

ОЦЕНКА ТЕМПОВ ДЕГРАДАЦИИ СУБАКВАЛЬНОЙ МЕРЗЛОТЫ АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА ПРИ СЦЕНАРИИ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА ПО ДАННЫМ CMIP6

Малахова

Валентина Владимировна

ИВМиМГ СО РАН,

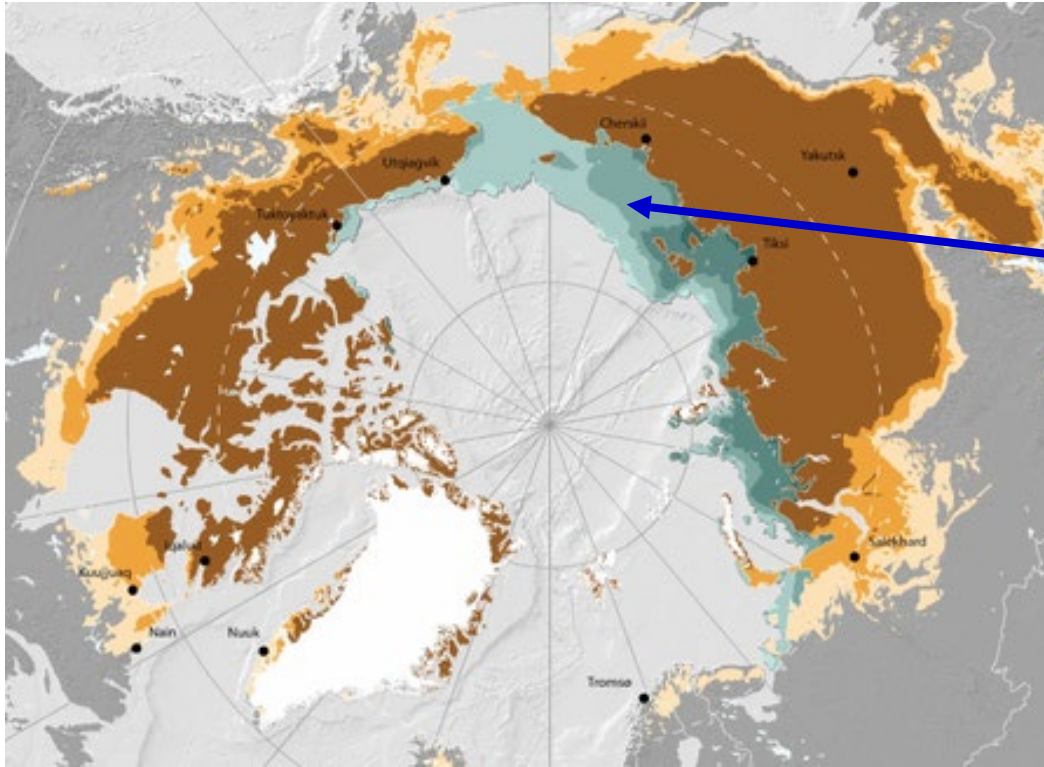
ИФА им.Обухова РАН

г. Новосибирск

**Международная конференция
«Физика атмосферы и климата»
6-9 апреля 2026, Кисловодск**



Актуальность

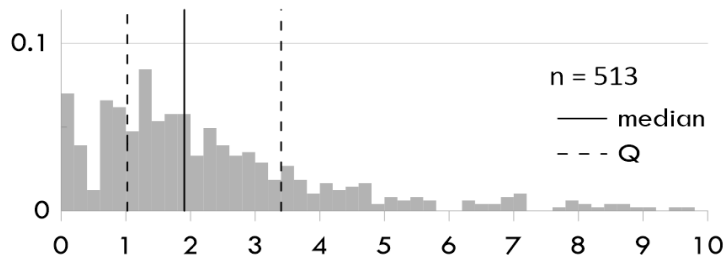


✓ Изучение состояния **субаквальной мерзлоты (СММП)** необходимо для проведения поисково-разведочного бурения и освоения месторождений мелководного шельфа Арктики

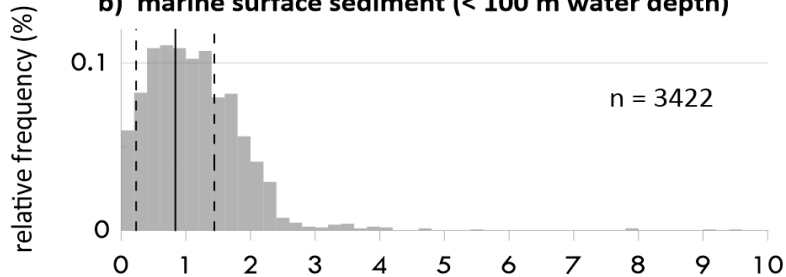
- ✓ В результате деградации подводной мерзлоты происходит выброс метана в атмосферу.
- ✓ В моделях земной системы не учитываются климатические обратные связи, возникающие в результате эмиссии углерода при таяния подводной мерзлоты.

Органический углерод в СММП

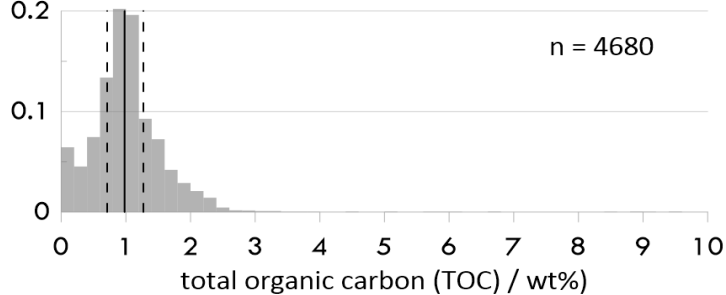
a) terrestrial (Weichselian deposits)



