



# Динамика вечной мерзлоты и ее взаимосвязь с климатом

Екатерина Ежова,

Институт исследований атмосферы и взаимодействия геосфер (INAR)

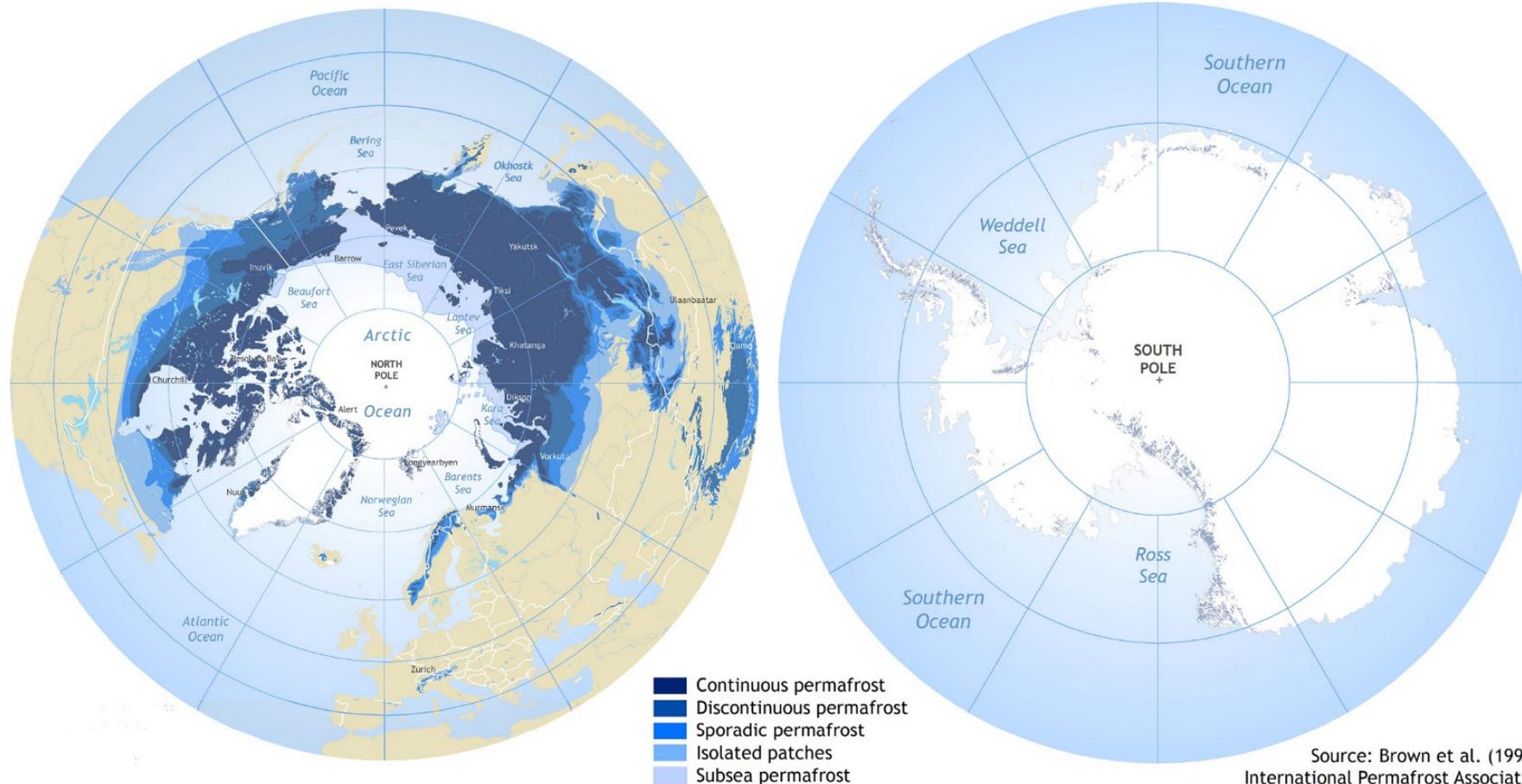
Университет Хельсинки

# Содержание лекции

- **Распространение многолетней мерзлоты.**
- Профили температуры в почве. Динамика температуры ММП в условиях современного климата.
- Обратная связь парниковые газы-климат-мерзлота. Запасы углерода в почве.
- Динамика выбросов парниковых газов в атмосферу в зоне распространения ММП.

# Распространение многолетней мерзлоты

- Многолетняя мерзлота - почва находится в замороженном состоянии более, чем 2 года



# На чем основаны наши оценки распространения мерзлоты?

...фундаментальная проблема состоит в том, что при создании карт распространения мерзлоты, мы картографируем концепцию или условия, но не материальный объект.

...Более того, эти условия не являются неизменными, как на геологических масштабах времени, так и на гораздо более коротких масштабах человеческой жизни.

J. Alan Heginbottom, Geological Survey of Canada

# Данные для картографирования

- Вообще, это наиболее важный вопрос, потому что без качественных данных, объединенных в рамках подходящей парадигмы, нельзя сделать качественную и полезную карту.
  - J. Alan Heginbottom, Geological Survey of Canada

	Прямые измерения	Косвенные измерения
Геологические методы	Бурение скважин, Лабораторный анализ образцов	Климатические данные, анализ ландшафта, карты растительности
Геофизические методы	Измерение температуры поверхности, термических свойств почв	Радары, геотермальное моделирование



# Проблемы с данными

- Измерения: бурение скважины создает значительные возмущения теплового поля в скважине. Особенно в случае глубоких скважин, возвращение к невозмущенному состоянию может занять месяцы, а то и годы.
- Накопление данных происходит в течение примерно 70 лет. Карта, которую мы используем как образец, основана на данных, собранных в различные периоды. Никаких попыток гомогенизировать данные, используя, например, моделирование, не предпринималось.
- Интерполяция и экстраполяция: карты распространения мерзлоты были скомпилированы из ограниченного количества данных измерений в скважинах, дополненных данными метеонаблюдений и некоторыми специфическими наборами (карты растительности, геоморфологические карты, позволяющие идентифицировать типичные формы рельефа).

# Разница в обозначения на различных картах (Hedinbottom, 2002)

**Table 1** Selected examples of permafrost distribution classifications used on maps and in reports

% Permafrost	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
Kudryavtsev <i>et al.</i> (1978)	?	Sporadic permafrost			?	Island permafrost			Massive island p.	[Continuous permafrost]		
Baulin (1982a)	?	Scattered islands		Permafrost islands			Discontinuous permafrost				Contin. pmf.	
Permafrost Sub-committee (1988)	Sporadic discontinuous permafrost				Widespread discontinuous permafrost					Continuous permafrost		
French (1996)	Sporadic discontinuous permafrost				Widespread discontinuous permafrost					Continuous permafrost		
IPA Map 1997 (Brown <i>et al.</i> , 1997)	Isolated patches		Sporadic discontinuous permafrost				Extensive discontinuous permafrost				Continuous permafrost	
IPA Glossary, 1998 (English usage) <sup>a</sup>	Isolated patches		Sporadic discontinuous permafrost		Intermediate discontinuous permafrost			Extensive discontinuous permafrost		Continuous permafrost		
IPA Glossary, 1998 (Russian usage) <sup>b</sup>	?	Sporadic permafrost			?	Island permafrost		?	Massive island p.	[Continuous permafrost]		
Yershov (1998)	Islands and sporadic permafrost			Massive-island permafrost					Discontinuous permafrost		Mainly contin.	Contin. pmf.

Отечественные  
ИСТОЧНИКИ VS

Зарубежные  
ИСТОЧНИКИ

Notes:

<sup>a</sup>Van Everdingen (1998), based on Hedinbottom and Radburn (1992).

