



Характеристики облачности в Арктике по данным глобальных климатических моделей и спутниковых наблюдений при разной концентрации морского льда.

Нарижная А.И.¹, Чернокульский А.В.^{1,2}, Мохов И.И.^{1,4}, Тимажев А.В.¹, Семенов В.А.¹

¹ Институт физики атмосферы имени А. М. Обухова Российской академии наук (ИФА РАН), Москва

² Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова (МГУ), Москва



alex.narizhnaya@ifaran.ru

v Всероссийская конференция с международным участием

Турбулентность, динамика атмосферы и климата

Посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова

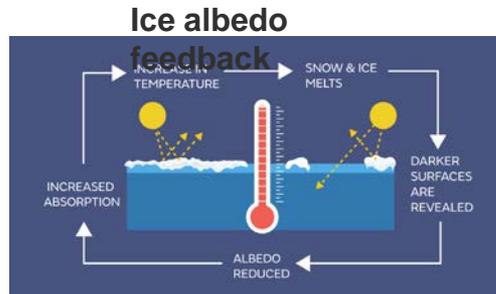
19–21 ноября 2024 г. Москва



Мотивация: роль облаков в полярных регионах

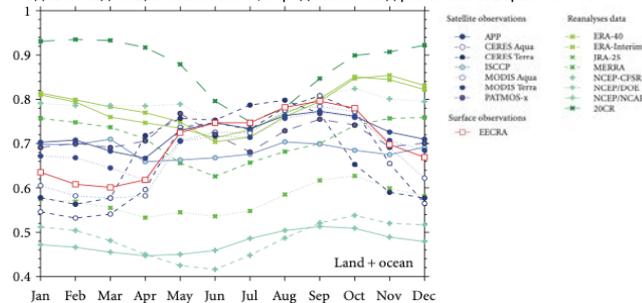
- Темпы потепления разнятся по всей планете, но особенно заметны они в Арктическом регионе, который в последние десятилетия теплеет в 2-3 раза быстрее, чем вся планета (так называемое «**полярное усиление**»). Изменения температуры сопровождаются уменьшением площади и толщины морского льда, повышением влажности воздуха, изменением циркуляции и облачности.
- **Облачность** играет одну из центральных ролей в арктических обратных связях, способствуя полярному усилению (Vavrus, 2004; Taylor et al., 2013; Boeke and Taylor, 2016; Liptak and Strong, 2016)
- В течение большей части года **облака** в Арктике обладают **отепляющим эффектом**, особенно зимой. Чувствительность радиационного воздействия облаков в Арктике составляет около 1 Вт м^{-2} на 1% облачности (Curry et al., 1996; Shupe and Inrieri, 2004; Boeke and Taylor, 2016; Huang et al., 2017)
- Облачный покров в Арктике претерпевает **заметные изменения**, отражающие перемены не только в количестве облаков, но и в сложной динамике их типов (Esau I. et al. 2023; Chernokulsky et al., 2012)
- Наибольшие **расхождения** между облачными данными наблюдаются **над полярными областями** (Chernokulsky and Mokhov, 2010, 2012; Shtubenrauch et al., 2013)

Taylor et al., 2013



<https://www.metoffice.gov.uk/research/climate/cryosphere-oceans/sea-ice/index>

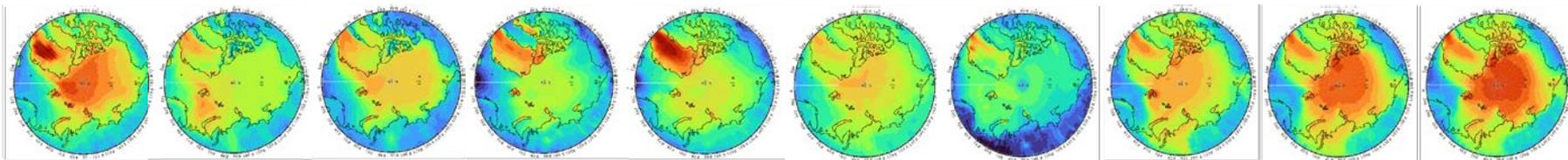
Годовой ход общей облачности, осредненной над регионом севернее 60° N.



Chernokulsky A., and Mokhov I., 2012

Цель

Анализ облачно-радиационных характеристик над арктическим регионом на основе глобальных климатических моделей в сравнении со спутниковыми наблюдениями.



Данные

Данные моделирования

CMIP6 			
ACCESS-CM2	CMCC-CM2-SR5	GFDL-ESM4	MPI-ESM1-2-LR
ACCESS-ESM1-5	CMCC-ESM2	GISS-E2-1-G	MRI-ESM2-0
BCC-CSM2-MR	CNRM-CM6-1	GISS-E2-1-H	NESM3
BCC-ESM1	CNRM-CM6-1-HR	HadGEM3-GC31-LL	NorCPM1
CanESM5	E3SM-1-0	INM-CM4-8	UKESM1-0-LL
CAS-ESM2-0	E3SM-2-0	INM-CM5-0	
CESM2	E3SM-2-0-NARRM	IPSL-CM6A-LR	
CESM2-FV2	FGOALS-f3-L	KIOST-ESM	
CESM2-WACCM-FV2	FIO-ESM-2-0	MIROC6	
CMCC-CM2-HR4	GFDL-CM4	MPI-ESM1-2-HAM	

Experiment: historical [35 models]

Arctic CORDEX
AWI-HIRHAM5
CCCma-CanRCM4
DMI-HIRHAM5
MOHC-HadRM3P
SMHI-RCA4-SN
SMHI-RCA4
ULg-MAR36
UQAM-CRCM5-SN

[8 models]

Спутниковые данные



CERES

Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) Energy Balanced and GEO-Enhanced TOA, Within-Atmosphere and Surface Fluxes, Clouds and Aerosols Daily Terra-Aqua Edition4A.

CERES data is based on observations from 11 instruments located on several satellites (Terra, Aqua, Suomi National Polar-Orbiting Partnership (SNPP), TRMM, and NOAA-20 spacecraft) [Loeb et al., 2018] which provides a total of 25 unique input data sources of cloud-radiation parameters (here we use longwave and shortwave radiation fluxes, cloud score form low-, middle- and high-level clouds).



Время: 2001-2014 (для CMIP6)

ΔT : ежемесячные данные

Регион: Арктика, $>65^\circ$ с.ш.

Все данные билинейно интерполированы на сетку $0.5^\circ \times 0.5^\circ$

2 Сезона

JFM

(Jan-Feb-Mar)

JAS

(Jul-Aug-Sep)

Сравнительный анализ проводился для двух сезонов: холодного (месяцы с января по март - JFM) и теплого (месяцы с июля по сентябрь - JAS) для регионов Северного Ледовитого океана за период с 1 января 2001 по 31 декабря 2014 г. (общий период для спутниковых данных CERES и экспериментов моделей CMIP6).

Параметры

Переменные:

- ☑ Количество облаков (CF – cloud fraction, %)
- ☑ Длинноволновая и коротковолновая радиации (LWR, SWR, Вт м⁻²)
- ☑ Облачно-радиационный эффект (CRE, Вт м⁻²)
- ☑ Концентрация льда (ICE, %)

Cloud Radiation Effect, W m⁻² (CRE)

Положительные значения CRE означают тепляющий эффект облаков по сравнению с безоблачной атмосферой, в то время как охлаждающий эффект облаков представлен отрицательными значениями CRE

Cloud-radiative effect (CRE) approach (following Ramanathan et al., 1989, as well as Allan R. P., 2011, Barrientos-Velasco C. et al., 2022, etc.)

Net Cloud Radiative Effect (CRE_{net})

$$CRE_{net} = CRE_{swr} + CRE_{lwr}$$

SWR – shortwave radiation

LWR – longwave radiation

↓ – downward flux

Shortwave and longwave cloud-radiation effects

$$CRE_{sw} = (SW_{\downarrow AS} - SW_{\uparrow AS}) - (SW_{\downarrow CS} - SW_{\uparrow CS})$$

AS – all sky

$$CRE_{lw} = (LW_{\downarrow AS} - LW_{\uparrow AS}) - (LW_{\downarrow CS} - LW_{\uparrow CS})$$

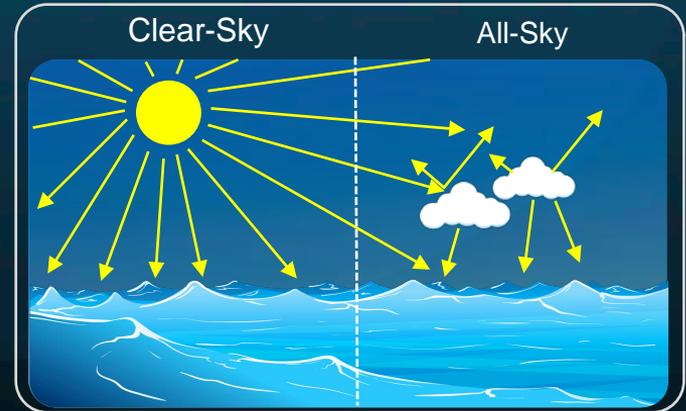
CS – clear sky

Время: 2001-2014 (для CMIP6)

ΔT: ежемесячные данные

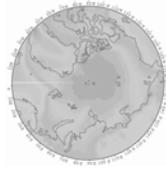
Регион: Арктика, >65 ° с.ш.

Все данные билинейно интерполированы на сетку 0.5 ° × 0.5 °



Методы

- Карты: демонстрируют пространственное распределение выбранных параметров по арктическому региону.

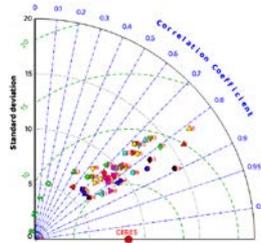


- Бокс-вискер диаграммы: демонстрируют межгодовое распределение параметров (CLT, радиационных потоков и CRE).

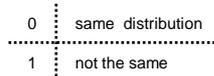


* Цветом отмечены значения в диапазоне 5-95-го перцентилей. Линия между ними отображает медиану распределения.

- Диаграммы Тейлора: показывают, какая из нескольких климатических моделей наиболее реалистично имитирует пространственное распределение параметров по сравнению с наблюдениями.