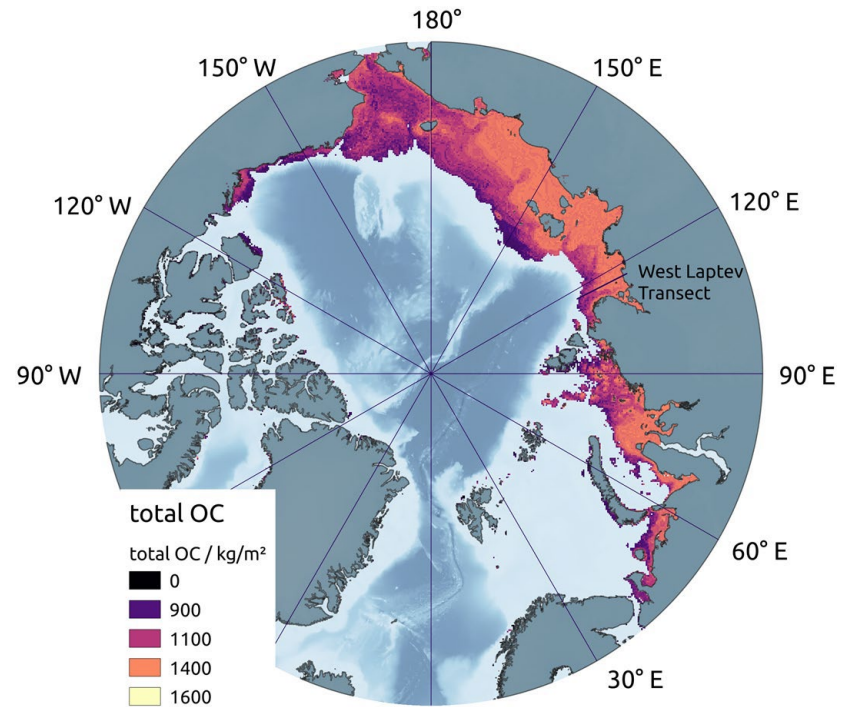
b) marine surface sediment (< 100 m water depth)



c) deeper Arctic shelf sediments (< 120 m water depth)



Распределение содержания органического углерода (в вес. %) в наземных и морских отложениях в Арктике на основе данных.



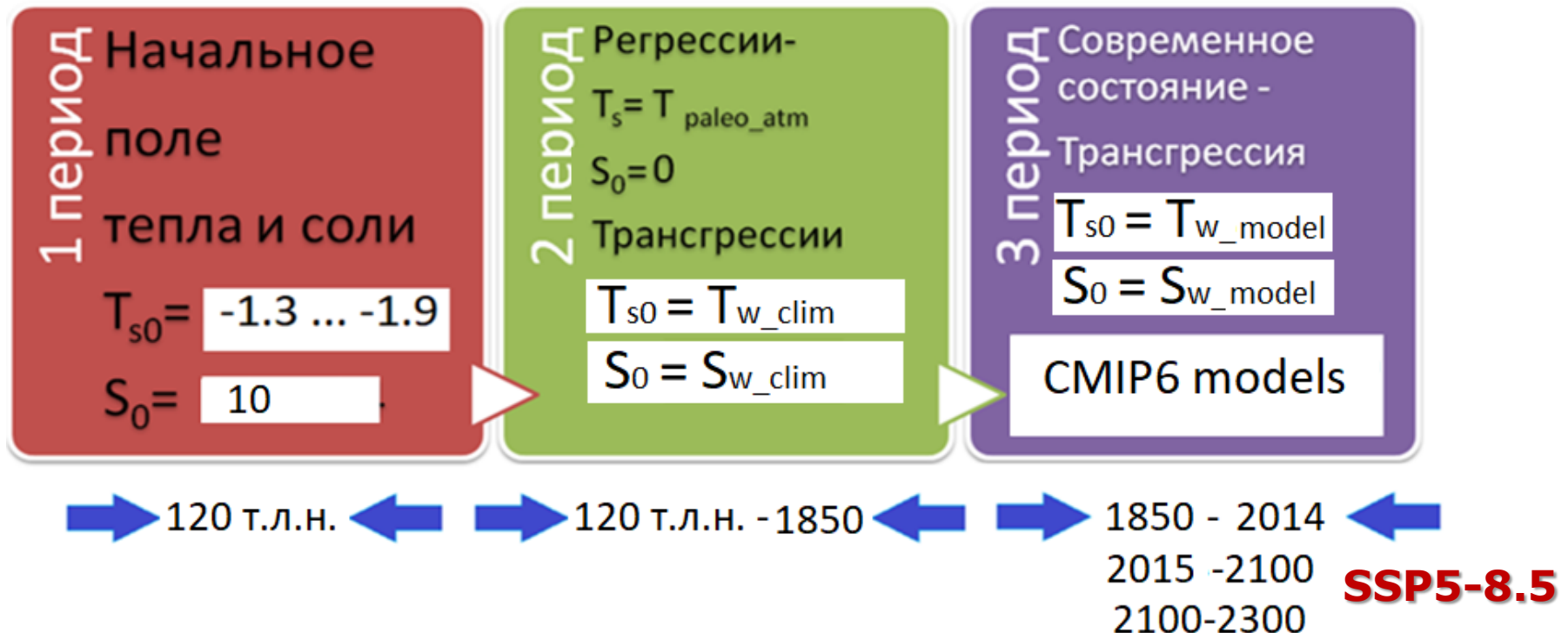
Общее содержание органического углерода в субаквальной мерзлоте в доиндустриальное время. На карте показано общее количество органического углерода, суммированное по осадку, накопленному за последние 450 тыс. лет. СММП арктического шельфа могут содержать **2800 (1500–5000) Пг** органического углерода.

(Miesner F. et al, Scientific Reports 2023)

Схема численного моделирования СММП

Предположение: уровень моря, температура и соленость на поверхности донных отложений, а также геотермический поток тепла являются определяющими факторами для оценки распространения субаквальной мерзлоты.

- Расчеты термического состояния донных отложений проводятся для области арктического шельфа с глубиной воды менее **150 м** для периода **120 тыс. лет**.