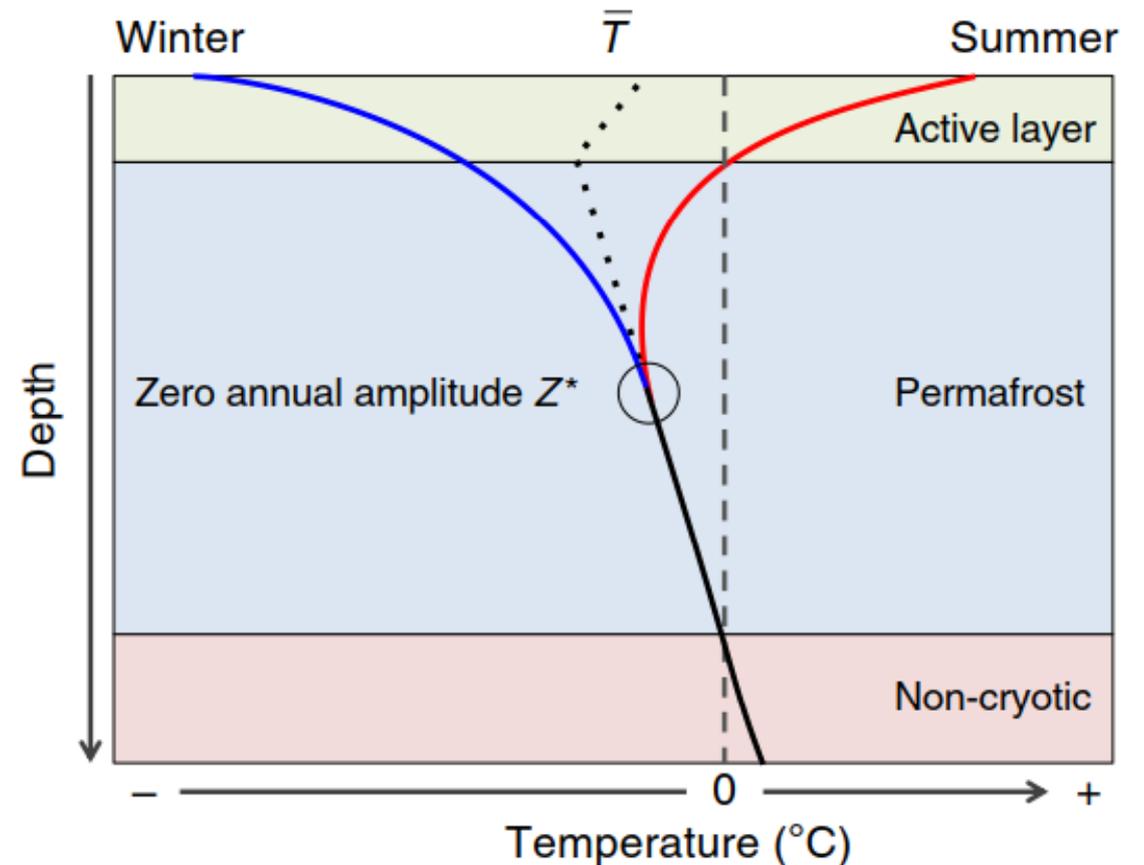
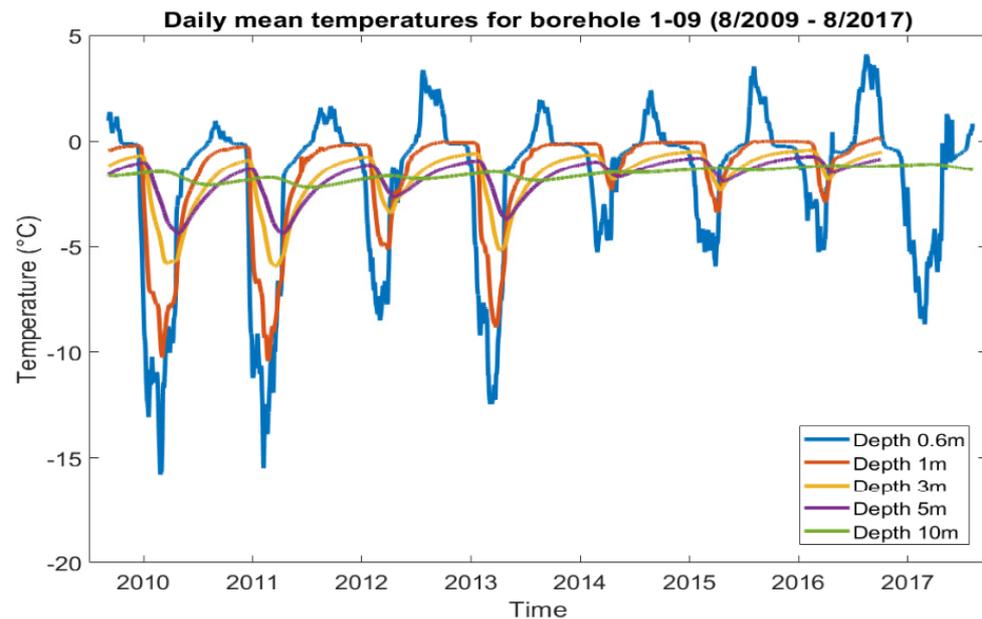
<sup>b</sup>Van Everdingen (1998), based on Kudryavtsev *et al.* (1978).

# Содержание лекции

- Распространение многолетней мерзлоты.
- Профили температуры в почве. Динамика температуры ММП в условиях современного климата.
- Обратная связь парниковые газы-климат-мерзлота. Запасы углерода в почве.
- Динамика выбросов парниковых газов в атмосферу в зоне распространения ММП.

# Профиль температуры в толще

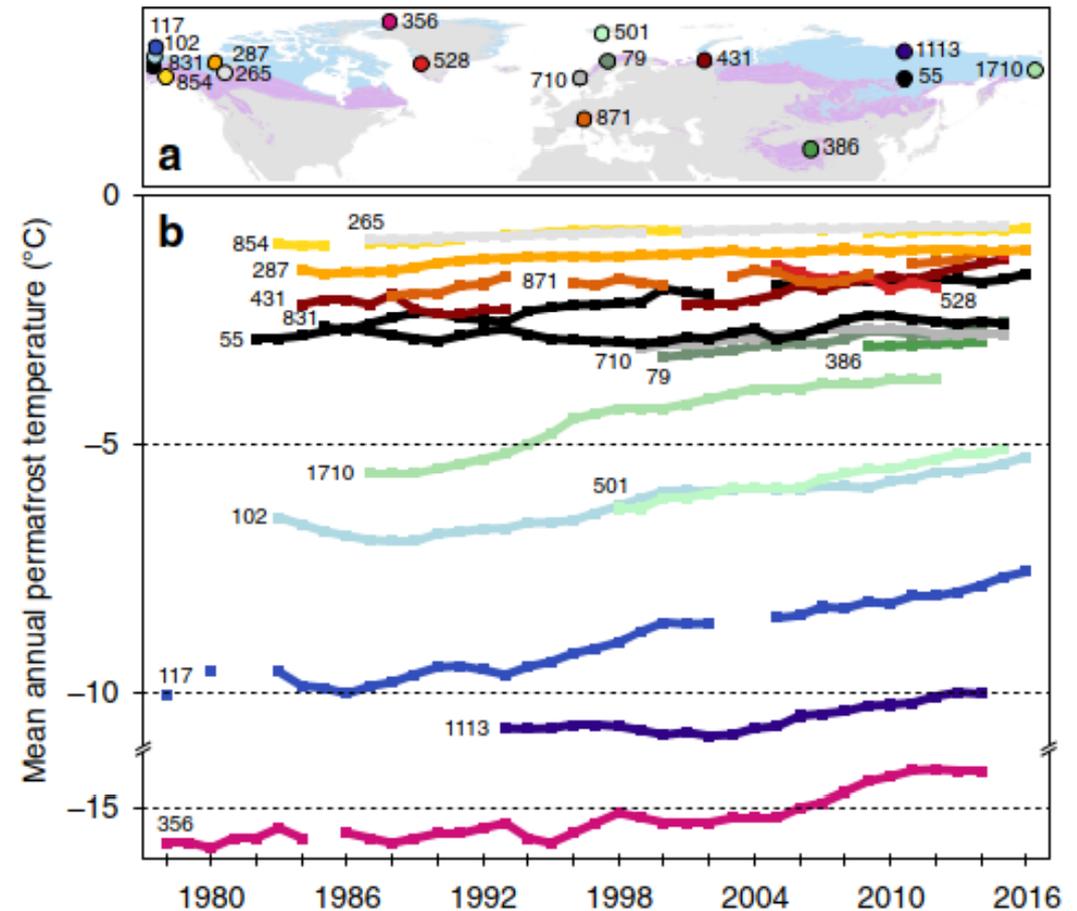
- Красная и синие кривые - сезонная изменчивость температуры (мин и макс среднесуточные температуры)
- Сезонноталый слой - слой, который ежегодно протаивает. глубина (или мощность) сильно меняется от года к году



