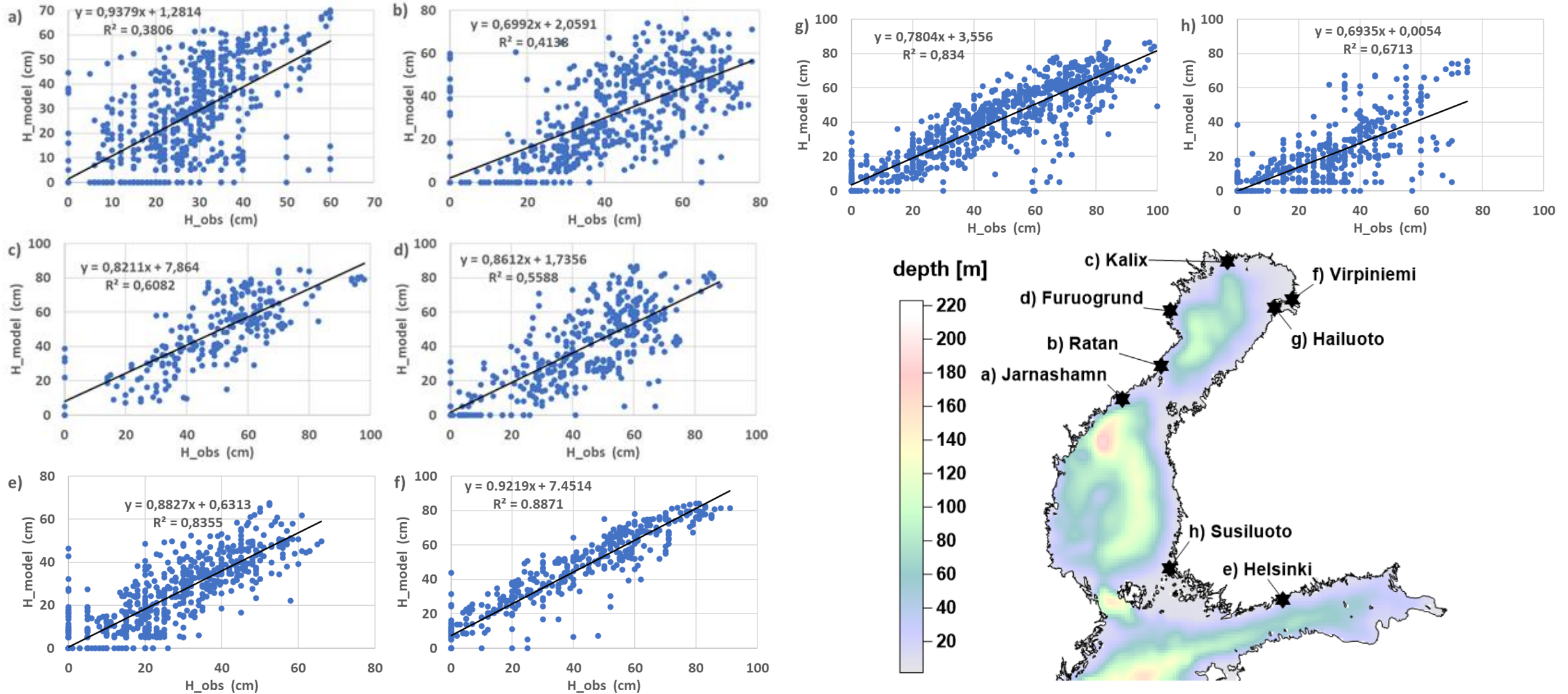


Grubość lodu (cm) Kalix

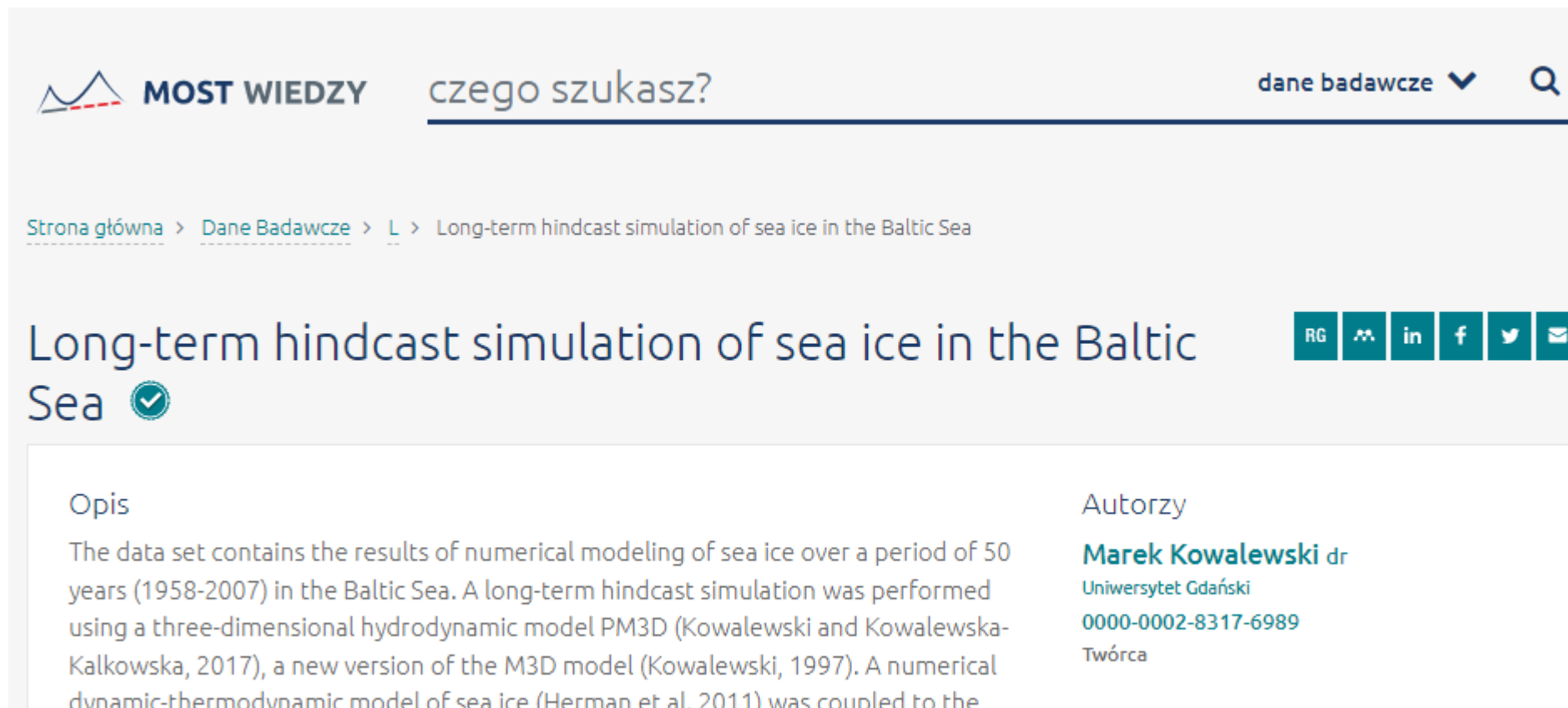
depth [m]



