

# СУБАКВАЛЬНАЯ МЕРЗЛОТА АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА: ОЦЕНКА МОЩНОСТИ И ПЛОЩАДИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ

Малахова Валентина Владимировна  
ИВМиМГ СО РАН, г. Новосибирск  
[malax@sscc.ru](mailto:malax@sscc.ru)



**г. Томск**

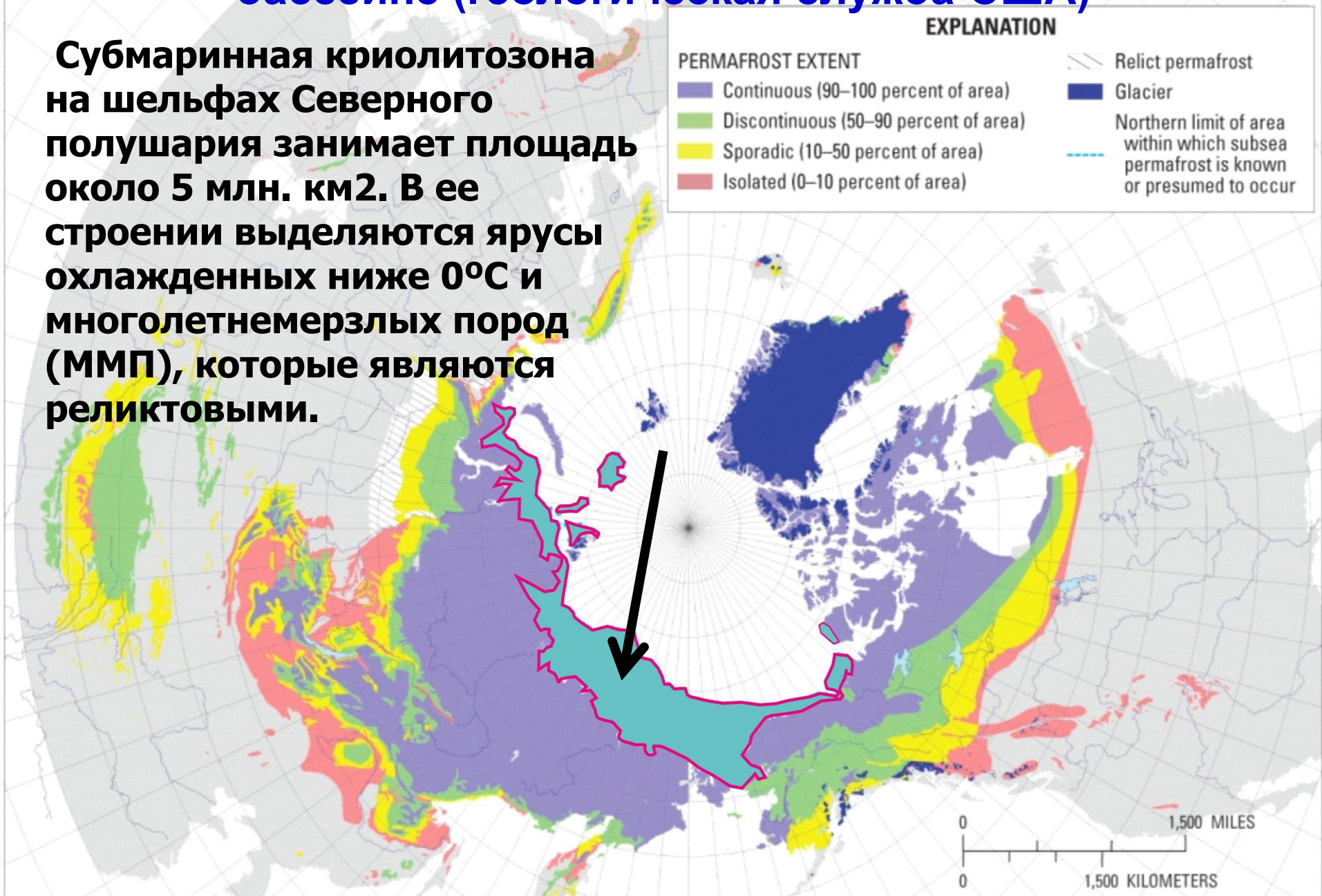
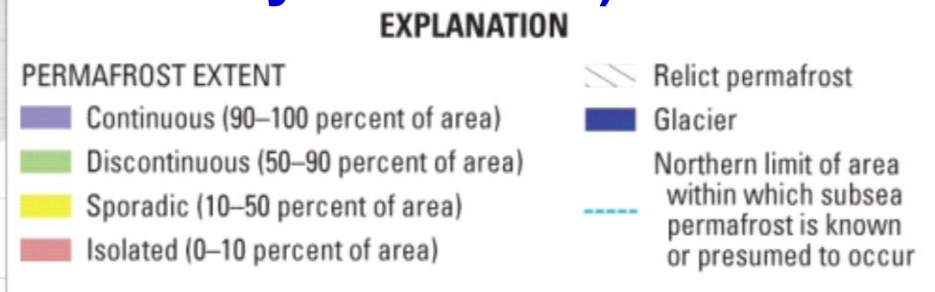
**XIII СИБИРСКОЕ СОВЕЩАНИЕ И ШКОЛА МОЛОДЫХ  
УЧЕНЫХ ПО КЛИМАТО-ЭКОЛОГИЧЕСКОМУ МОНИТОРИНГУ  
15-19 октября 2019 года**

# План лекции

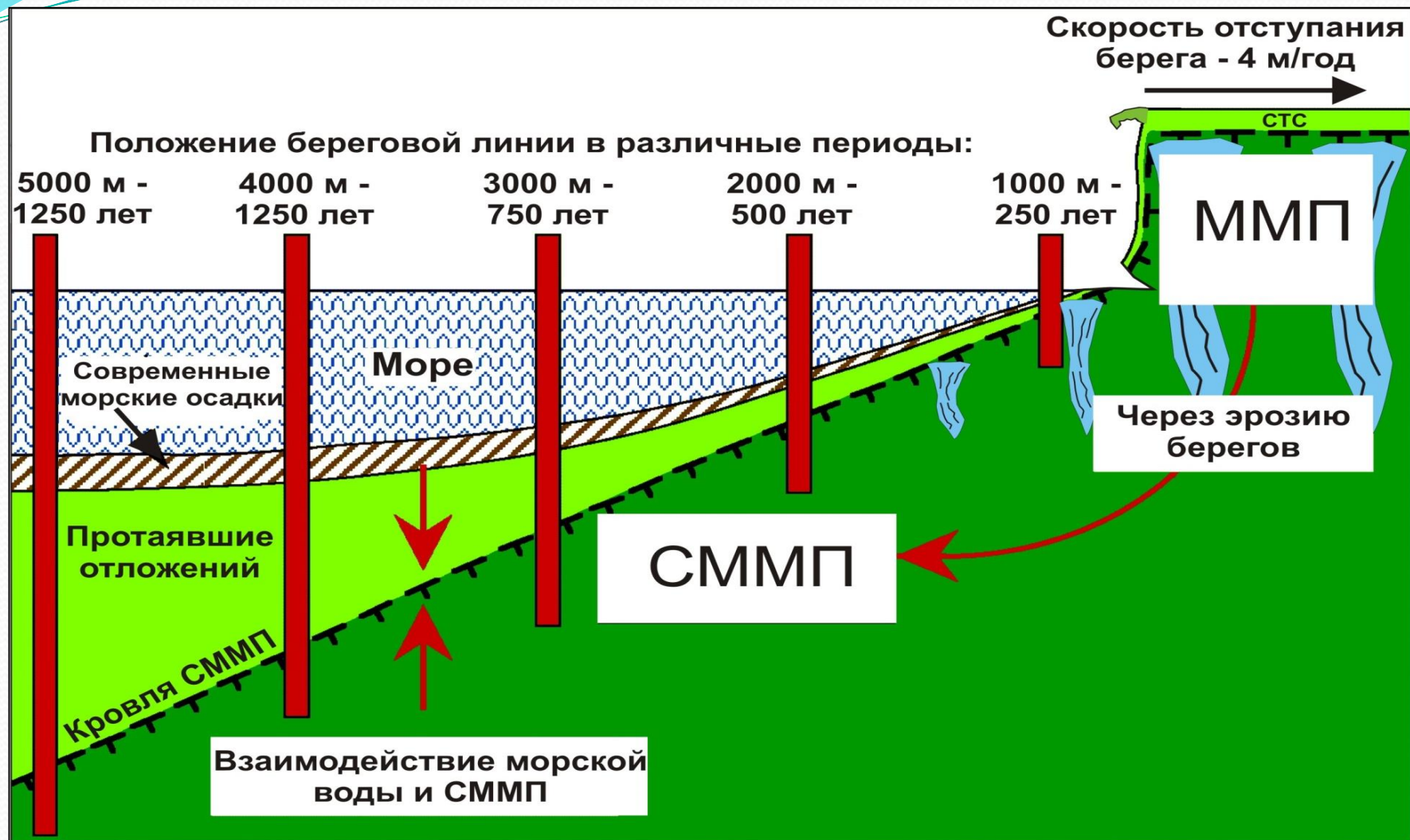
- Субаквальная мерзлота ???
- Типы шельфов по подводной мерзлоте
- Субаквальная мерзлота и гидраты метана
- Субаквальная мерзлота – данные измерений
- **Моделирование криогенных процессов в шельфовой зоне**
- Ретроспективный подход
- Оценка мощности субаквальной мерзлоты (СММП)
- Газовые гидраты. Оценка зоны стабильности гидратов метана (ЗСГМ)
- Влияние озерного термокарста
- Оценка неопределенности палеосценариев
- Потоки метана в атмосферу - данные измерений и модельные оценки

# Распространение подводной мерзлоты в Арктическом бассейне (геологическая служба США)

**Субмаринная криолитозона на шельфах Северного полушария занимает площадь около 5 млн. км<sup>2</sup>. В ее строении выделяются ярусы охлажденных ниже 0°C и многолетнемерзлых пород (ММП), которые являются реликтовыми.**

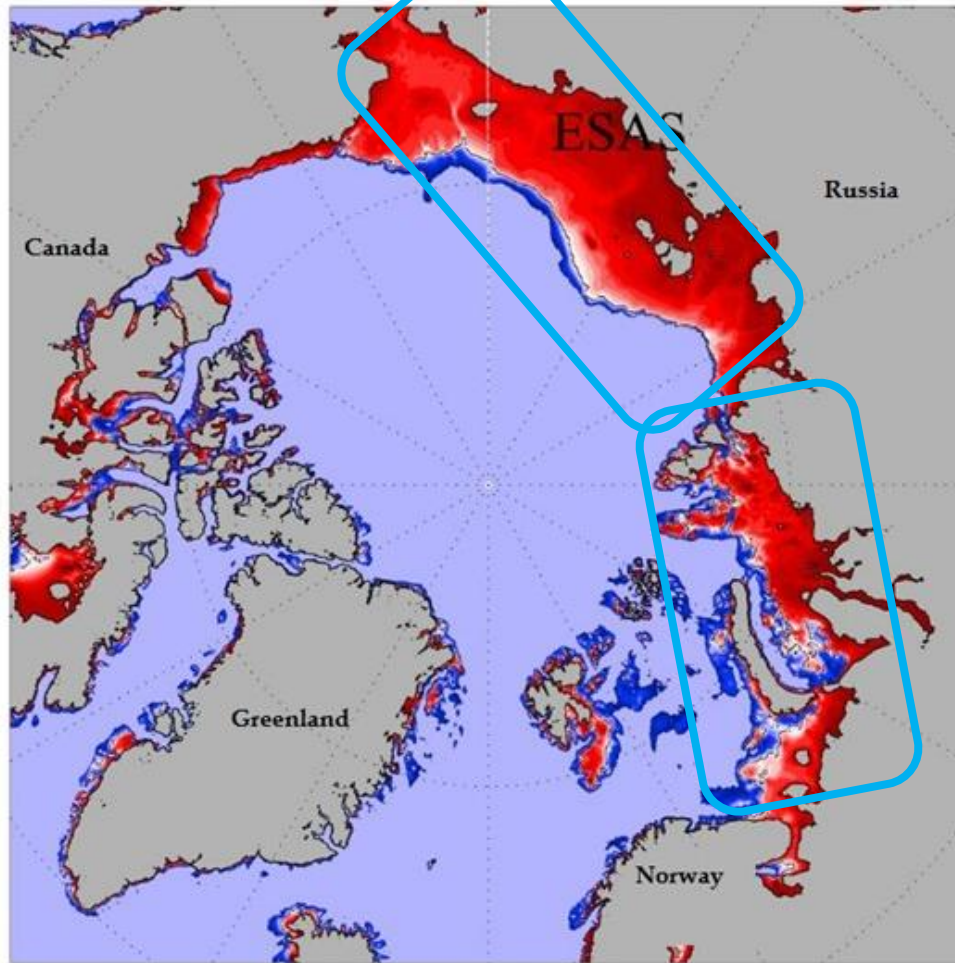


# Схема перехода ММП в субаквальное положение вблизи берегов и темпы перемещения береговой линии.



Усиление темпов разрушения термоабразионных берегов произошло в период с 2000 г. до 2009 г. Для морей Лаптевых и Восточно-Сибирского поступающая масса органического углерода составляет 1,6 и 2,4 млн т в год. (Григорьев, 2017)

# Субаквальная мерзлота



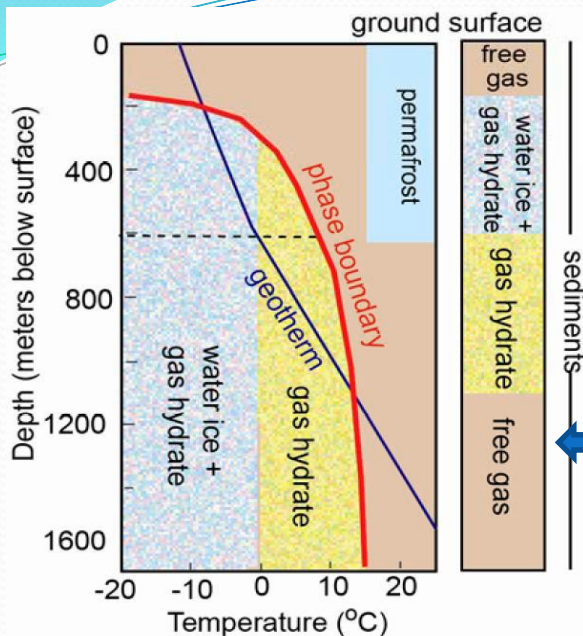
**Предполагаемое распространение подводной мерзлоты в Арктическом бассейне**

Условия формирования криолитозоны на арктических шельфах определяли процессы формирования и таяния плейстоценовых ледников. С их наличием и расположением по отношению к шельфу была связана глубина промерзания пород.

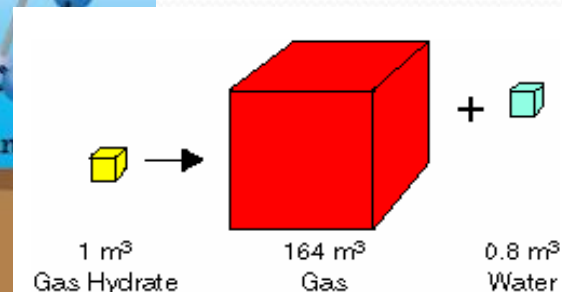
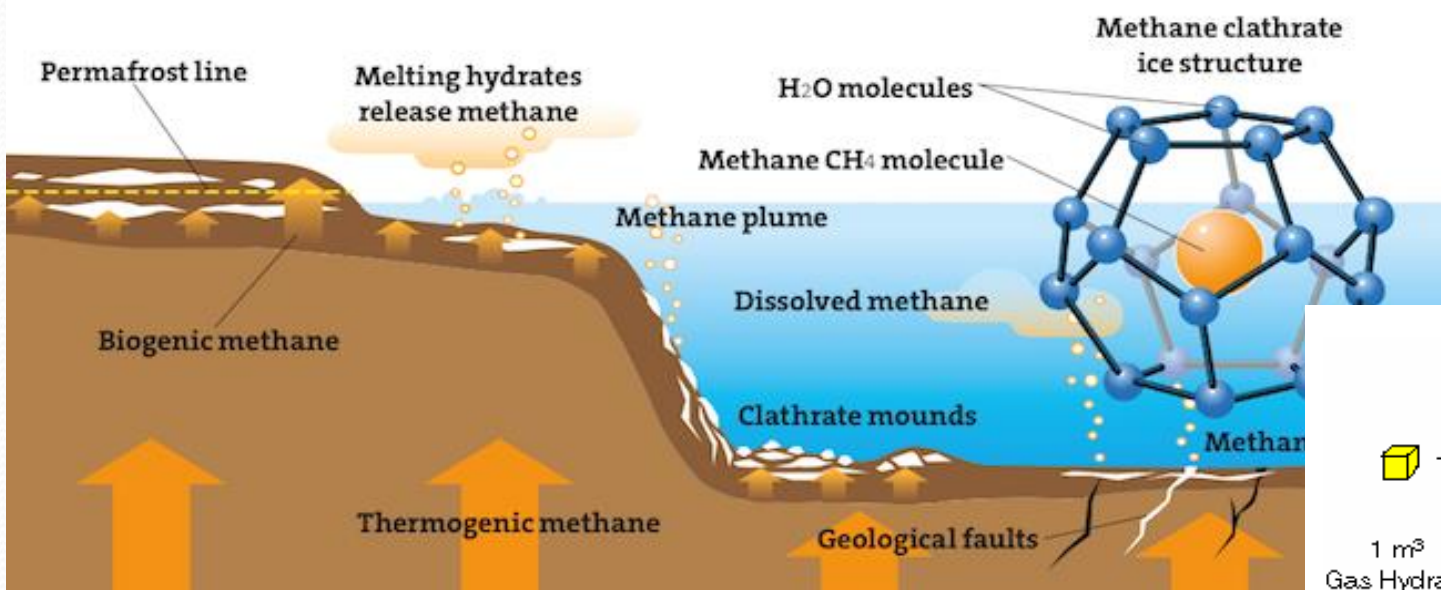
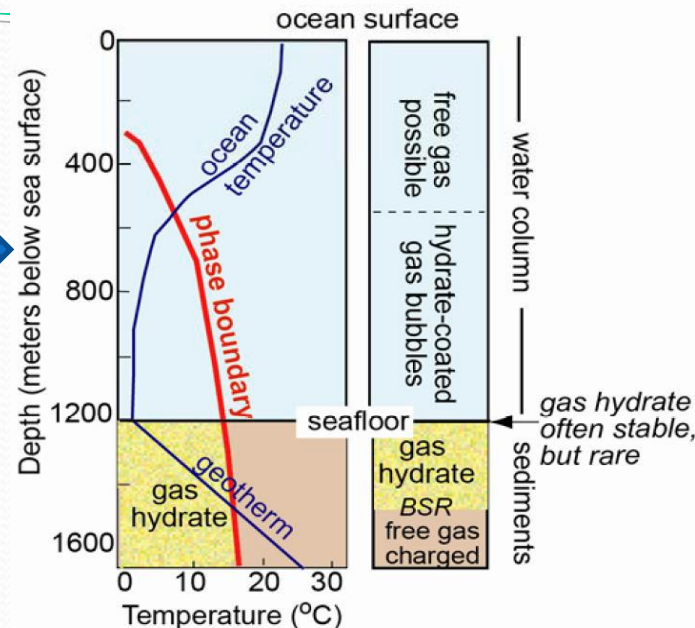
**Типы шельфов по подводной мерзлоте** (Гаврилов А.В., 2008):

- внеледниковый (морей Лаптевых, Восточно-Сибирского, Чукотского)
- ледниковый тип шельфов (морей Баренцева и Карского),
- приледниковые шельфы (море Бофорта)

# Газовые гидраты

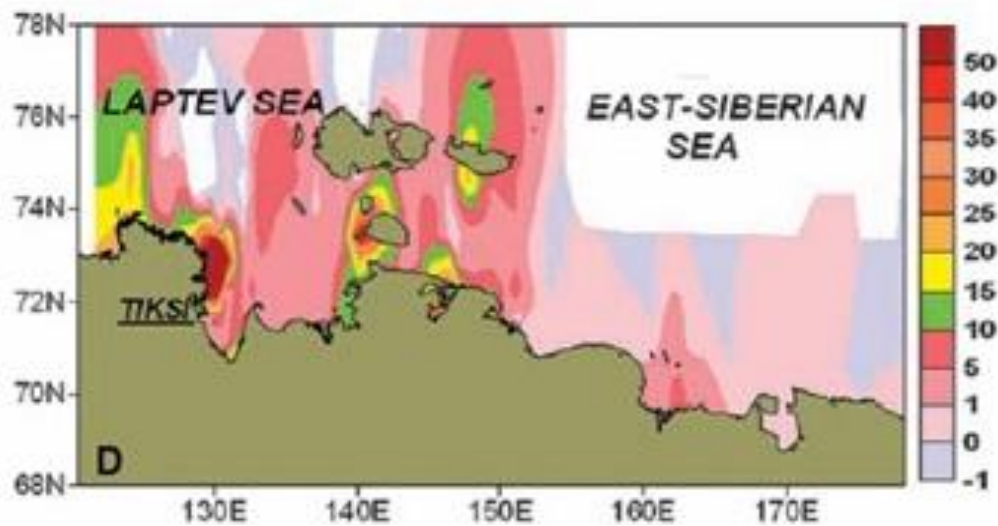


- Зона стабильности газовых гидратов (ЗСГМ) в условиях морского дна
- ЗСГМ при наличии многолетнемерзлых пород



# Актуальность

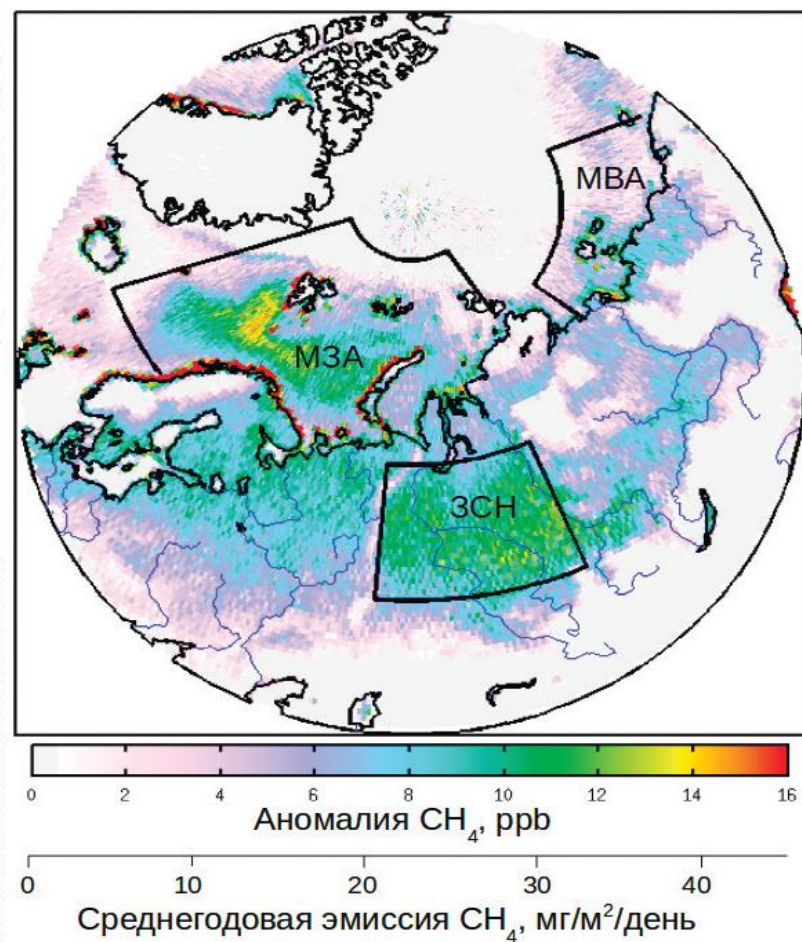
- В результате деградации подводной мерзлоты происходит выброс метана в атмосферу
- От состояния СММП зависит освоение арктических нефтяных, газовых и газоконденсатных залежей, находящихся под мерзлыми толщами