Глубина нулевой амплитуды – температура не испытывает сезонных колебаний

# Утверждение AR1.3 из Специального отчета по океану и криосфере (SROCC)

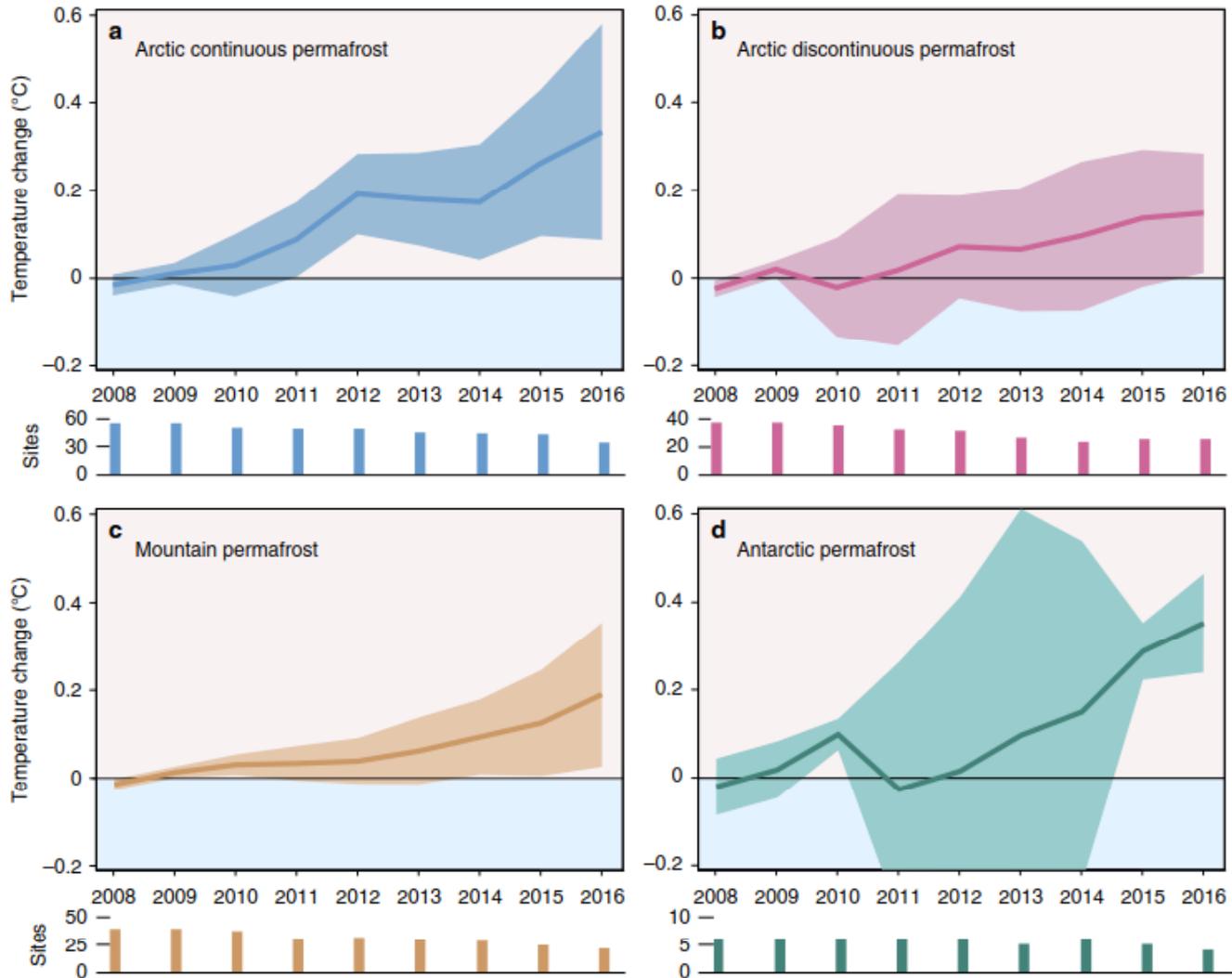
- Температура мерзлоты увеличилась до рекордно высокого уровня (1980 - н.в.) включая недавнее увеличение на  $0.29^{\circ}\text{C} \pm 0.12^{\circ}\text{C}$  с 2007 до 2016. Значение осреднено по полярным и высокогорным областям распространения (*very high confidence*)
- Температура мерзлоты - температура на глубине нулевой амплитуды



Среднегодовая температура на глубине нулевой амплитуды  
*Biskaborn et al., Nat. Comm. (2019)*



# Изменение температуры мерзлоты



**Зона сплошной мерзлоты, Арктика:**

$0.39 \pm 0.15 \text{C}$ .

Наибольшее возрастание в Сибири (0.93 and 0.90C): Марре-Сале и остров Самойловский

**Зона прерывистой мерзлоты:**  $0.20 \pm 0.10 \text{C}$ .

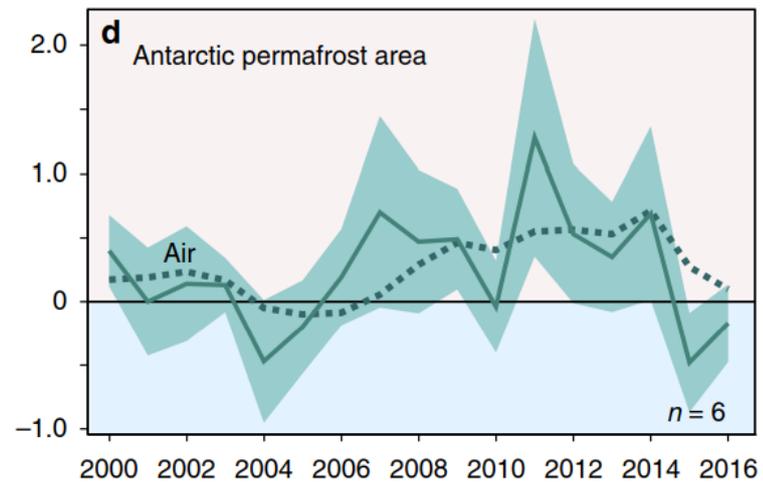
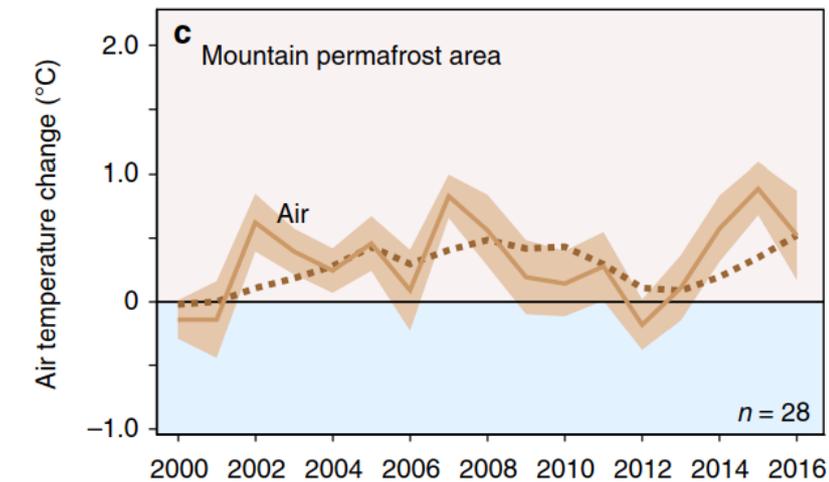
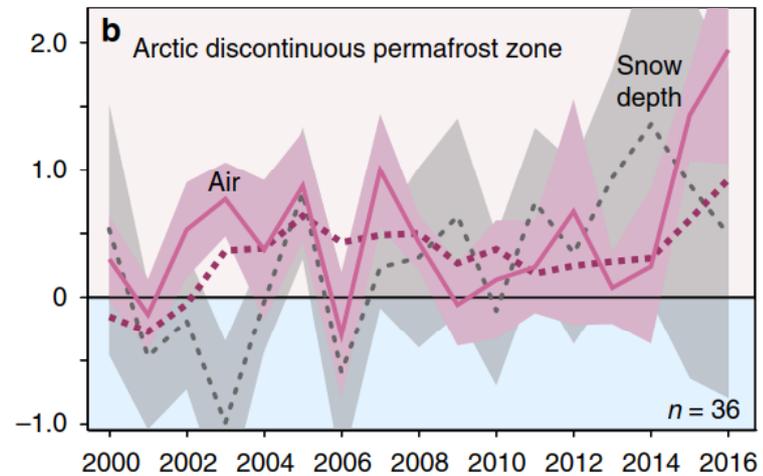
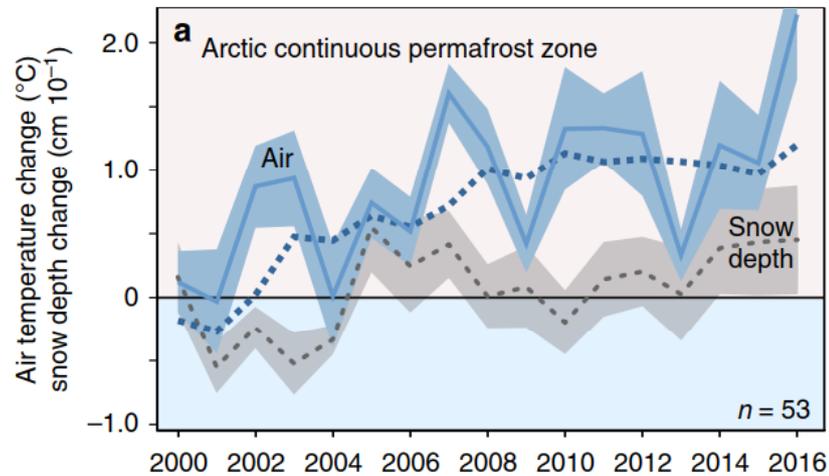
Наибольшее возрастание (0.95C) в Сибири: Магадан.