Walidacja modelu – grubość lodu



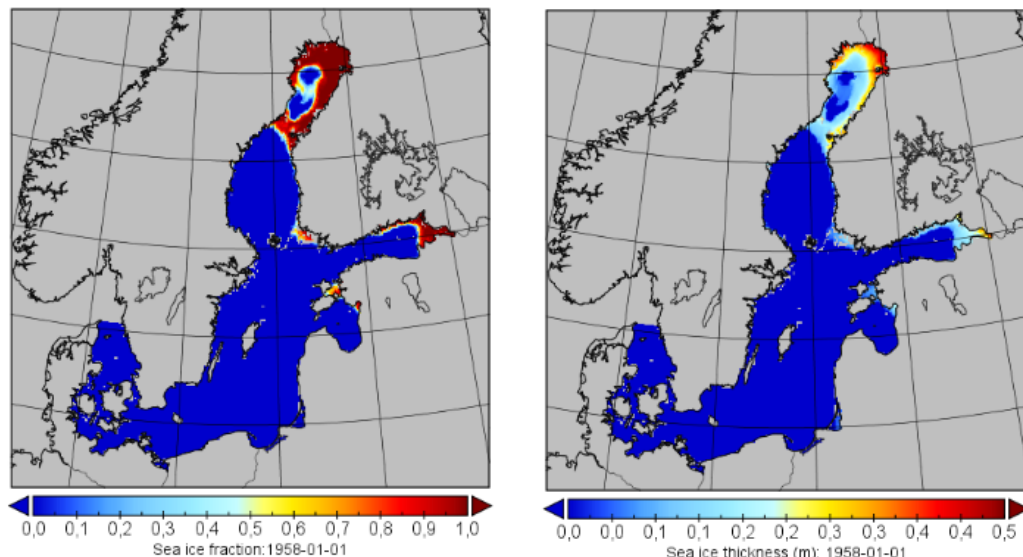
Publikacja cyfrowych wyników symulacji



The screenshot shows a web page from MOST WIEDZY. At the top left is the logo and name 'MOST WIEDZY'. To its right is a search bar with the text 'czego szukasz?'. Further right are the words 'dane badawcze' with a dropdown arrow and a magnifying glass icon. Below the search bar is a breadcrumb trail: 'Strona główna > Dane Badawcze > L > Long-term hindcast simulation of sea ice in the Baltic Sea'. The main title of the page is 'Long-term hindcast simulation of sea ice in the Baltic Sea' with a checkmark icon. To the right of the title are social media icons for RG, a share icon, LinkedIn, Facebook, Twitter, and Email. Below the title, there are two columns: 'Opis' (Description) and 'Autorzy' (Authors). The description text is partially visible, mentioning a 50-year simulation (1958-2007) in the Baltic Sea using a three-dimensional hydrodynamic model PM3D and a numerical dynamic-thermodynamic model of sea ice. The author information lists 'Marek Kowalewski dr' from 'Uniwersytet Gdański' with the phone number '0000-0002-8317-6989' and the role 'Twórca'.

Kowalewski, M. (2021). *Long-term hindcast simulation of sea ice in the Baltic Sea* [Data set]. Gdańsk University of Technology. <https://doi.org/10.34808/cdd9-be22>

Publikacja cyfrowych wyników symulacji



File content of `Baltic_sea_ice_1958-2007.zip` preview (max 50 files)

1.  `Baltic_sea_ice_1958.nc`
2.  `Baltic_sea_ice_1959.nc`
3.  `Baltic_sea_ice_1960.nc`
4.  `Baltic_sea_ice_1961.nc`
5.  `Baltic_sea_ice_1962.nc`
6.  `Baltic_sea_ice_1963.nc`
7.  `Baltic_sea_ice_1964.nc`
8.  `Baltic_sea_ice_1965.nc`
9.  `Baltic sea ice 1966.nc`

Dataset file

 **Baltic_sea_ice_1958-2007.zip**
182.8 MB, [S3 ETag](#) 87b3068003ab330bbaf607f6e68b8e18-1,
downloads: 3

download

contents preview

File details

License:



CC BY-NC-SA
Non-commercial - Share-alike

Software:

[Software for Manipulating or Displaying NetCDF Data](#)

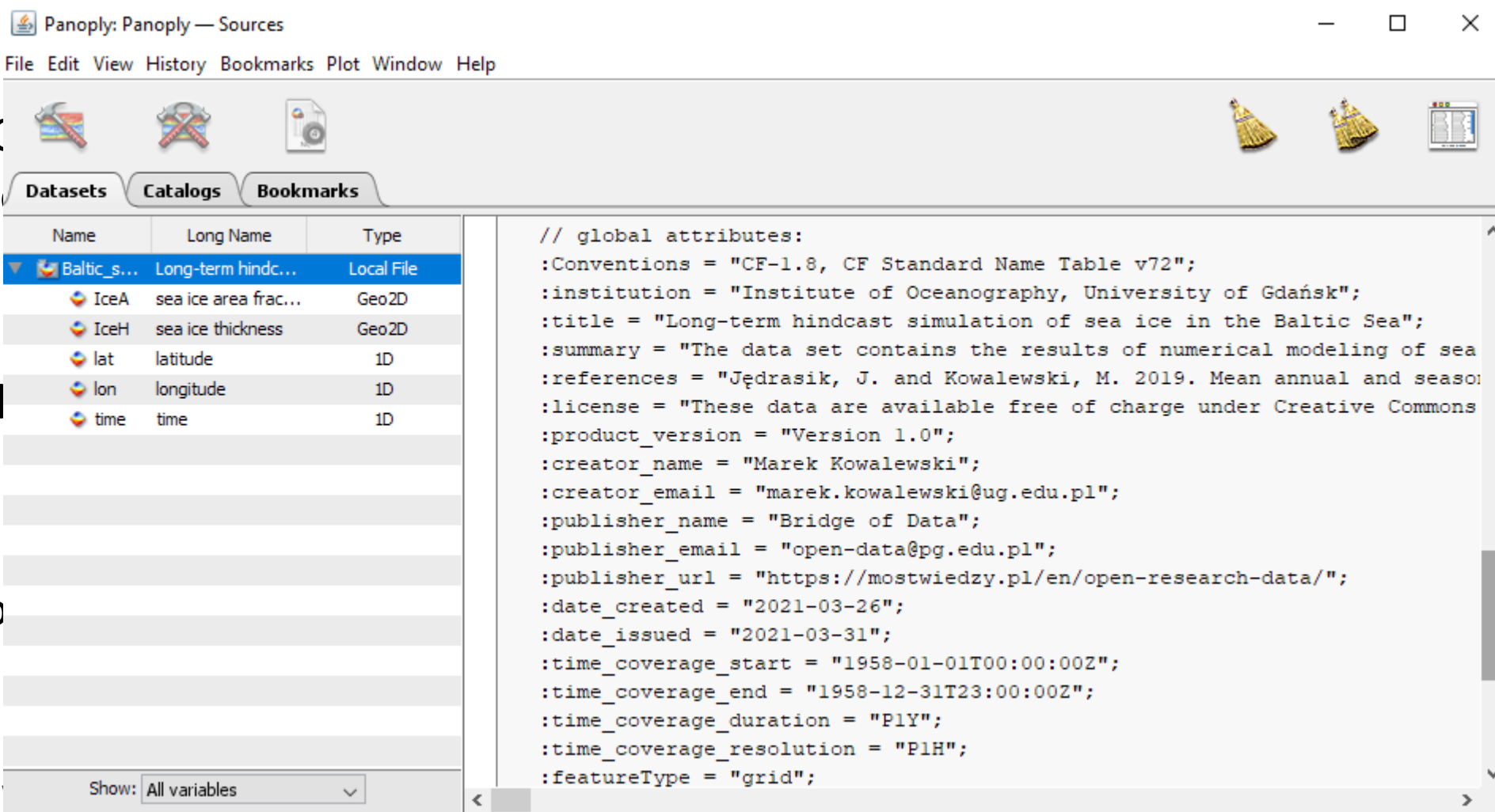
Kowalewski, M. (2021). *Long-term hindcast simulation of sea ice in the Baltic Sea* [Data set].
Gdańsk University of Technology. <https://doi.org/10.34808/cdd9-be22>