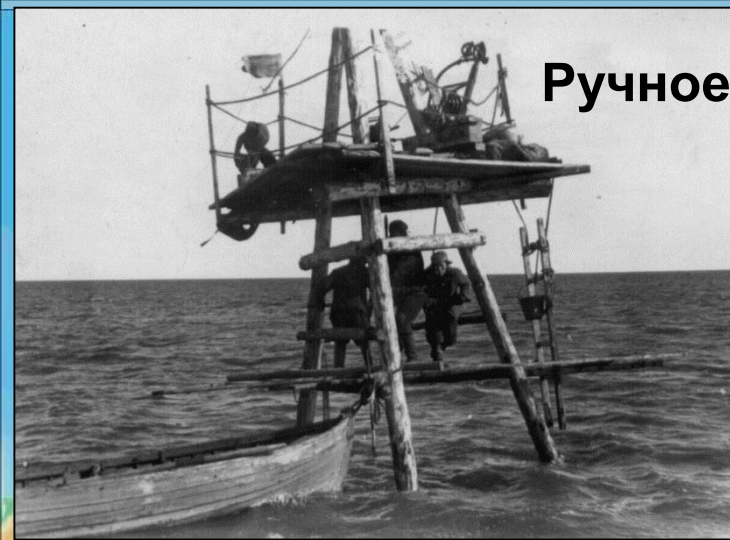
Потоки метана в атмосферу  
( $\text{мг м}^{-2} / \text{сут}$ ) *Shakhova et al., 2010*

Распределение усредненной за 2010–2014 гг. аномалии метана в приземном воздухе

Юрганов и др. 2016

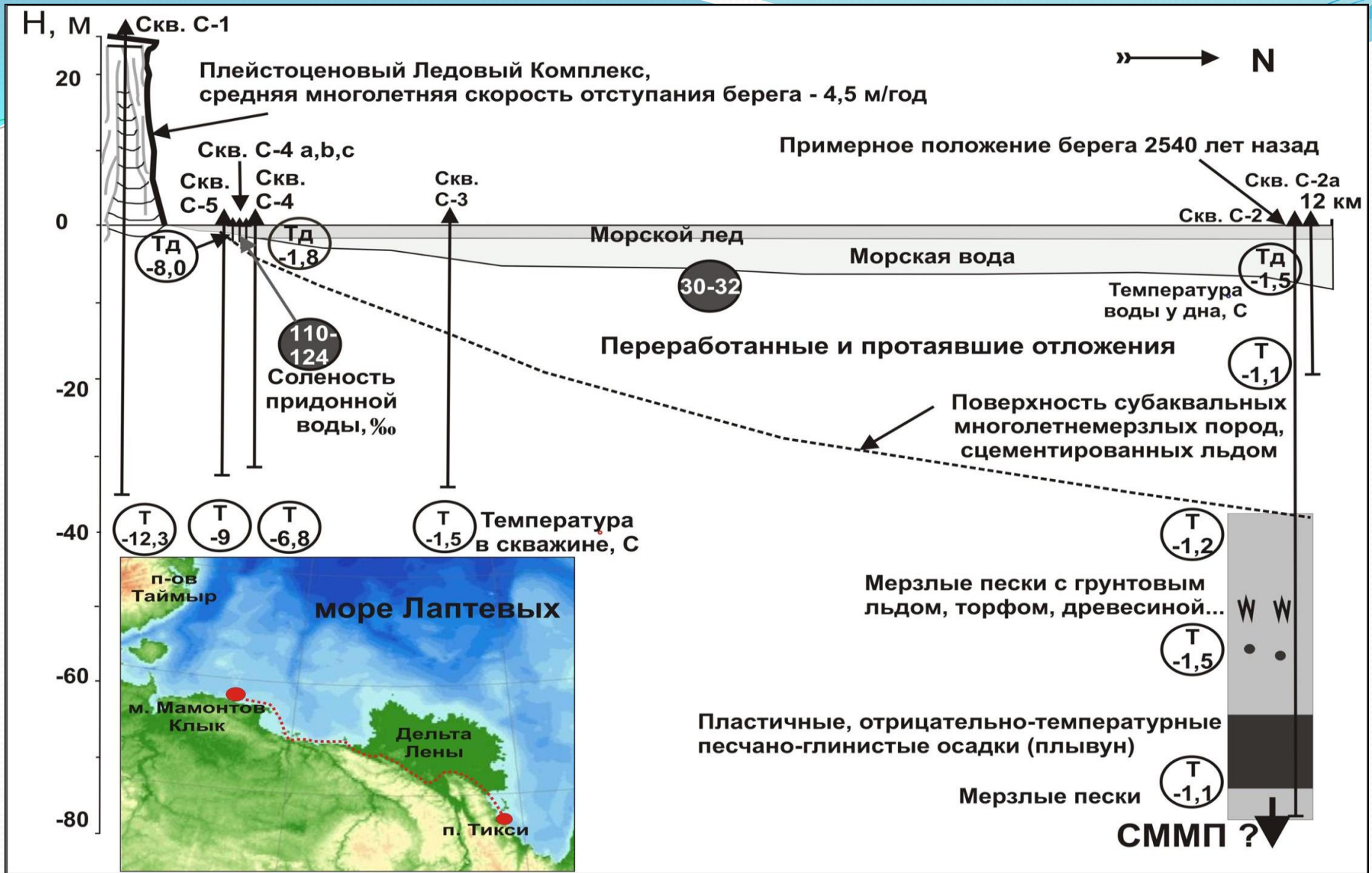


Ручное бурение с платформы в Янском заливе, ИМЗ СО РАН, 1960 г.



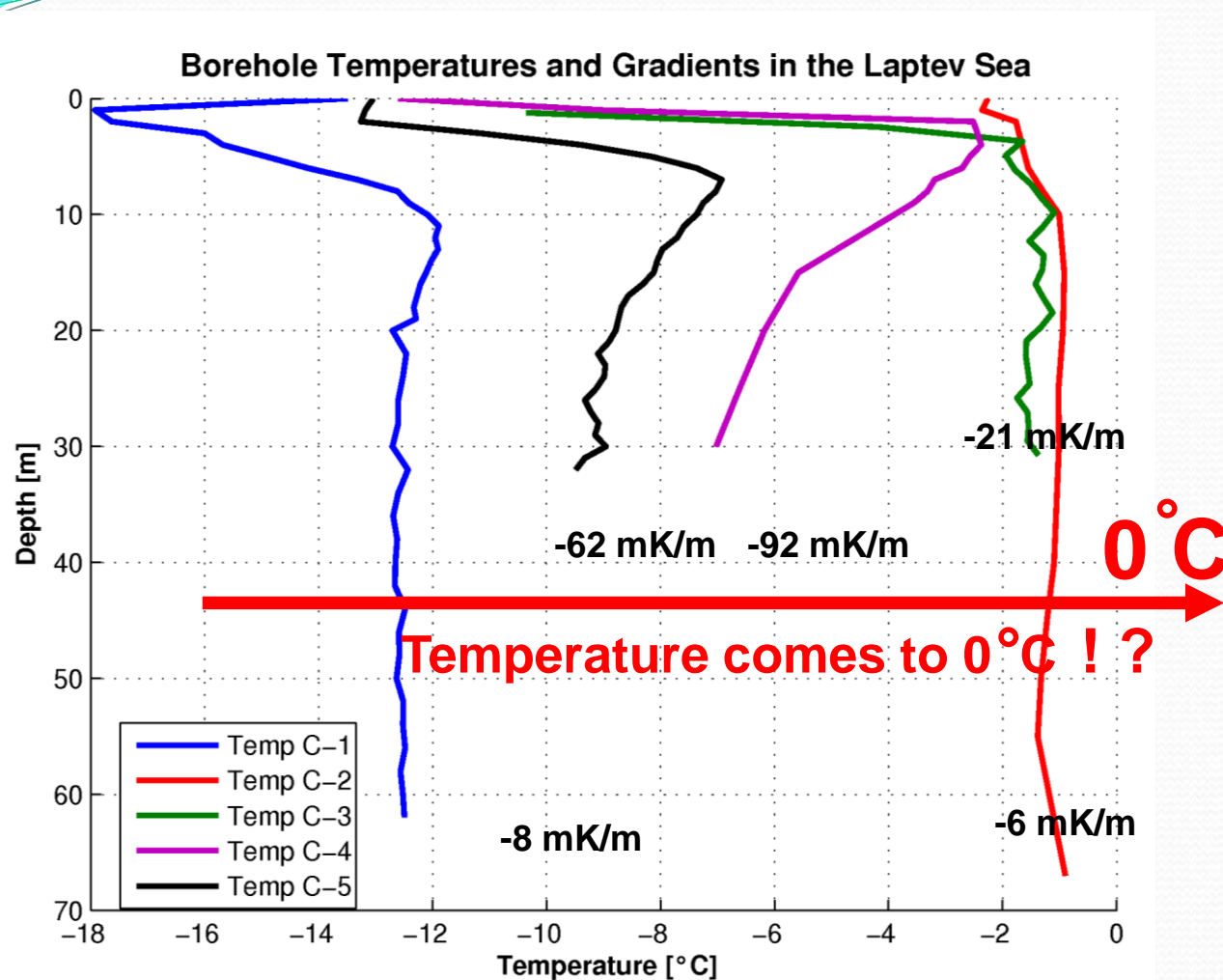
Все известные буровые профили, вскрывшие подводную мерзлоту в морях Восточной Сибири (Григорьев, 2018)





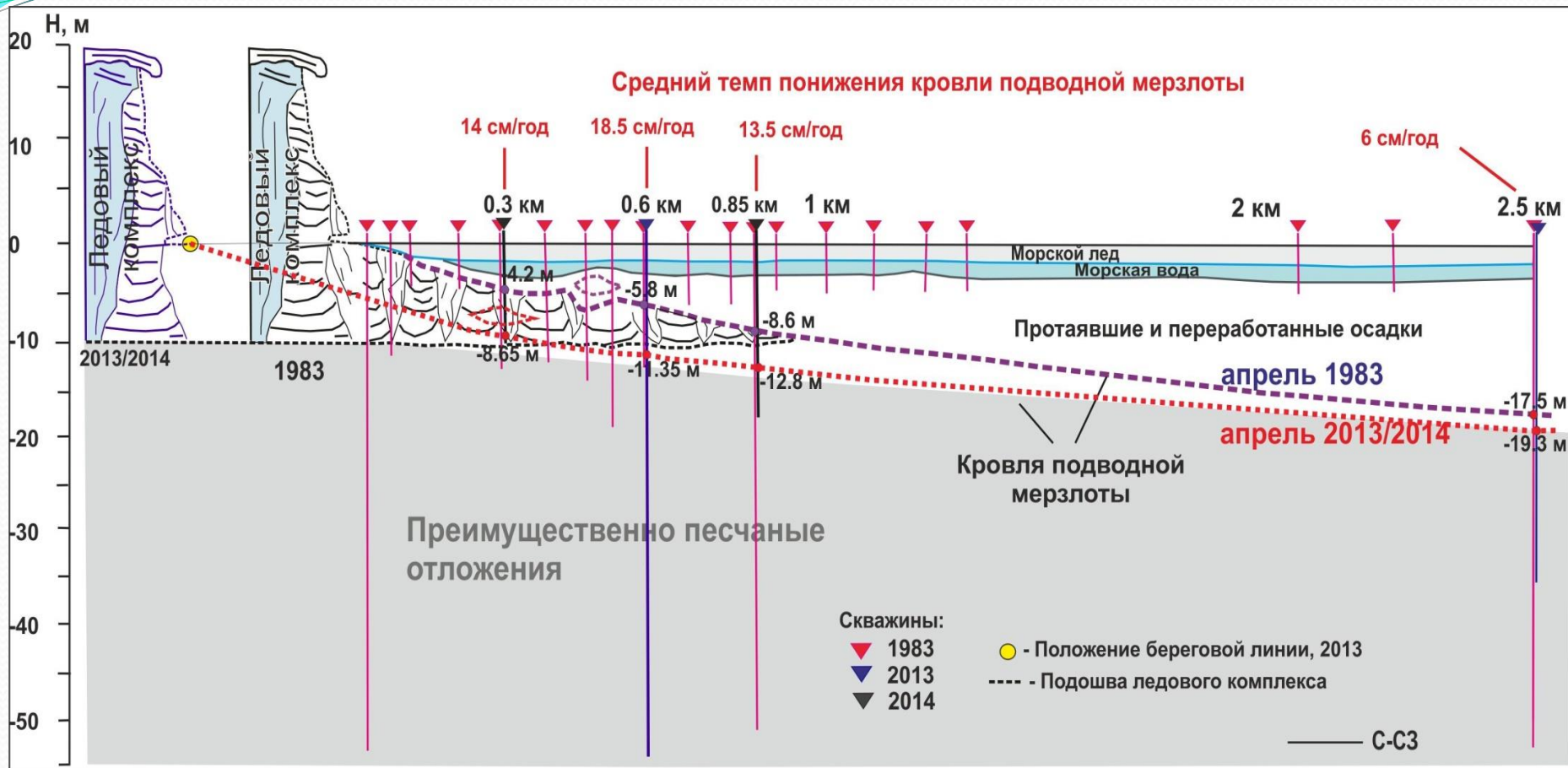
**В 2005 г. в акватории западного сектора моря Лаптевых, в районе м. Мамонтов Клык, был пробурен субмеридиональный профиль неглубоких (до 77 м) скважин [Григорьев, 2006; Rachold et al., 2008].**

# Распределение температур в скважинах бурового профиля Мамонтов Клык



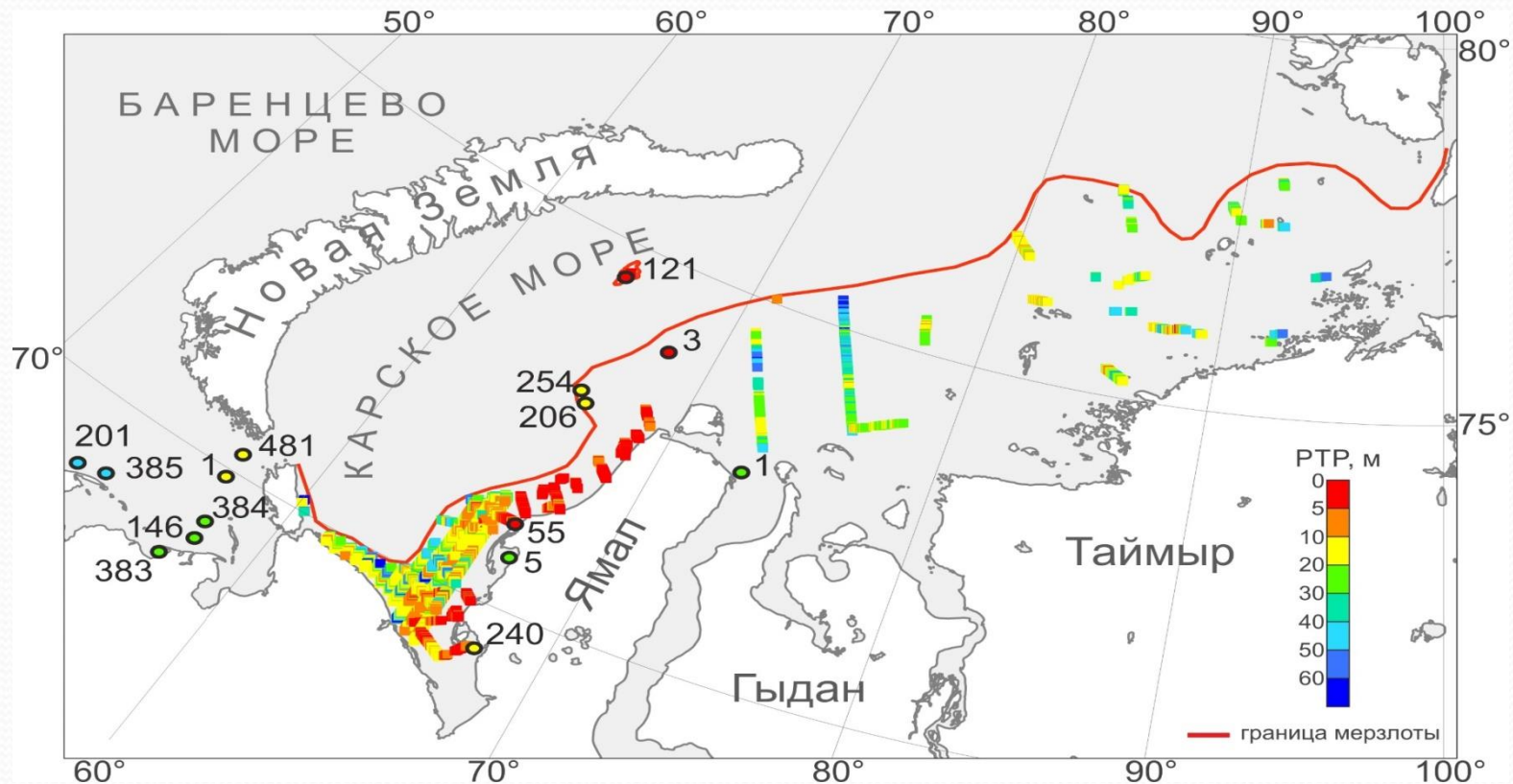
Распределение солей в керне скв. С-2 показало, что морское засоление проникает до глубины 24 м ниже дна. Распределение температур в этой скважине оказалось почти безградиентным, с некоторым повышением в нижней части почти до  $-1^{\circ}\text{C}$ . (Григорьев, 2006; Rachold et al., 2008).

# Динамика деградации подводной мерзлоты в прибрежно-шельфовой зоне моря Лаптевых по данным



Буровые профили у северного мыса о-ва Муостах. Положение кровли подводной мерзлоты на двух профилях 1983 и 2014 гг. Скорость деградации СММП от 5 до 20 см в год

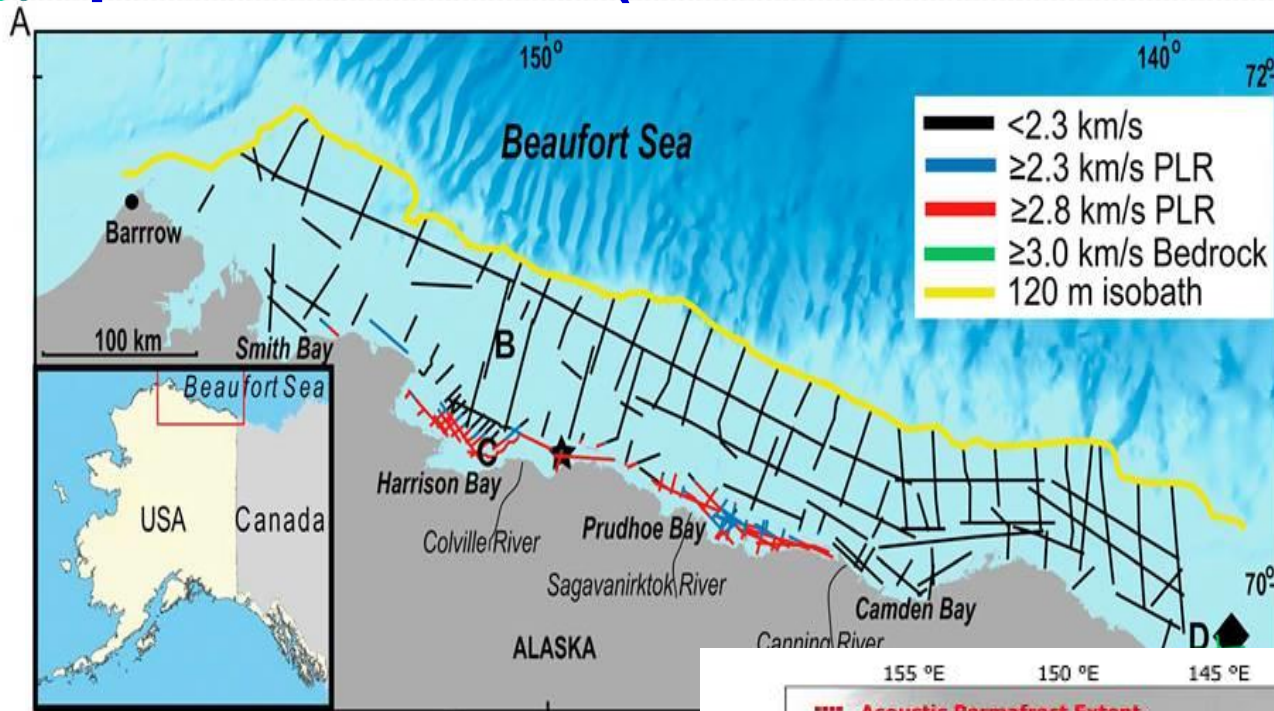
# Деградация субаквальной мерзлоты Карского и юго-восточной части Баренцева морей



**Выводы по СММП (Васильев, 2018):**

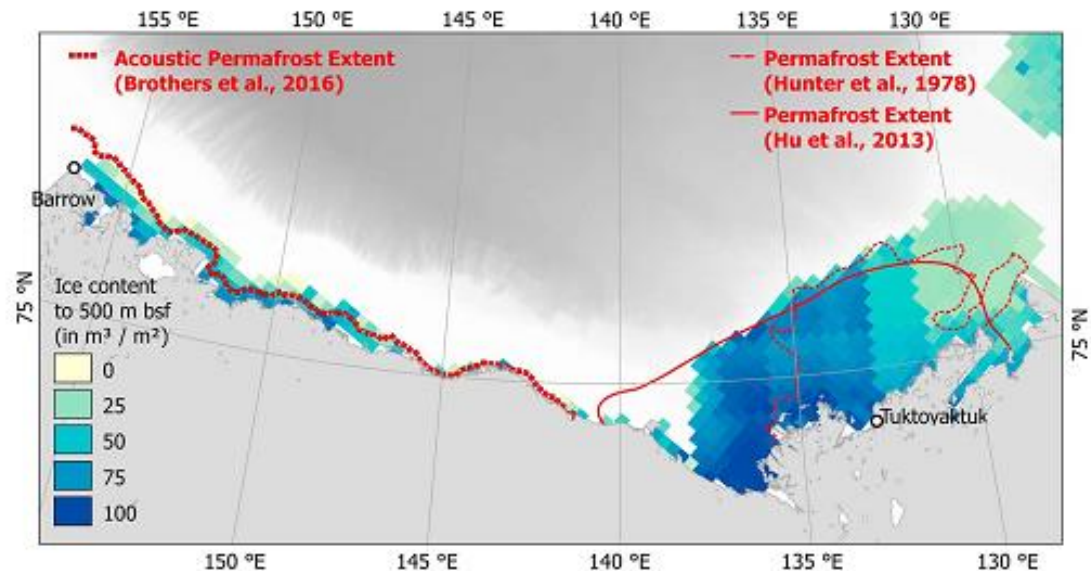
- субаквальная мерзлота в Западном секторе Российской Арктики находится в неустойчивом квазиравновесном состоянии с температурой близкой к фазовым переходам;**
- скорость деградации субаквальной мерзлоты сверху составляет около 2,5 – 0,0 см/год;**
- оставшееся время «жизни» субаквальной мерзлоты – первые тысячи лет.**

# Распространение подводной мерзлоты у берегов Аляски (Brothers et al, 2012)

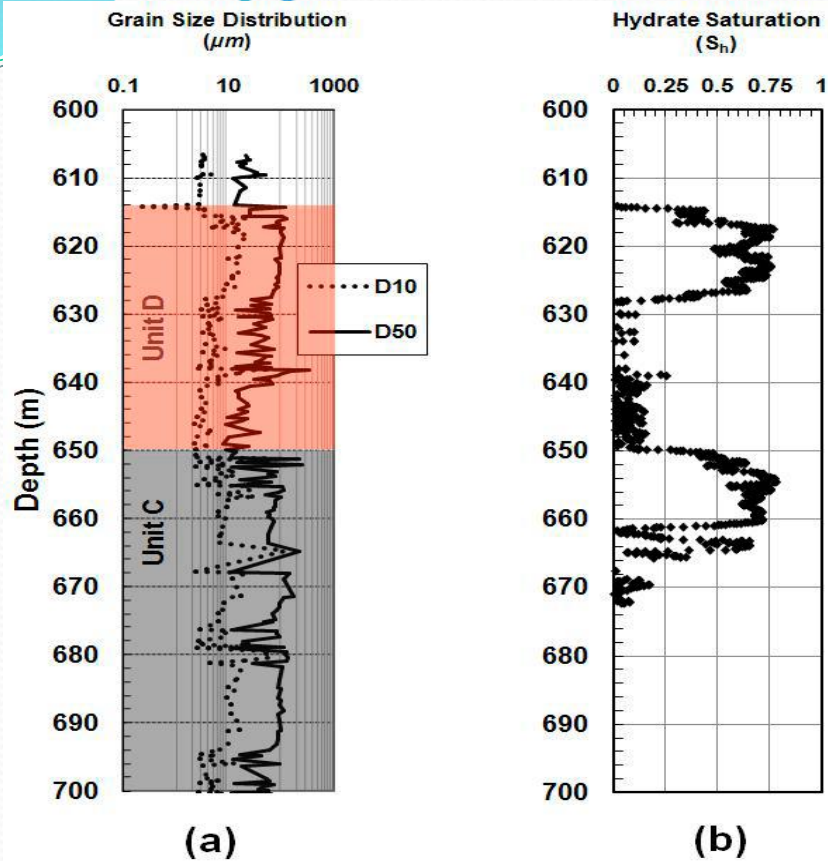


Ice-bearing permafrost distribution on the U.S. Beaufort Sea shelf based on observation of high-velocity refractions (red, blue) in pre-stack seismic data with inset showing study location.