**Высокогорная мерзлота:**  $0.19 \pm 0.05 \text{C}$

Наибольшее возрастание (1.15C) в Сибири: Алданское нагорье.

**Антарктика:** возрастание статистически недостоверное

# Температура воздуха и толщина снежного покрова

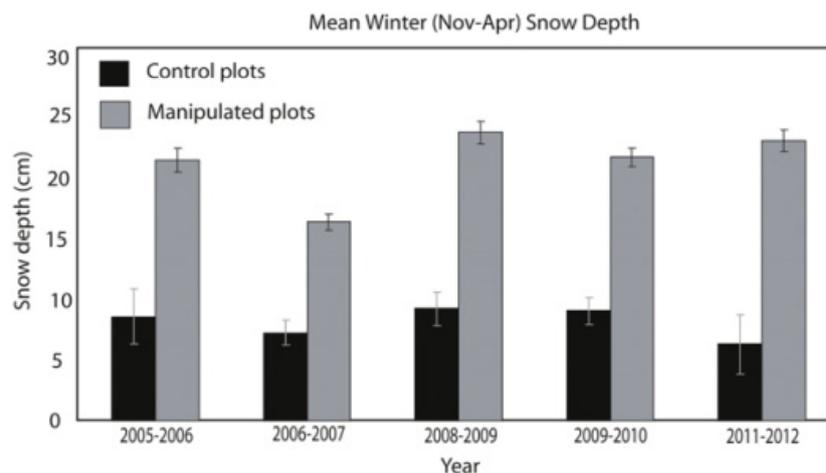


Температура, осредненная за предыдущие 4 года - данные реанализа Era Interim

Толщина снежного покрова – Canadian Meteorological Center.

Возможные причины увеличения температуры мерзлоты: потепление в зоне сплошной мерзлоты, увеличение толщины снежного покрова в зоне прерывистой мерзлоты

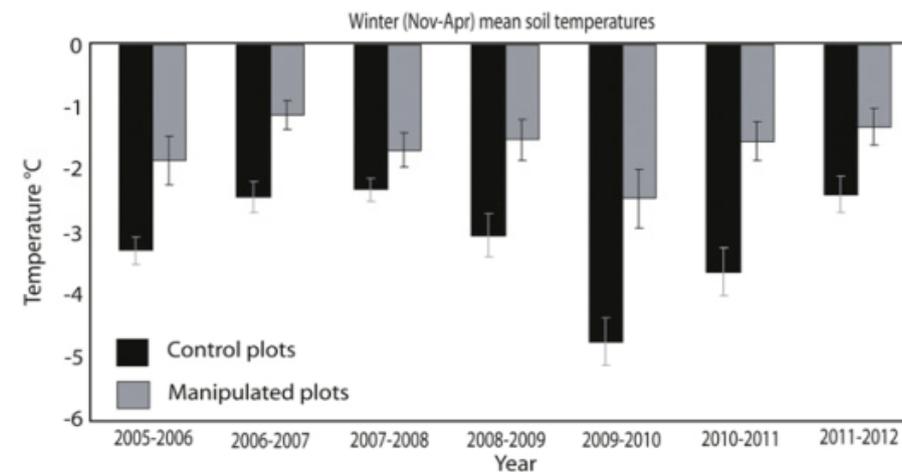
# Влияние снежного покрова на мерзлоту



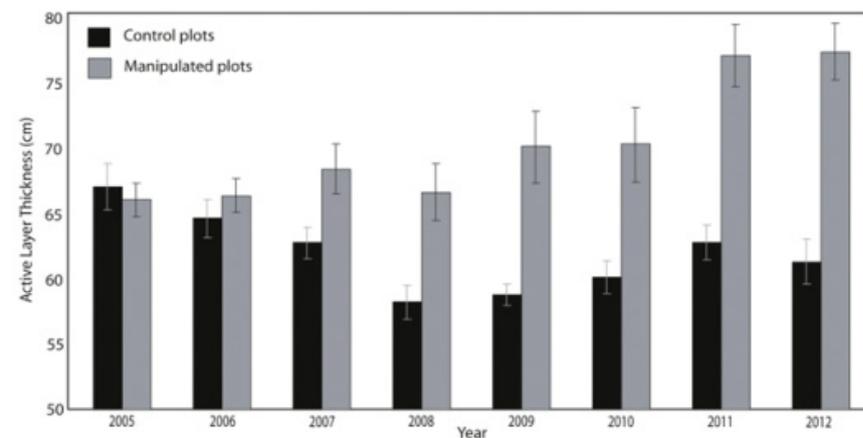
**Figure 2.** Mean winter (November–April) snow depth and standard error in the manipulated and control plots.

*Johansson et al 2013 Environ. Res. Lett. 8 035025*

- Эксперимент в области прерывистой мерзлоты (Швеция).
- Увеличение толщины снежного покрова на 10 см приводит к протаиванию сезонного слоя на 20%.



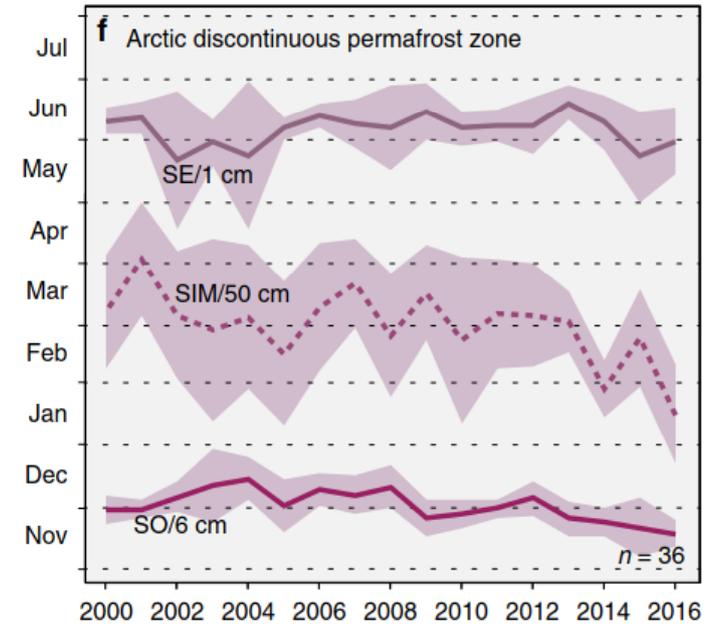
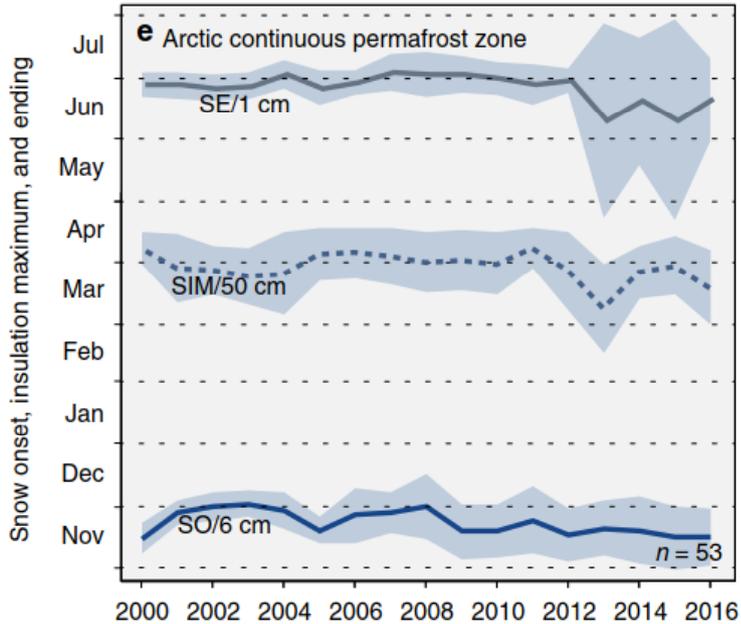
**Figure 3.** Winter (November–April) mean ground temperatures at 15 cm depth and standard error.