Format NetCDF

- NetC wiel

- Jest stru

- Jest umo



Panoply: Panoply — Sources

File Edit View History Bookmarks Plot Window Help

Datasets Catalogs Bookmarks

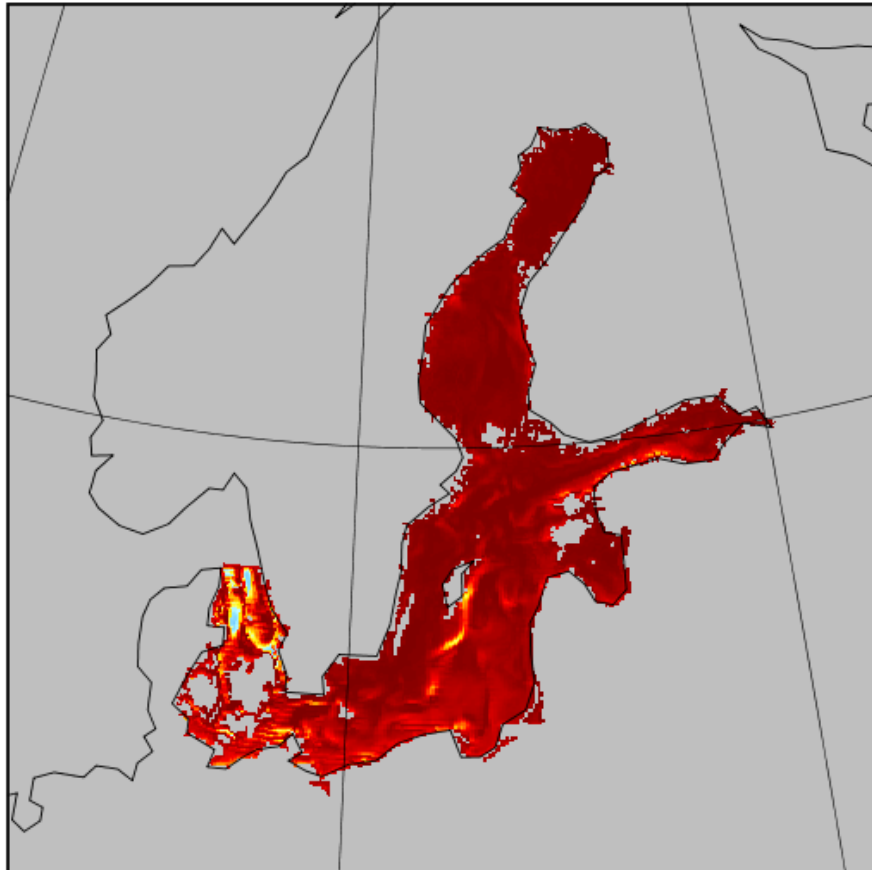
Name	Long Name	Type
Baltic_s...	Long-term hindc...	Local File
IceA	sea ice area frac...	Geo2D
IceH	sea ice thickness	Geo2D
lat	latitude	1D
lon	longitude	1D
time	time	1D

```
// global attributes:  
:Conventions = "CF-1.8, CF Standard Name Table v72";  
:institution = "Institute of Oceanography, University of Gdańsk";  
:title = "Long-term hindcast simulation of sea ice in the Baltic Sea";  
:summary = "The data set contains the results of numerical modeling of sea  
:references = "Jędrasik, J. and Kowalewski, M. 2019. Mean annual and season  
:license = "These data are available free of charge under Creative Commons  
:product_version = "Version 1.0";  
:creator_name = "Marek Kowalewski";  
:creator_email = "marek.kowalewski@ug.edu.pl";  
:publisher_name = "Bridge of Data";  
:publisher_email = "open-data@pg.edu.pl";  
:publisher_url = "https://mostwiedzy.pl/en/open-research-data/";  
:date_created = "2021-03-26";  
:date_issued = "2021-03-31";  
:time_coverage_start = "1958-01-01T00:00:00Z";  
:time_coverage_end = "1958-12-31T23:00:00Z";  
:time_coverage_duration = "P1Y";  
:time_coverage_resolution = "P1H";  
:featureType = "grid";
```

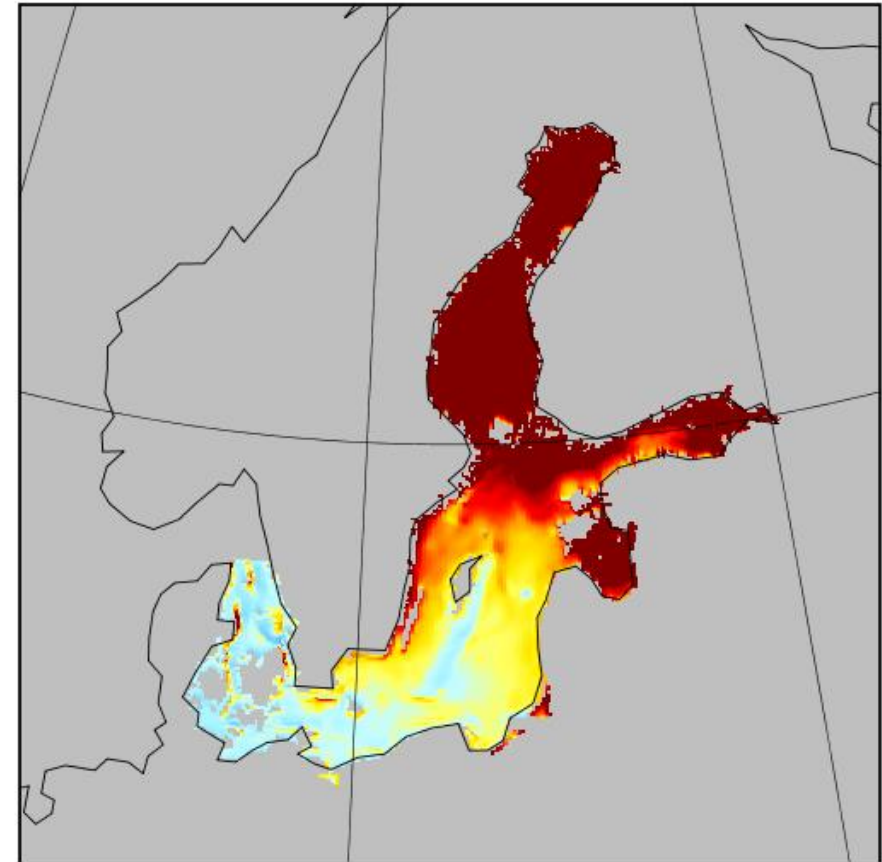
Show: All variables

Ko
Gdańsk University of Technology. <https://doi.org/10.34808/cdd9-be22>

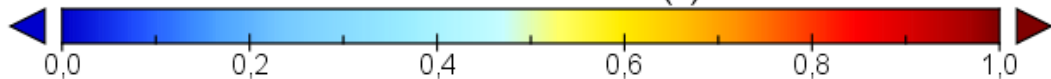
Wyniki symulacji dla wybranego dnia



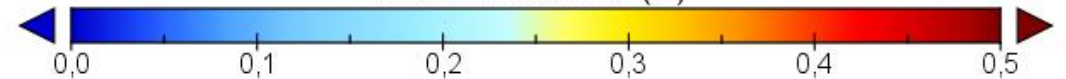
15.03.1987



sea ice area fraction (1)



sea ice thickness (m)