На основе анализа сейсмических данных получено, что СММП заканчиваются в пределах 30 км от берега и не выходят за пределы 20-метровой изобаты



# Газовые гидраты – фактические данные



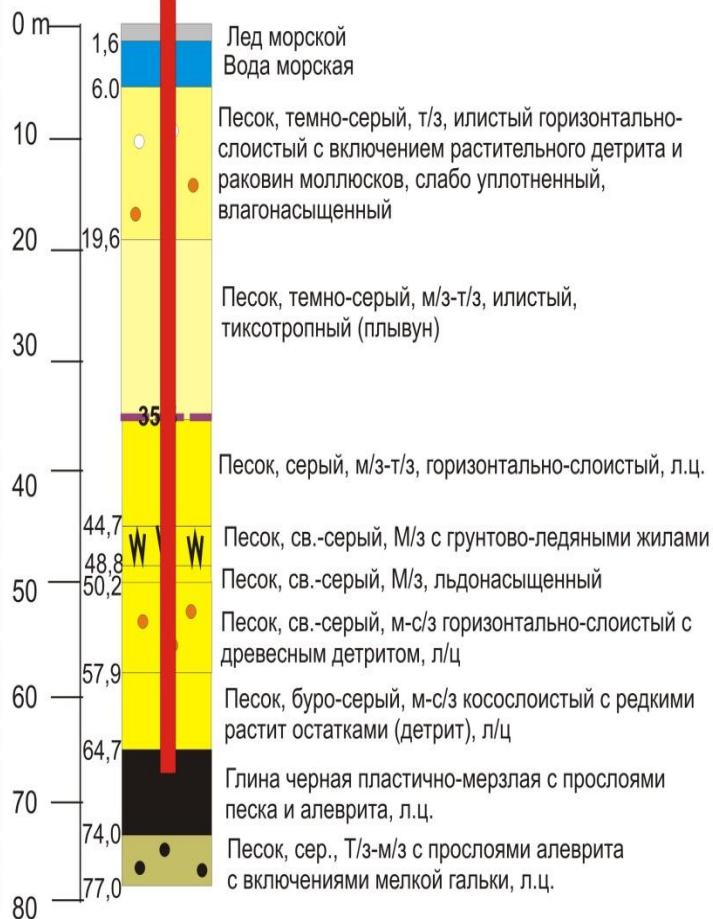
Метановые пузыри во льду у побережья Аляски  
(<http://www.climatewatch.noaa.gov>)

Континентальный склон Аляски. Газовые гидраты расположены между месторождениями Прадхо Бей и Купарук Ривер в 70–200 км от берега. Газогидраты в этом районе приурочены к шести горизонтам песчаников и залегают в интервале глубин от 550 до 700 м; мощность слоев – от 7 до 30 м.

# Буровой профиль экспедиции «Южный берег моря Лаптевых»



## Скважина С-2



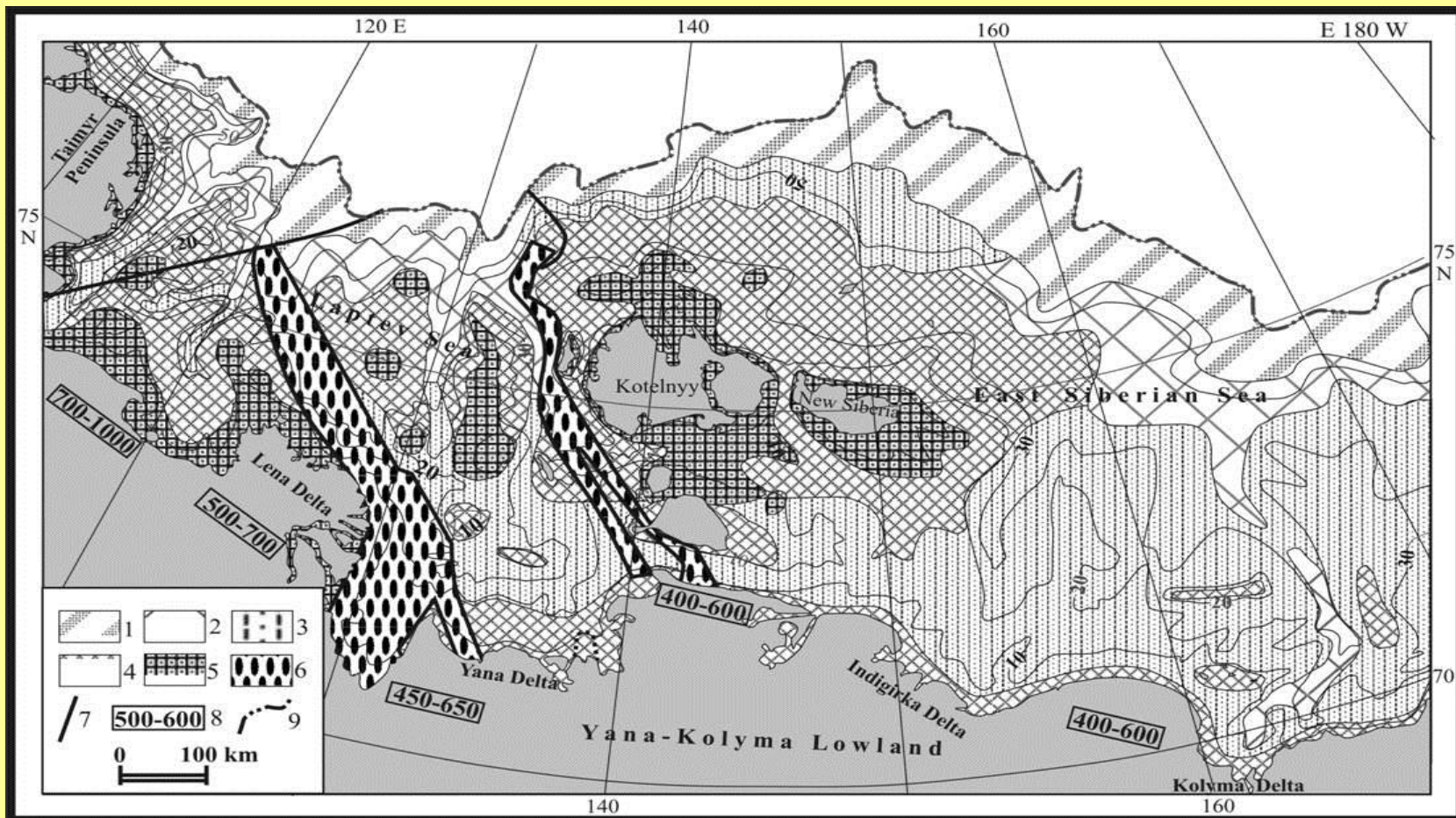
**Закономерности распространения  
и условия залегания СММП до сих  
пор не установлены из-за  
отсутствия достаточной прямой  
геологической информации.**



**Изучение криогенных  
процессов в прибрежно-  
шельфовой зоне Арктики на  
основе математического  
моделирования**



# Модели распространения подводной мерзлоты

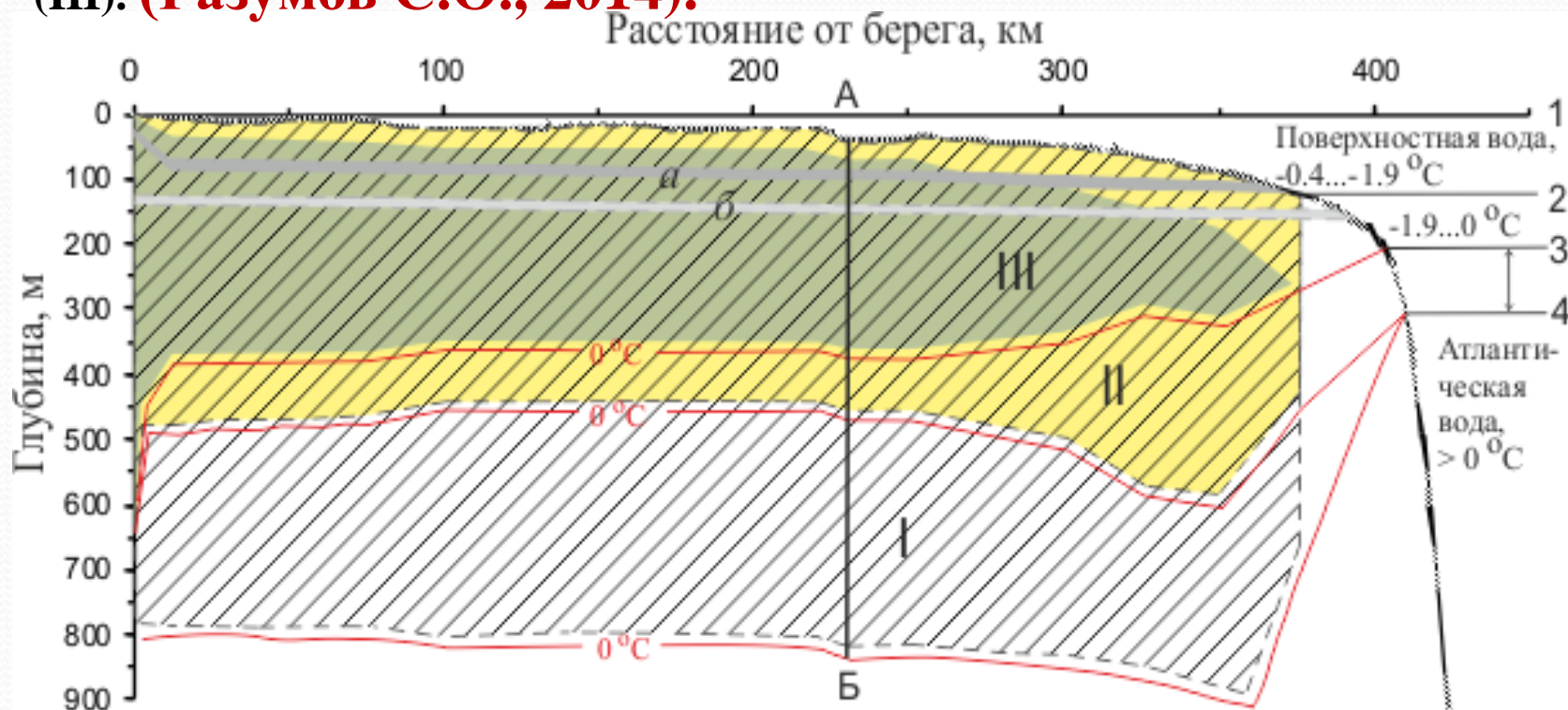
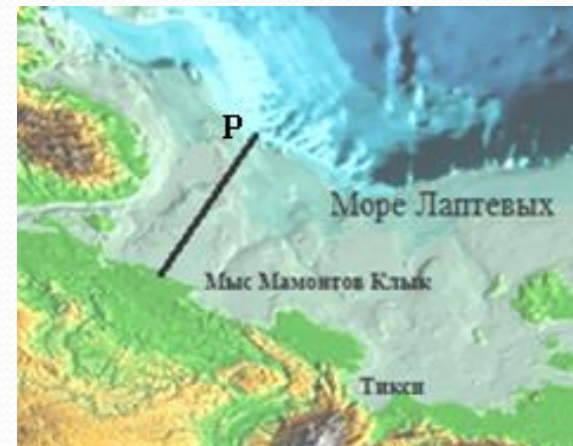


Модель распространения СММП на шельфе морей Лаптевых и Восточно-Сибирского (моделирование с использованием геотермального теплового потока -  $45 \text{ mW/m}^2$ ). Мощность СММП (м): 1- прерывистая,  $\leq 100$ ; непрерывная 2- 100-200; 3- 200- 300; 4- 300-400; 5- 400-600; 6- 100-600 в рифтах с открытыми таликами; 7- сквозные талики по крупным тектоническим разломам (предполагаемые); 8- мощность ММП на побережье; 9- граница арктического шельфа (Романовский и др., 2005)

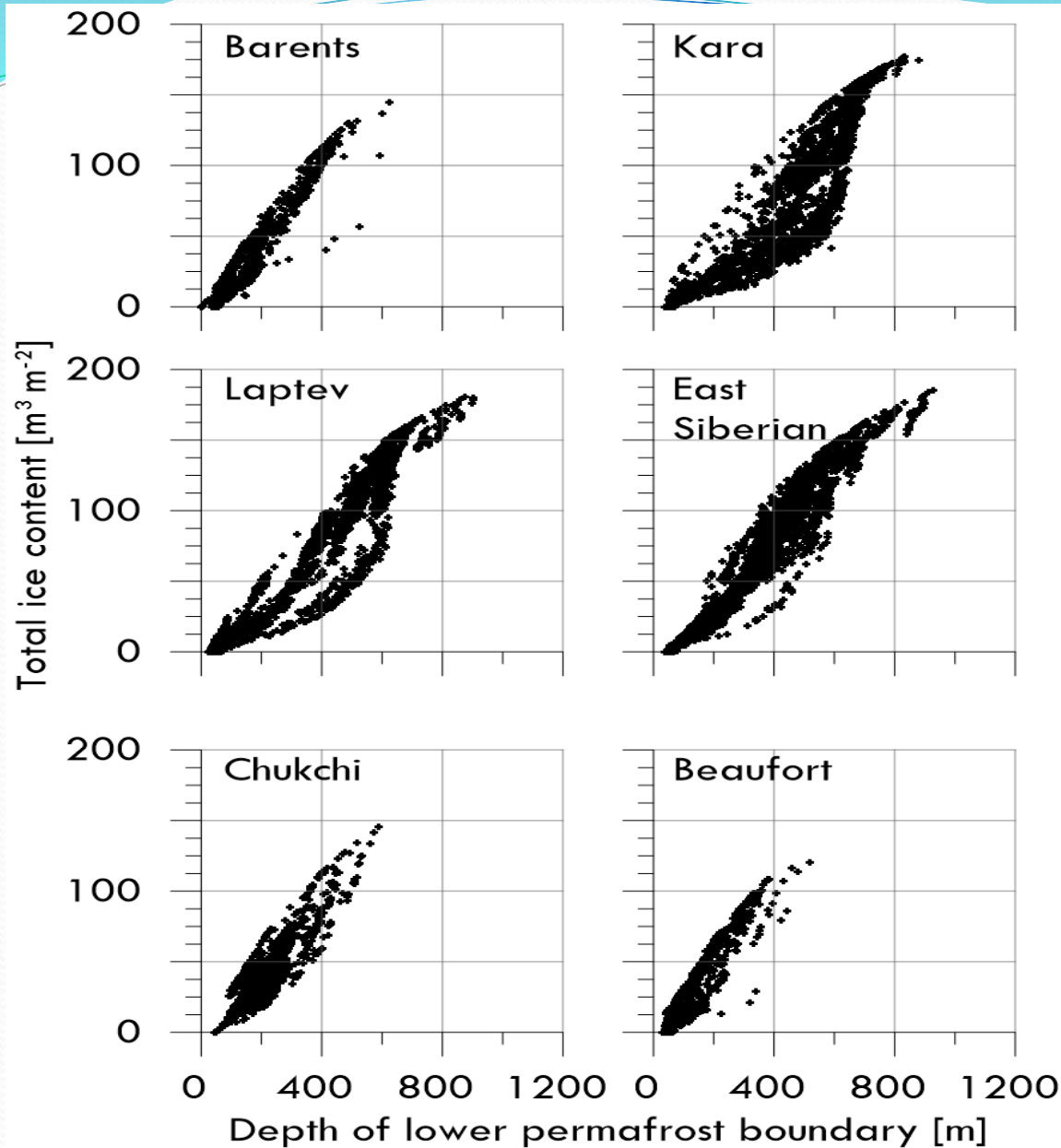
# Моделирование мощности СММП для шельфовой зоны западного сектора моря Лаптевых

**2-х мерная модель эволюции криолитозоны шельфа западной части моря Лаптевых (профиль Р):**

ММП, сформированные в субэаральных условиях 117-50 тыс. лет назад (I), частично деградировавшие в условиях пассивного оледенения от 50 до 18-4 тыс. лет назад (II) и частично деградировавшие в субаквальных условиях от 18-4 до 0 тыс. лет назад (III). (Разумов С.О., 2014).



# Оценка МОЩНОСТИ СММП арктических морей



Submarine Permafrost  
Map in the Arctic Modeled  
Using

1-D Transient Heat Flux  
(SuPerMAP) 2019

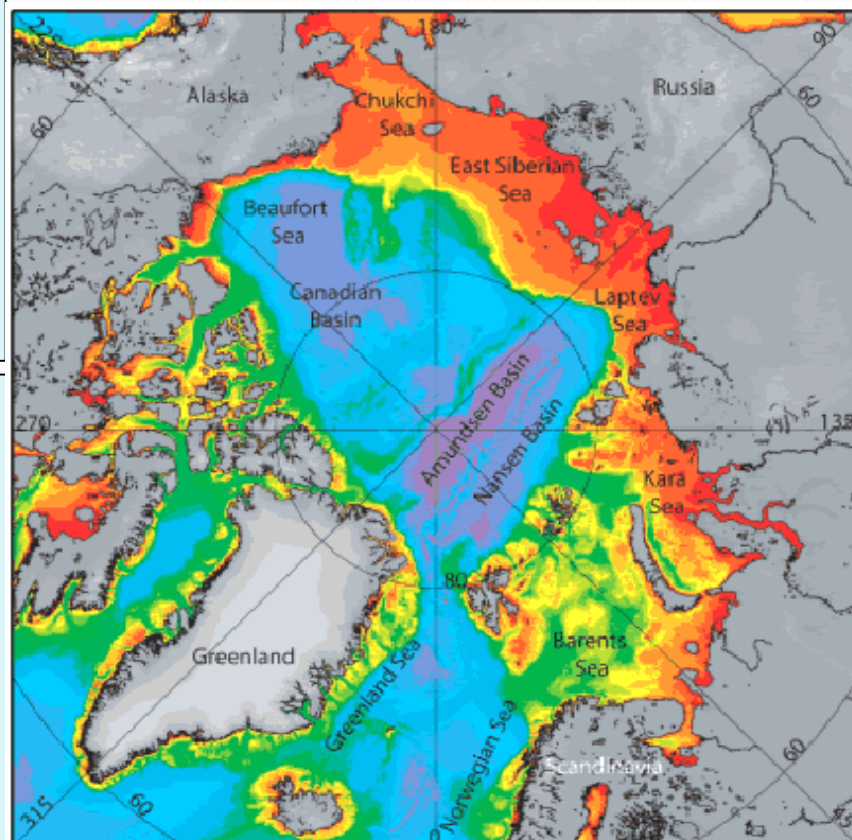
**P. P. Overduin , T.  
Schneider von Deimling,  
F. Miesner ,M. N.  
Grigoriev , C. Ruppel,  
A. Vasiliev, H. Lantuit, B.  
Juhls, and S.Westermann**

# Численный подход на основе модели океан-лед ИВМиМГ СО РАН

- Численная модель крупномасштабной динамики океана (z-версия модели) (Kuzin, 1985, Голубева и др., 1992, Golubeva, [2001], Golubeva and Platov, [2007], Голубева, 2008).
- Ледовая модель CICE 3.0 относится к категории эластичных вязко-пластичных моделей (W.D.Hibler, 1979; E.C.Hunke, J.K.Dukowicz, 1997; G.A.Maykut 1971 С.М.Битз, W.H.Lipscomb 1999, J.K.Dukowicz, J.R.Baumgardner 2000, W.H.Lipscomb, E.C.Hunke 2004 )

- Модель субаквальной мерзлоты (Malakhova, Eliseev, 2017)
- Палеогеографический сценарий
- $R, T$  соотношения для расчета зоны стабильности метангидратов («HydrateResSim» )

- Численная модель переноса трассера (Малахова, Голубева, 2013)
- Диффузионные потоки на дне + субаквальная мерзлота
- Параметризация процессов окисления
- Поток метана в атмосферу



# Моделирование динамики СММП

$$C_T \frac{\partial T_S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_T \frac{\partial T_S}{\partial z} \right)$$

$$C_M \frac{\partial T_S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_M \frac{\partial T_S}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial(W_N S)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D_S \frac{\partial S}{\partial z} \right)$$