**Figure 4.** Mean active layer thickness and standard errors. (Note that measurements from 2005 were made at the outset of the experiment to record baseline information.)

# Характеризация снежного сезона

- Начало- 6 см
- Максимальное экранирование – 50 см
- Окончание - 1 см



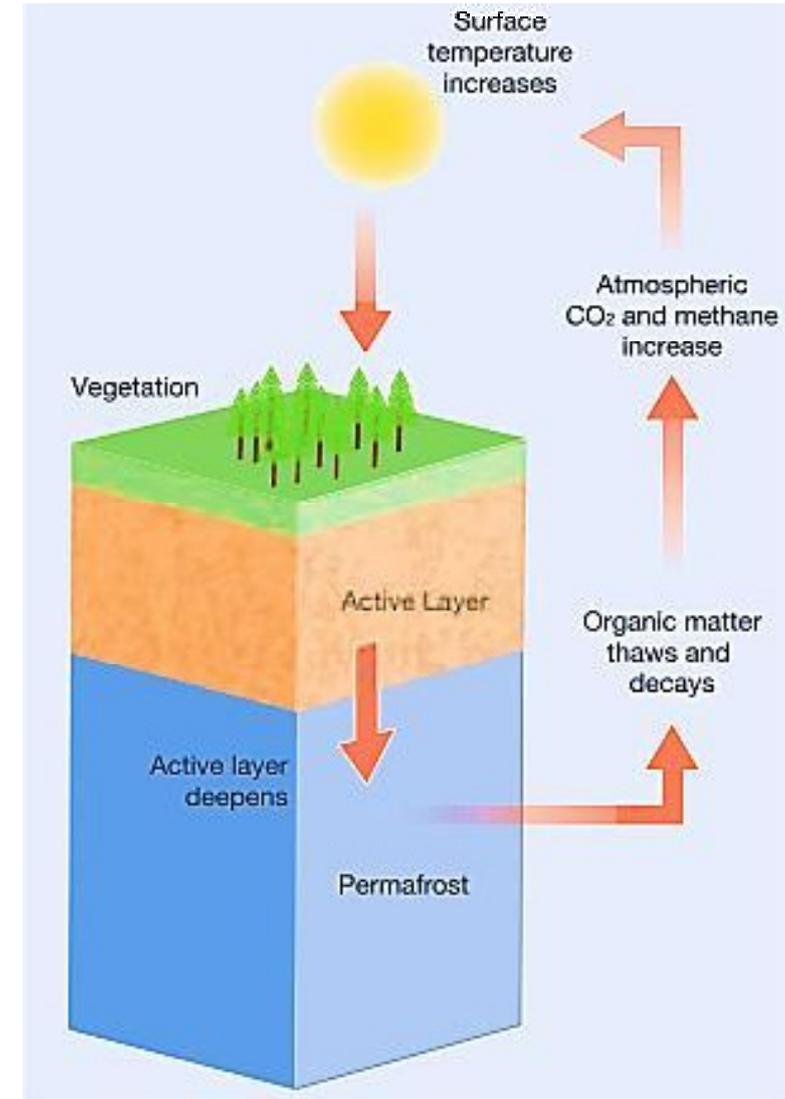
Более раннее начало сезона, раньше достигается высота максимального экранирования-> усиление эффекта теплоизоляции

# Содержание лекции

- Распространение многолетней мерзлоты.
- Профили температуры в почве. Динамика температуры ММП в условиях современного климата.
- **Обратная связь парниковые газы-климат-мерзлота. Запасы углерода в почве.**
- Динамика выбросов парниковых газов в атмосферу в зоне распространения ММП.

# Утверждение AR1.3

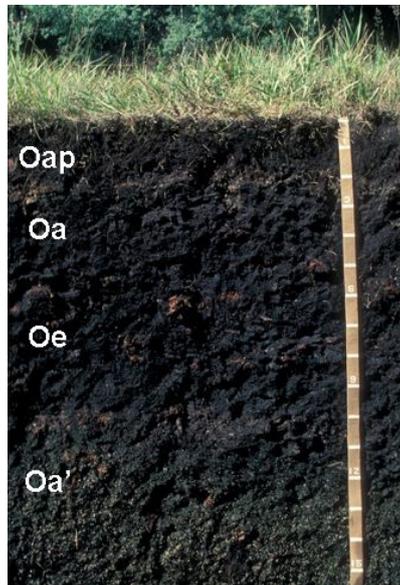
- В почвах Арктики и бореальной зоны содержится 1460–1600 Гт органического углерода - величина, почти в 2 раза превышающая количество углерода в атмосфере (*medium confidence*).
- Обратная связь: потепление -> увеличение мощности СТС -> микробная деятельность -> выделение парниковых газов -> потепление
- Почвы в зоне мерзлоты - глубокие и поверхностные резервы углерода