- Тест Колмогорова-Смирнова (двухвыборочный K-S тест): используется для оценки статистической значимости различий выборок среднегодовых и сезонных значений, осредненных над арктическим регионом, между моделями и данными CERES с целью выявления наиболее успешных моделей.



* Распределение на 10-процентном уровне значимости.

Различная концентрация морского льда

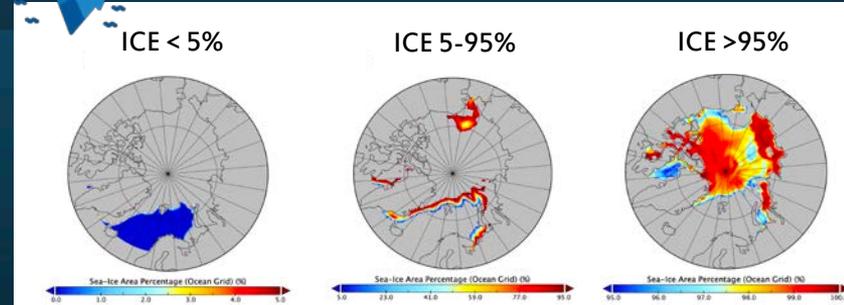
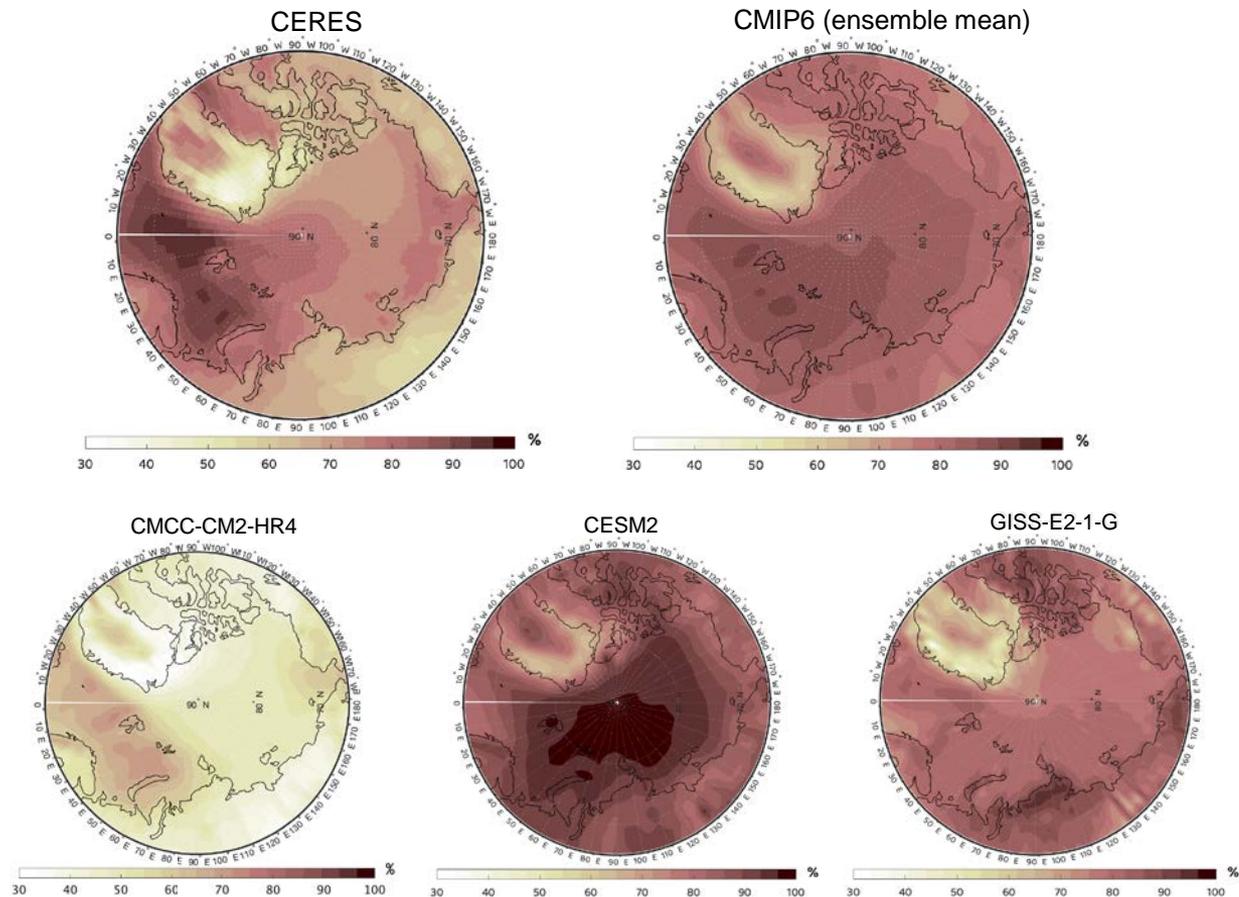


Рисунок: Пример средних за зиму (JFM) значений площади морского льда определенной концентрации по данным модели CMCC-ESM2.

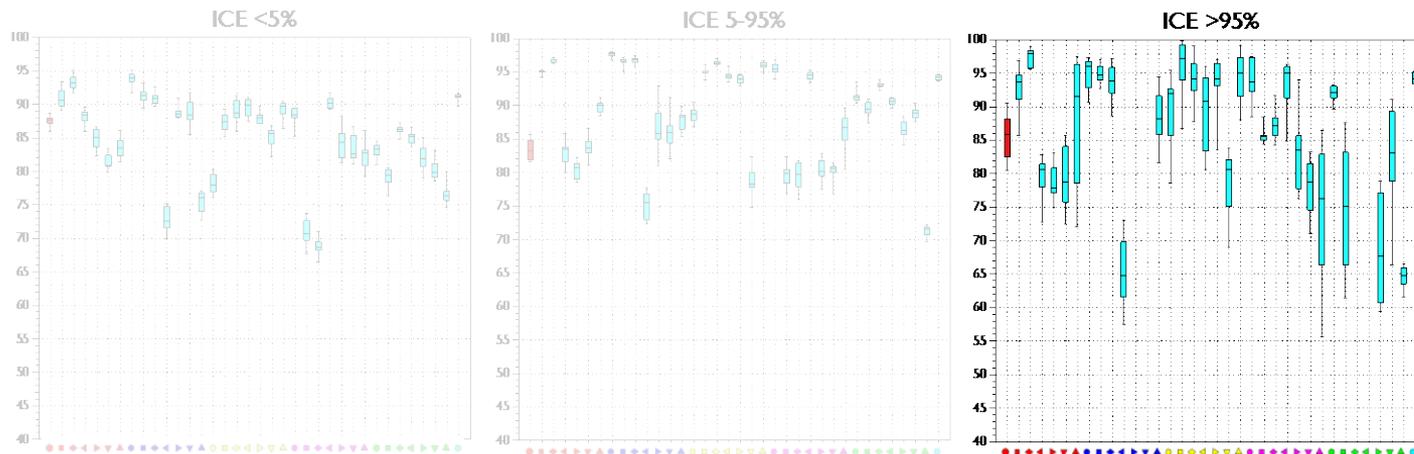
* Для подобного анализа данные рассчитывались только для 'морской' атмосферы, без учета континентов.

I. Балл облачности (CF, %): карты среднегодовых значений, осредненных по Арктическому региону, 2001-2010 гг.

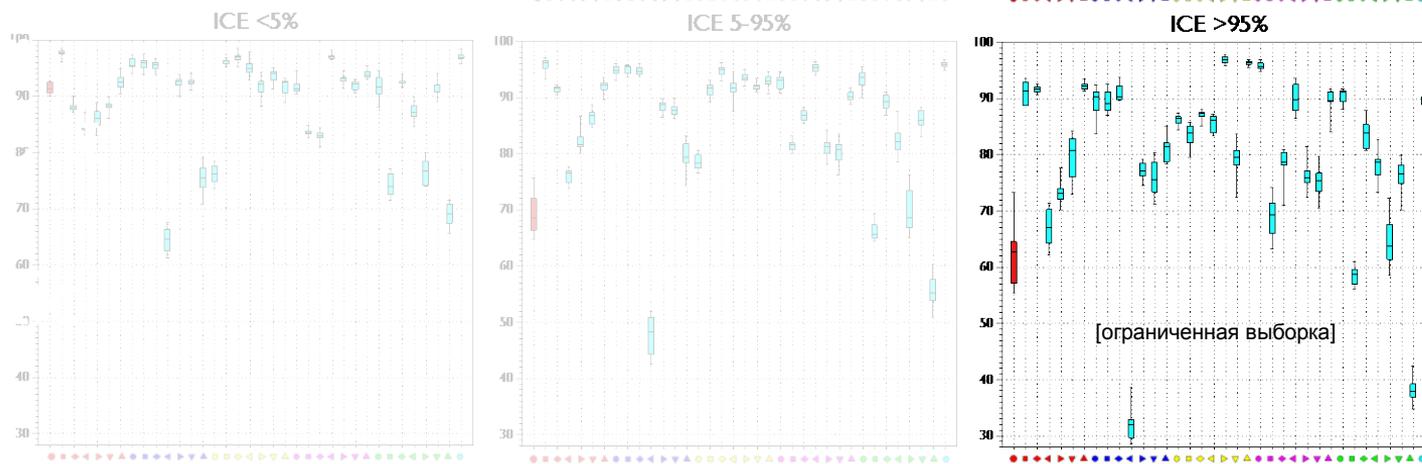


Балл облачности, % (2001-2010) – Бокс-плоты межгодового распределения сезонных средних значений для различных ледовых условий.