Палеогеографический сценарий

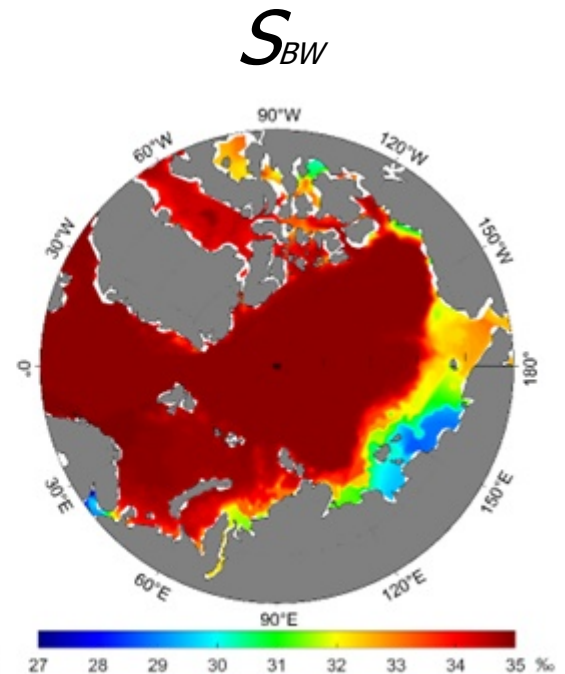
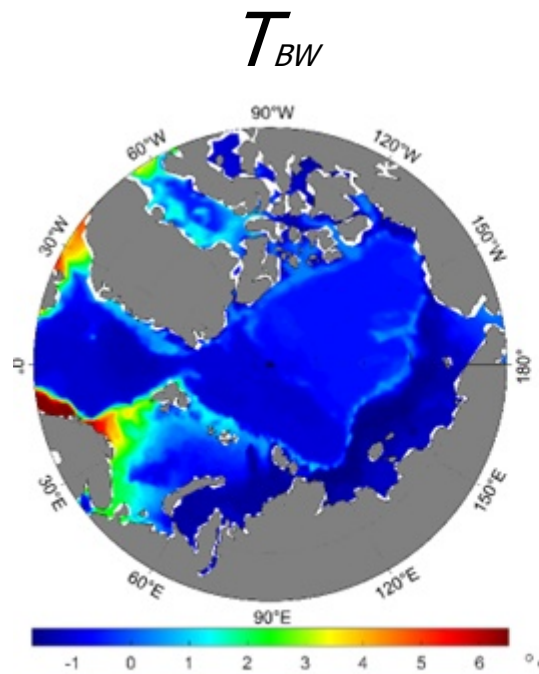
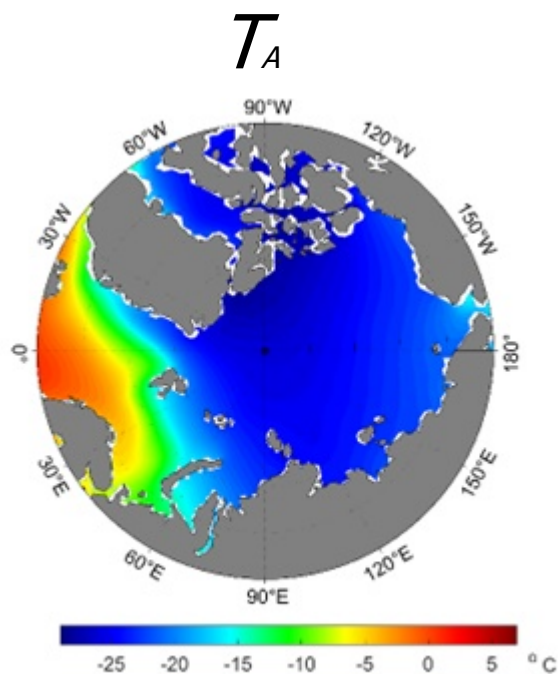
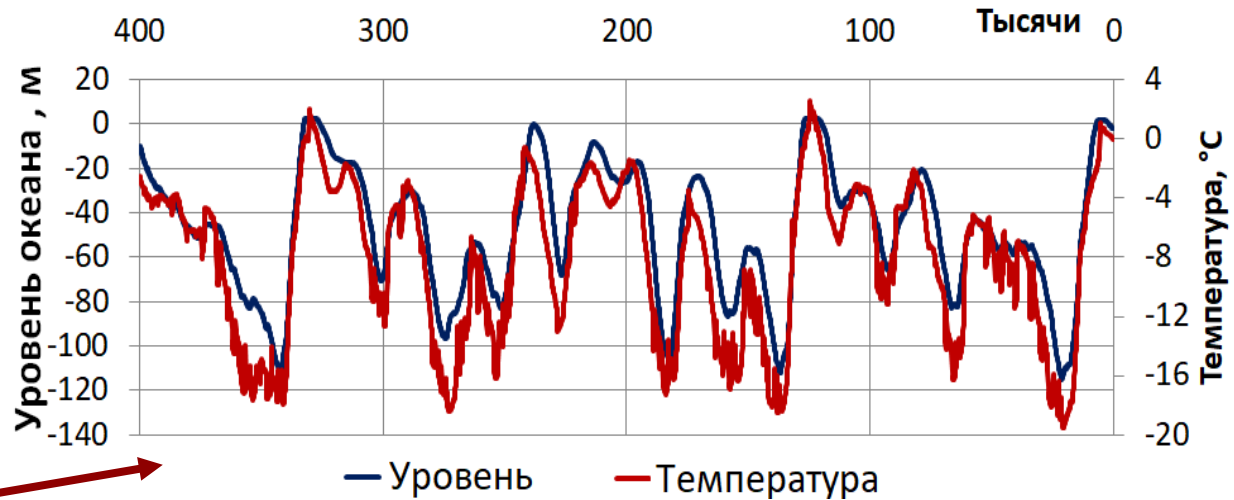
the shelf is under water:

$$T_B = T_{B,W}, \quad S_B = S_{B,W}$$

the shelf is exposed to the air:

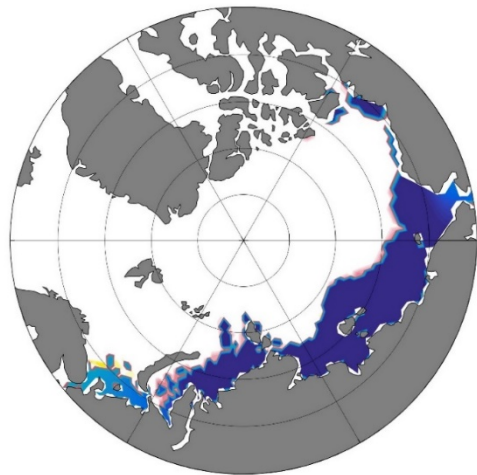
$$T_B = T_A + \Delta T_{pal}, \quad S_B = 0$$