Обратная связь: мерзлота-углерод

# Содержание углерода в различных почвах: поверхностный резерв

Торф

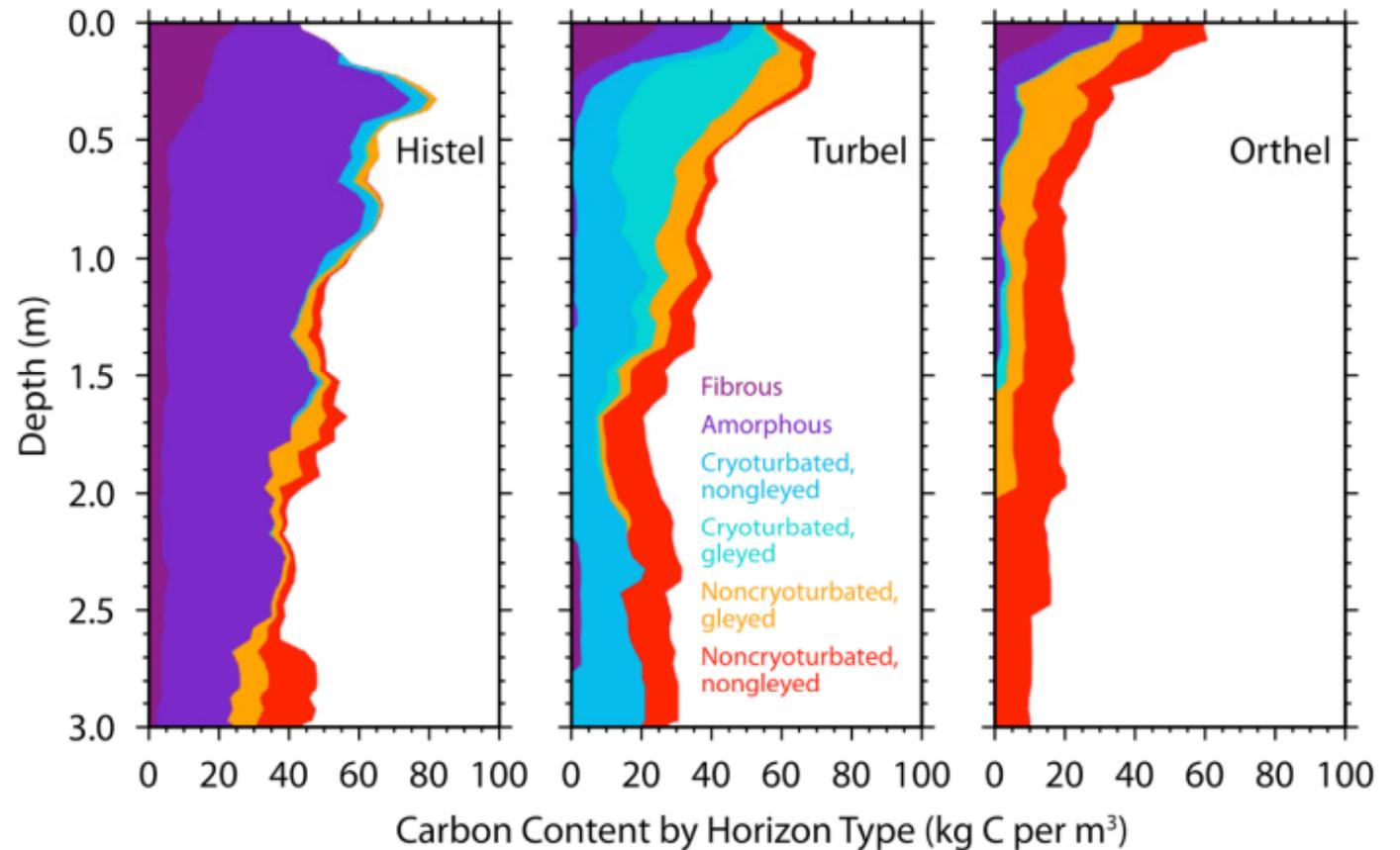


Криотурбация



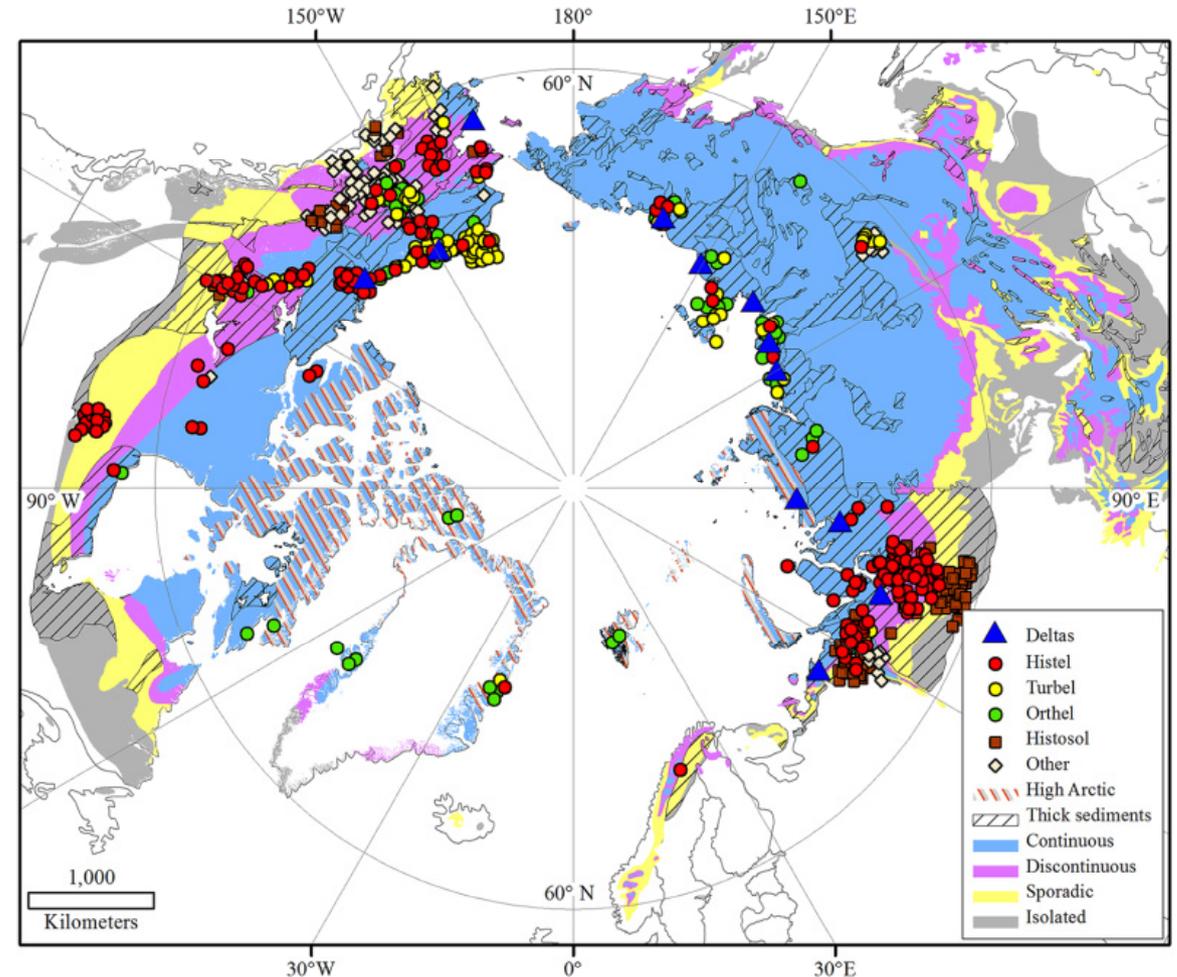
Торф

Криотурбация



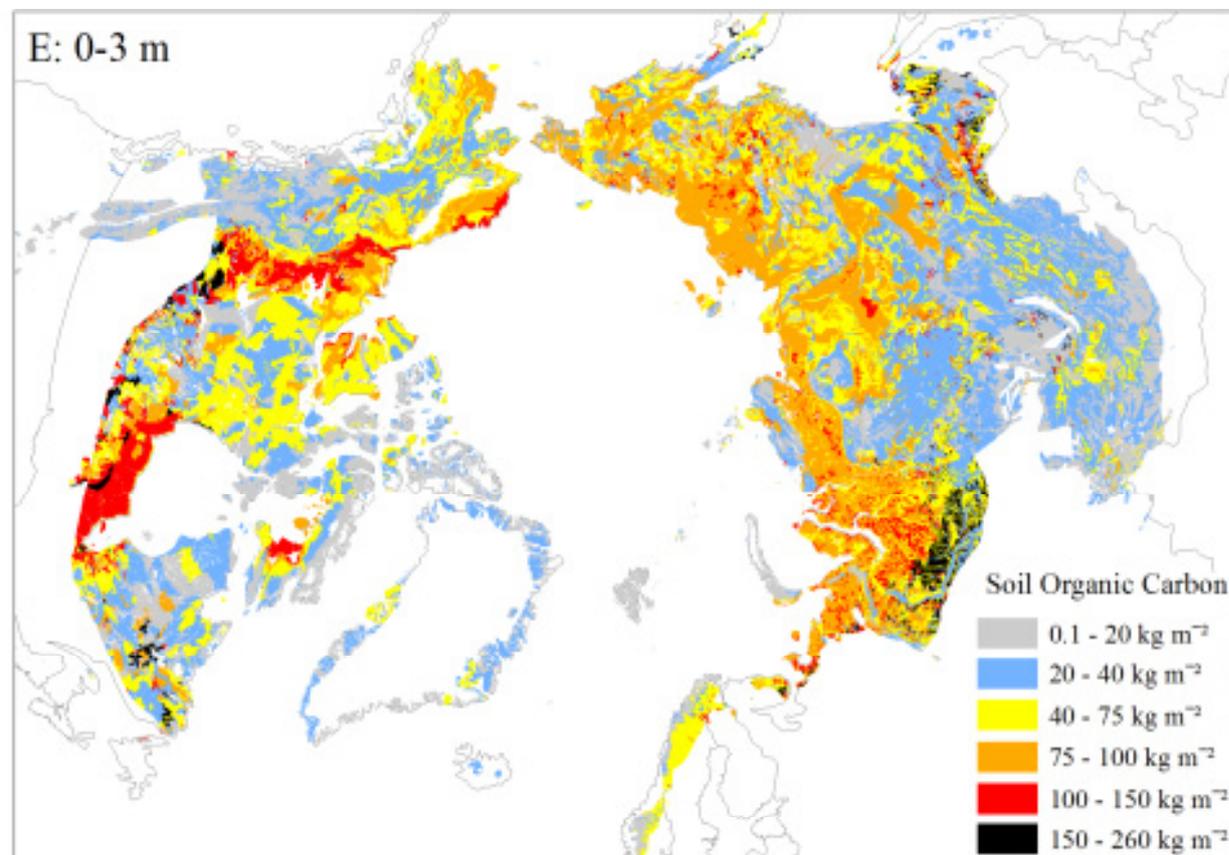
# Картографирование содержания углерода в почве

- Символами обозначены места забора образцов
- Метод (Hugelius et al., Earth Syst. Sci. Data, 2013)
- Забор образцов почвы площадью 1×2 и глубиной 1-3 м (педоны) и измерение содержания углерода в лаборатории
- Данные:
  - 0-1 м: 1778 pedons,
  - 1-2 м: 524 pedons,
  - 2-3 м: 326 pedons



# Карта запасов органического углерода

- 3 м почвы в зоне ММП содержат  $1035 \pm 150$  Пг С (*high confidence*)
- 3 м почвы глобально – 2050 Пг С
- При том, что зона ММП составляет лишь 15% континентальной поверхности, в ней содержится примерно половина органического углерода