Фазовый переход на границе между мерзлой и талой зоной:

$$T_S = T_F(S, P)$$

$$\left( \lambda_T \frac{\partial T_{ST}}{\partial z} - \lambda_M \frac{\partial T_{SM}}{\partial z} \right) = L(W_S(z) - W_N) \frac{\partial X}{\partial t}$$

Граничные условия

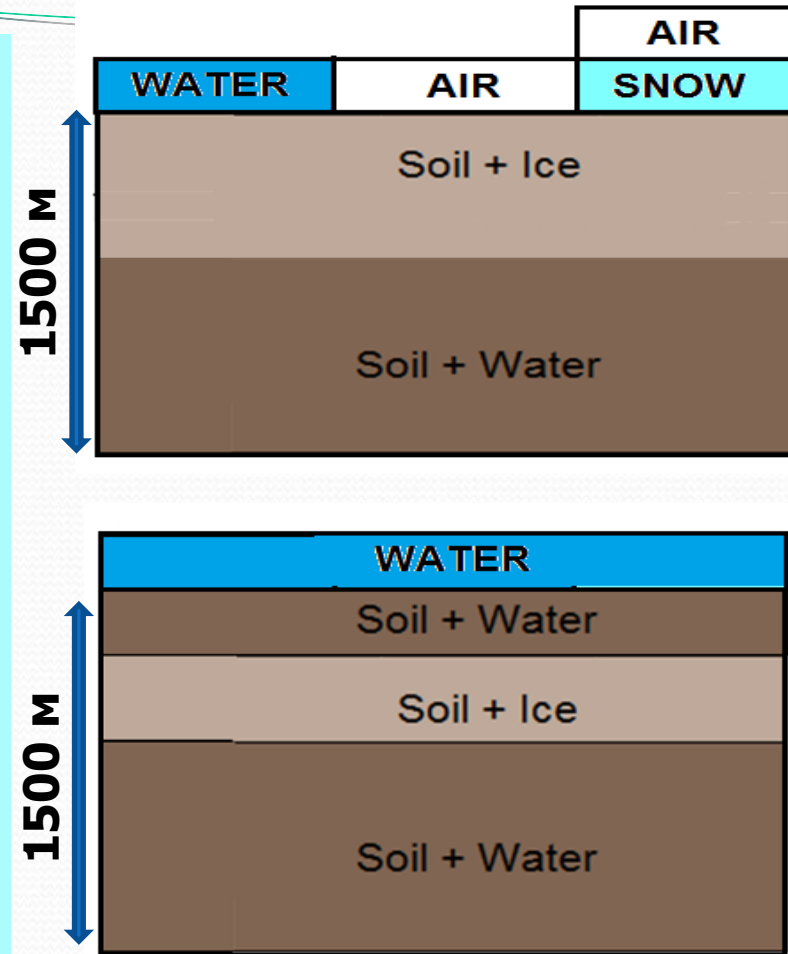
$$z = 0 : T_S = T_B(t)$$

$$z = H_S : \lambda_T \frac{\partial T_S}{\partial z} = Q_T$$

$$T_B(t) = T_W(t),$$

$$T_B(t) = T_A + T_{PAL}(t)$$

$$T_F(z) = -0.064 \cdot S(z) - 0.073 \cdot P(z)$$

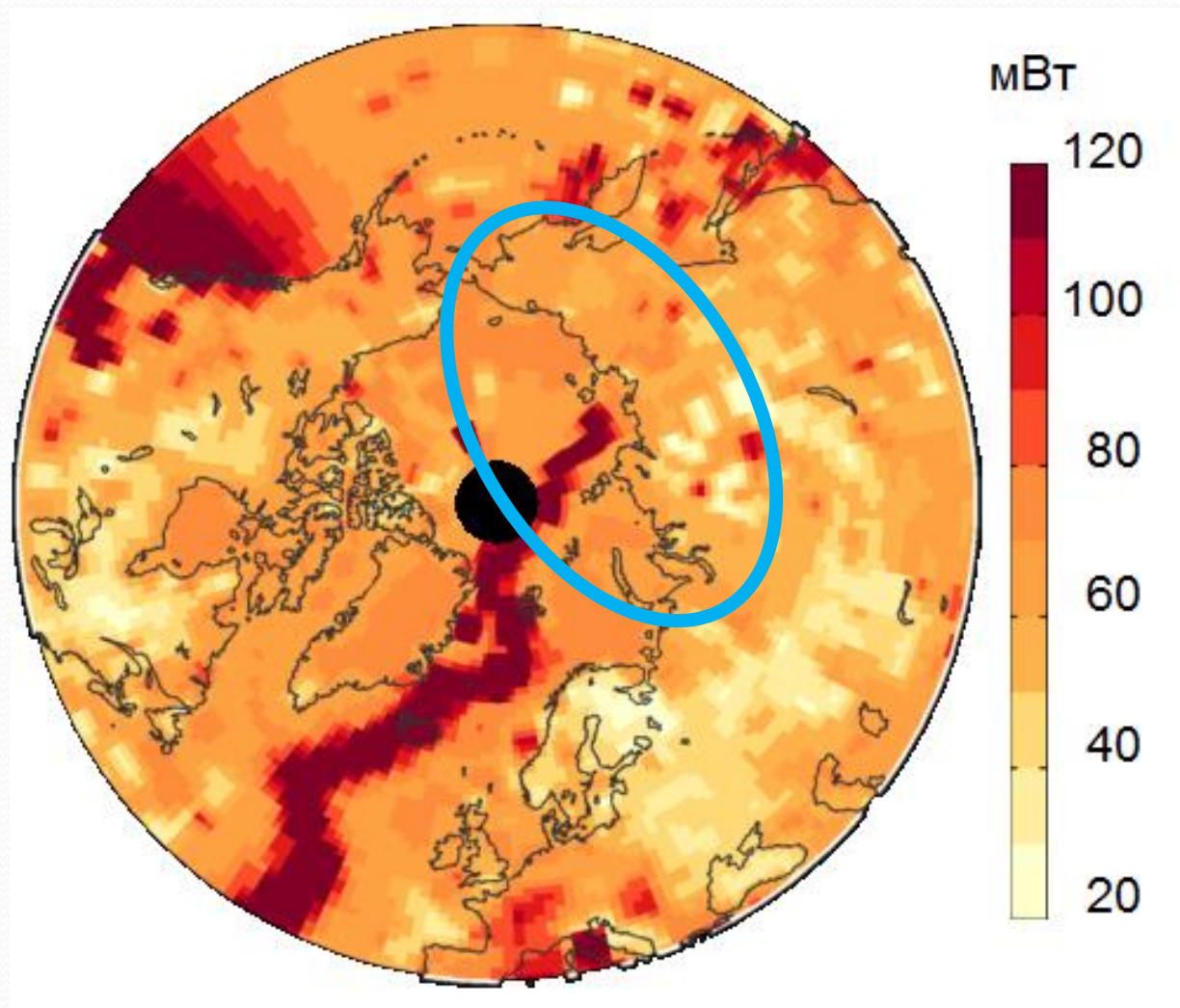


«HydrateResSim»

[Reagan M. T., Moridis G. J., 2008 ]

# Распределение геотермического потока по данным

(Davies J. H. Global map of Solid Earth surface heat flow, 2013)



# Палеогеографический сценарий

Учет глобальных климатических изменений и колебаний уровня моря в регионе.

$$T_B = \begin{cases} T_{BW} \\ T_A + \Delta T_{Pal} \end{cases}$$

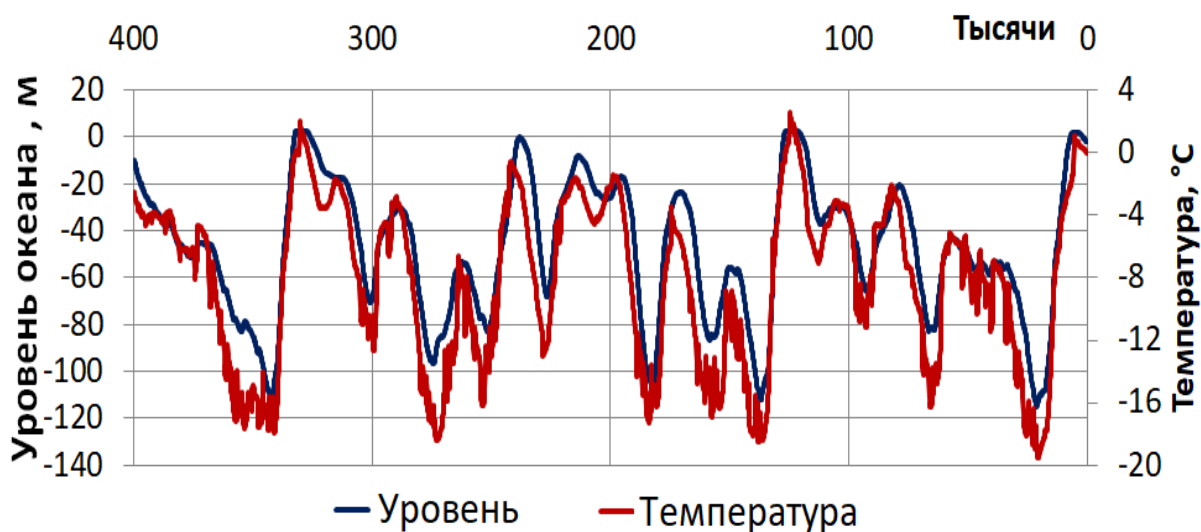
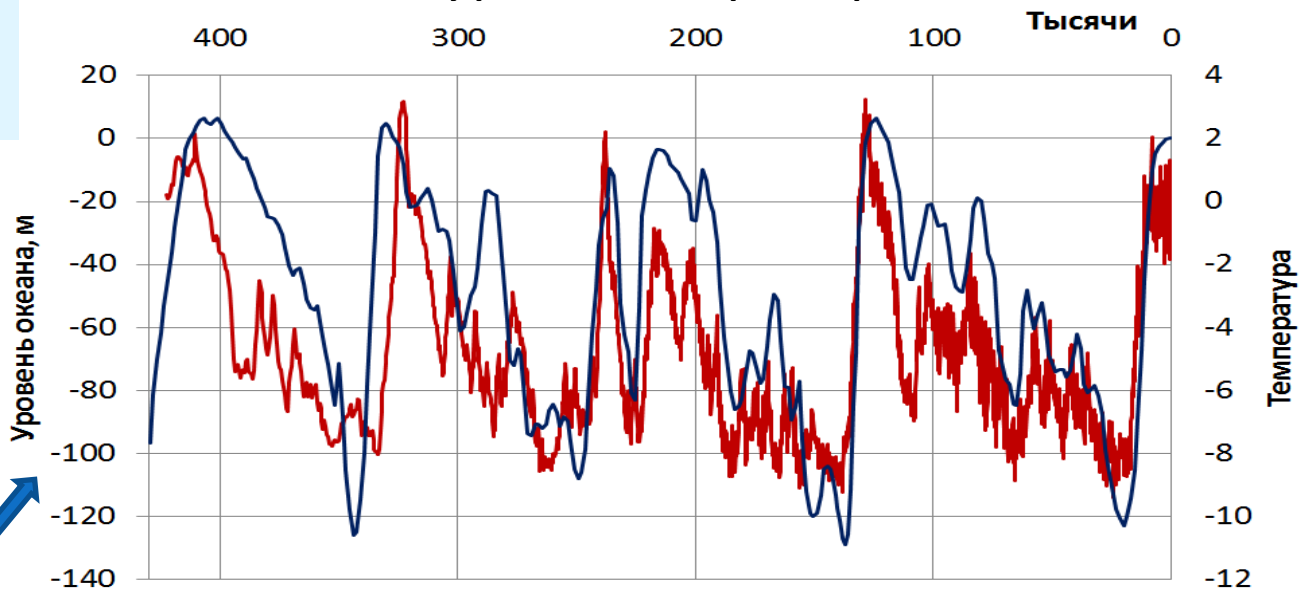
**Waelbroeck C., et al 2002 .**  
Sea-level and deep water temperature changes derived from benthic foraminifera isotopic records

**Petit J.R., et al 1999**  
Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica

**Bauch H. A., et al 2001**  
Chronology of the Holocene transgression at the North Siberian margin

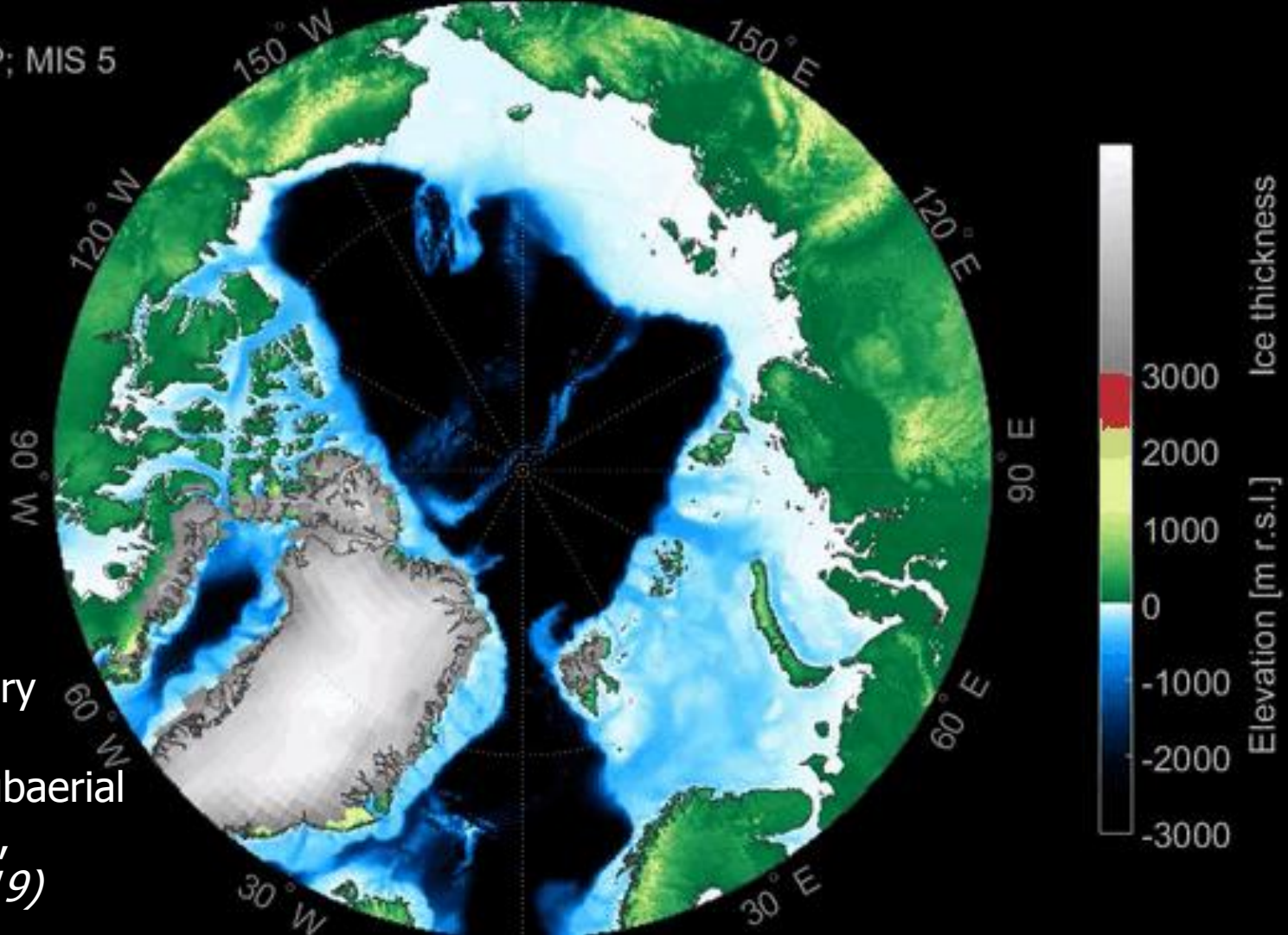
**V. Petoukhov, et al., 2000**  
CLIMBER-2: a climate system model of intermediate complexity.

**Ganopolski et al., 2016**



# Сценарий развития климатических изменений в период последнего ледникового цикла

-126000 yr BP; MIS 5



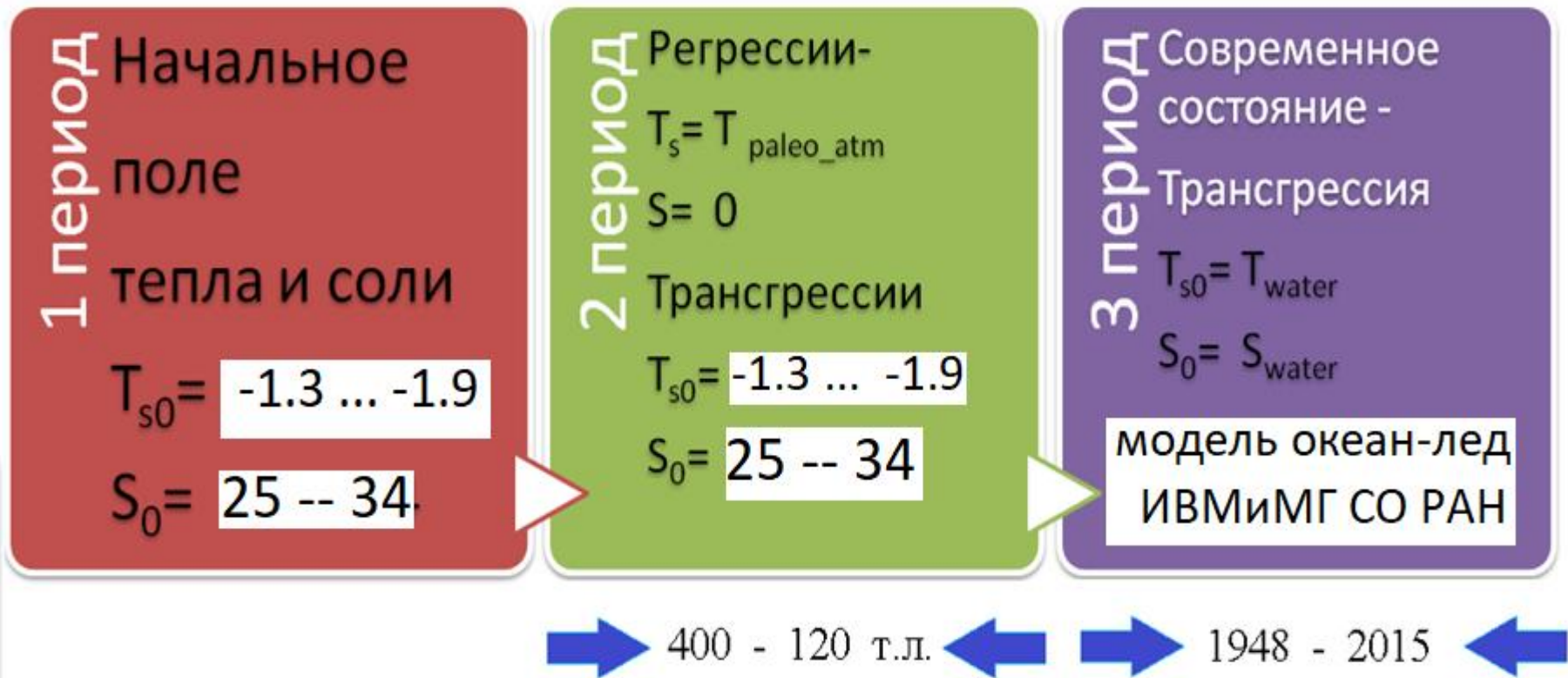
Upper boundary  
condition type  
(subglacial, subaerial  
or submarine),  
(Overduin, 2019)

**V. Petoukhov, et al., 2000** CLIMBER-2: a climate system model of intermediate complexity.

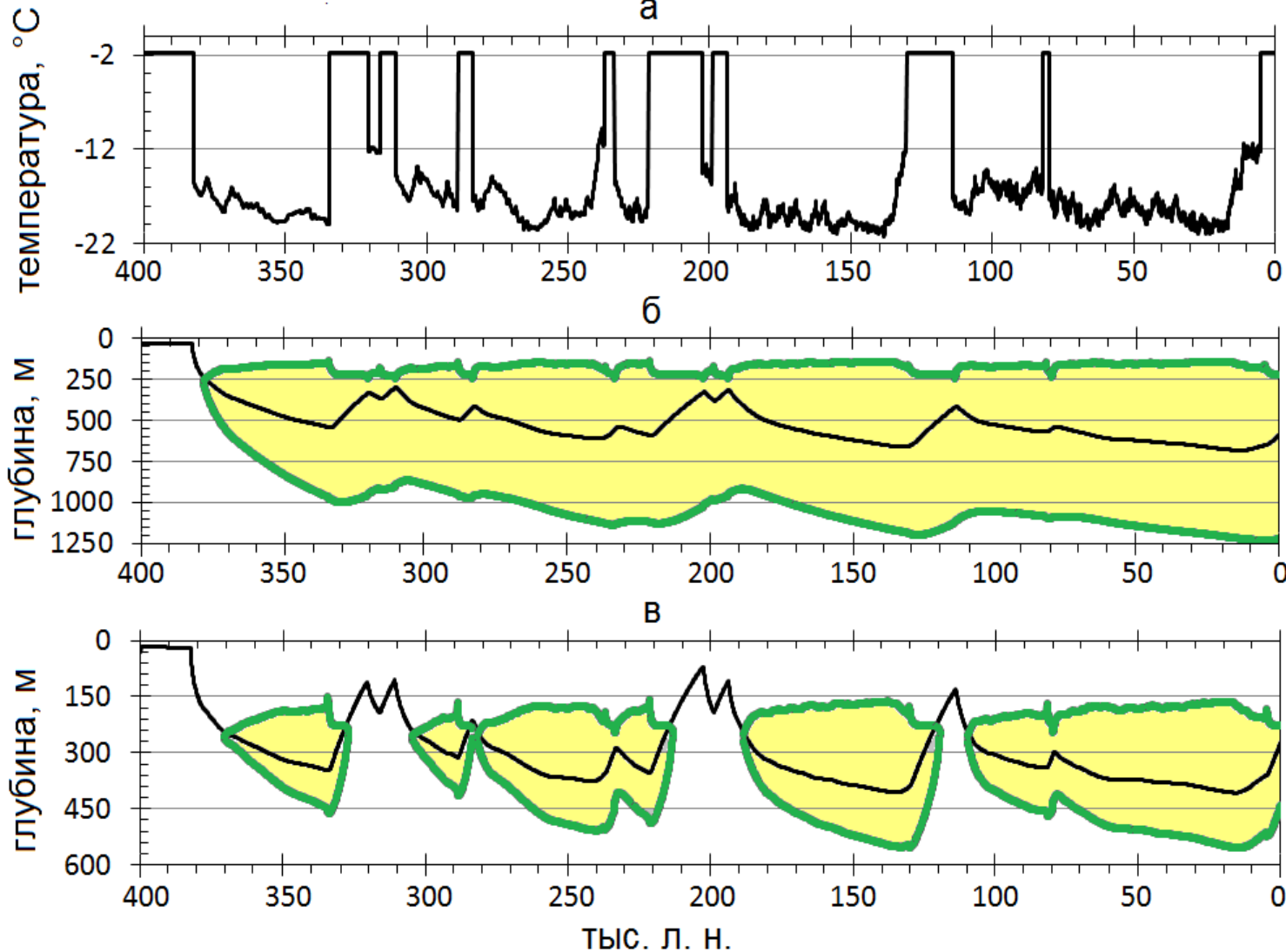


# Описание численного эксперимента

- Расчет температурного поля пород для периода 120-400 тыс. лет с учетом палеогеографического сценария.
- В период регрессии на поверхности задается средняя температура воздуха с учетом палеореконструкций
- Во время затопления шельфа поверхностная температура донных отложений увеличивается до средней температуры воды. (Romanovskii N.N., 2005; Гаврилов А.В., 2006; Разумов С.О., 2014; Overduin P. P., 2019)