Skumulowana grubość lodu

Skumulowana grubość lodu (Koslowski, Loewe, 1994):

$$H_A = \frac{1}{n} \sum_k \sum_j (Nh)_{jk}$$

N – koncentracja lodu,

h – grubość lodu [m],

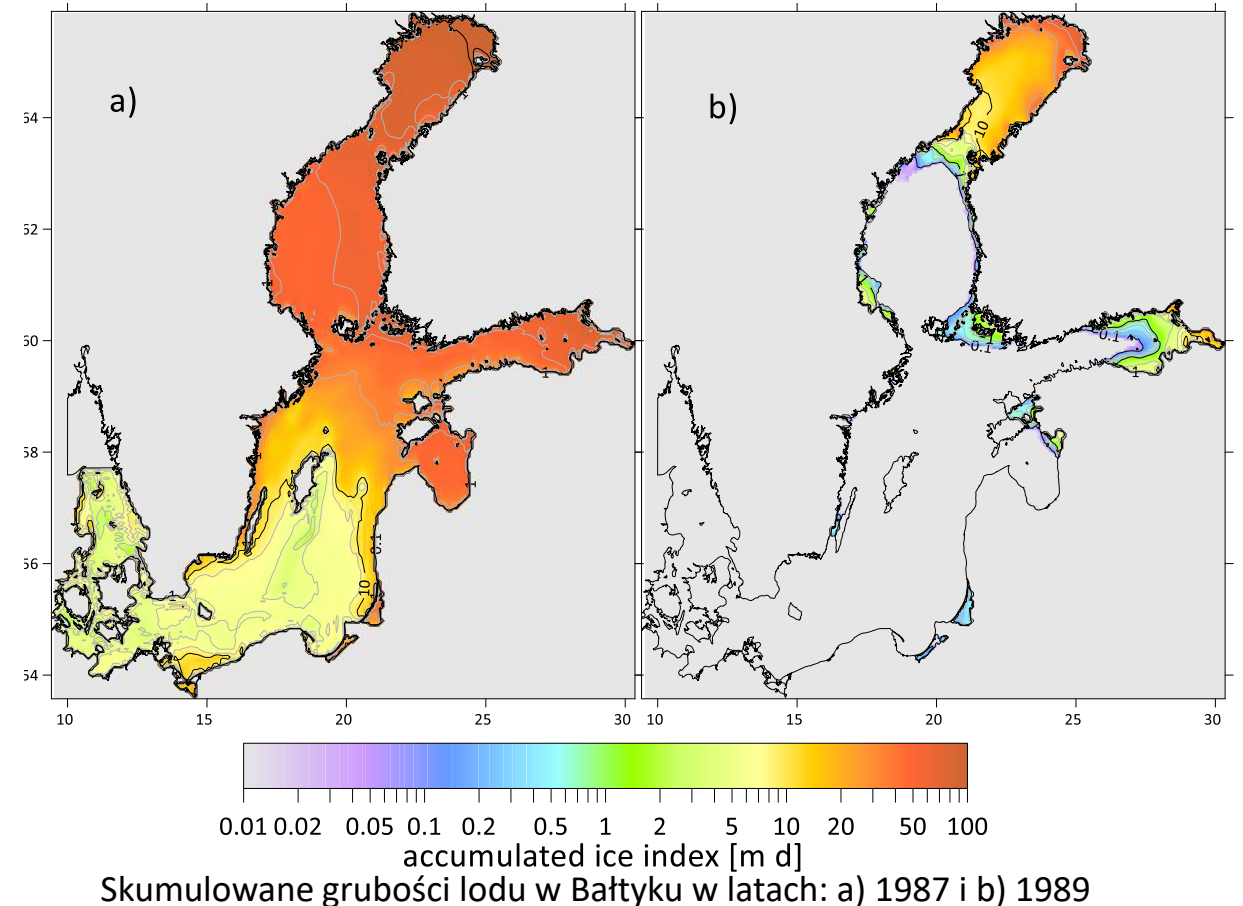
n – liczba stacji,

j – indeks dni sezonu zimowego,

k – indeks stacji obserwacyjnej.

W przypadku danych przestrzennych, z modelu numerycznego, skumulowaną grubość lodu można obliczyć dla każdego węzła siatki obliczeniowej (i – numer węzła):

$$H_{Ai} = \sum_j (Nh)_{ij}$$



Skumulowana grubość lodu

Skumulowana grubość lodu (Koslowski, Loewe, 1994):