ΔT_{pal} - **CLIMBER-2**
(Petoukhov, et al., 2000;
Ganopolski et al., 2010)

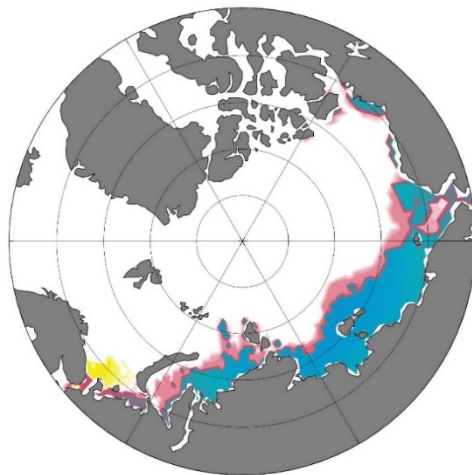


Данные, используемые при моделировании для различных временных периодов

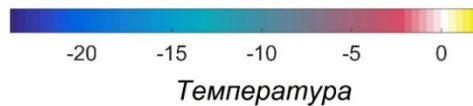
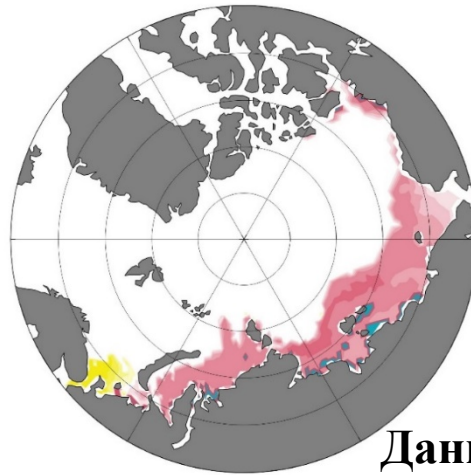
20 тысяч лет назад



10 тысяч лет назад



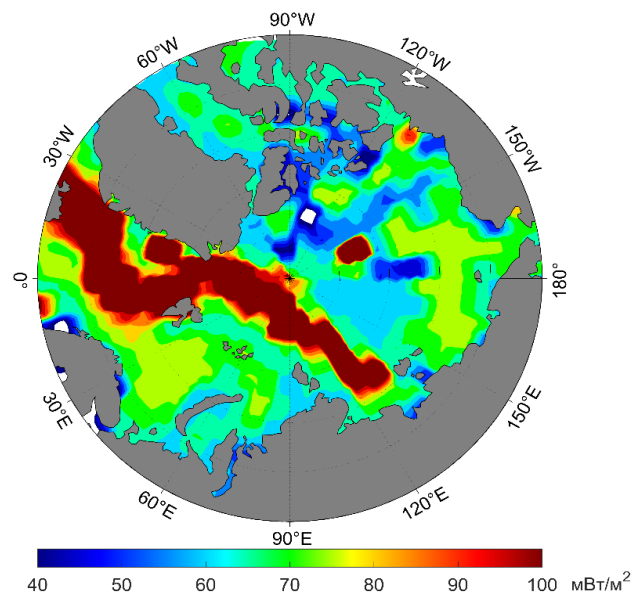
5 тысяч лет назад



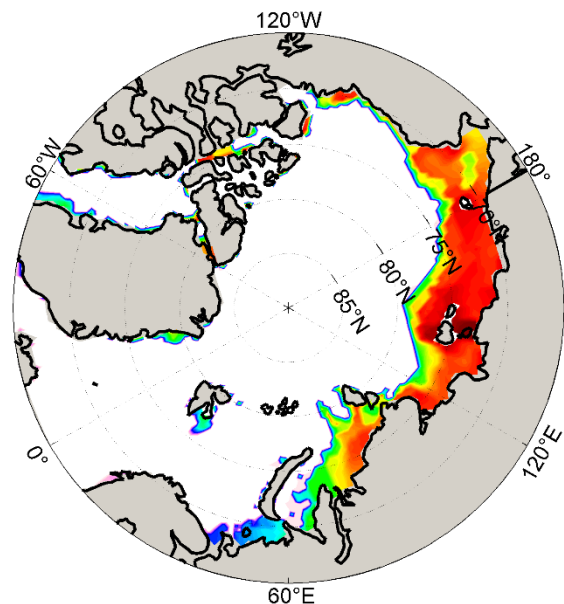
Данные по тепловому потоку (мВт/м²)

Для оценки пространственно-временной изменчивости мерзлого слоя для прошлого и будущего используется температура придонного слоя, полученная из палеоданных, данных реанализа и расчетов с моделями земной системы проекта CMIP6.

На нижней границе области учитывается геотермический поток.