# Результаты: Эволюция СММП и ЗСГМ последние 400 тыс.лет



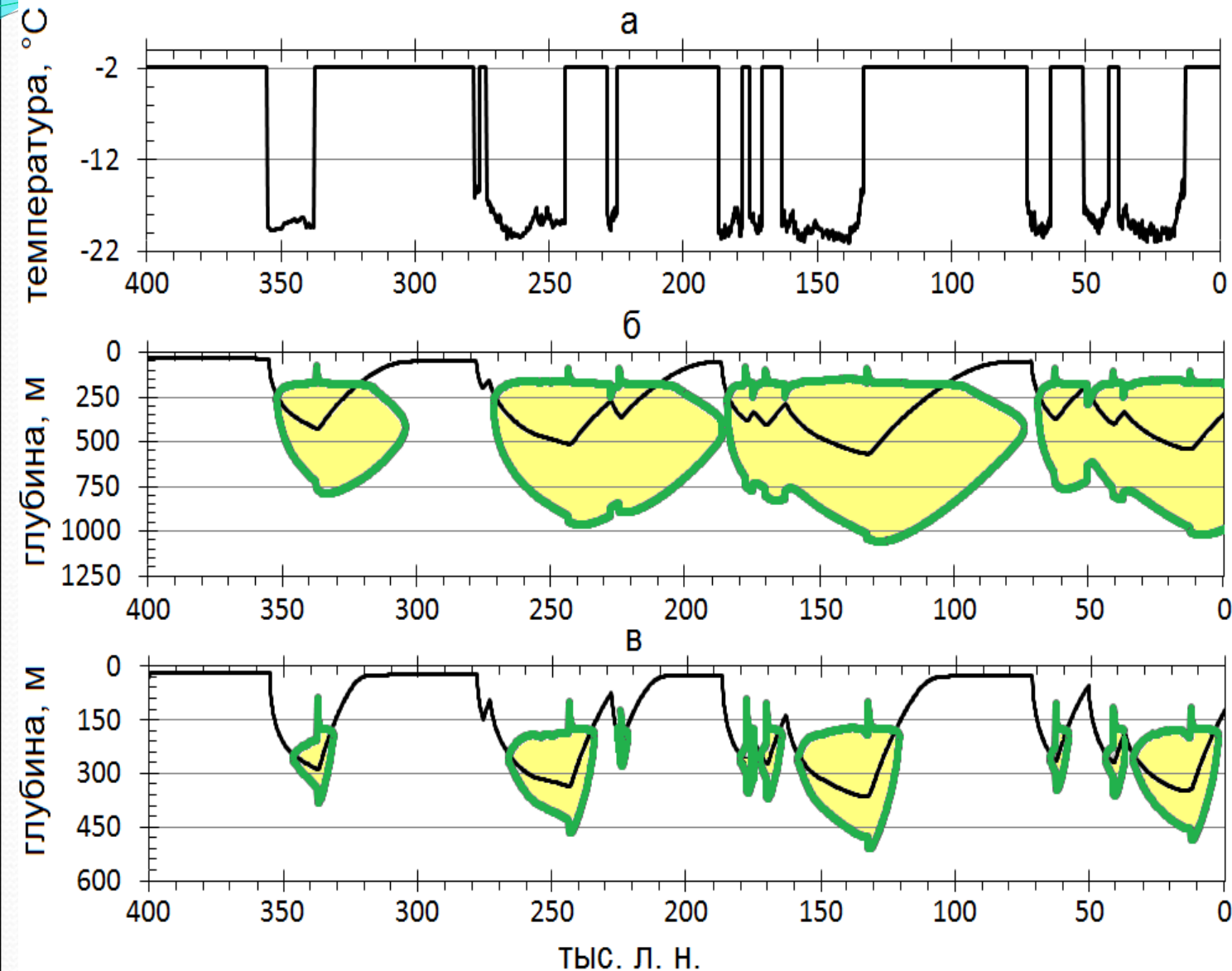
Изменения по времени: температуры на верхней границе расчетной области (а), нижней границы СММП, верхней и нижней границ ЗСГМ для глубин шельфа

**20 м**

**(б)  $Q_T=60$   
мВт/м<sup>2</sup>**

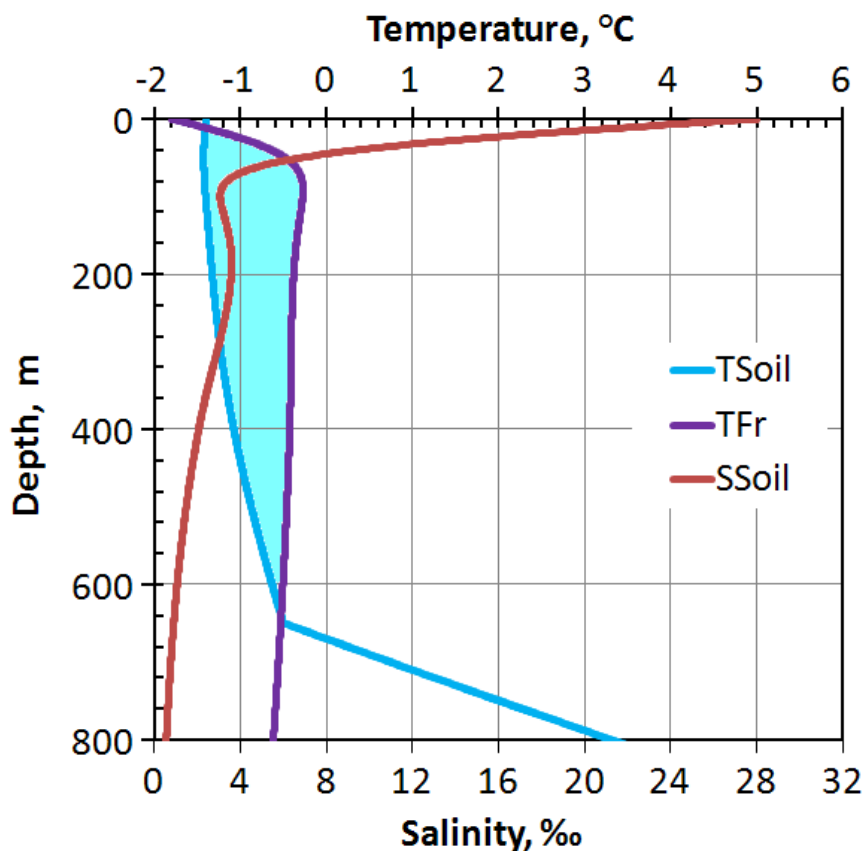
**(в)  $Q_T=100$   
мВт/м<sup>2</sup>**

# Эволюция СММП и ЗСГМ последние 400 тыс.лет

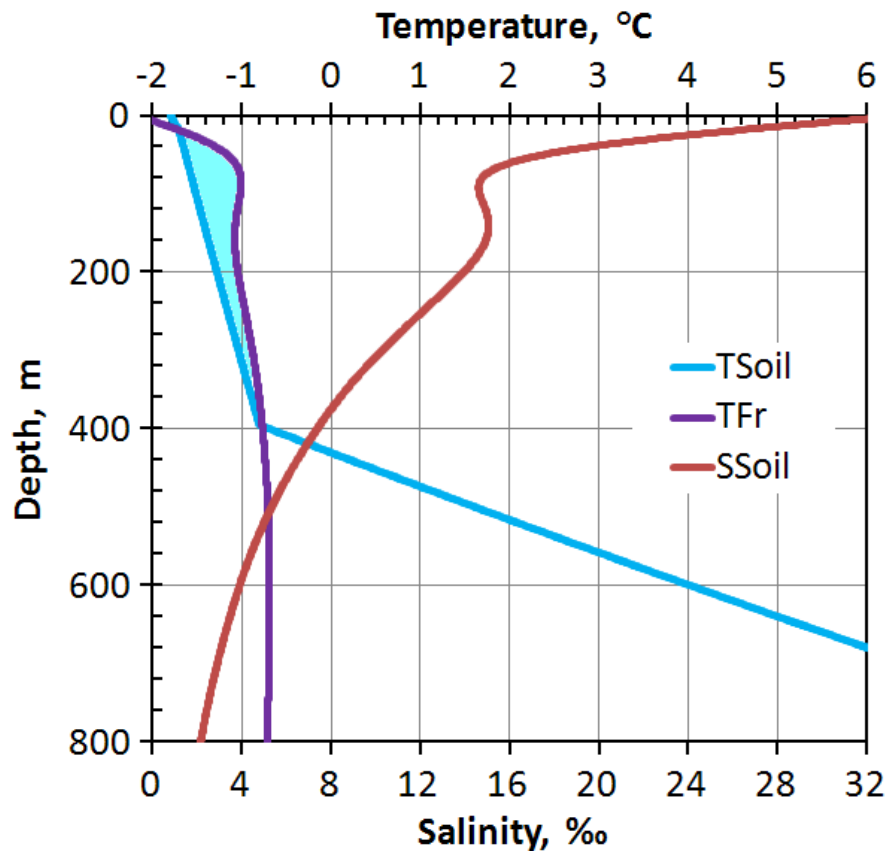


Изменения по времени: температуры на верхней границе расчетной области (а), нижней границы СММП, верхней и нижней границ ЗСГМ для глубин шельфа **70 м**, (б)  $Q_T=60$   $\text{МВт/м}^2$  (в)  $Q_T=100$   $\text{МВт/м}^2$

# Примеры профилей температуры и солёности в донных отложениях ( $Gt = 60 \text{ мВт/м}^2$ )

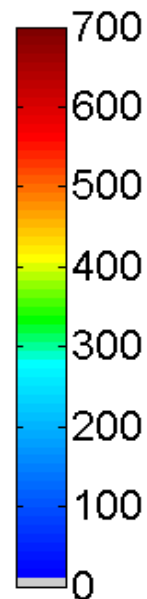
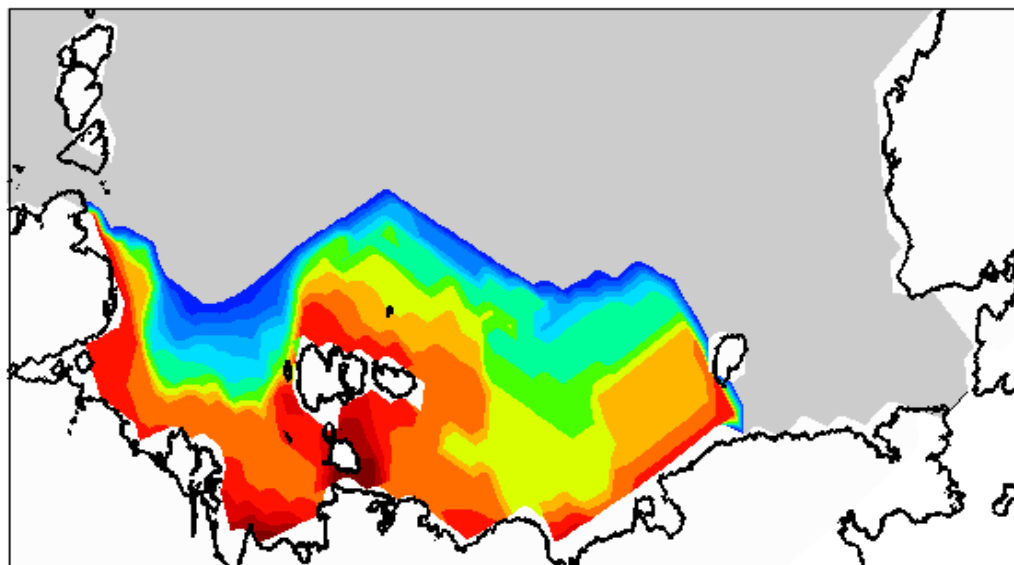


Профили температуры, солёности, температуры замерзания в донных отложениях шельфа, при водной глубине **20 м**

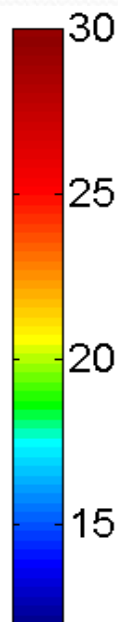
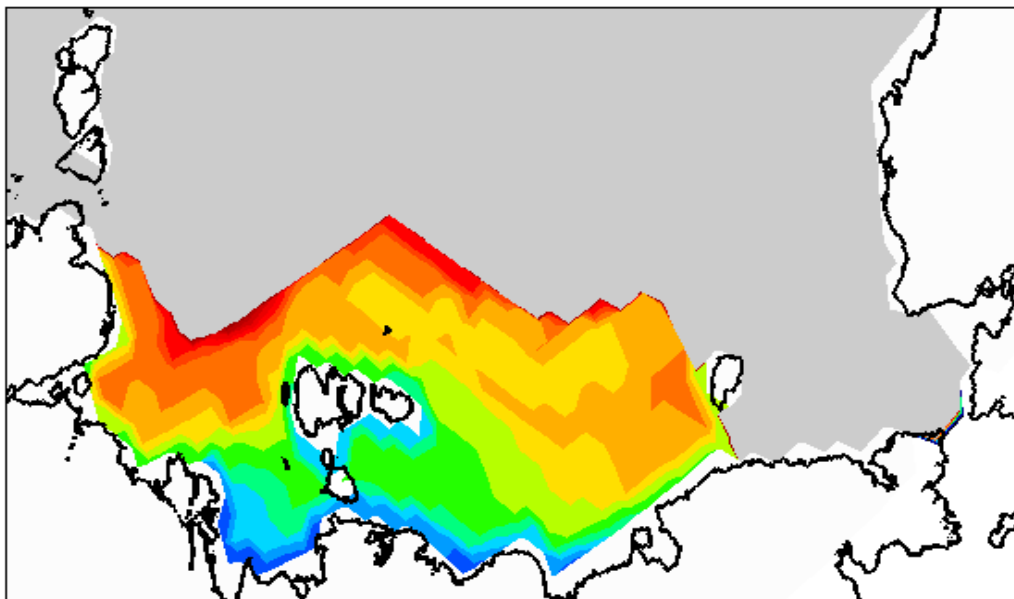


Профили температуры, солёности, температуры замерзания в донных отложениях шельфа, при водной глубине **70 м**

# Мощность СММП по модельным оценкам

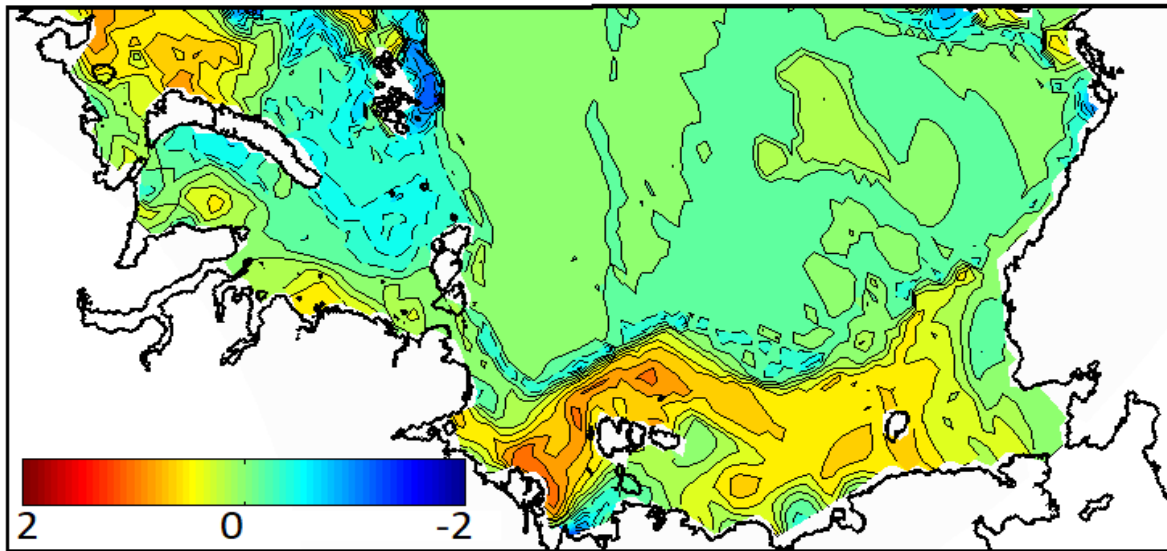


**Положение  
нижней границы  
мерзлоты в  
донных  
отложениях на  
шельфе морей  
Лаптевых и  
Восточно  
Сибирского**



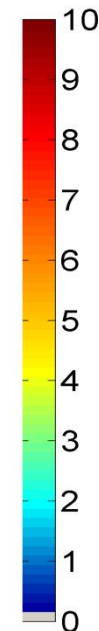
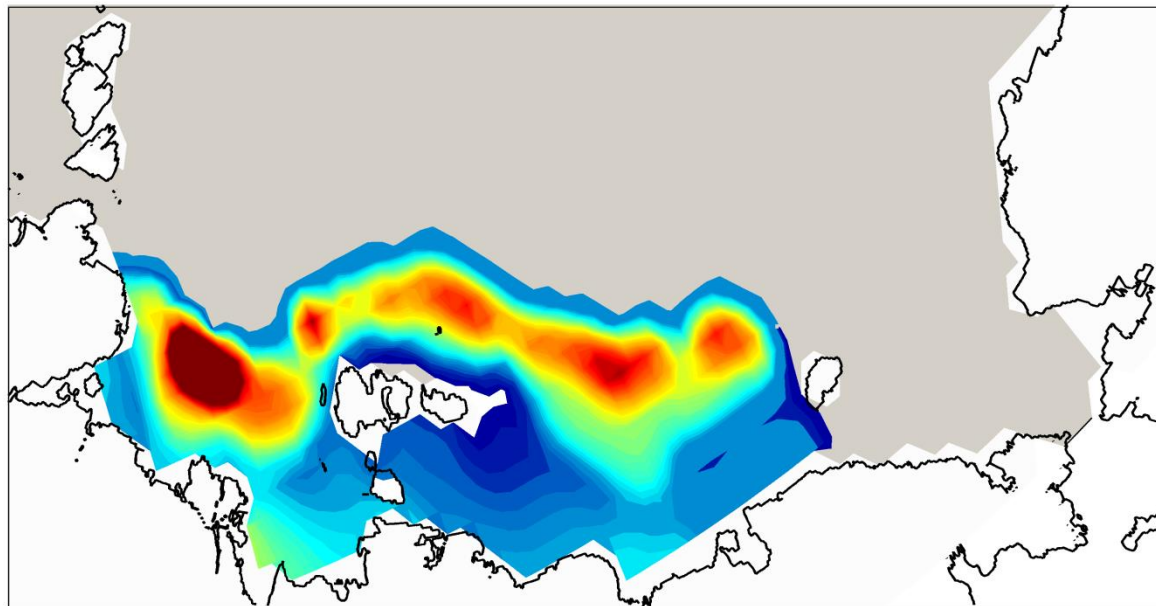
**Положение  
верхней границы  
мерзлого слоя  
ниже дна**

# Изменение положения верхней границы субаквальной мерзлоты



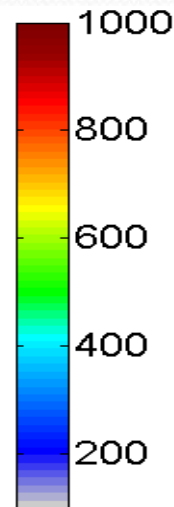
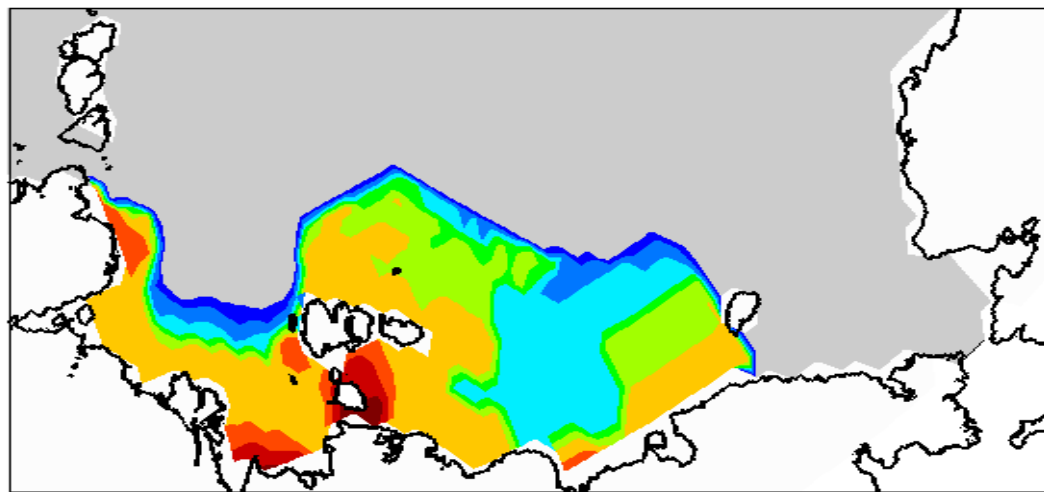
Изменение придонной температуры океана (разность осредненной за период 2010-2015 и 1950-1955).