ЗИМА



ЛЕТО

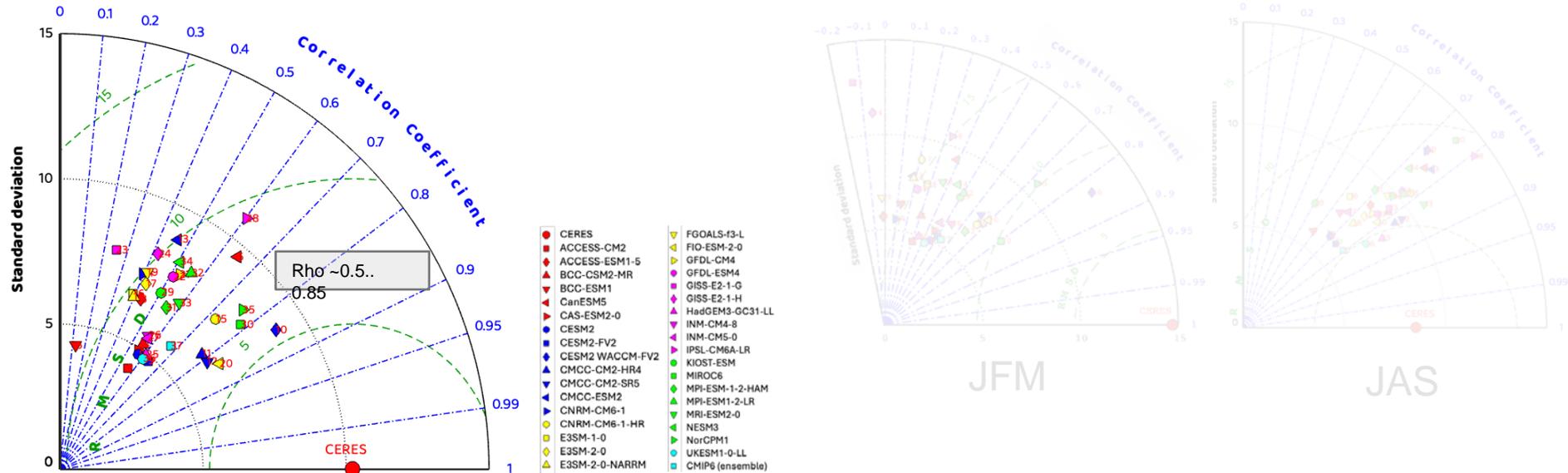


- CERES
- ACCESS-CM2
- ◆ ACCESS-ESM1-5
- ▲ BCC-CSM2-MR
- ▼ BCC-ESM1
- ▲ CanESM5
- ▼ CAS-ESM2-0
- CESM2
- CESM2-FV2
- ◆ CESM2-WACCM-FV2
- ▲ CMCC-CM2-HR4
- ▼ CMCC-CM2-SR5
- ▲ CMCC-ESM2
- ▼ CNRM-CM6-1
- ▲ CNRM-CM6-1-HR
- E3SM-1-0
- E3SM-2-0
- ◆ E3SM-2-0-NARRM
- ▲ FGOALS-f3-L
- ▼ FIO-ESM-2-0
- ▲ GFDL-CM4
- ▼ GFDL-ESM4
- GISS-E2-1-G
- ◆ GISS-E2-1-H
- ▲ HadGEM3-GC31-LL
- ▼ INM-CM4-8
- ▲ INM-CM5-0
- ▼ IPSL-CM6A-LR
- KIOST-ESM
- ◆ MIROC6
- ▲ MPI-ESM1-2-HAM
- ▼ MPI-ESM1-2-LR
- MRI-ESM2-0
- ◆ NESM3
- ▲ NorCPM1
- ▼ UKESM1-0-LL

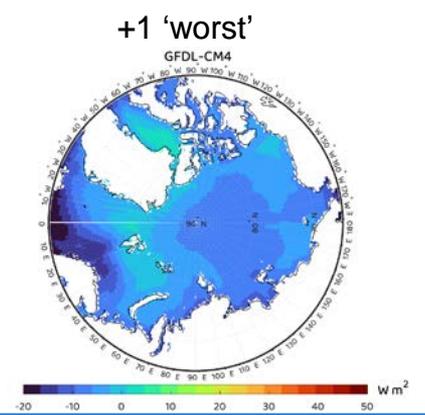
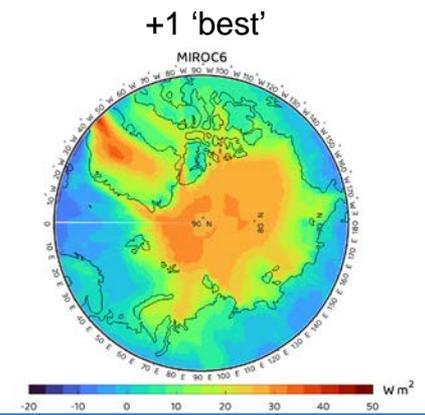
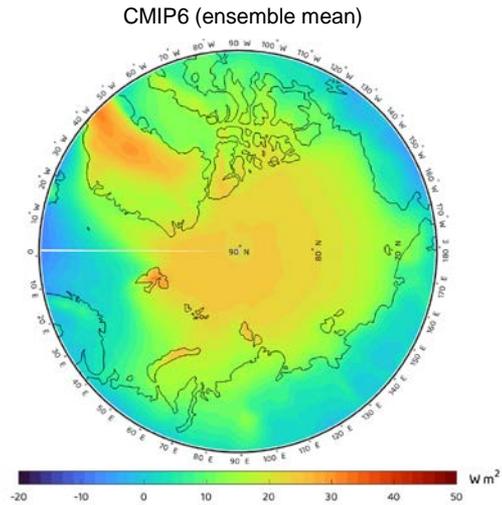
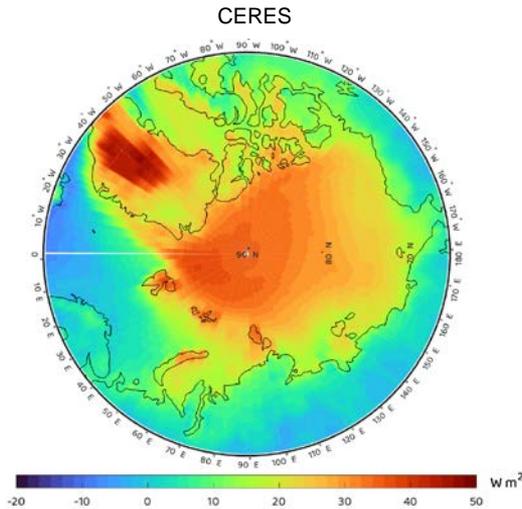


I. Балл облачности, % – Диаграммы Тейлора среднегодовых значений

CMIP6

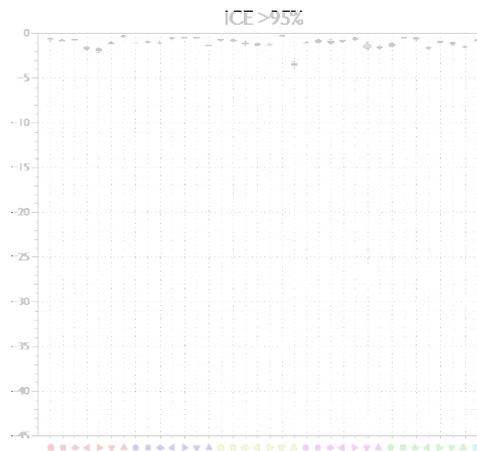
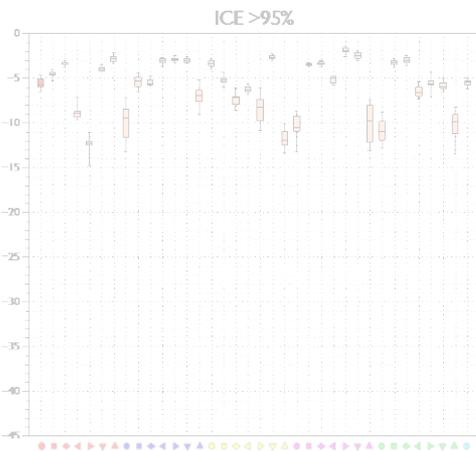
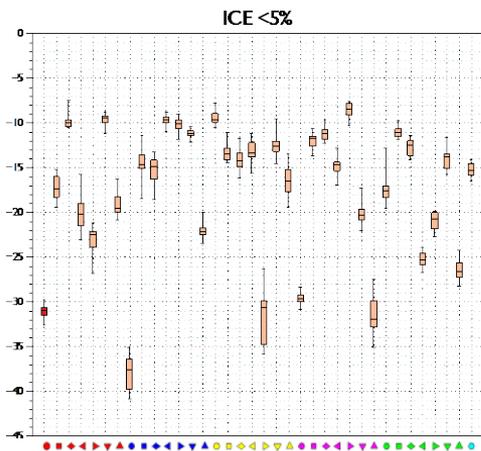


Диаграммы Тейлора, характеризующие степень соответствия **балла облачности** (CF, %) над Арктическим регионом, полученного по ансамблям климатических моделей **CMIP6** (исторический сценарий) и спутниковым данным **CERES** за период 2001-2014 г. Радиальная координата характеризует пространственное стандартное отклонение CF, % (Std); угловая координата - коэффициент пространственной корреляции поля CF между результатами модельных расчетов и спутниковыми данными (Rho). Зеленая пунктирная линия показывает среднеквадратическое отклонение результатов модельных расчетов относительно соответствующих оценок по спутниковым данным (RMSE).

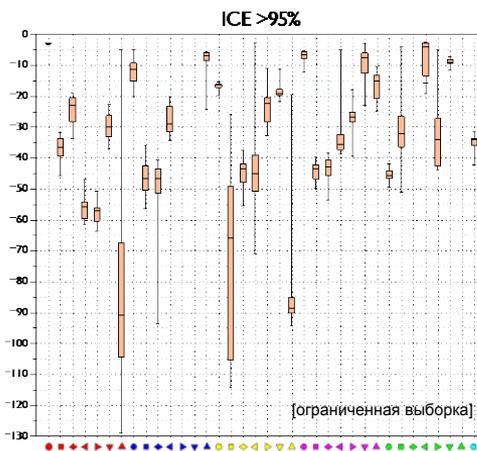
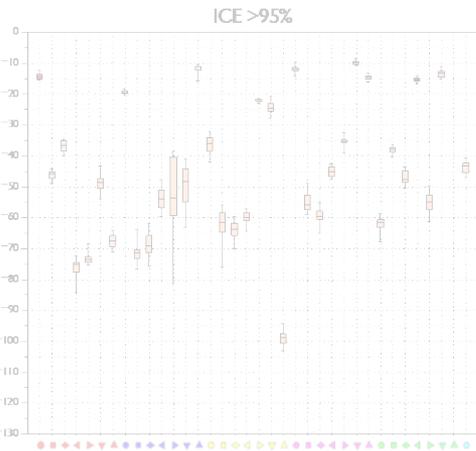
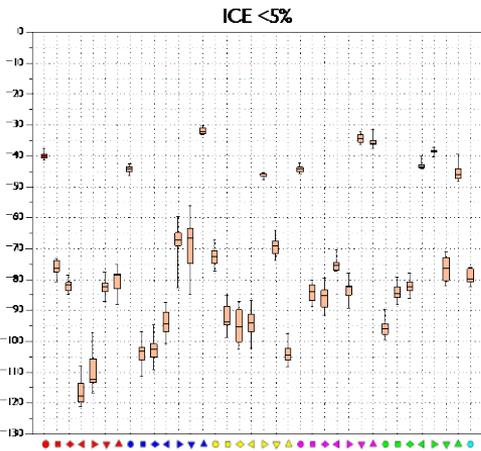


CRE_{SW}, В м² (2001-2014) – Бокс-плоты межгодового распределения сезонных средних значений для различных ледовых условий.