$$H_A = \frac{1}{n} \sum_k \sum_j (Nh)_{jk}$$

N – koncentracja lodu,

h – grubość lodu [m],

n – liczba stacji,

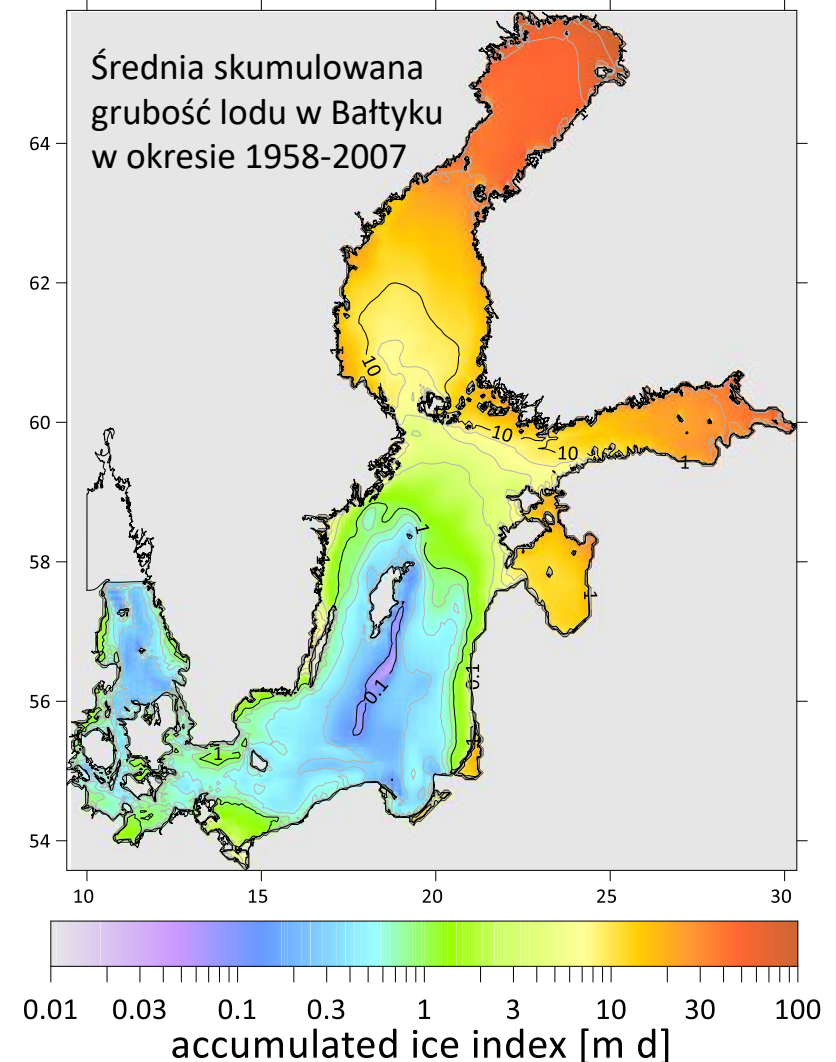
j – indeks dni sezonu zimowego,

k – indeks stacji obserwacyjnej.

W przypadku danych przestrzennych, z modelu numerycznego, skumulowaną grubość lodu można obliczyć dla każdego węzła siatki obliczeniowej (i – numer węzła):

$$H_{Ai} = \sum_j (Nh)_{ij}$$

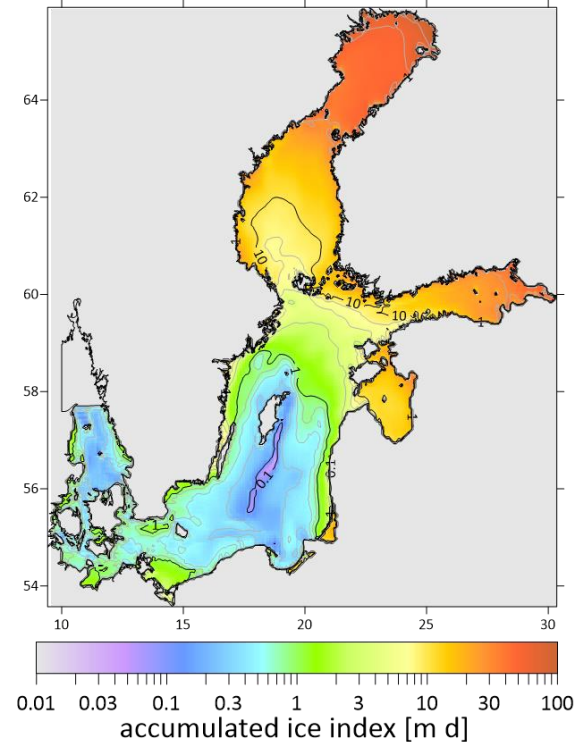
Koslowski, G., Loewe, P., (1994) *The western Baltic Sea ice seasons in terms of mass related severity index 1879–1992*. Tellus 46A, 66–74.