Модель океан-лед ИВМиМГ (Голубева, 2018)

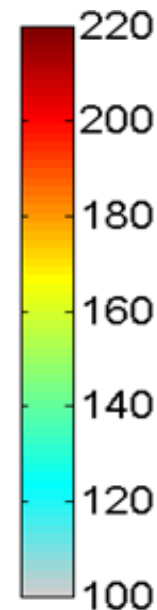
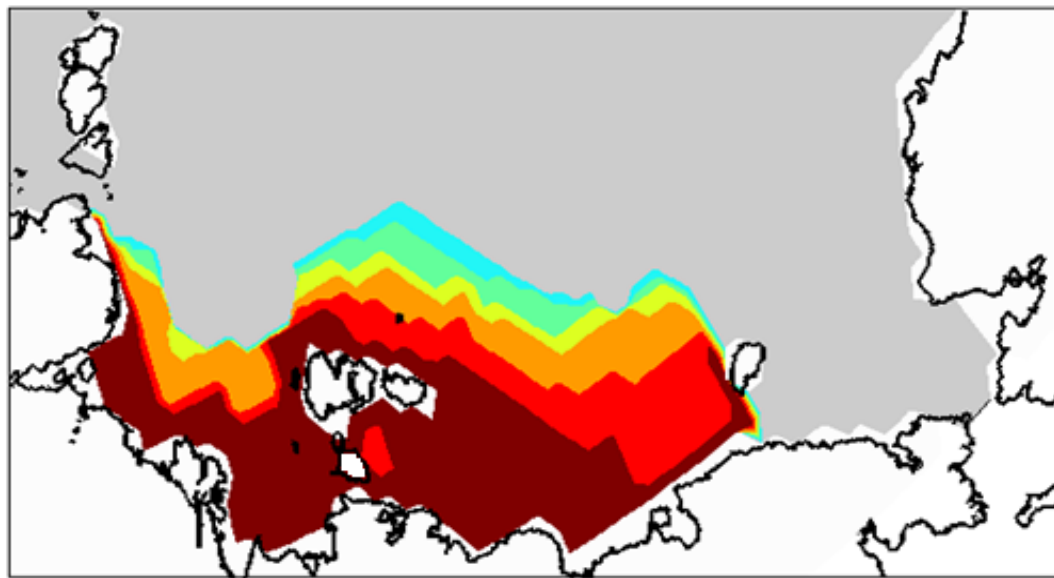


Заглубление верхней границы субаквальной мерзлоты для периода 1950-2015 гг

# Зона стабильности метангидратов по модельным оценкам

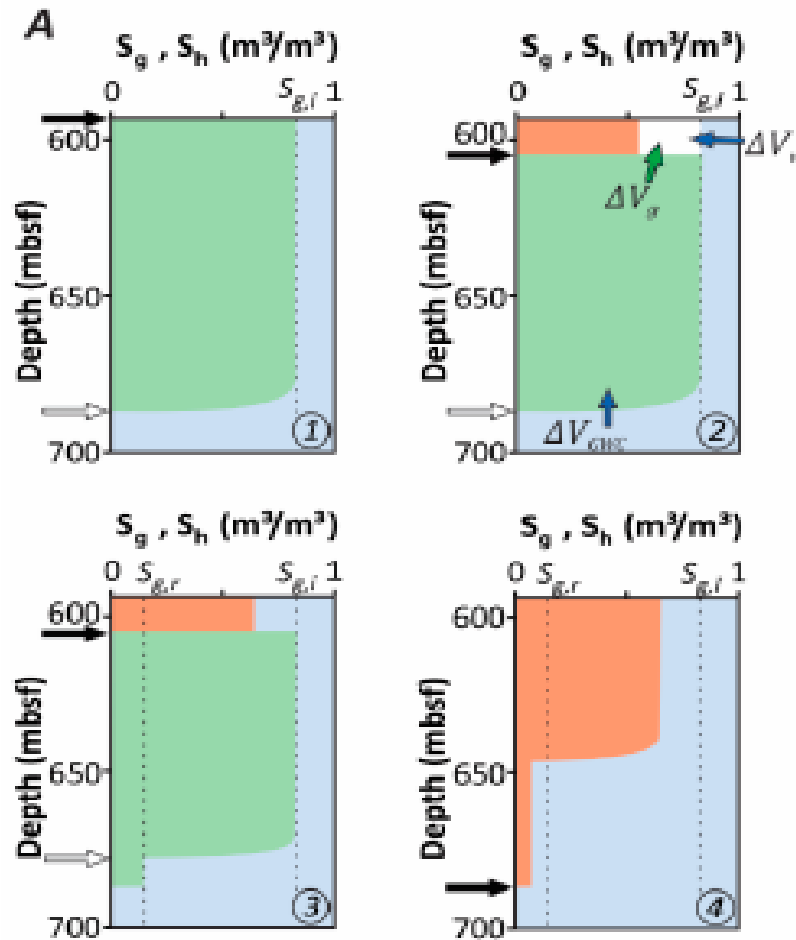


**Положение  
нижней границы  
ЗСГМ в донных  
отложениях на  
шельфе морей  
Лаптевых и  
Восточно -  
Сибирского**

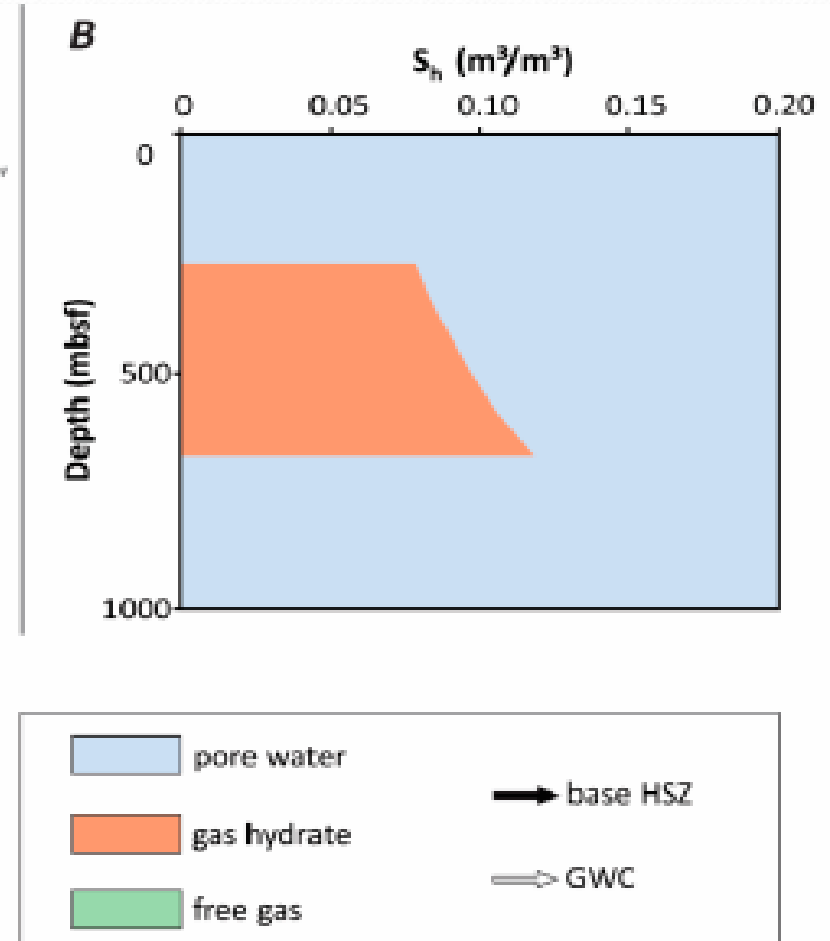


**Положение  
верхней границы  
ЗСГМ ниже дна**

# Гидратонасыщенность донных отложений



**Модель формирования метангидрата в слое СММП**  
(Behseresht J., Bryant S.L., 2012)

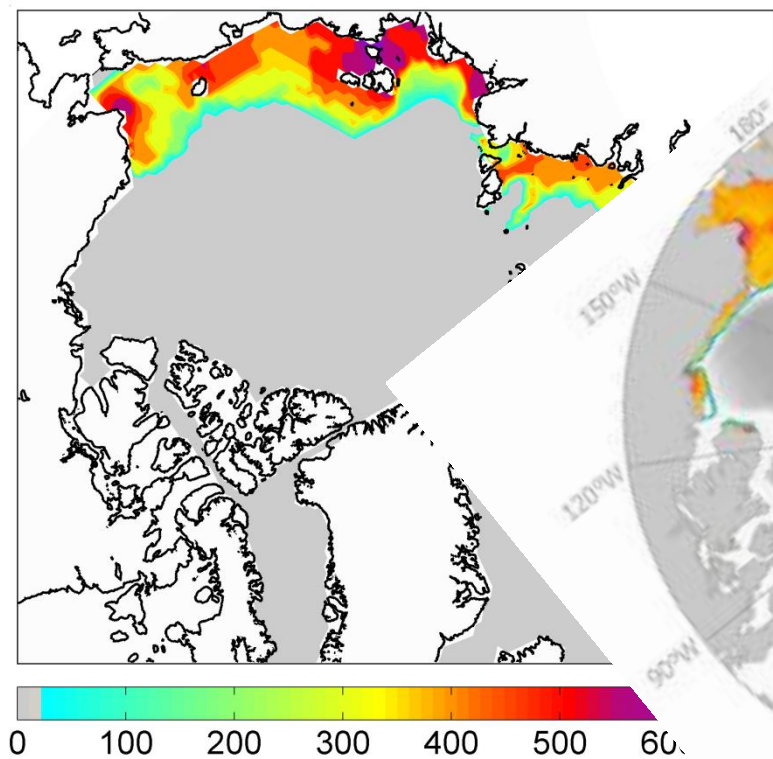


**Модель формирования метангидрата в донных отложениях океана**  
(Xu and Ruppel, 1999)

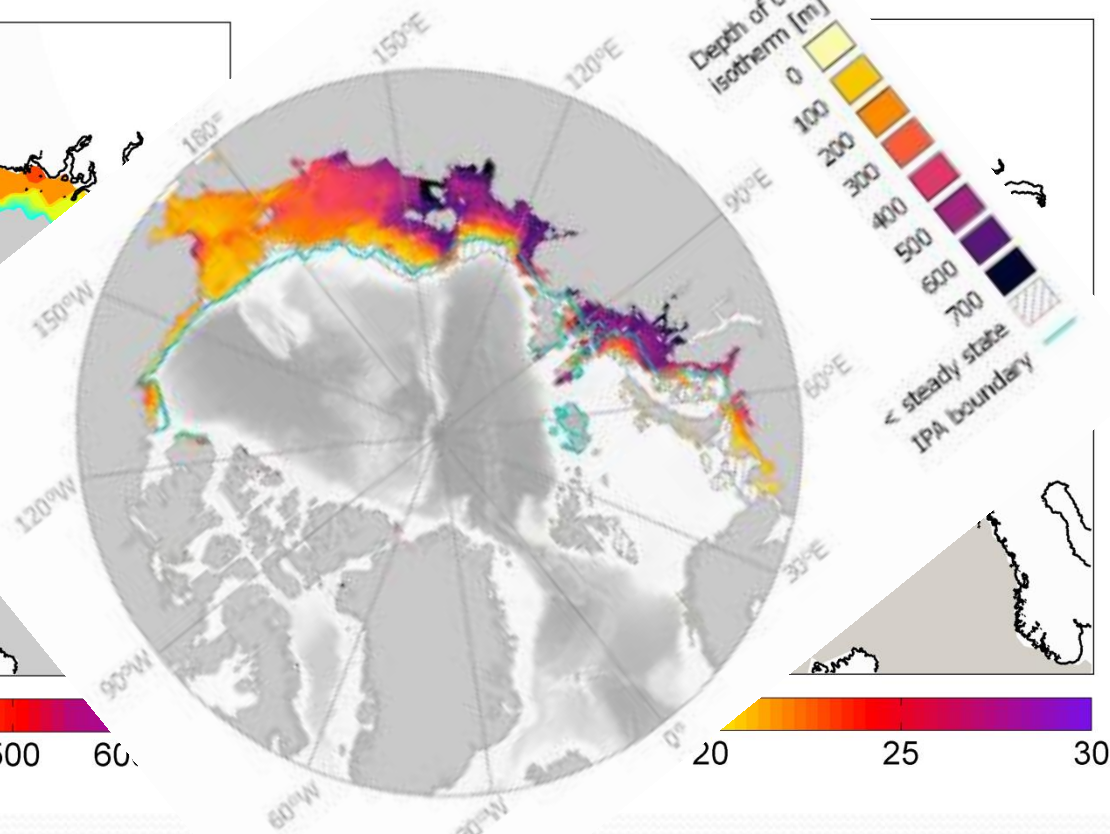


# Модельная оценка мощности и распространения СММП арктического шельфа

Положение нижней границы СММП под морским дном



Положение верхней границы СММП под морским дном



The distribution of modeled postindustrial cryotic sediment and the depth of the lower 0°C isotherm beneath the Arctic Ocean Shelf seas. (*P. P. Overduin, 2019*)

# ВЫВОДЫ

- Мощность СММП на шельфе Арктики по результатам математического моделирования может составить от 20 до 700 м в зависимости от глубины шельфа.
- Верхняя граница СММП расположена на глубине 10 - 40 м ниже морского дна в зависимости от области шельфа. Скорость разрушения мерзлых пород для мелководного шельфа составила 1-7 см/год. На внешнем шельфе – до 30 см/год
- На шельфе арктических морей России имеются необходимые условия для образования газовых гидратов.
- При этом верхняя граница ЗСГМ находится на глубине 120-220 м под морским дном.

# Влияние озерного термокарста

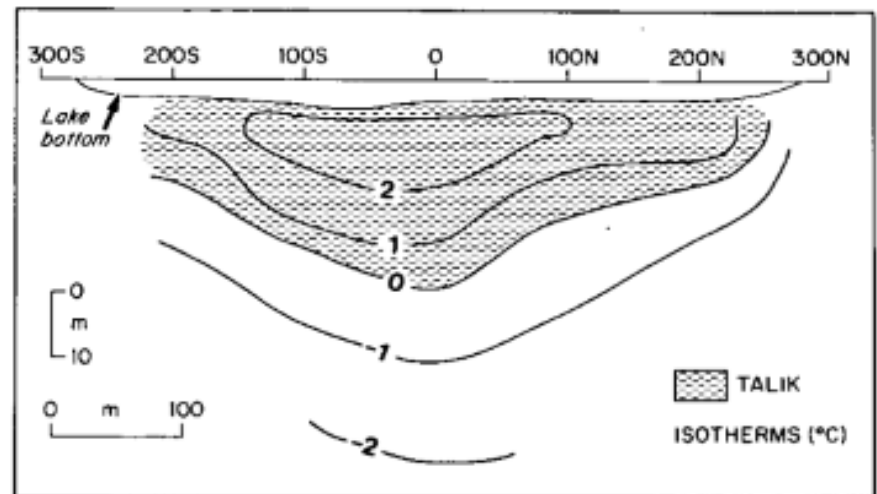


Ледовый комплекс в северной Якутии ( по материалам Соловьева П.А. и Григорьева М.Н.)

Источниками тепла, которое способно проникать на значительные глубины многолетнемёрзлых толщ, являются озёра глубиной более толщины ледяного покрова. [Burges et. al., 1982]

В прибрежной зоне Якутии развит **Ледовый Комплекс**. Это покровные массивы (возраст от 10 до 100 тыс. лет) суглинистых отложений, пронизанных мощными ледяными жилами.

**В эпохи потеплений, когда климат становился более теплым и влажным, по льдистым отложениям ЛК образовывались многочисленные термокарстовые озера**

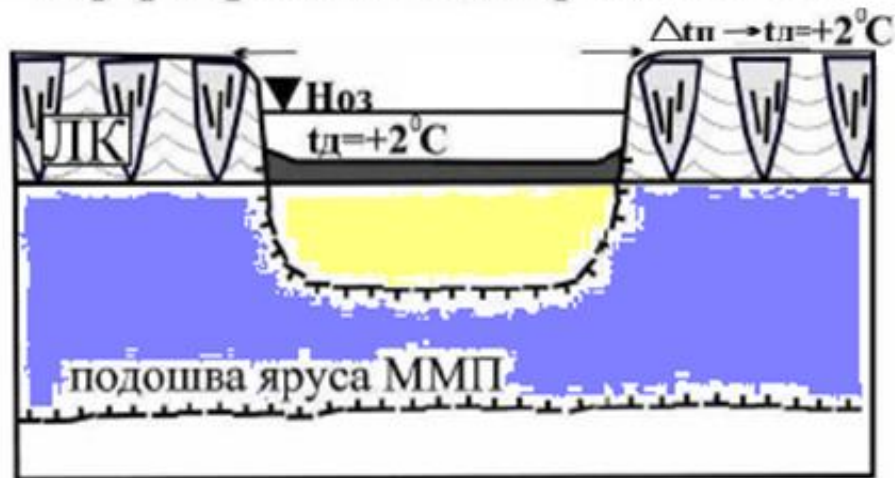


# Схема эволюции подозерных таликов

Для областей шельфа с глубинами 10-50 м

1 этап – 13 т.л.н.

Образование термокарстового озера и формирование подозерного талика

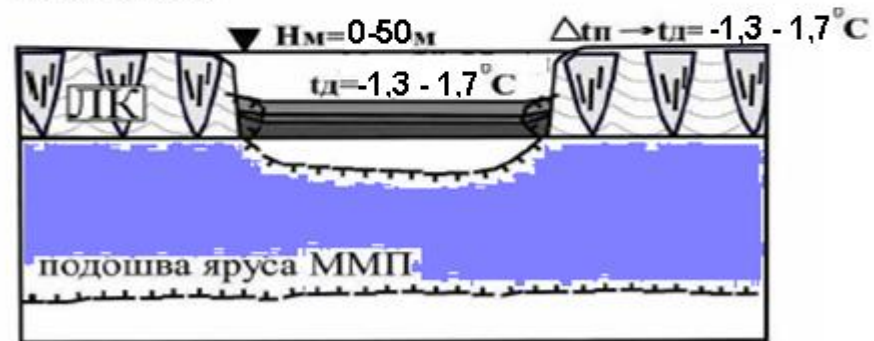


•Касымская М.В. Реликтовый термокарстовый рельеф и талики восточной части шельфа моря Лаптевых // 2010

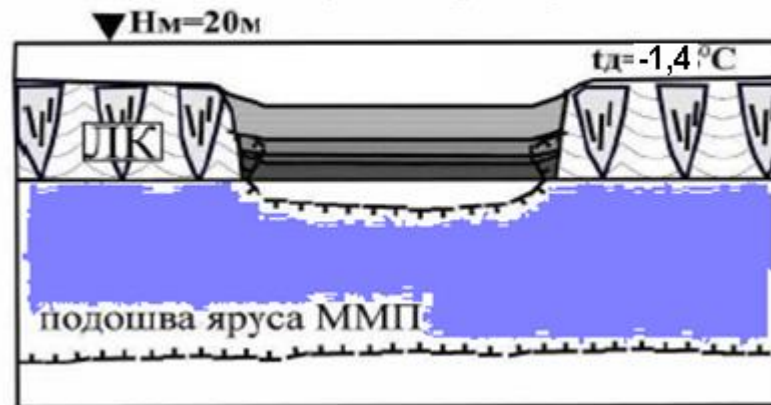
2 этап – 4-10 т.л.н.

Трансформация талика под “термокарстовой лагуной” в субмаринный

подъем уровня моря 0-50 м в результате поздненеолейстоцен-голоценовой трансгрессии и затопление прилегающих останцов ЛК

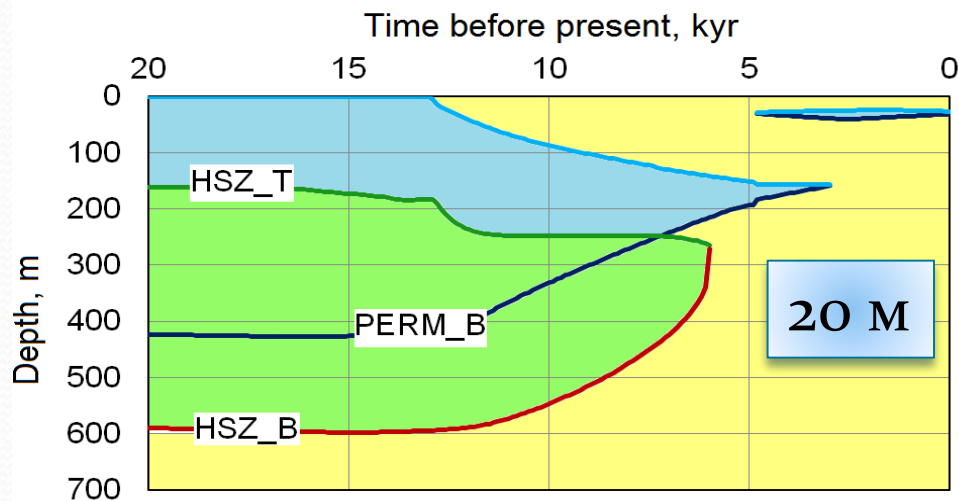
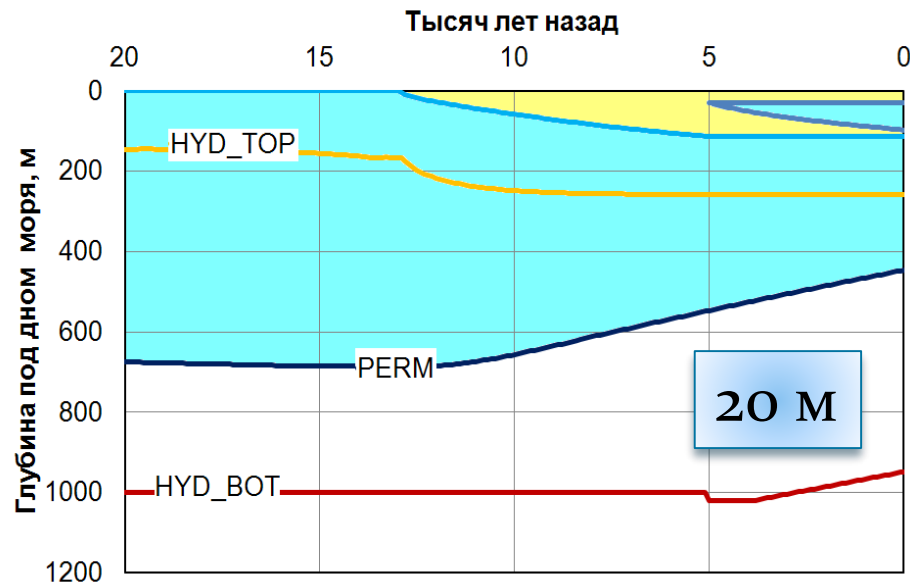
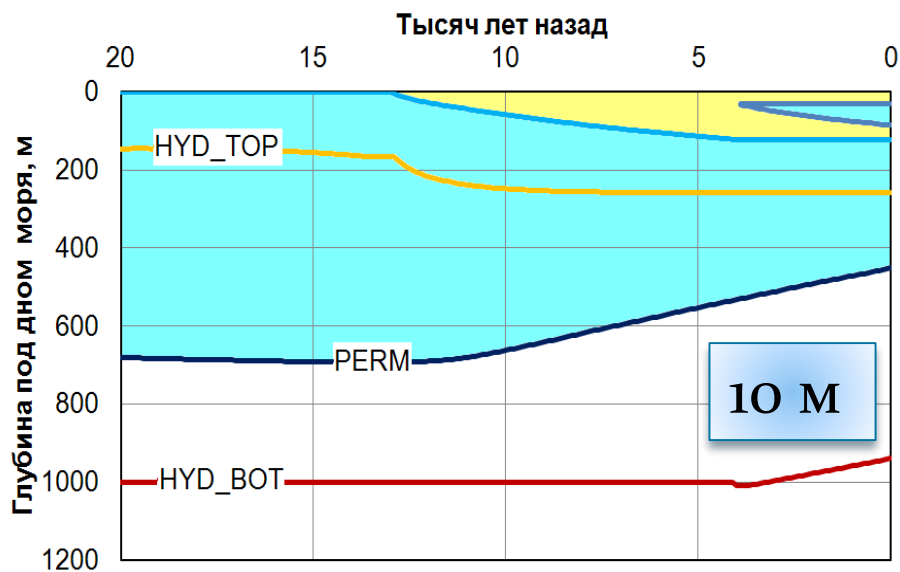


накопление морских отложений, перекрывающих термокарстовую котловину и прилегающие более возвышенные участки рельефа