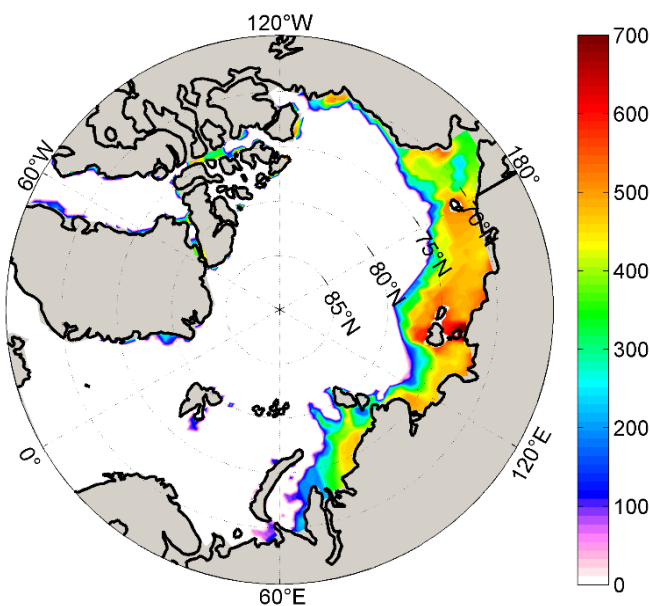
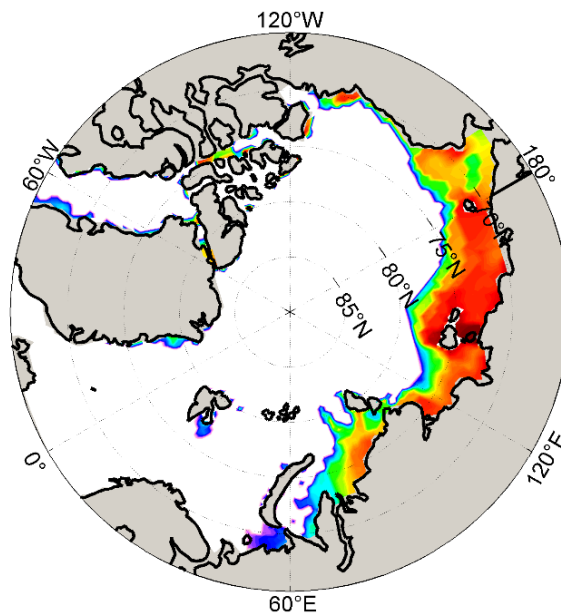


Результаты моделирования: Изменение мощности мерзлоты за последние 20 тыс. лет



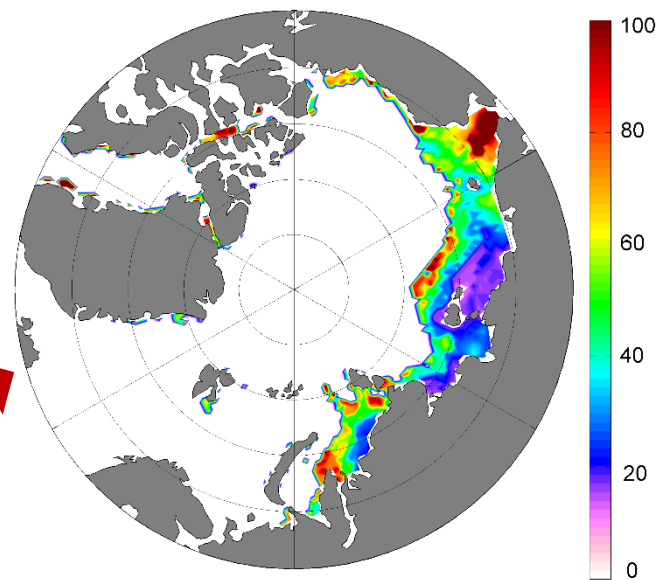
20 т.л.н.
 $S = 2,8$ млн км²

5 т.л.н.
 $S = 2,4$ млн км²



1850 г.
 $S = 2,27$ млн км²

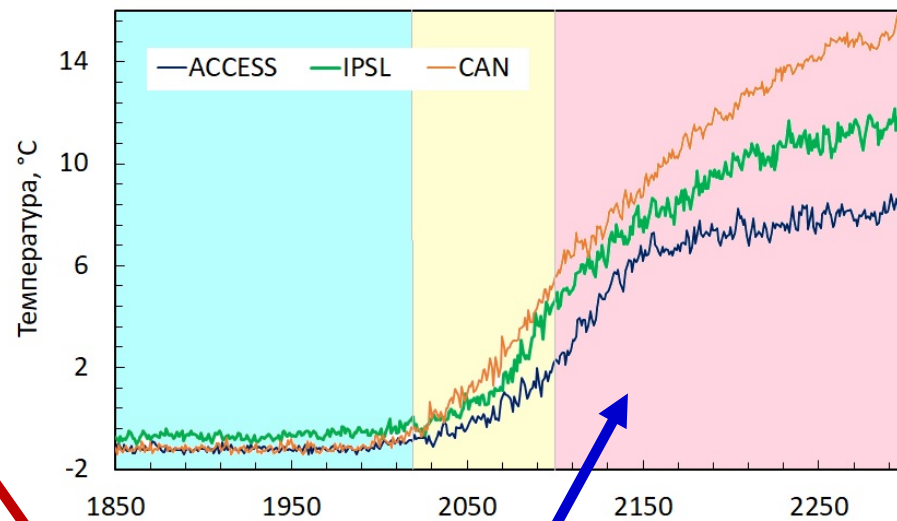
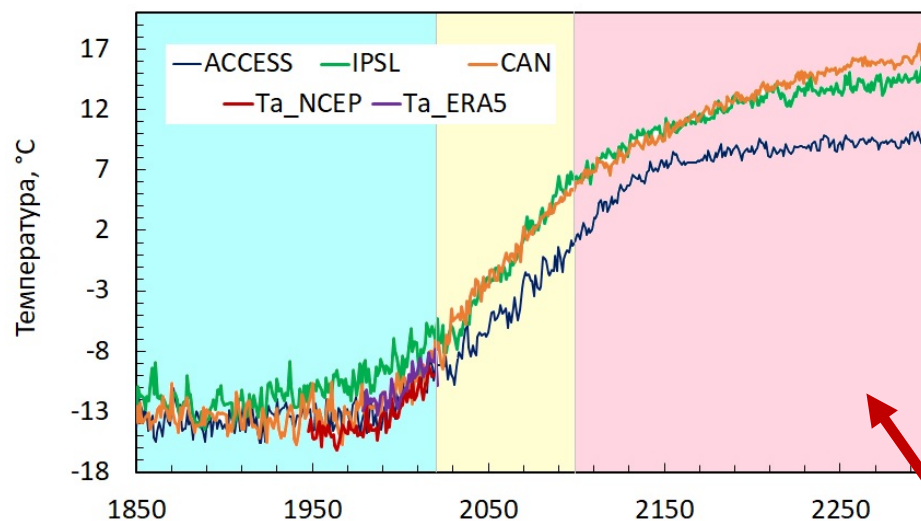
Глубина верхней
границы СМ
ниже дна



Данные моделей CMIP6 (SSP5-8.5)

Модель	Модель океана	Модель морского льда	Пространственное разрешение	ECS, °C
ACCESS-ESM1-5	ACCESS-OM2	CICE4.1	17 km, L50	3.9
IPSL-CM6A-LR	NEMO 3.6	NEMO-LIM3	17 km, L30	4.6
CanESM5	NEMO 3.4.1	LIM2	17 km, L45	5.6

ECS (equilibrium climate sensitivity) - равновесная чувствительность глобальной приземной температуры к удвоению содержания CO_2 в атмосфере
[Masson-Delmotte et al., 2021]



Среднегодовая температура приземного воздуха и температура у дна, осредненная для области Сибирского шельфа, в соответствии с модельными результатами и данными реанализа.