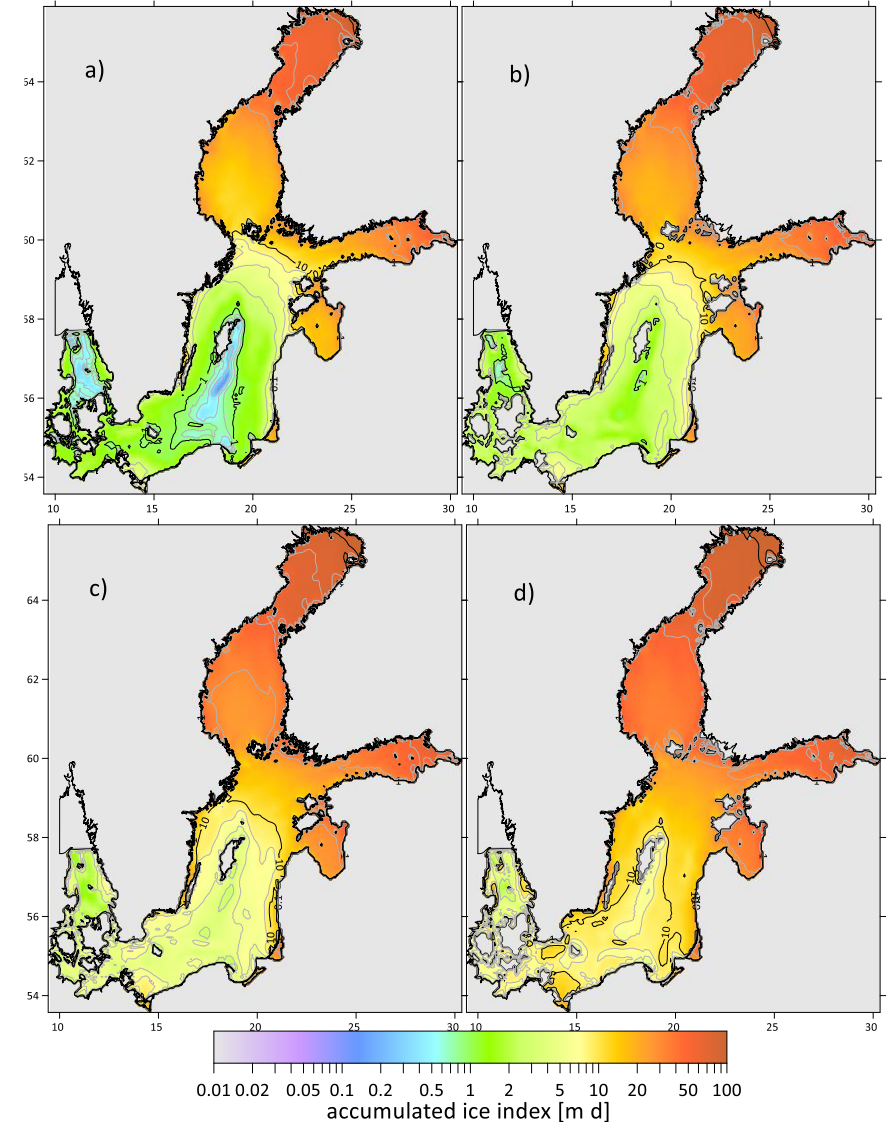
Symulacje dla okresu MEL

- Za pomocą modelu wykonano szereg symulacji, w których temperaturę powietrza obniżono o stałą wartość: 1°C, 2°C, 3°C i 4°C.
- Obliczenia wykonano w oparciu o te same dane meteorologiczne, które były wykorzystane do walidacji modelu, pochodzące z modelu REMO dla okresu 1958-2007.
- Poza temperaturą powietrza wszystkie charakterystyki pogody przyjmowano takie same jak w okresie 1958-2007.

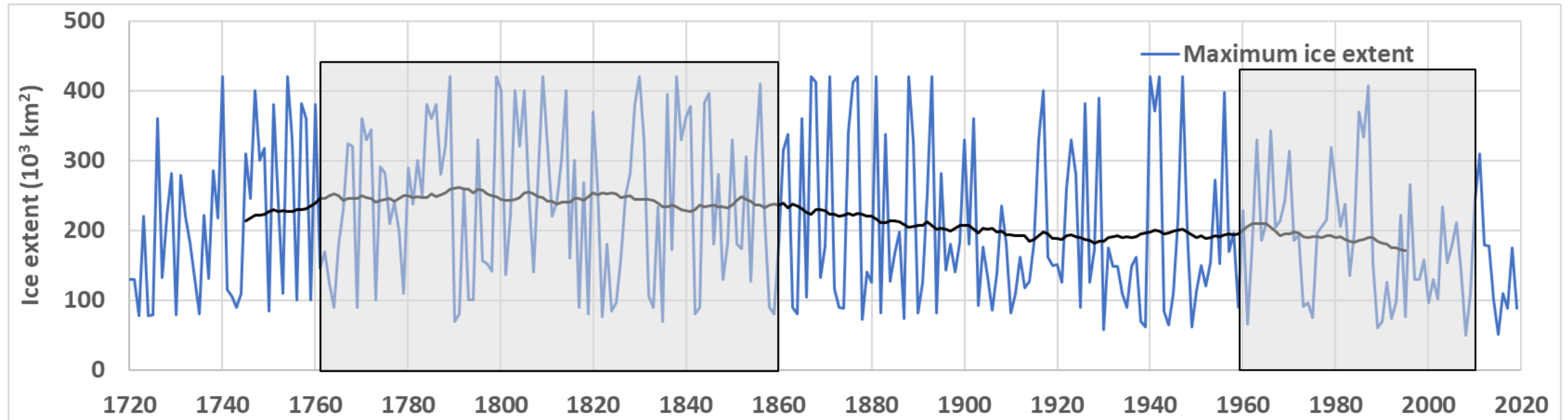
Średnia skumulowana grubość lodu w Bałtyku w okresie 1958-2007



Rozkład średniej rocznej skumulowanej grubości lodu w Morzu Bałtyckim dla temperatury powietrza obniżonej o: a) 1°C, b) 2°C, c) 3°C, d) 4°C



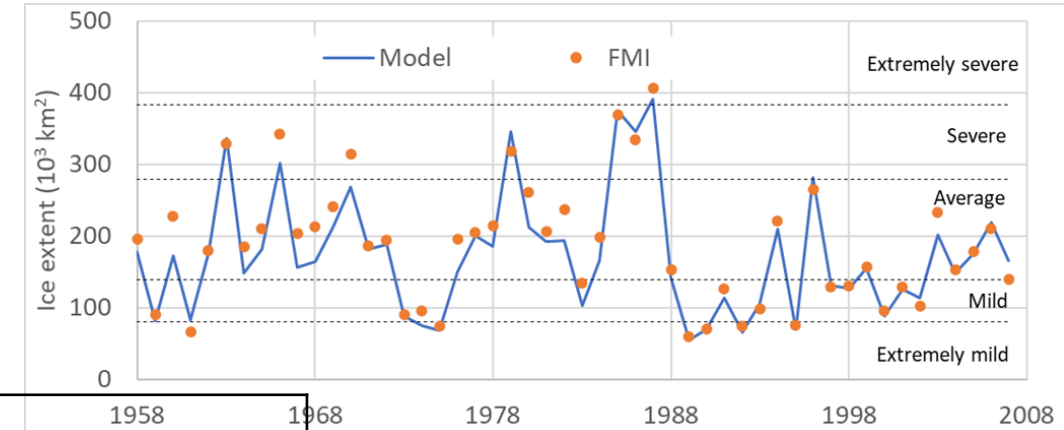
Maksymalny zasięg pokrywy lodowej na Bałtyku