3

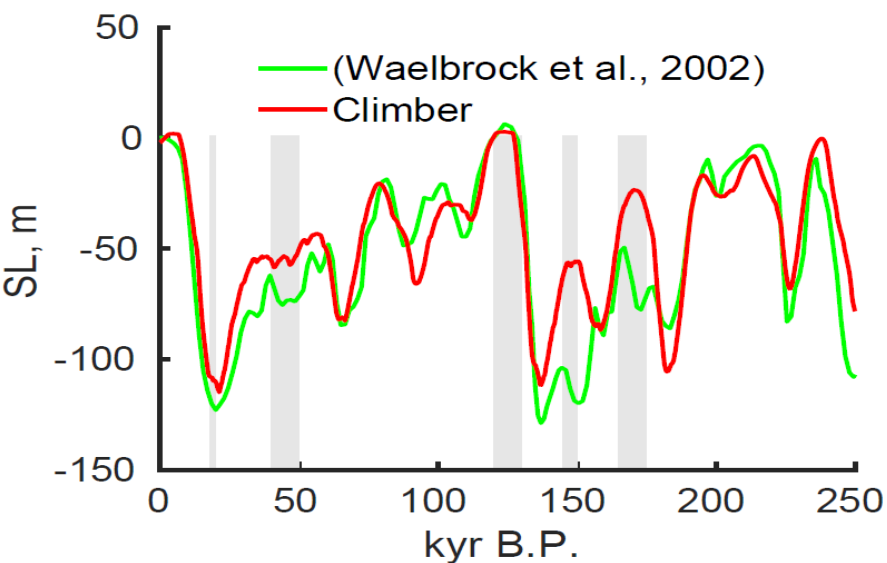
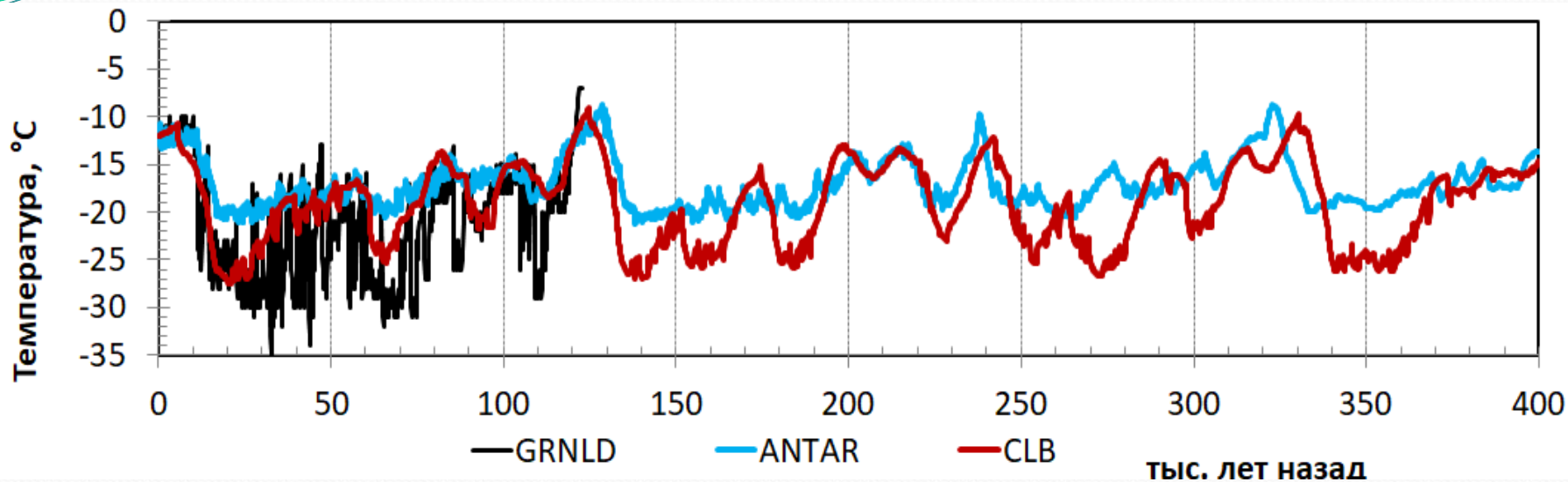
# Динамика мощности ММП и ЗСГГ под влиянием озера



Реликтовые озерные талики, оказавшиеся погруженными под море, создают в подводном мерзлом слое несквозные и сквозные талики.  
(Малахова, Елисеев, 2018)

**Динамика мощности СММП и ЗСГМ  
в зоне рифтов ( $100 \text{ мВт/м}^2$ ) под влиянием озера**

# Неопределенность палеосценариев. Изменения температуры воздуха и уровня



Название эксперимент	Температурные данные	Данные для уровня моря
ANTAR	EPICA Dome C	Waelbroeck et al., 2002
GRNLD	NGRIP for last 123kyr, EPICA Dome C for earlier period	Waelbroeck et al., 2002
CLB	Climber-2	Climber-2
CLBLO	Climber-2	Waelbroeck et al., 2002

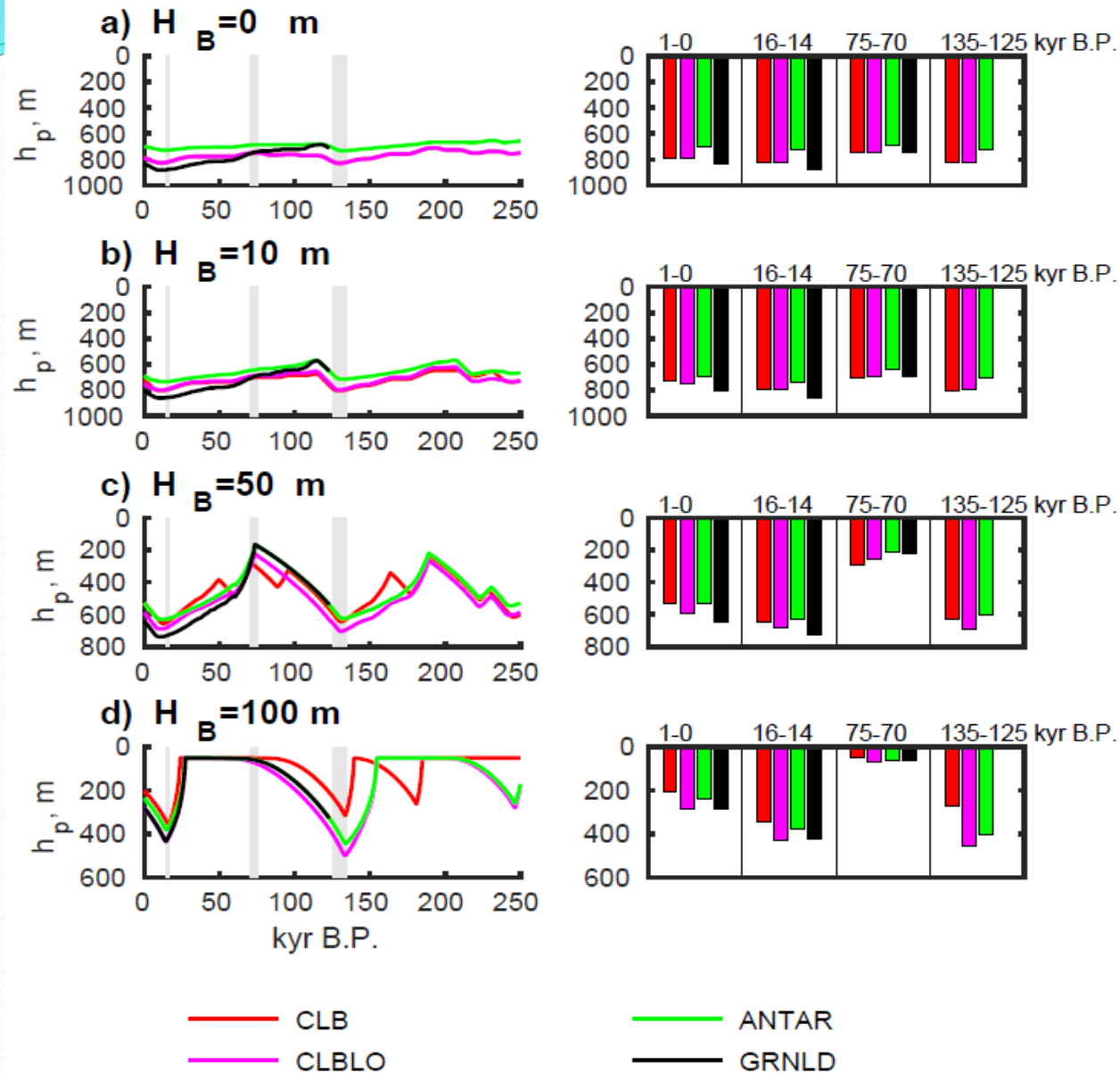
(Malakhova, Eliseev, 2019)

**Реконструкции температурных данных**

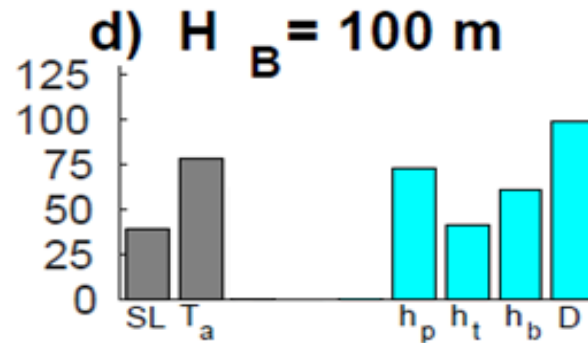
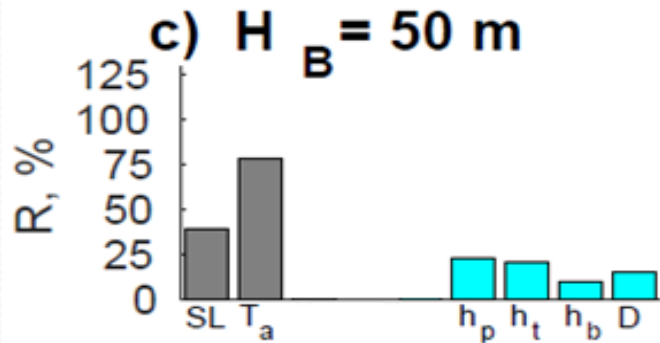
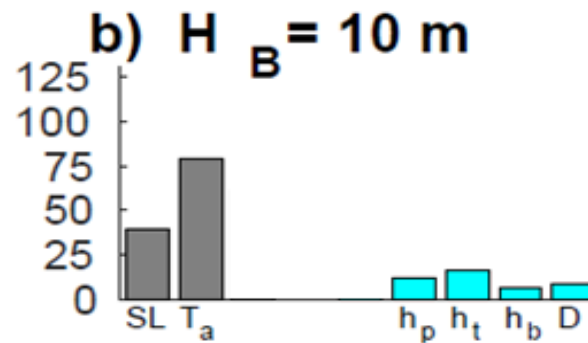
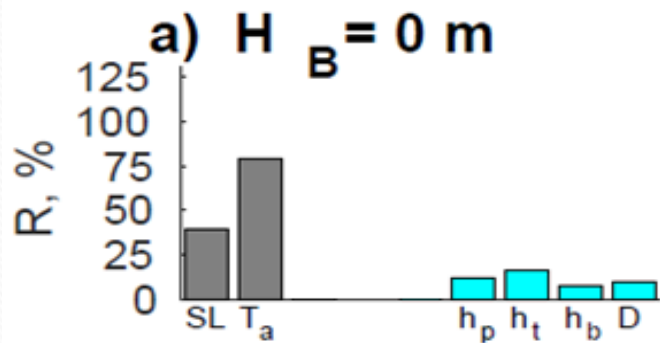
# Эволюция слоя СММП

**Глубина основания  
зоны  
многолетнемерзлых пород шельфа  
полученная в  
численных  
экспериментах CLB,  
CLBLO, ANTAR и  
GRNLD**

- Диапазон полученных оценок :
- Береговая линия  $h_p = 702 - 832$  м,
- Внутренний шельф  $h_p = 685 - 803$  м,
- Средний шельф  $h_p = 530 - 641$  м
- Внешний шельф  $h_p = 202 - 281$  м.



# Сравнение коэффициента неопределенности данных с результатами



Диапазон полученных оценок для СММП:

$H_B = 0 \text{ m}$   
 $R = 0,16$

$H_B = 10 - 20 \text{ m}$   
 $R = 0,16$

$H_B = 50 - 70 \text{ m}$   
 $R = 0,19$

$H_B = 100 \text{ m}$   
 $R = 0,3.$

$$R = \left| \max_k h_P - \min_k h_P \right| / \left( \frac{1}{K} \sum_k h_P \right)$$

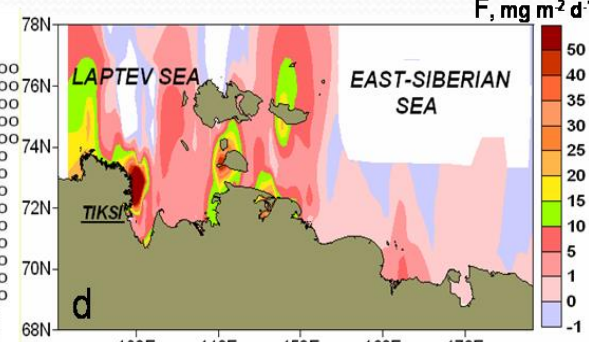
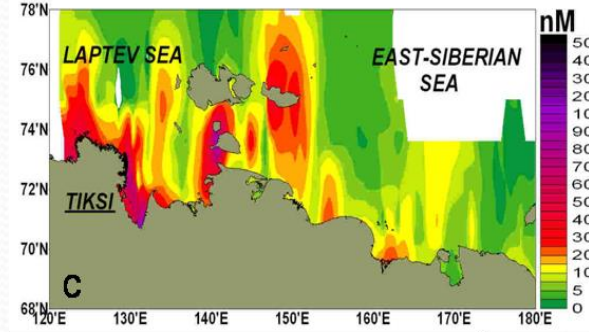
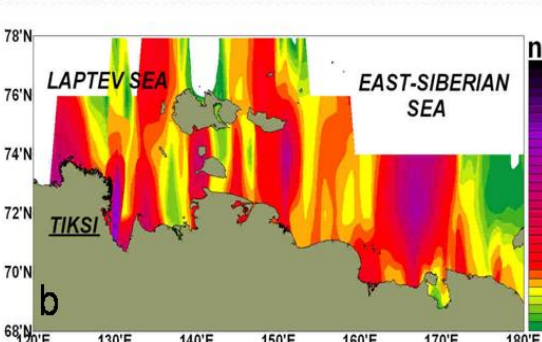
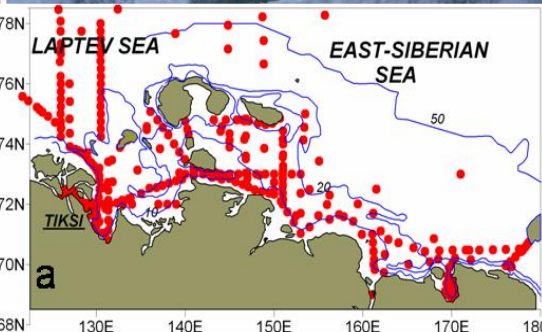


# ВЫВОДЫ

- Существующие реконструкции палеотемпературных данных, эмпирические и модельные, характеризуются значительной неопределенностью, которая обусловлена пространственной и временной изменчивостью.
- Несмотря на заметные различия в данных температуры и уровня моря, получено ограничение отклика состояния субаквальных многолетних грунтов арктического шельфа.
- Такой отклик является неопределенным с коэффициентом  $< 0.3$



# Потоки CH4 на шельфе???



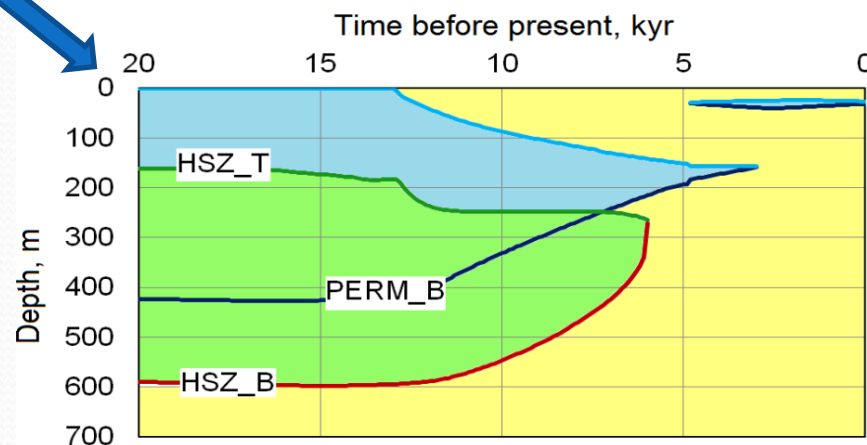
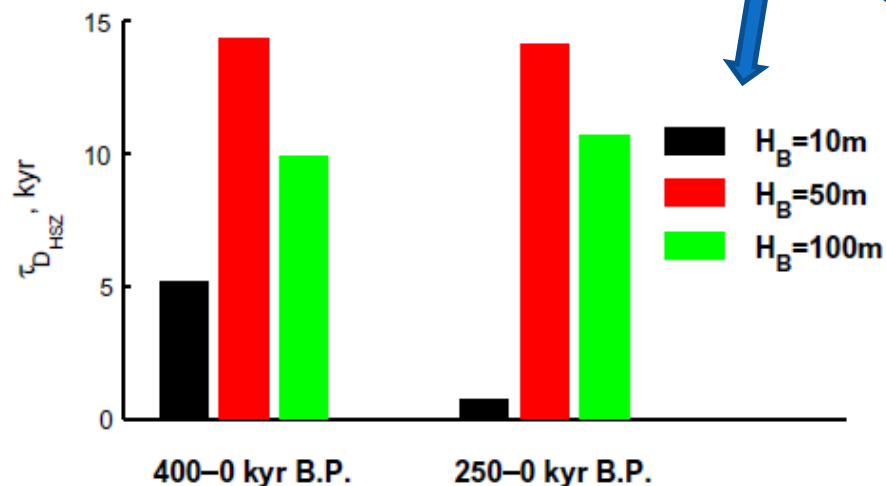
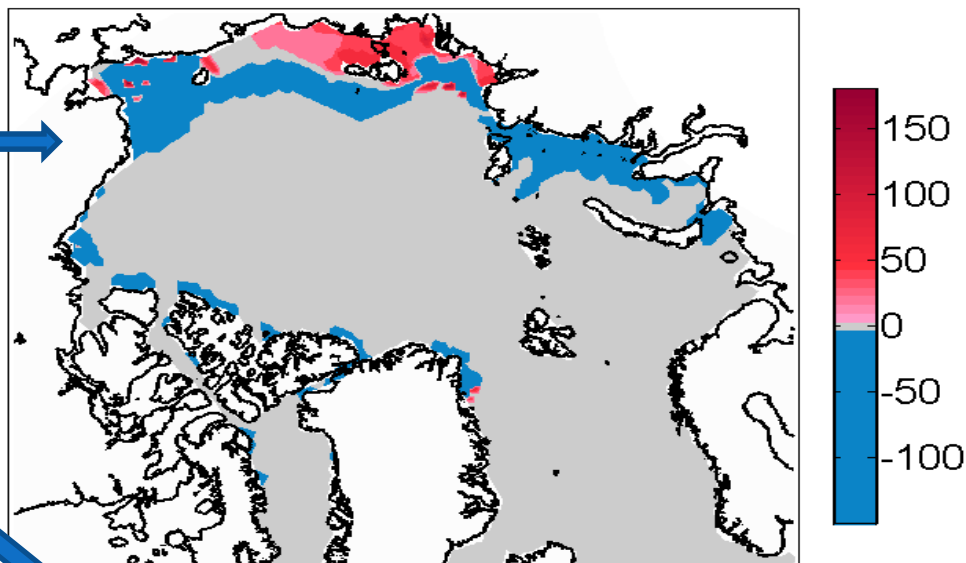
Факел – 20 мин. (2005 г.)

Скважина С-2



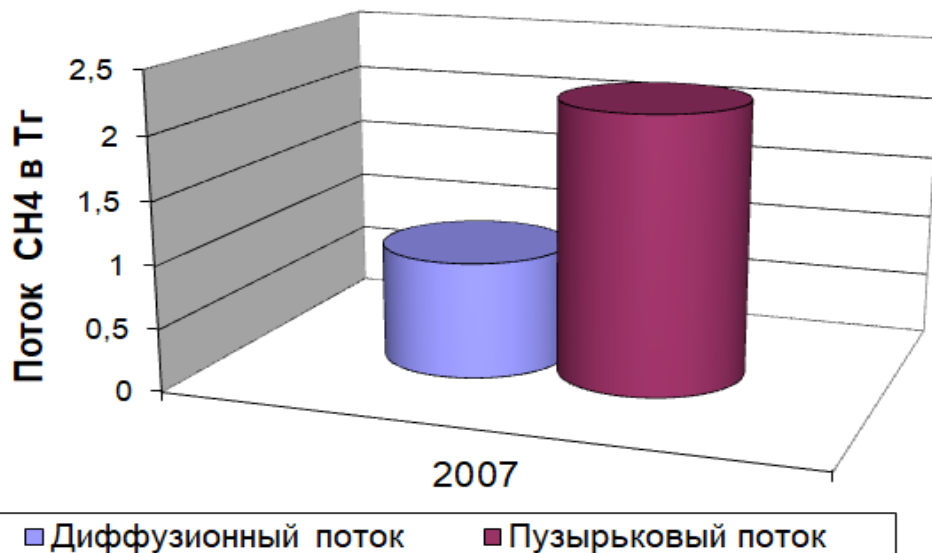
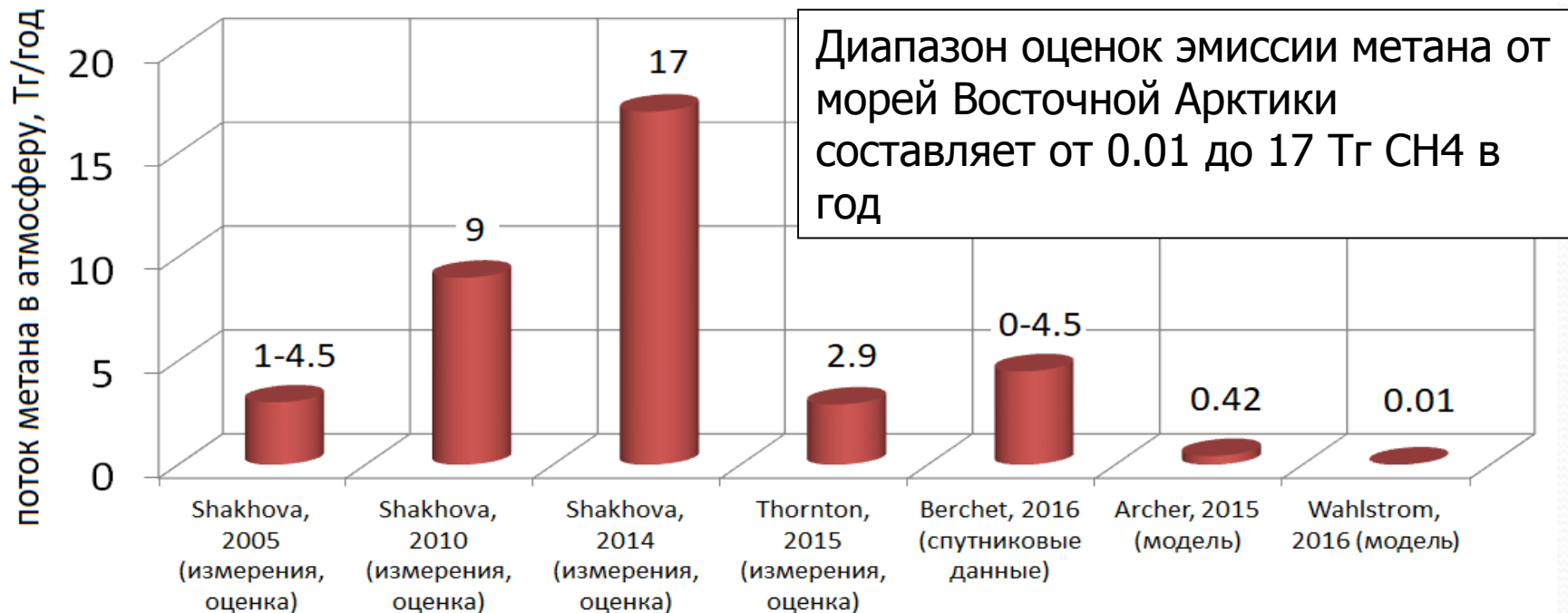
# Возможные причины эмиссии метана на ВСШ