Оценка темпов деградации СММП до 2300. CMIP6 (SSP5-8.5)

1850-2015

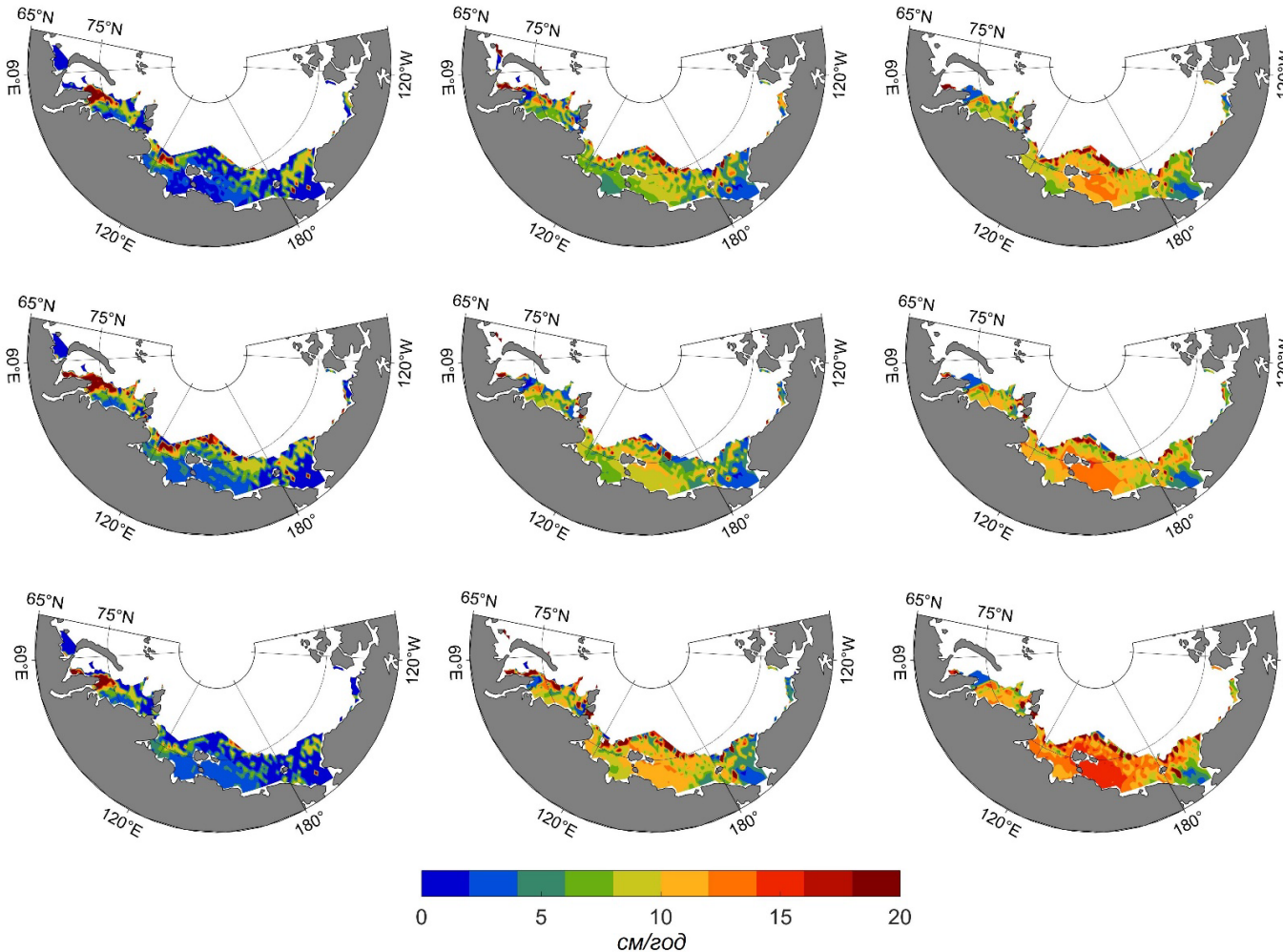
2015-2100

2100-2300

ACCESS-ESM1-5

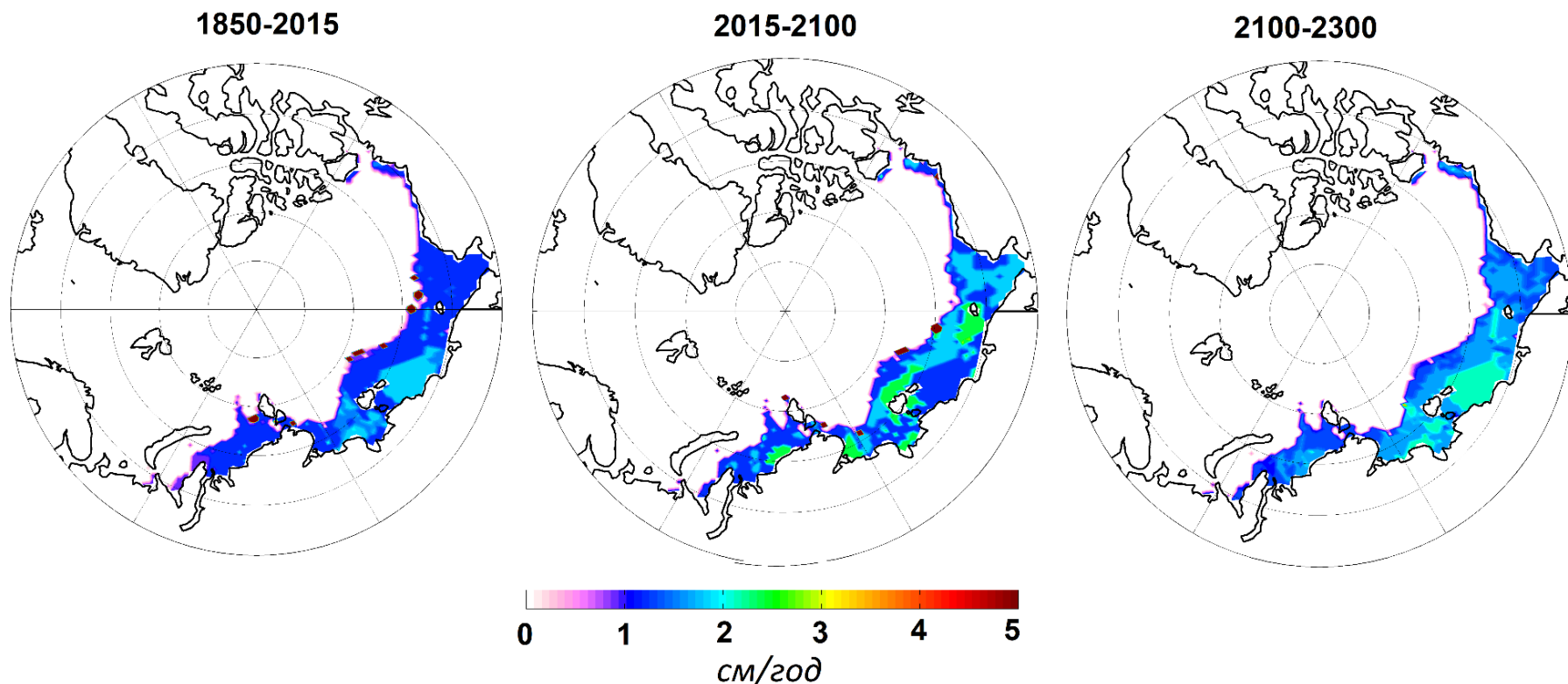
IPSL-CM6A-LR

CanESM5



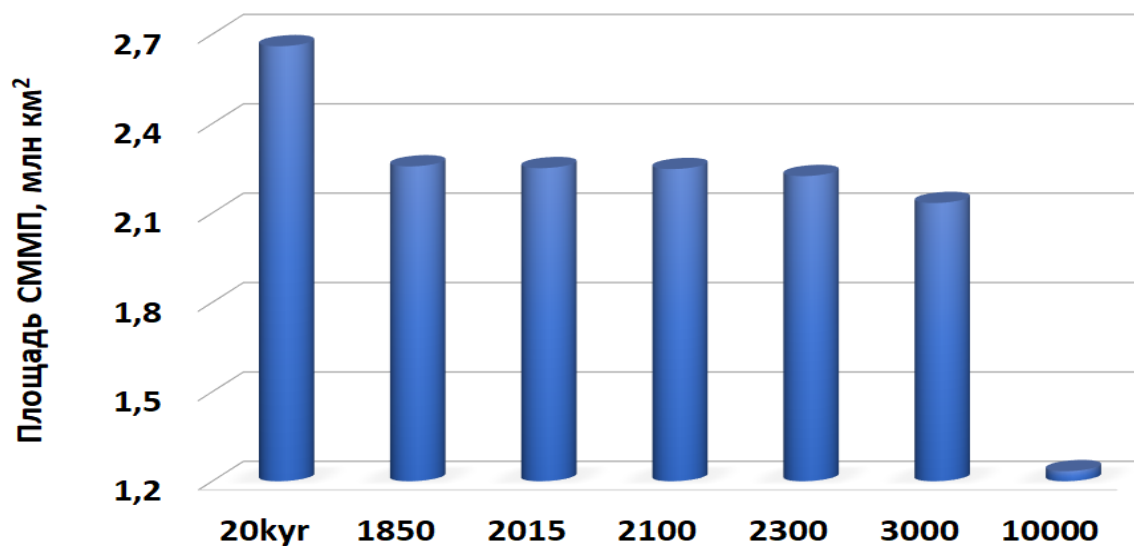