ЗИМА



ЛЕТО

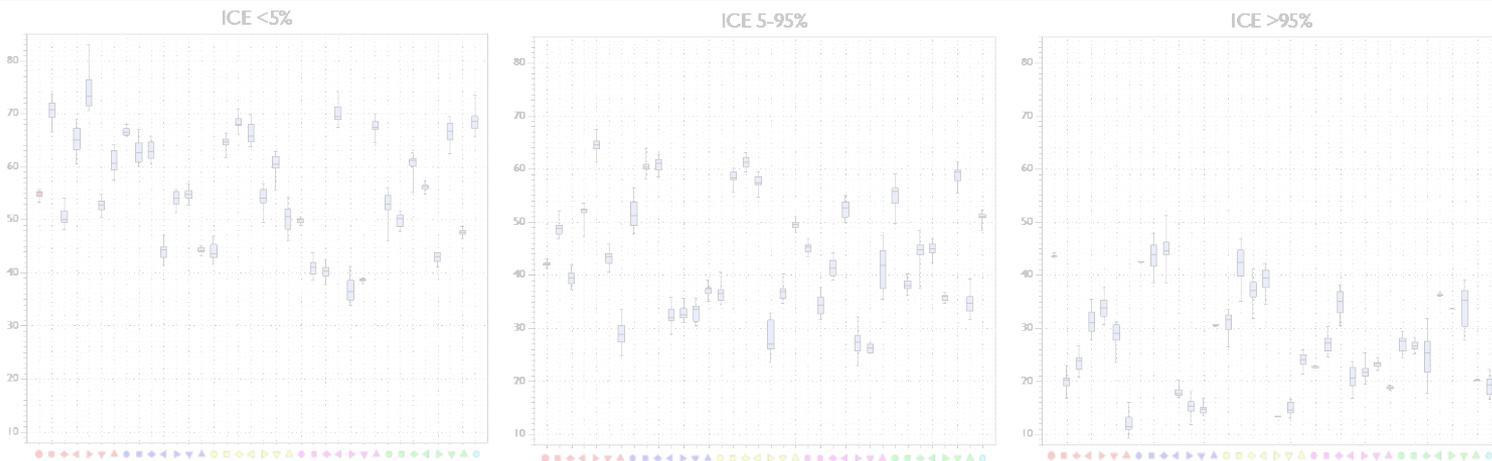


- CERES
- ACCESS-CM2
- ◆ ACCESS-ESM1-5
- ▲ BCC-CSM2-MR
- ▼ BCC-ESM1
- ▲ CanESM5
- CAS-ESM2-0
- CESM2
- CESM2-FV2
- ◆ CESM2-WACCM-FV2
- ▲ CMCC-CM2-HR4
- ▼ CMCC-CM2-SR5
- ▲ CMCC-ESM2
- CNRM-CM6-1
- CNRM-CM6-1-HR
- E3SM-1-0
- ◆ E3SM-2-0
- ▲ E3SM-2-0-NARRM
- ▼ FGOALS-f3-L
- ▼ FIO-ESM-2-0
- GFDL-CM4
- GFDL-ESM4
- GISS-E2-1-G
- ◆ GISS-E2-1-H
- ▼ HadGEM3-GC31-LL
- ▼ INM-CM4-8
- ▼ INM-CM5-0
- IPSL-CM6A-LR
- KIOST-ESM
- MIROC6
- ◆ MPI-ESM-1-2-HAM
- ▲ MPI-ESM1-2-LR
- ▼ MRI-ESM2-0
- ▼ NESM3
- NorCPM1
- UKESM1-0-LL

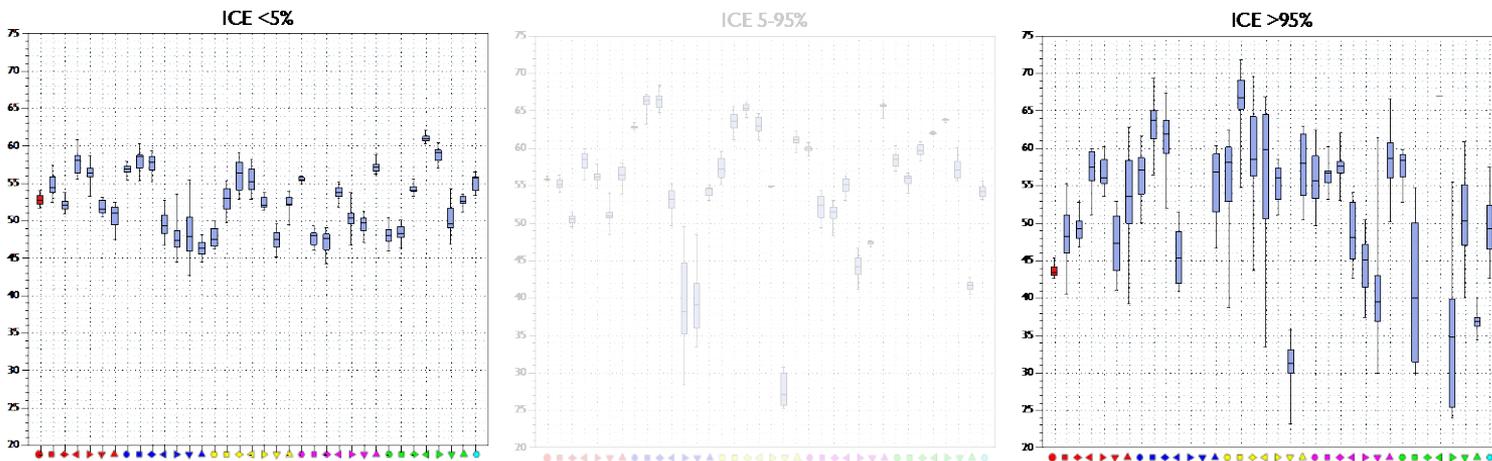


CRE_{LW}, В м² (2001-2014) — Бокс-плоты межгодового распределения сезонных средних значений для различных ледовых условий.