- 1) Заглубление верхней границы ЗСГГ после затопления шельфа
- 2) Запаздывание отклика толщины ЗСГГ относительно температуры на поверхности донных отложений
- 3) Деградация ММП под термокарстовыми озерами



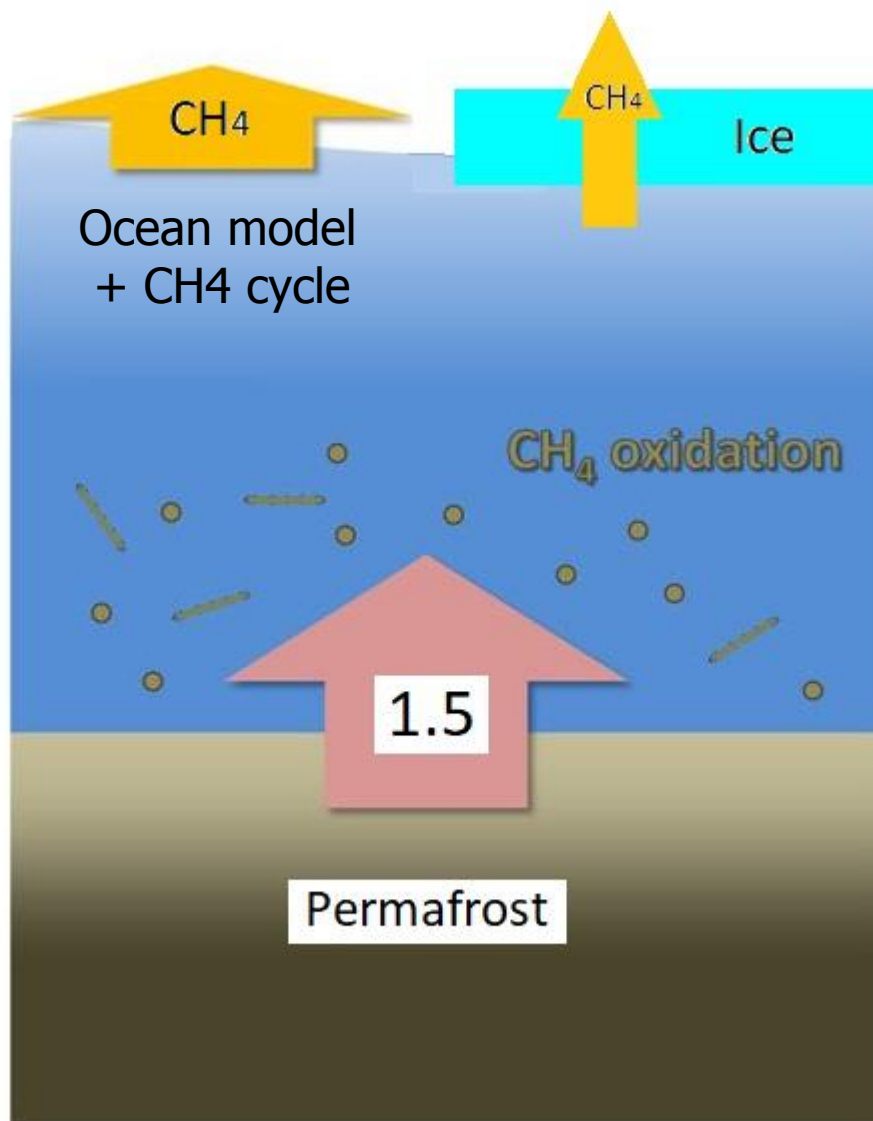
Время запаздывания отклика вычислено по максимуму кросс-корреляционной функции между этими переменными, для разных временных интервалов расчета

# Оценки потока метана в атмосферу



**На основе данных измерений был рассчитан диффузионный и пузырьковый потоки метана из шельфовых морей Восточной Арктики для летнего периода. (Shakhova et al., 2010)**

# Численные эксперименты



- ✓ Перенос растворенного метана в СЛО в период с 1948 по 2015 год.
- ✓ Источник - диффузионные потоки из донных отложений равномерно по всей области шельфа, где имеются СММП, из данных  $1.5 \text{ г}(\text{CH}_4) / \text{м}^2$  в год (Shakhova2005, Wahstrom,2016)
- ✓ Скорости окисления метана [Elliott,2011]

$$F = \kappa \left( \frac{Sc}{660} \right)^{-0.5} \Delta C \cdot (1 - Ice)$$

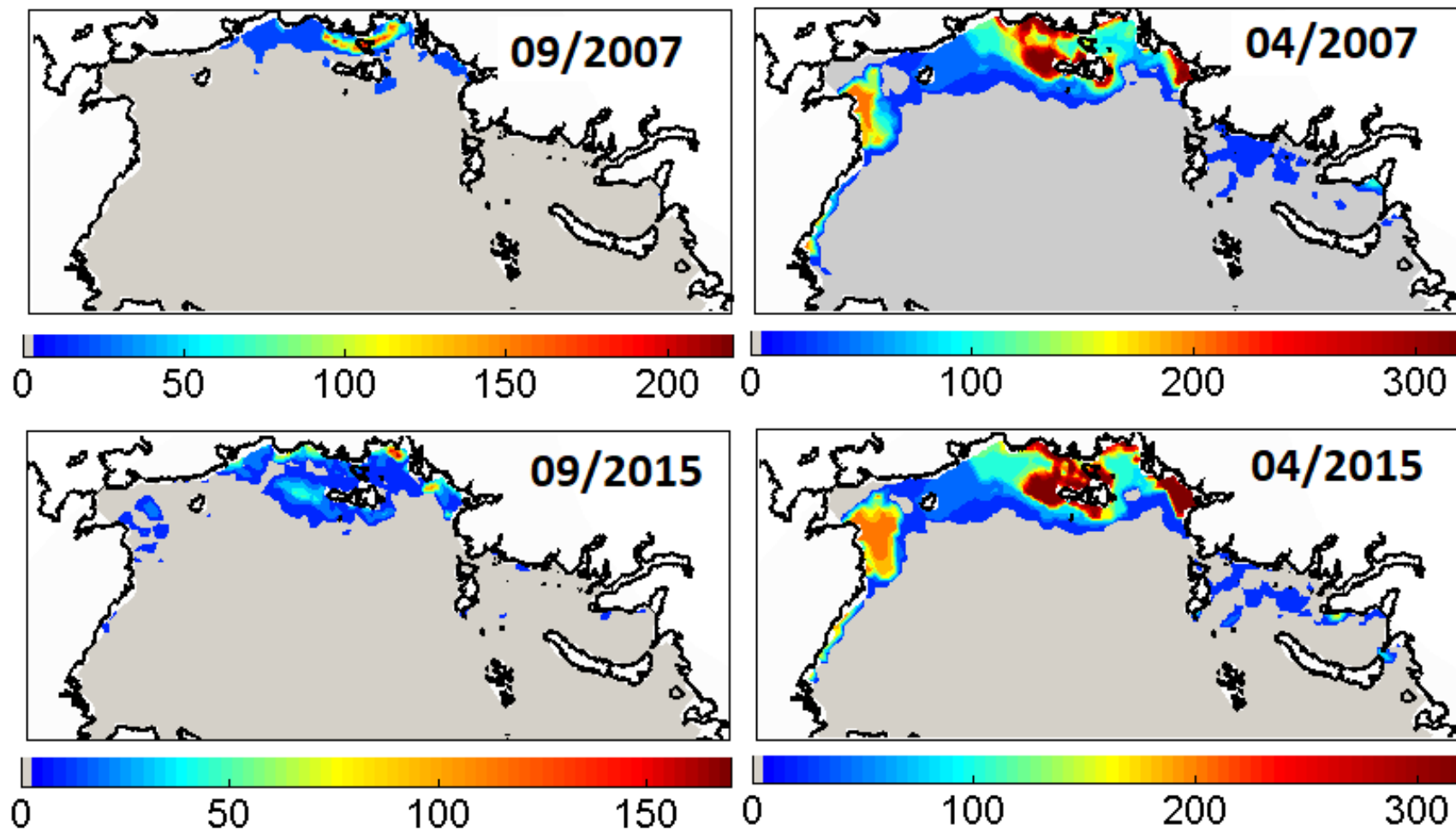
$$Sc = 2039.2 - 120.31T + 3.4209T^2 - 0.040437T^3$$

$$\kappa = 0.31\nu^2$$

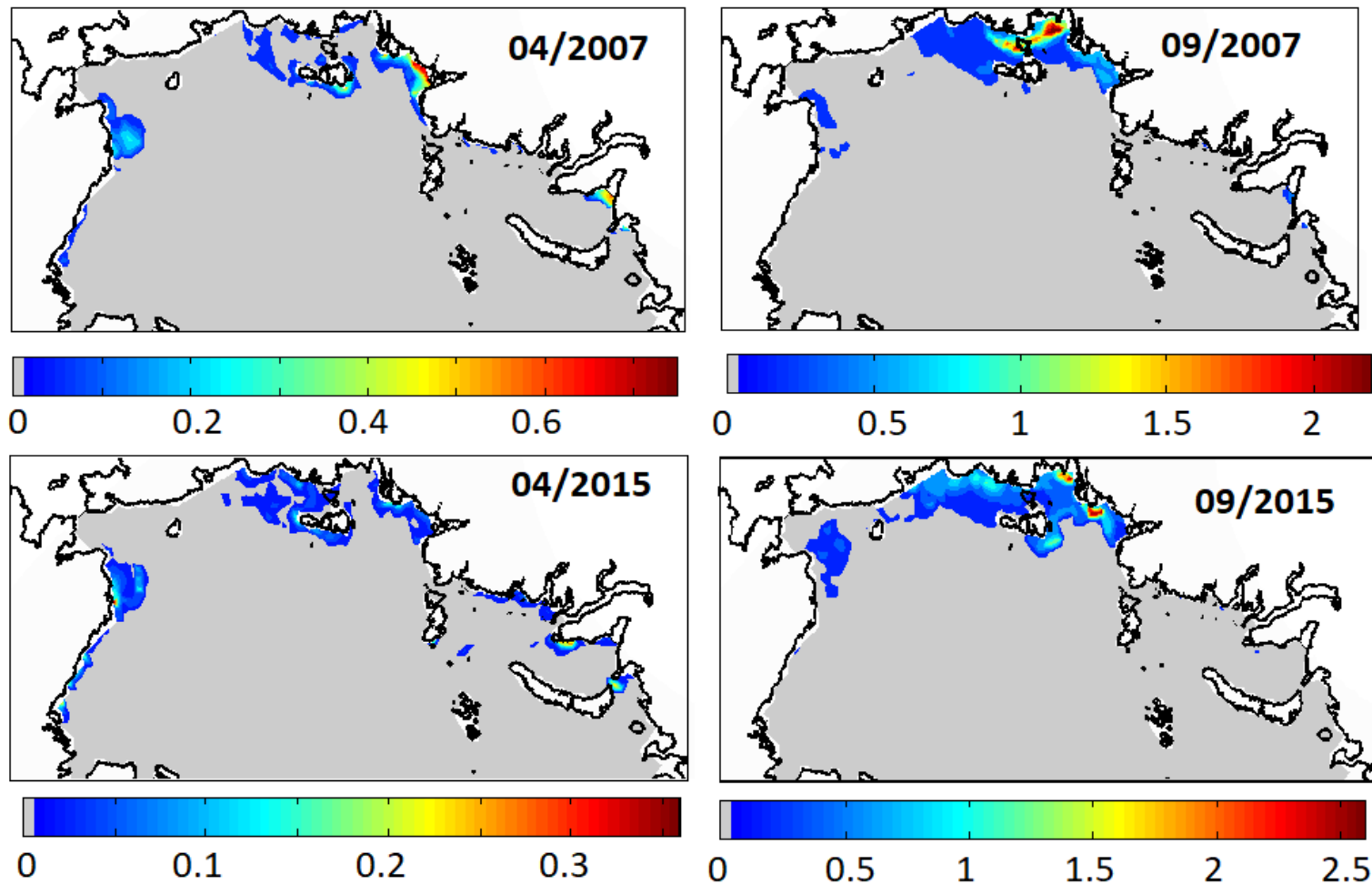
$$\Delta C = C - C_a(T, S)$$

Оценка потока метана в атмосферу

# Рассчитанные концентрации растворенного метана (в нмоль/л)

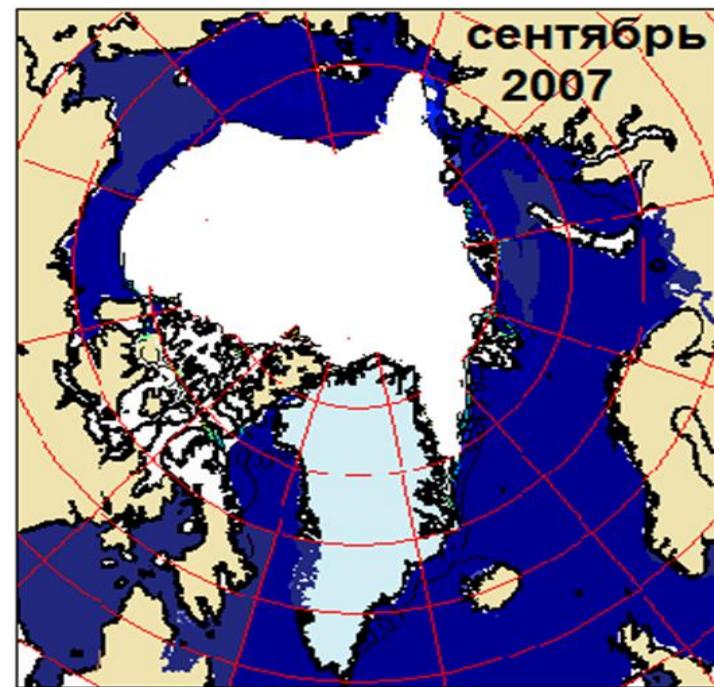
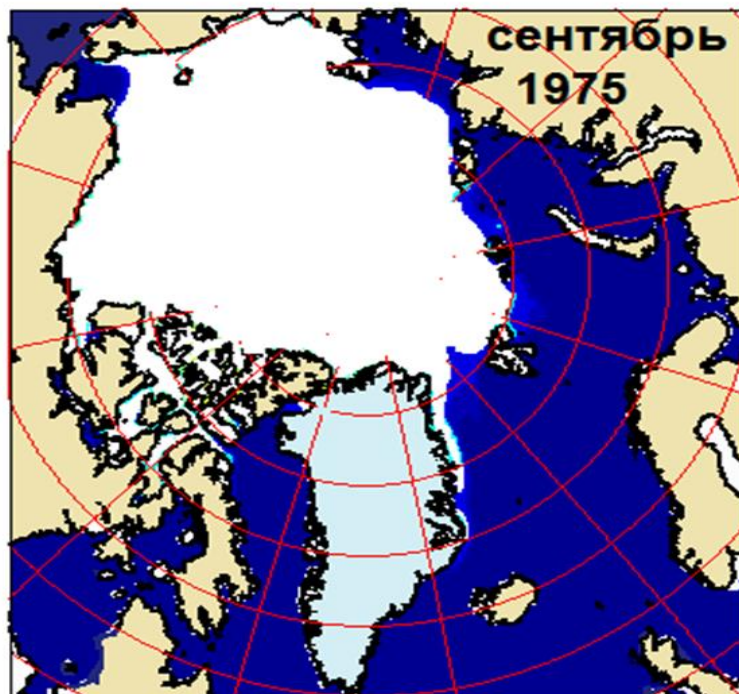
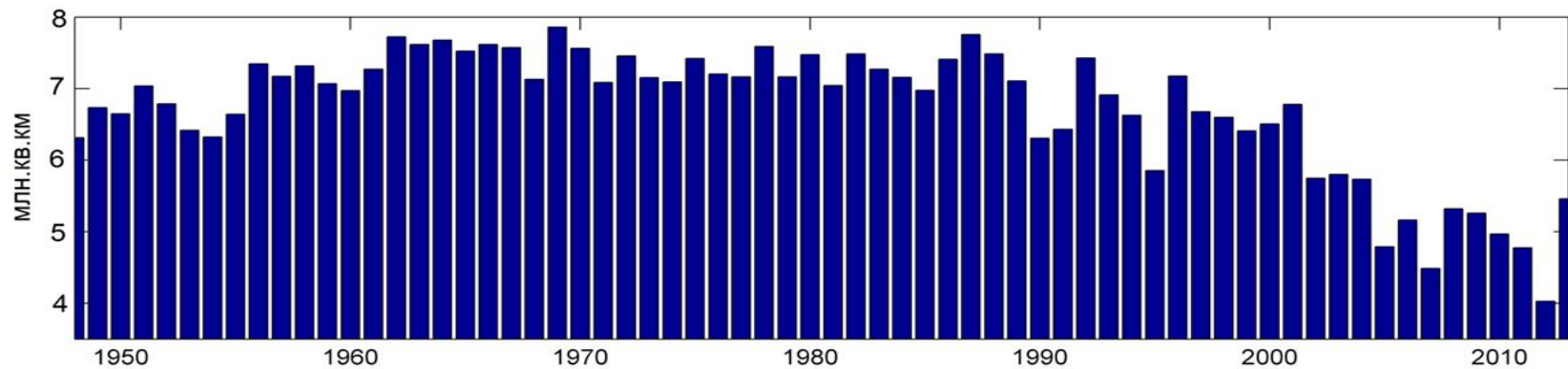


# Рассчитанные потоки метана в атмосферу ( $\text{mg}/\text{m}^2$ in day)



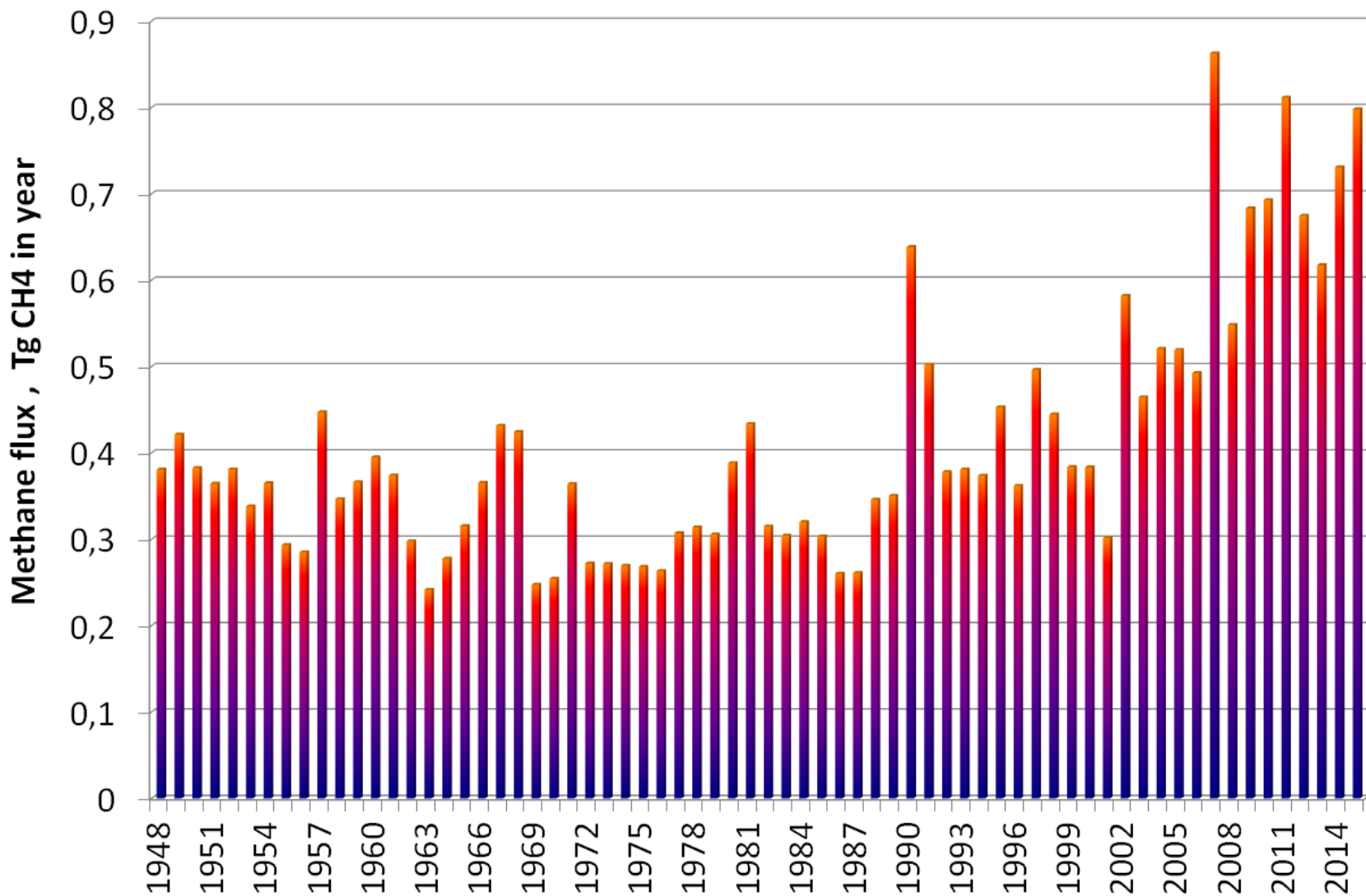
**Measurements of CH<sub>4</sub>** in the atmosphere above, and surface waters of, the Laptev and East Siberian Seas, [Thornton et al. \(2016\)](#). Turbulence-driven sea-air fluxes along the ship's track were derived from these observations; an average diffusive flux of **3  $\text{mg}/\text{m}^2$**  in day was calculated for the Laptev Sea (for the ice-free period).

# Площадь распространения ледового покрова. Результаты моделирования





# Поток метана в атмосферу (Тг в год)



# ВЫВОДЫ

- ❖ На основе сценарных расчетов получены оценки потока метана на шельфе морей Арктики.
- ❖ Показано, что эмиссия метана в атмосферу (при неизменных потоках  $\text{CH}_4$  из донных источников) увеличивается, как результат сокращения площади льда.
- ❖ Устранение различий в оценках потока метана требует лучшего знания пространственного распределения источников  $\text{CH}_4$  (где речные и наземные источники могут играть большую роль), скоростей окисления метана, а также учета пузырьковых выбросов.