Деградация СММП со стороны **верхней границы**. Учет температуры придонной воды по результатам сценария SSP5-8.5

Скорости деградации СММП до 2300. CMIP6 (SSP5-8.5)

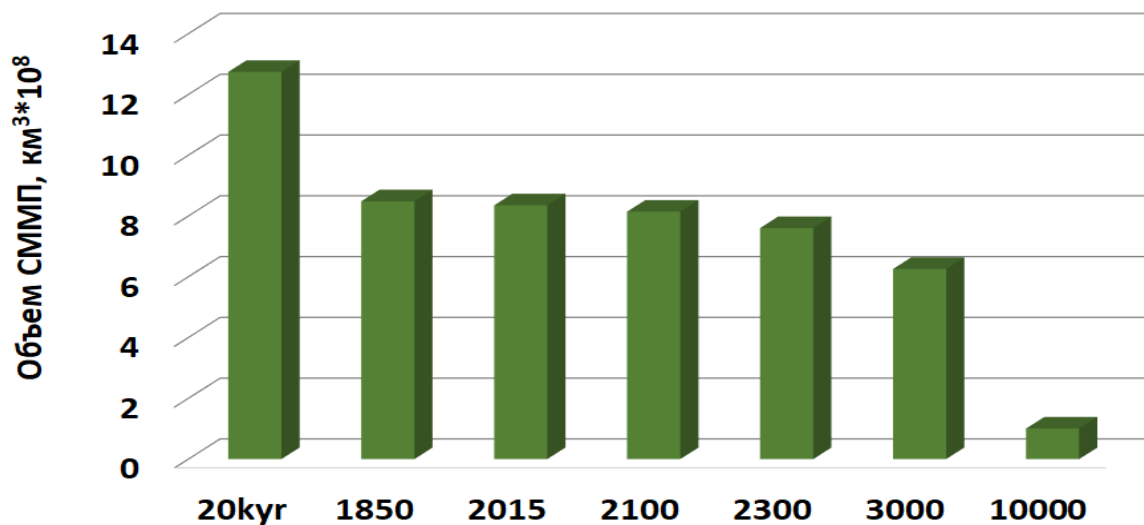


Деградация СММП со стороны **нижней границы**. Учет температуры придонной воды по результатам сценария SSP5-8.5 с моделью CanESM5.