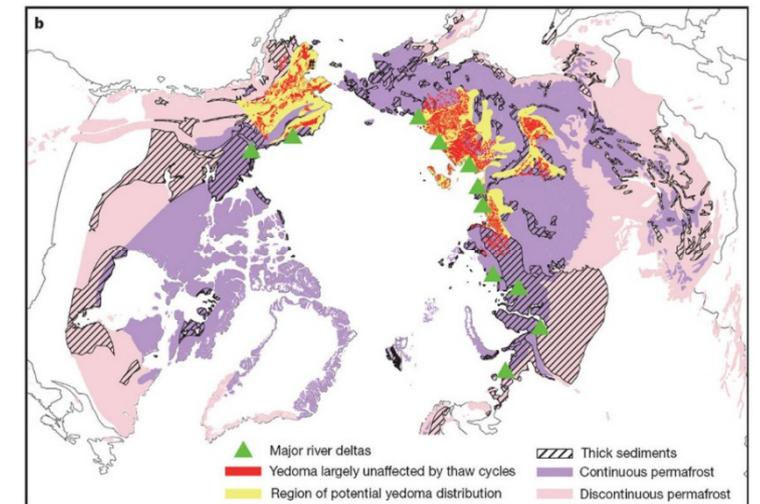
Soil area (km <sup>2</sup> ):	Thick sediments	Thin sediments	High Arctic region	Circumpolar
	$6.2 \times 10^6$ (35 %)	$10.6 \times 10^6$ (59 %)	$1.0 \times 10^6$ (6 %)	$17.8 \times 10^6$
SOC stocks (Pg):				
0-0.3 m	90	117	$10 \pm 3$	$217 \pm 12$
0-1 m	213	235	$24 \pm 8$	$472 \pm 27$
1-2 m	$161 \pm 14$	$187 \pm 79$	$7 \pm 5$	$355 \pm 81$
2-3 m	$119 \pm 16$	$86 \pm 39$	$3 \pm 3$	$207 \pm 42$
0-2 m	374	422	$31 \pm 13$	$827 \pm 108$
0-3 m	493	507	$34 \pm 16$	$1035 \pm 150$

# Глубокий резерв углерода - едома

- Формирование: последний ледниковый период (20 000 лет назад). Накопление углерода в течение тысяч лет
- Механизм: Аккумуляция лёсс со скоростью несколько см/год -> агградация мерзлоты, захват растений и др. органического материала



Это основной источник неопределенности в оценке резервов углерода: 327-466 Пг С



# Содержание лекции

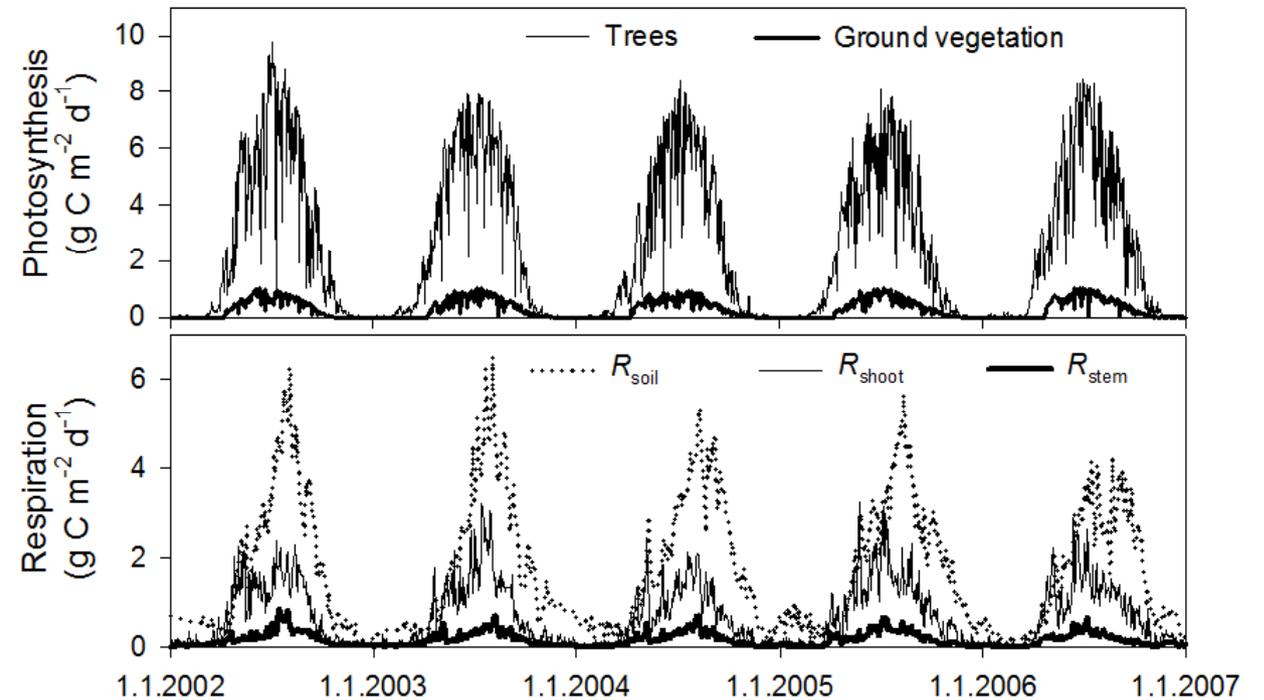
- Распространение многолетней мерзлоты.
- Профили температуры в почве. Динамика температуры ММП в условиях современного климата.
- Обратная связь парниковые газы-климат-мерзлота. Запасы углерода в почве.
- Динамика выбросов парниковых газов в атмосферу в зоне распространения ММП.

## AR1.3 утверждение,

- *Medium evidence* и *low agreement* о том, что в зоне мерзлоты в настоящее время происходят дополнительные выбросы метана и углекислого газа из-за таяния.

# Фотосинтез и респирация

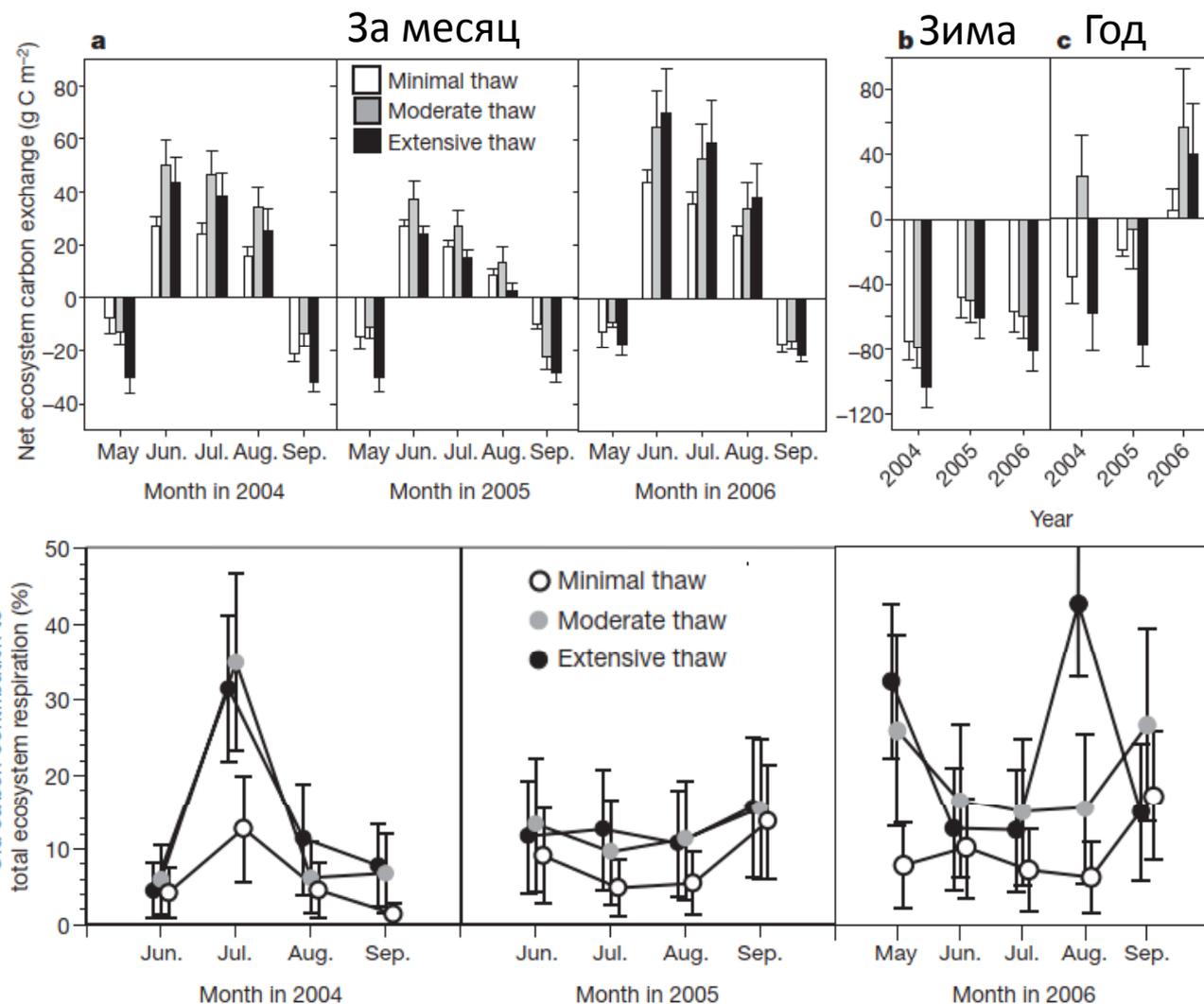
- Чистый обмен экосистемы:
- $NEE = GPP - R$
- Поток углекислого газа:
- $F_{CO_2} = \langle w'CO_2' \rangle$