Zmiany maksymalnego zasięgu lodu w Morzu Bałtyckim w latach 1720-2020 i 50-letnia średnia ruchoma; na wykresie zaznaczono okresy analizy i walidacji modelu (FMI, Seinä and Palosuo 1996; Seinä et al. 2001, (<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/maximum-extent-of-ice-cover-3>))

Maksymalny zasięg pokrywy lodowej na Bałtyku

Procentowy udział zim o różnym stopniu surowości i inne charakterystyki statystyczne obliczone na podstawie rekonstrukcji (Seina i Palosuo, 1996) i dla symulacji modelowych: referencyjnej (v0) oraz dla symulacji z obniżoną temperaturą o 1, 2, 3 i 4 °C (v1, v2, v3, v4)



	Reconstruction (Seina&Palosuo, 1996)		Model version (temperature reduction)				
	1761-1860	1958-2007	v0	V1 (-1°C)	V2 (-2°C)	V3 (-3°C)	V4 (-4°C)
Number of seasons	100	50	50	50	50	50	50
Extremely mild (EM)	7%	12%	12%	2%	0%	0%	0%
Mild (M)	17%	22%	22%	20%	18%	4%	0%
Average (N)	32%	52%	52%	56%	46%	40%	28%
Severe (S)	31%	12%	12%	18%	24%	36%	32%
Extremely severe (ES)	13%	2%	2%	4%	12%	20%	40%
S+ES	44%	14%	14%	22%	36%	56%	72%
Mean (10 ³ km ³)	240.7	186.5	173.8	208	242.5	292	325
Standard deviation (10 ³ km ³)	111.2	85.9	84.06	91	93.9	92	81
Median (10 ³ km ³)	245	190	166.2	201	244.3	342	369

Rekonstrukcja stopnia surowości zim dla Bałtyku zachodniego

- Dla Bałtyku zachodniego Koslowski i Glaser (1995) dokonali rekonstrukcji stopnia surowości zim w okresie MEL na podstawie zakumulowanej grubości lodu dla 6 stacji.
- Stosując taką samą metodę klasyfikacji surowości zim opartą na skumulowanej grubości lodu obliczono procentowy udział zim o różnej surowości w symulacji referencyjnej (v0) i z obniżoną temperaturą o: 1, 2, 3 i 4 °C.

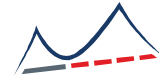
Procentowy udział zim o różnym stopniu surowości w zachodnim Bałtyku wg rekonstrukcji Koslowski i Glaser, 1995 oraz modelowanych za pomocą PM3D: v0 - symulacja referencyjna, v1, v2, v3, v4 symulacje z obniżoną temperaturą o 1, 2, 3 i 4 °C. Avg, Var – średnia wartość i wariancja zimowego

indeks lodu	Reconstruction (Koslowski-Glaser, 1995)	Model version (temperature reduction)				
	1761-1860	v0	V1 (-1°C)	V2 (-2°C)	V3 (-3°C)	V4 (-4°C)
Number of seasons	100	50	50	50	50	50
Weak	44%	86%	82%	68%	48%	34%
Moderate	24%	6%	8%	18%	26%	30%
Strong	32%	8%	10%	14%	26%	36%
Avg	0.71	0.13	0.23	0.32	0.58	0.86
Var	0.86	0.37	0.56	0.61	0.89	1.01

Koslowski G, Glaser R (1995) *Reconstruction of the ice winter severity since 1701 in the Western Baltic*. Climatic Change 31:79-98

Podsumowanie

- Walidację modelu PM3D sprzężonego z modelem lodu morskiego przeprowadzono dla długiego okresu (1958-2007) obejmującego 5 dekad. Wyniki symulacji maksymalnego zasięgu lodów w poszczególnych latach wykazały bardzo dużą zgodność otrzymanych wyników z obserwacjami.
- Porównanie wyników symulacji przeprowadzonych w przypadku średniej temperatury powietrza obniżonej o 2°C wykazało duże podobieństwo pomiędzy modelowanymi i zrekonstruowanymi przez Seina i Palosuo (1996) maksymalnymi zasięgami lodu dla końcowych 100 lat okresu MEL (1761-1860).
- Wyniki symulacji pozwoliły na zastosowanie metody klasyfikacji surowości zim opartej na skumulowanej grubości lodu i porównanie ich z rekonstrukcją (Kosłowski i Glaser, 1995) przeprowadzoną dla Bałtyku zachodniego dla okresu MEL. Największą zgodność uzyskano w przypadku symulacji, w których średnią temperaturę powietrza obniżono o 3 - 4 °C.



MOST WIEDZY
mostwiedzy.pl

Open Research Data

Projekt

*„MOST DANYCH. Multidyscyplinarny Otwarty System Transferu Wiedzy
– etap II: Open Research Data”*

współfinansowany jest

z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego

w ramach Programu Operacyjnego Polska Cyfrowa na lata 2014-2020



Unia Europejska
Europejski Fundusz
Rozwoju Regionalnego