ЗИМА



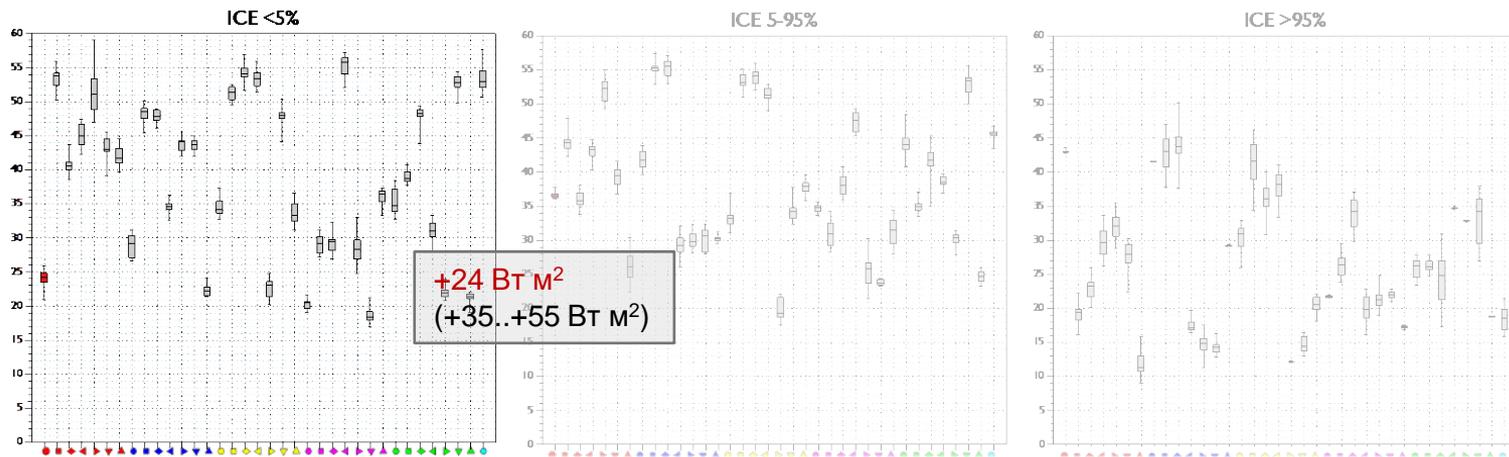
ЛЕТО



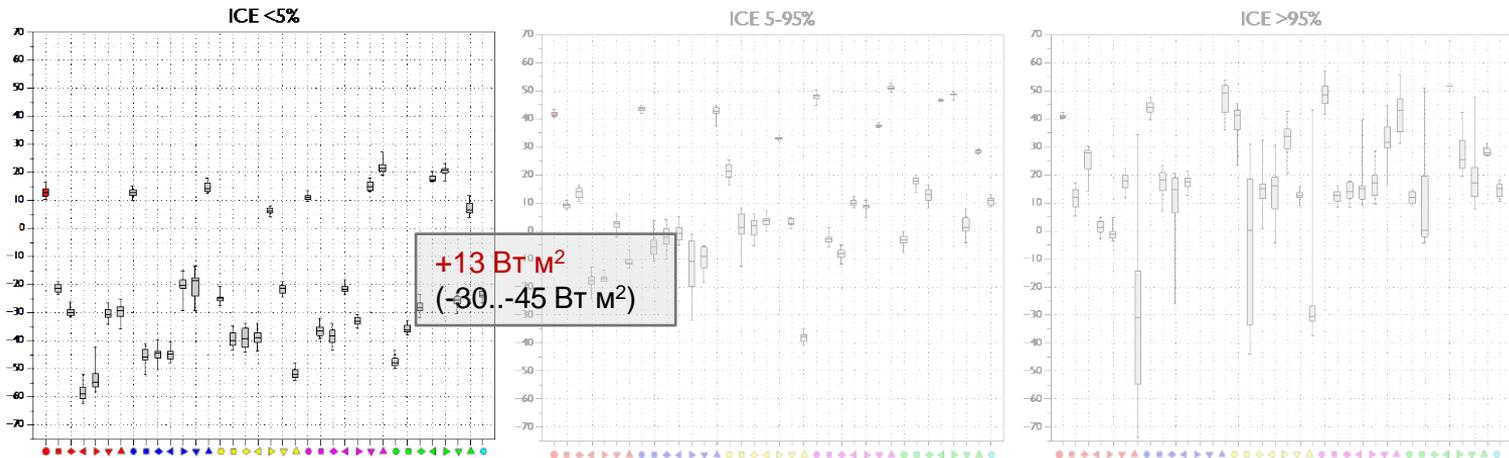
- CERES
- ACCESS-CM2
- ◆ ACCESS-ESM1-5
- ▲ BCC-CSM2-MR
- ▼ BCC-ESM1
- ▲ CanESM5
- ▼ CAS-ESM2-0
- CESM2
- ◆ CESM2-FV2
- ▲ CESM2-WACCM-FV2
- ▼ CMCC-CM2-HR4
- ▲ CMCC-CM2-SR5
- ▼ CMCC-ESM2
- ▲ CNRM-CM6-1
- ▼ CNRM-CM6-1-HR
- E3SM-1-0
- ◆ E3SM-2-0
- ▲ E3SM-2-0-NARRM
- ▼ FGOALS-f3-L
- ▲ FIO-ESM-2-0
- ▼ GFDL-CM4
- ▲ GFDL-ESM4
- ▼ GISS-E2-1-G
- ▲ GISS-E2-1-H
- ▼ HadGEM3-GC31-LL
- ▲ INM-CM4-8
- ▼ INM-CM5-0
- ▲ IPSL-CM6A-LR
- ▼ KIOST-ESM
- MIROC6
- ◆ MPI-ESM-1-2-HAM
- ▲ MPI-ESM1-2-LR
- ▼ MRI-ESM2-0
- ▲ NESM3
- ▼ NorCPM1
- UKESM1-0-LL

CRE_{NET}, В м² (2001-2014) – Бокс-плоты межгодового распределения сезонных средних значений для различных ледовых условий.

ЗИМА



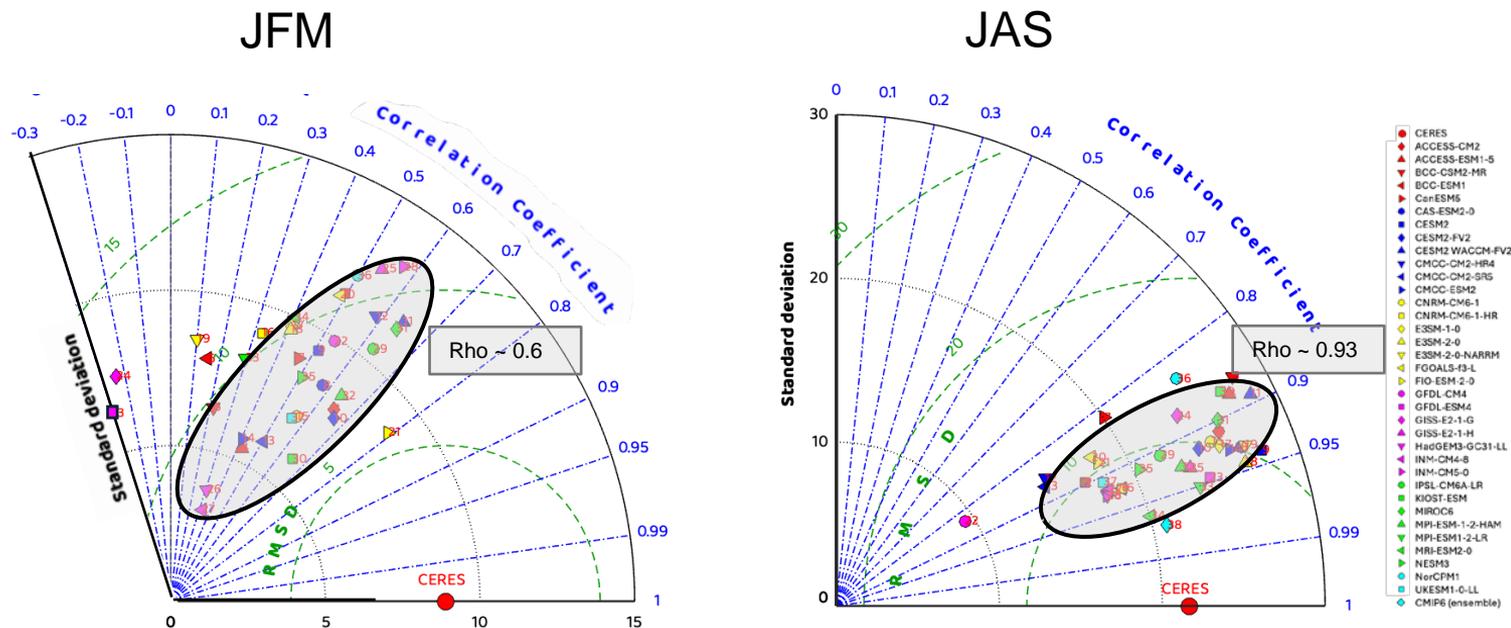
ЛЕТО



- CERES
- ACCESS-CM2
- ◆ ACCESS-ESM1-5
- ▲ BCC-CSM2-MR
- ▼ BCC-ESM1
- ▲ CanESM5
- ▼ CAS-ESM2-0
- CESM2
- ◆ CESM2-FV2
- ▲ CESM2-WACCM-FV2
- ▼ CMCC-CM2-HR4
- ▲ CMCC-CM2-SR5
- ▼ CMCC-ESM2
- ◆ CNRM-CM6-1
- ▲ CNRM-CM6-1-HR
- ▼ E3SM-1-0
- ◆ E3SM-2-0
- ▲ E3SM-2-0-NARRM
- ▼ FGOALS-f3-L
- ▲ FIO-ESM-2-0
- ▼ GFDL-CM4
- ◆ GFDL-ESM4
- ▲ GISS-E2-1-G
- ▼ GISS-E2-1-H
- ◆ HadGEM3-GC31-LL
- ▲ INM-CM4-8
- ▼ INM-CM5-0
- ◆ IPSL-CM6A-LR
- ▲ MIROC6
- ▼ MIROC6
- ◆ MPI-ESM-1-2-HAM
- ▲ MPI-ESM1-2-LR
- ▼ MRI-ESM2-0
- ◆ NESM3
- ▲ NorCPM1
- ▼ UKESM1-0-LL



II. CRE_{NET} – Диаграммы Тейлора сезонных средних значений



Диаграммы Тейлора, характеризующие степень соответствия **суммарного облачно-радиационного эффекта** (CRE_{net}) над Арктическим регионом, полученного по ансамблям климатических моделей **CMIP6** (исторический сценарий), спутниковым данным **CERES** для зимнего (JFM) и летнего (JAS) сезонов за период 2001-2014 гг. Радиальная координата характеризует пространственное стандартное отклонение CRE_{net} ($Вт м^2$), угловая координата - коэффициент пространственной корреляции поля CRE_{net} между результатами модельных расчетов и спутниковыми данными. Зеленая пунктирная линия показывает среднеквадратическое отклонение результатов модельных расчетов относительно соответствующих оценок по спутниковым данным.

Выделение «лучших» моделей

Диаграммы Тейлора

(Отобраны модели, наилучшим образом согласующиеся с CERES в оценке пространственного распределения долгопериодных средних характеристик облачности).

Топ-5 моделей для CLT (среднегодовые значения): CMCC-CM2-HR4, CMCC-ESM2, CanESM5, FIO-ESM-2-0.

Топ-5 моделей для CRE_{NET} (среднегодовые значения): CNRM-CM6-1-HR, CNRM-CM6-1, E3SM-2-0-NARRM, E3SM-2-0, MPI-ESM-1-2-HAM, MPI-ESM1-2-LR.

Тест Колмогорова-Смирнова

(Отобраны модели, наилучшим образом согласующиеся с CERES в оценке межгодовой изменчивости средних облачных характеристик в Арктике).

CRE

CRE_{NET} (JAS): GISS-E2-1-G, IPSL-CM6A-LR.

CRE_{NET} (JFM): BCC-ESM1, MRI-ESM2-0, NESM3.

CRE_{SW} (JAS): ACCESS-CM2, CNRM-CM6-1-HR, GISS-E2-1-G, HadGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR, MIROC6.

CRE_{SW} (JFM): ACCESS-ESM1-5, BCC-CSM2-MR, CAS-ESM2-0, E3SM-1-0, GISS-E2-1-G, MPI-ESM-1-2-HAM.

CRE_{I,W} (JAS): GISS-E2-1-H.

CLT_W (JFM): BCC-ESM1, CESM2-FV2, MRI-ESM2-0, NESM3.

CLT (JAS): CanESM5, MRI-ESM2-0, NESM3.