Изменение площади и объема СММП

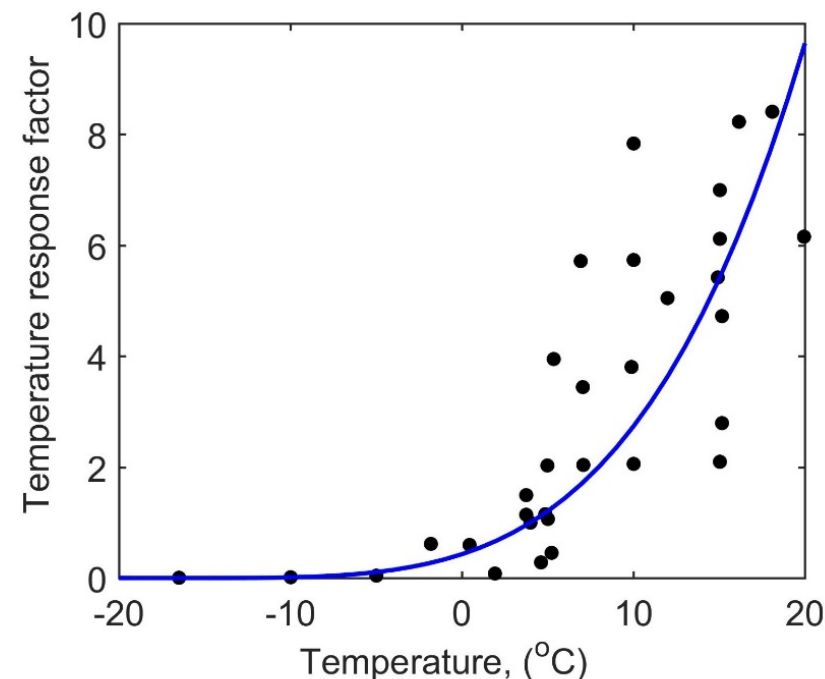


Площадь шельфа с
СММП, млн км²



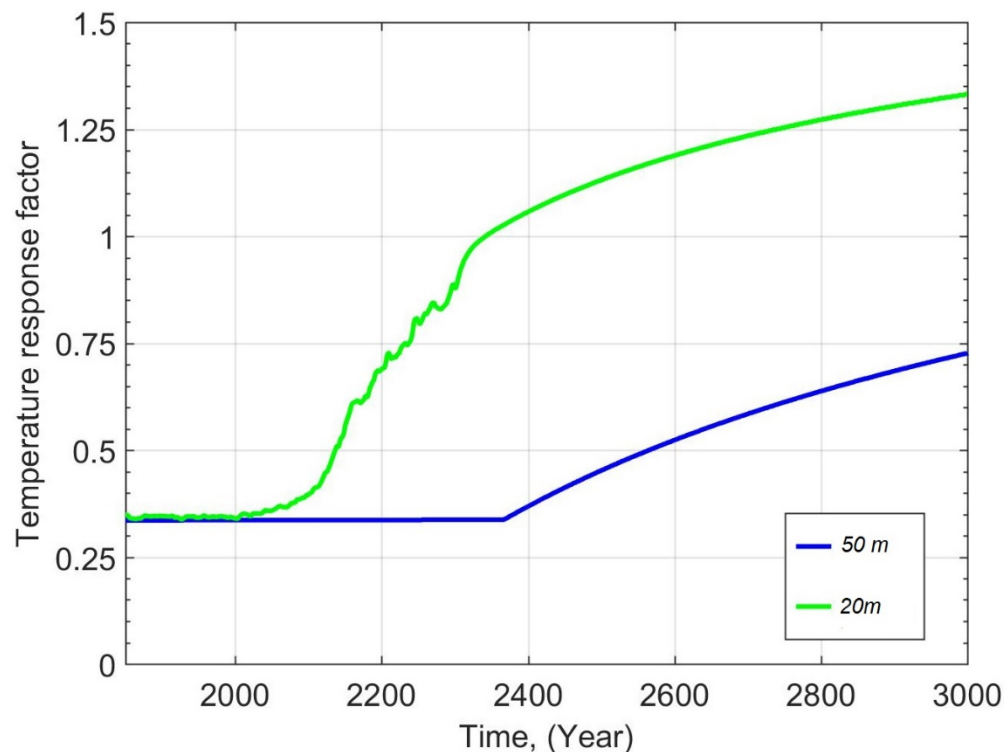
Объем донных
отложений с
содержанием льда,
*10⁸ км³

Коэффициент температурного отклика



Коэффициент температурного отклика реакционной способности органического углерода. Зависимость от температуры.
 Черные точки - измерения, Kätterer et al. (1998) и Rivkina et al. (2002).

С
у|
$$r(T) = \frac{(T - T_{\min})^4}{(T_{\text{ref}} - T_{\min})^4}$$
 ОТВЕТСТВИИ С



Коэффициент температурного отклика на глубине 50 м (синяя) и 20 м (зеленая) ниже дна. Зависимость от времени.

Заключение

- Субаквальная мерзлота на шельфе морей Арктики может существовать севернее 65° . Мощность СММП составляет от 20 до 700 м в зависимости от области шельфа.
- Получены оценки скоростей таяния подводной мерзлоты до 2300 года на основе данных моделей CMIP6 при сценарии SSP5-8.5.
- Средние скорости деградации подводной мерзлоты составили 1-2 см/год для периода 1850-2015, 5 см/год для 2015-2100 и 10 см/год для периода 2100- 2300.
- Увеличение температуры донных отложений после 2015 г. приводит к росту коэффициента температурного отклика реакционной способности органического углерода

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ-25-17-00015

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!