Выводы

- Проведен сравнительный анализ облачно-радиационных характеристик по данным моделирования (CMIP6) и спутниковым наблюдениям CERES над высокоширотными арктическим регионом (севернее 65° с.ш.). Анализ проводился для холодного и теплого сезонов, для различных ледовых условий, в зависимости от концентрации морского льда. Рассчитан облачно-радиационный эффект (CRE, Вт м²), который описывает влияние облаков на атмосферные радиационные потоки и определяется как разница между радиационными потоками в облачной и безоблачной атмосфере.
 - Показано, что в целом, модели переоценивают балл общей облачности (CLT) над арктическим регионом в сравнении с данными наблюдений. Модели показывают более сильную межгодовую изменчивость (как зимой, так и летом, как для SWR, так и для LWR, и как над льдом, так и над водой), чем наблюдения. **Наибольшие разногласия** обнаружены в зимний сезон как в CLT, так и CRE, причем над поверхностью с максимальной сплоченностью морского льда (ICE>95%). **Наилучшее согласие** между спутниковыми и модельными данными получено для CRE_{LW} над открытой водой (<5%) при низкой сплоченности морского льда в летний период (разброс между данными составил 16 Вт м²).
 - Было обнаружено, что согласно и модельным данным и данным наблюдений, облака в Арктике способствуют **охлаждению** нижней атмосферы Арктики летом и обладают **отепляющим** воздействием зимой: значения Net CRE согласно наблюдениям составили 24 Вт м² (+35..50 Вт м² в моделях) зимой и 13 Вт м² (-30..-45 Вт м² в моделях) летом.
 - По итогу анализа были отобраны «лучшие» модели по критериям их согласованности со спутниковыми данными наблюдений CERES при оценке пространственного распределения выбранных характеристик, а также при оценке межгодовой изменчивости средних характеристик балла облачности и облачно-радиационных эффектов в Арктике: среди них CMCC-CM2-HR4, CMCC-ESM2, CanESM5, CNRM-CM6-1-HR, CNRM-CM6-1, E3SM-2-0-NARRM.
-  *Планы на будущее: проанализировать согласованность модельных данных и данных наблюдений в зависимости от модельных облачных схем, а также сделать акцент на водо- и ледо-запасе облаков.*



Спасибо за внимание!

alex.narizhnaya@ifaran.ru





The Chamber Of Secrets

Model data

CMIP6 <https://wcrp-cmip.org/cmip-data-access/>

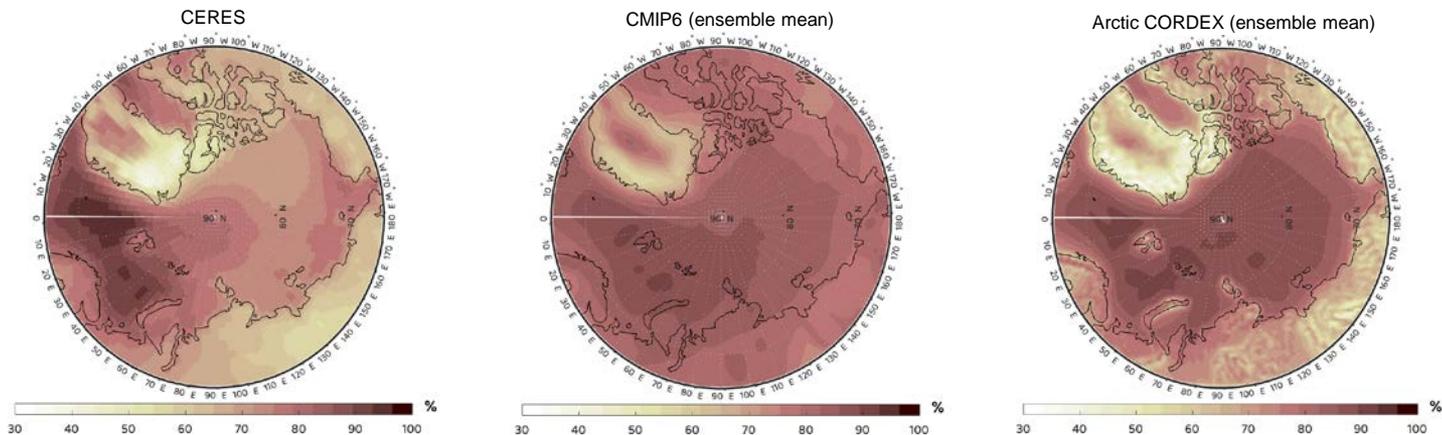
No.	Model name	Institution ID	Country	Initial grid resolution (lon x lat)	Initial grid resolution (lon x lat)	Key references
1	ACCESS-CM2	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO): CSIRO-ARCCSS	Australia	1.875° x 1.25°	144x192	Bi et al. (2012)
2	ACCESS-ESM1-5	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO): CSIRO-ARCCSS	Australia	1.875° x 1.25°	144x192	Law et al. (2017)
3	BCC-CSM2-MR	Beijing Climate Center (BCC)	China	1.125° x 1.125°	160x320	Wu et al. (2019)
4	BCC-ESM1	Beijing Climate Center (BCC)	China	1.125° x 1.125°	160x320	Wu et al. (2019)
5	CanESM5	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Environment and Climate Change Canada (CCCma)	Canada	2.8° x 2.8°	64 x 128	Swart et al. (2019)
6	CAS-ESM2-0	Chinese Academy of Sciences (CAS)	China	1.4° x 1.4°	128 x 256	Zhu et al. (2023)
7	CESM2	National Center for Atmospheric Research (NCAR), Climate and Global Dynamics Laboratory, Boulder, USA	USA	1.25° x 0.94°	288 x 192	Rodgers et al. (2021)
8	CESM2-FV2	National Center for Atmospheric Research (NCAR)	USA	2.5° x 1.9°	144 x 96	Rodgers et al. (2021)
9	CESM2-WACCM-FV2	National Center for Atmospheric Research (NCAR)	USA	2.5° x 1.9°	144 x 96	Rodgers et al. (2021)
10	CMCC-CM2-HR4	Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC)	Italy	1.25° x 0.94°	288 x 192	Scozzimarro et al.,(2022)
11	CMCC-CM2-SR5	Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC)	Italy	1.25° x 0.94°	288 x 192	Cherchi et al. (2019)
12	CMCC-ESM2	Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC)	Italy	1.25° x 0.94°	288 x 192	Cherchi et al. (2019)
13	CNRM-CM6-1	Centre National de Recherches Meteorologiques (CNRM), Centre Europeen de Recherche et de Formation Avancee en Calcul Scientifique (CERFACS)	France	1.4° x 1.4°	256 x 128	Voltaire et al. (2019)
14	CNRM-CM6-1-HR	Centre National de Recherches Meteorologiques (CNRM), Centre Europeen de Recherche et de Formation Avancee en Calcul Scientifique (CERFACS)	France	0.5° x 0.5°	720 x 360	Voltaire et al. (2019)
15	E3SM-1-0	LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory), ANL (Argonne National Laboratory), BNL (Brookhaven National Laboratory), LANL (Los Alamos National Laboratory), LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory), ORNL (Oak Ridge National Laboratory), PNNL (Pacific Northwest National Laboratory), SNL (Sandia National Laboratories)	USA	1° x 1°	380 x 180	Bader et al.(2019)
16	E3SM-2-0	---	USA	1° x 1°	380 x 180	Rasch et al. (2019); Zhang et al. (2019)
17	E3SM-2-0-NARRM	---	USA	1° x 1°	380 x 180	Tang et al. (2023)
18	FGOALS-f3-L	Chinese Academy of Sciences	China	1.25° x 1°	288 x 180	He et al. (2019)
19	FIO-ESM-2-0	The First Institution of Oceanography	China	1.25° x 0.94°	288 x 192	Song et al. (2019)
20	GFDL-CM4	National Oceanic and Atmospheric Administration	USA	1.25° x 1°	288 x 180	Adcroft et al. (2019)
21	GFDL-ESM4	National Oceanic and Atmospheric Administration	USA	1.25° x 1°	288 x 180	Held et al. (2019)
22	GISS-E2-1-G	NASA Goddard Institute for Space Studies (NASA-GISS)	USA	2.5° x 2°	144 x 90	Kelley et al. (2020)
23	GISS-E2-1-H	NASA Goddard Institute for Space Studies (NASA-GISS)	USA	2.5° x 2°	144 x 90	Kelley et al. (2020)

24	HadGEM3-GC31-LL	Met Office Hadley Centre (MOHC)	UK	2.5° x 1.25°	192 x 144	Williams et al. (2017)
25	INM-CM4-8	Institute for Numerical Mathematics, Russian Academy of Science	Russia	2° x 1.5°	180 x 120	Volodin et al. (2021)
26	INM-CM5-0	Institute for Numerical Mathematics, Russian Academy of Science	Russia	2° x 1.5°	180 x 120	Volodin et al. (2018)
27	IPSL-CM6A-LR	Institut Pierre Simon Laplace (IPSL)	France	2.5° x 1.26°	144 x 143	Boucher et al. (2020)
28	KIOST-ESM	Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST)	Republic of Korea	1.9° x 1.9°	192 x 96	Pak et al. (2021)
29	MIROC6	The University of Tokyo, National Institute for Environmental Studies, and the Japan Agency for Marine Earth Science and Technology	Japan	1.41° x 1.41°	256 x 128	Shiogama et al. (2019)
30	MPI-ESM-1-2-HAM	Max Planck Institute for Meteorology	Germany	1.9° x 1.9°	192 x 96	Neubauer et al. (2019)
31	MPI-ESM1-2-LR	Max Planck Institute for Meteorology	Germany	1.9° x 1.9°	192 x 96	Mauritsen et al. (2019)
32	MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute (MRI)	Japan	1.1° x 1.1°	320 x 160	Yukimoto et al. (2019)
33	NESM3	Nanjing University of Information Science and Technology (NUIST), Nanjing, China	China	1.9° x 1.9°	192 x 96	Cao, J., et al.(2018)
34	NovCM1	Institute for Numerical Mathematics, Russian Academy of Science	Novosibirsk	2.5° x 1.9°	144 x 96	...

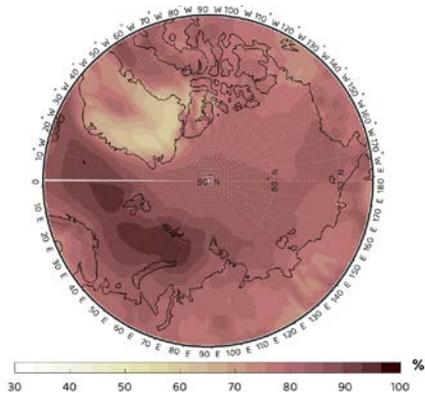
ARCTIC CORDEX <http://www.climate-cryosphere.org/activities/targeted/polar-cordex/arctic>

No	Model Name	Institute	Institution Name	Country	Initial grid resolution (lon x lat.)
1	AWI-HIRHAM5	AWI	Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research	Germany	108 x 119
2	CCCma-CanRCM4	CCCma	CCCma (Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Victoria, BC, Canada)	Canada	116 x 133
3	DMI-HIRHAM5	DMI	Danish Meteorological Institute	Denmark	116 x 133
4	MOHC-HadRM3P	MOHC	Met Office Hadley Centre	UK	116 x 133
5	SMHI-RCA4-SN	SMHI	Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Rosby Centre	Sweden	720 x 50
6	SMHI-RCA4	SMHI	Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Rosby Centre	Sweden	720 x 50
7	ULg-MAR36	ULg	Dpt. Of Geography, University of Liège, Belgium	Belgium	140 x 126
8	UQAM-CRCM5-SN	UQAM	Universite du Quebec a Montreal	France	124x 140

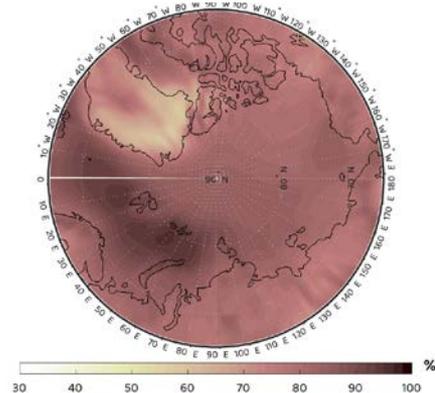
I. Балл облачности (CF, %): карты среднегодовых значений, осредненных по Арктическому региону, 2001-2010 гг.



+ 1 CMIP6 : CMCC-ESM2

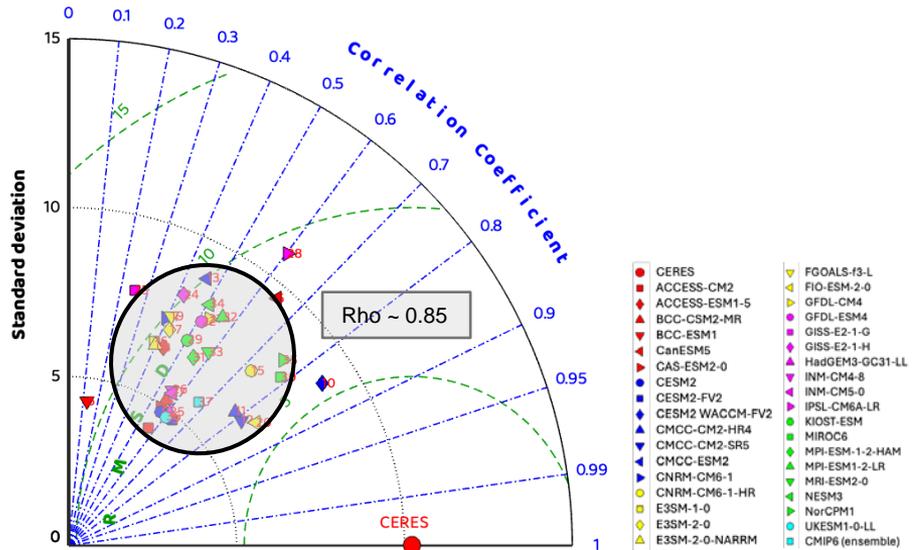


+ 1 CORDEX: Ulg-MAR36

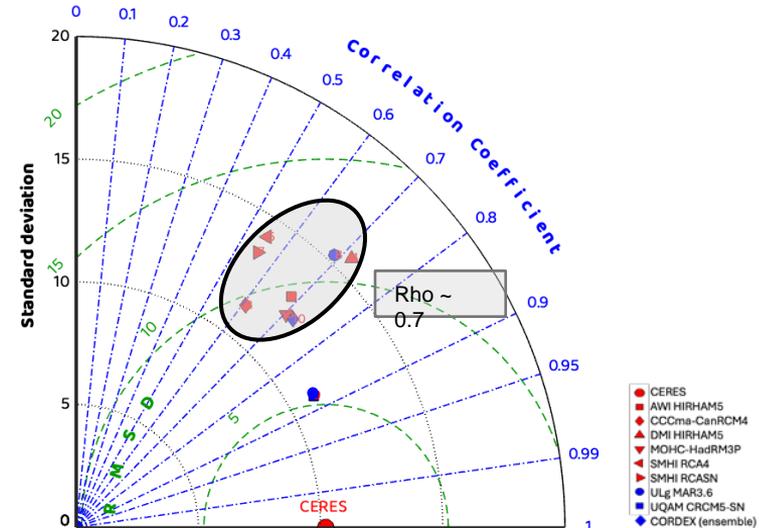


I. Балл облачности, % – Диаграммы Тейлора среднегодовых значений

CMIP6



Arctic CORDEX



Диаграммы Тейлора, характеризующие степень соответствия **балла облачности** (CF, %) над Арктическим регионом, полученного по ансамблям климатических моделей **CMIP6** (исторический сценарий), спутниковым данным **CERES** за период 2001-2014 г. Радиальная координата характеризует пространственное стандартное отклонение CF, % (Std); угловая координата - коэффициент пространственной корреляции поля CF между результатами модельных расчетов и спутниковыми данными (Rho). Зеленая пунктирная линия показывает стандартное отклонение (%) результатов модельных расчетов относительно соответствующих оценок по спутниковым данным (RMSD).

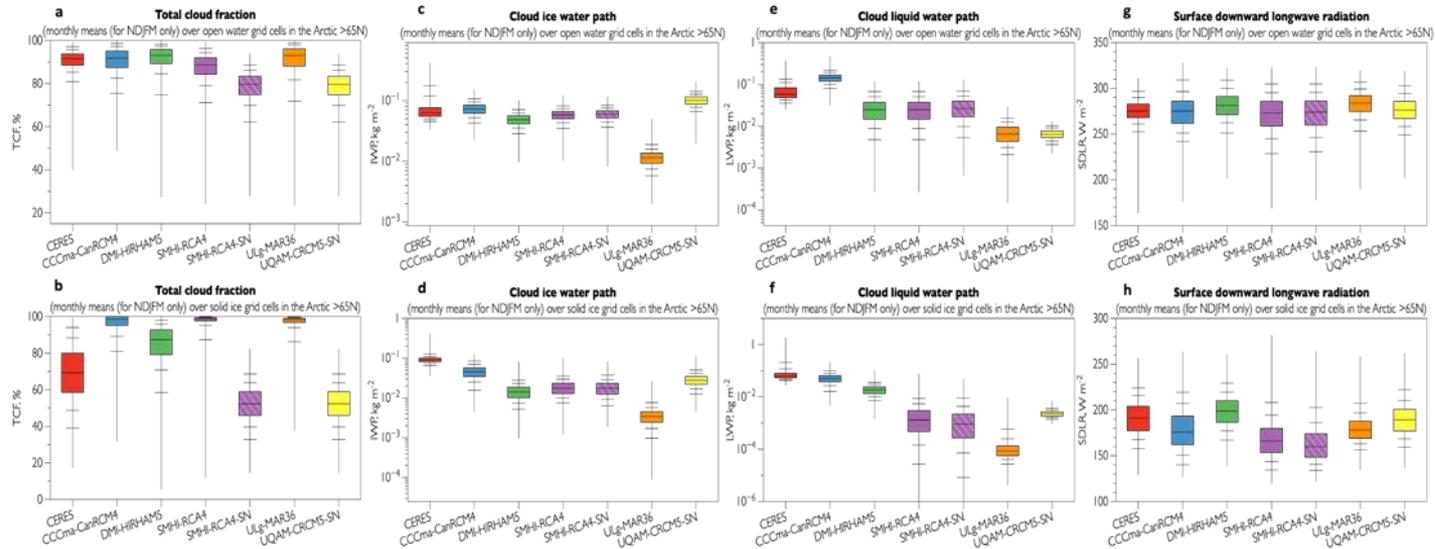


Рисунок 2. Бокс-плоты для TCF (a, b) – total cloud fraction, %; CIWP (c, d) – cloud ice water path, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ и CLWP (e, f) – cloud liquid water path, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$, SDLR (g, h) – surface downward longwave radiation, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ для областей открытой воды (верхняя панель) и сплошного льда (нижняя панель) для различных данных. Цветными рамками показан интерквартильный разброс, горизонтальными отрезками – 2,5, 10, 90 и 97,5 перцентили.

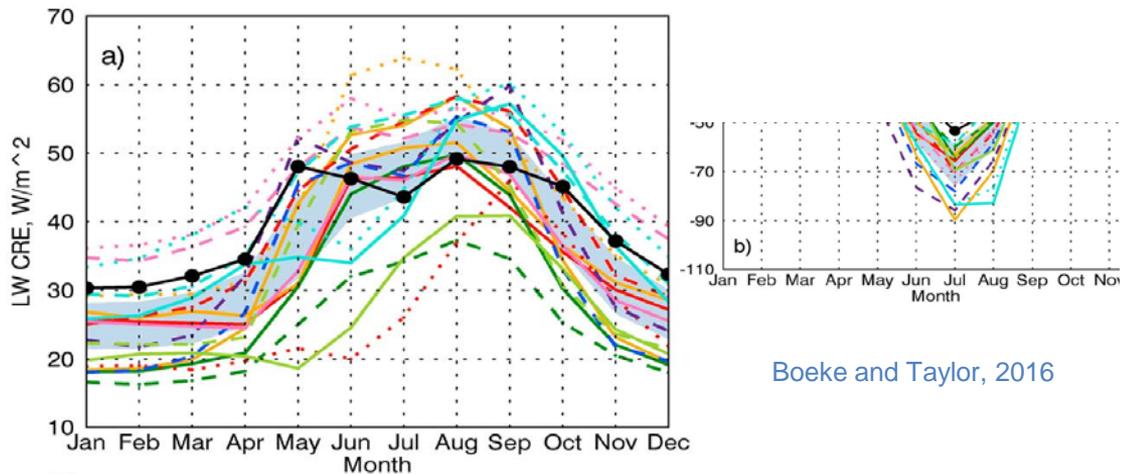
- Обнаружено лучшее согласие между моделями и спутниковыми наблюдениями как для CLWP, так и для CIWP над открытой водой и меньшее согласие над сплошным льдом.
- Данные CERES показывают более высокие значения для CLWP, чем для CIWP (отношение CIWP/CLWP составляет около 0,7 для областей со сплошным льдом и около 0,92 для областей с открытой водой). В целом данные CERES показывают более высокие значения CTWP над областями сплошного льда, в то время как модели отражают обратную картину. Следует отметить, что хотя модели демонстрируют существенное различие между значениями CLWP и CIWP, они хорошо согласуются в показателях длинноволнового нисходящего потока радиации (рис. 2). Предположительно, это свидетельствует о различной зависимости между излучательной способностью облаков (связанной с водозапасом облаков) и длинноволновой поверхностной радиацией в каждой модели.

DATA	Over open water		Over sea ice		
	Cor	Reg,W/m2%	Cor	Reg,W/m2%	
CERES	0,07	0,33	0,90	0,36	TCF
CCCma_CanRCM4	0,21	0,33	0,15	0,54	
DMI_HIRHAM5	0,32	0,33	0,69	0,43	
SMHI_RCA4	-0,14	-0,32	0,12	0,57	
SMHI_RCA4-SN	-0,07	-0,32	0,07	0,60	
Ulg_MAR36	0,24	0,32	-0,04	-0,54	
UQAM_CRCM5-SN	0,45	0,28	0,89	0,28	CIVT
CERES	Cor	Reg*1000, W/kg	Cor	Reg*1000, W/kg	
CCCma_CanRCM4	0,08	0,52	-0,17	-0,88	
DMI_HIRHAM5	0,41	0,80	0,83	0,57	
SMHI_RCA4	0,53	0,46	0,74	0,17	
SMHI_RCA4	0,64	0,32	0,88	0,13	
SMHI_RCA4-SN	0,62	0,33	0,88	0,13	LWP
Ulg_MAR36	0,47	0,07	0,75	0,02	
UQAM_CRCM5-SN	0,70	0,02	0,88	0,01	
CERES	Cor	Reg*1000, W/kg	Cor	Reg*1000, W/kg	
CCCma_CanRCM4	0,20	0,25	-0,13	-0,40	
DMI_HIRHAM5	0,76	0,53	0,84	0,30	
SMHI_RCA4	0,81	0,29	0,78	0,10	IWP
SMHI_RCA4	0,80	0,11	0,81	0,01	
SMHI_RCA4-SN	0,80	0,11	0,78	0,01	
Ulg_MAR36	0,81	0,03	0,47	0,00	
UQAM_CRCM5-SN	0,88	0,02	0,88	0,01	
CERES	Cor	Reg, W/kg	Cor	Reg, W/kg	
CCCma_CanRCM4	-0,19	-0,27	0,80	0,27	
DMI_HIRHAM5	0,48	0,17	0,69	0,08	
SMHI_RCA4	0,49	0,21	0,86	0,12	
SMHI_RCA4-SN	0,42	0,22	0,87	0,12	
Ulg_MAR36	0,01	0,04	0,73	0,02	
UQAM_CRCM5-SN	0,62	0,37	0,84	0,15	

Таблица 3. Мedianные значения характеристик облачности для различных районов Северного Ледовитого океана за период с ноября по март.

Мотивация: роль облаков в полярных регионах (3)

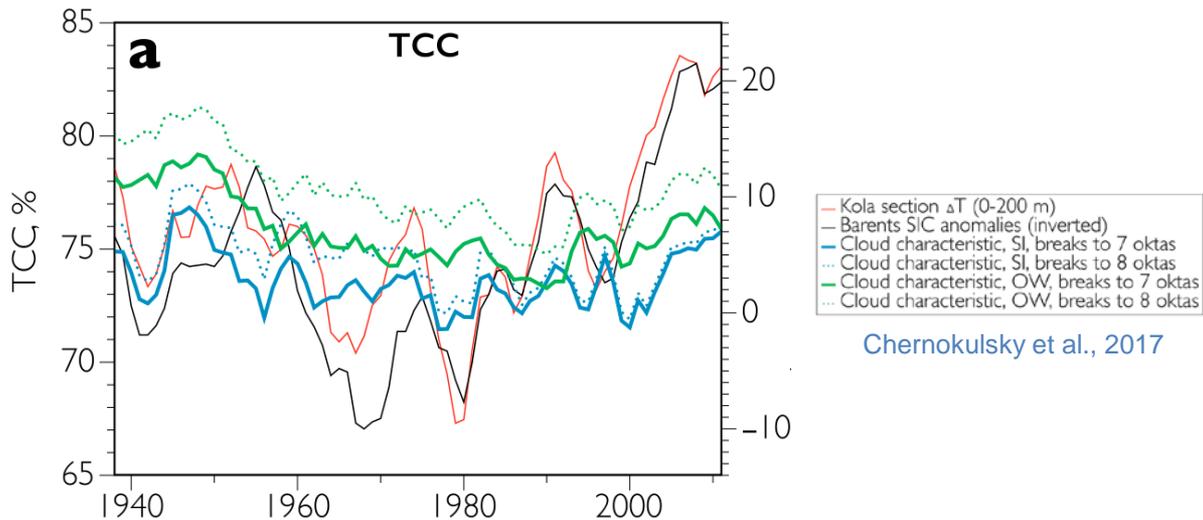
- В течение большей части года облака в Арктике обладают тепляющим эффектом, особенно зимой. Чувствительность радиационного воздействия облаков в Арктике составляет около 1 Вт м^{-2} на 1% облачности. (Curry et al., 1996; Shupe and Intrieri, 2004; Boeke and Taylor, 2016; Huang et al., 2017).



Среднегодовые значения суммарного облачно-радиационного эффекта (Вт м^2), осредненные по Арктическому региону ($> 66^\circ$ с.ш.) за период с 2000 по 2016 гг. по данным спутниковых наблюдений CERES и экспериментов моделей CMIP5.

Вызовы : роль облаков в полярных регионах (1)

- Облачный покров в Арктике претерпевает заметные изменения, отражающие перемены не только в количестве облаков, но и в сложной динамике их типов.



Межгодовая изменчивость среднего за 5 лет балла общей облачности с 1938 по 2011 гг. над областью сплошного льда (синие кривые) и открытой воды (зеленые кривые) над Норвежским, Баренцевым и Карским морями для зимнего периода.

Вызовы : основные трудности (2)

- Наибольшие расхождения между облачными данными наблюдаются над полярными областями. (Chernokulsky and Mokhov, 2010, 2012; Shtubenrauch et al., 2013)

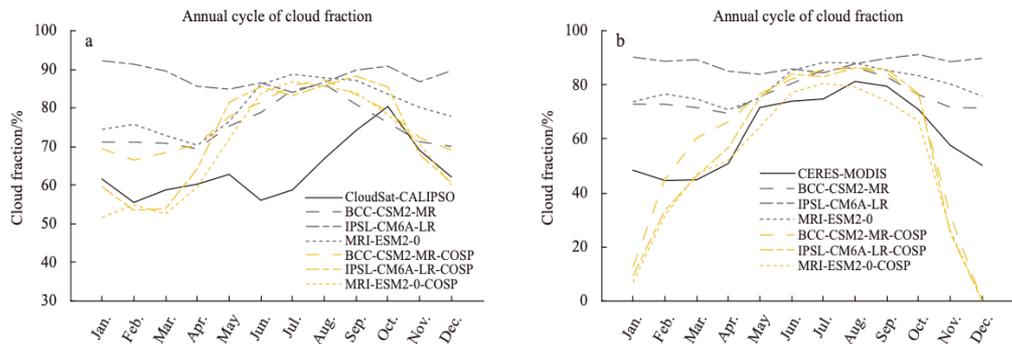
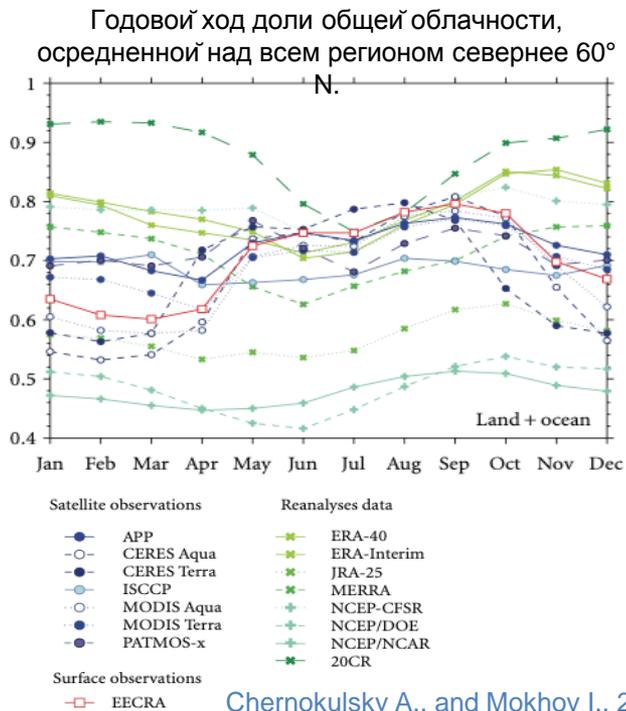


Fig. 11. Arctic Basin monthly CF from CloudSat-CALIPSO (a) and CERES-MODIS (b) and CMIP6 models' none-COSP and COSP output averaged over 2007-2010 (a) and 2001-2014 (b). Note that the CloudSat-CALIPSO has an observational "pole hole" from 82°N to 90°N.

Wei Jianfen et al., 2021

References

- **CMIP6:** <https://wcrp-cmip.org/cmip-data-access/>
- **Arctic CORDEX:** <http://www.climate-cryosphere.org/activities/targeted/polar-cordex/arctic>
- **CERES Syn1-deg Ed-4A product:**
https://ceres.larc.nasa.gov/documents/DQ_summaries/CERES_SYN1deg_Ed4A_DQS.pdf