Carbon fluxes (photosynthesis and respiration) of the forest trees, ground vegetation and forest soil over 5 years (Kolari et al, 2009)

# Выбросы «старого» углерода (Schuur et al, Nature, 2009)

- Аляска: 3 контрольных участка, с различной степенью таяния
- Выброс старого углерода, особенно для участков умеренного/выраженного таяния
- В то же время, наблюдается рост фотосинтетической активности в теплый сезон



	Minimal Thaw	Moderate Thaw	Extensive Thaw
Soil Temperature (10 cm, °C)	6.8±0.2	8.8±0.1	9.1±0.2
Active Layer Thickness (m)	0.69±0.02	0.70±0.02	0.78±0.05
Surface microtopography (m)	0.18	0.28	0.36
Maximum depression depth (m)	-0.67±0.005	-1.03±0.009	-1.30±0.014

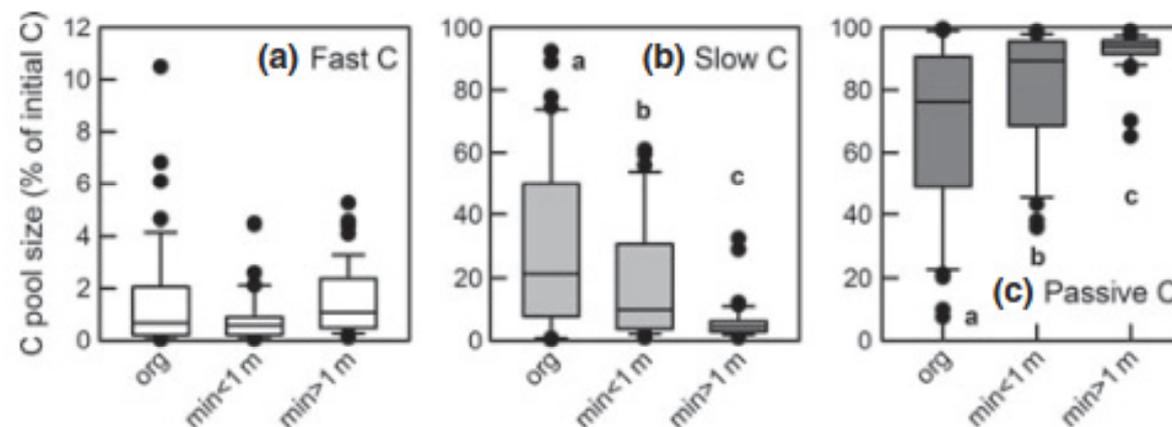
# Скорость разложения углерода

Экспериментальное изучение процессов разложения углерода при оттаивании почвы (выбросы из СТС и мерзлой почвы) в Арктике, в условиях окисления (аэробных)

121 образец

**Table 1** Mean residence times ( $\pm$ SD) at 5 °C for the fast, slow, and passive C pool grouped by soil type. Letters indicate significant differences by Tukey Kramer honestly significant difference (HSD) test

	MRT (years)		
	Fast C	Slow C	Passive C
Organic	0.41 $\pm$ 0.87 <sup>b</sup>	7.21 $\pm$ 4.32	>125
Mineral < 1 m	0.48 $\pm$ 0.51 <sup>a</sup>	8.76 $\pm$ 6.11	>2500
Mineral > 1 m	0.21 $\pm$ 0.17 <sup>ab</sup>	6.42 $\pm$ 4.99	>2500

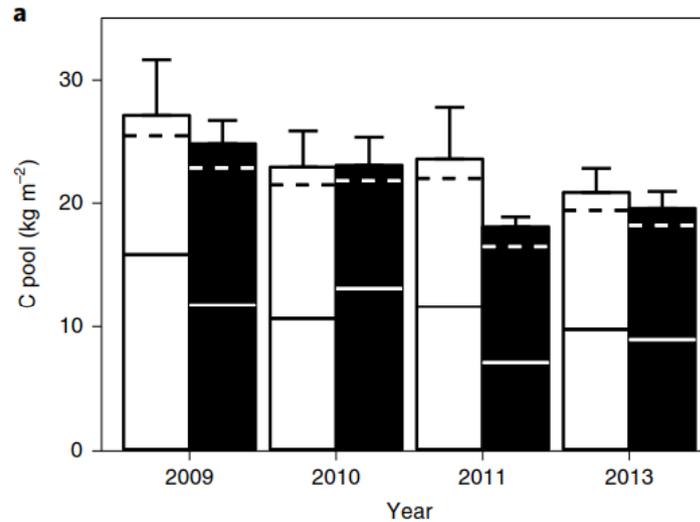
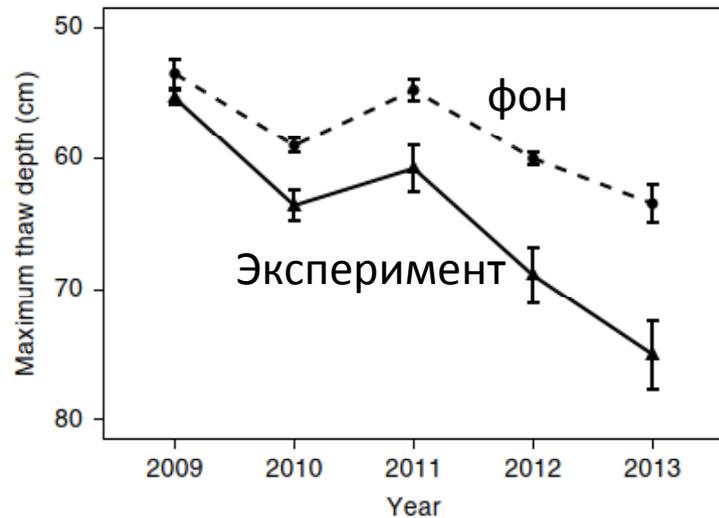


Быстрый резерв: разложение в течение 1 года,  
 Медленный: разложение в течение 10 лет,  
 Пассивный: сотни-тысячи лет

- Обратите внимание на пассивные резервы!
- Медленные резервы органических почв больше, чем резервы минеральных

# Влияние гидрологии на перенос углерода

Экспериментальное потепление – снежные наносы. Рост температуры почвы на 1°C на глубине 5-40 см.



Эксперимент: черный,  
фоновые условия: белый

- 5.4% потерь в год и только половина из них может быть объяснена выбросами парниковых газов

Горизонтальный перенос углерода, гидрология?

# Заключение

- Температура ММП повышается, что связано с общим потеплением климата и изменением характеристик снежного покрова.
- Содержание углерода в почве в зоне вечной мерзлоты вдвое превышает его текущее содержание в атмосфере. В Арктике зафиксированы выбросы 'старого' углерода из почвы.
- Однако необходимо учитывать скорость поступления углерода в атмосферу при таянии мерзлоты. По современным оценкам, величина пассивного резерва почв, богатых органикой, составляет около 80%.

# Carbon dynamics under different warming scenarios (McGuire et al, PNAS, 2018)

- Carbon dynamics in the permafrost area with regards to RCP4.5 (aggressive climate mitigation) and RCP8.5 (no action) scenarios

Two counteracting effects are known: CO<sub>2</sub> fertilization and carbon loss from permafrost

Table 1. Models used in this study to assess responses of permafrost dynamics, carbon dynamics, and sensitivity of carbon dynamics to changes in atmospheric CO<sub>2</sub>, air temperature, and precipitation

Model acronym	Model name	Used to simulate		Used to evaluate
		permafrost dynamics	carbon dynamics	sensitivity of carbon dynamics
CLM4.5	Community Land Model, Version 4.5	Yes	Yes	No
CoLM	Common Land Model	Yes	No	No
JULES	Joint UK Land Environmental Simulator	Yes	No	No
ORCHb	Orchidee Land Model, Version b*	Yes	Yes	Yes
UVic	University of Victoria Earth System Climate Model	Yes	Yes	Yes
TEM6	Terrestrial Ecosystem Model, Version 6	Yes	Yes	Yes
SiBCASA	Simple Biosphere/Carnegie-Ames-Stanford Approach Model	Yes	Yes	No
GIPLb	Geophysical Institute Permafrost Lab Model, Version b <sup>†</sup>	Yes	No	No

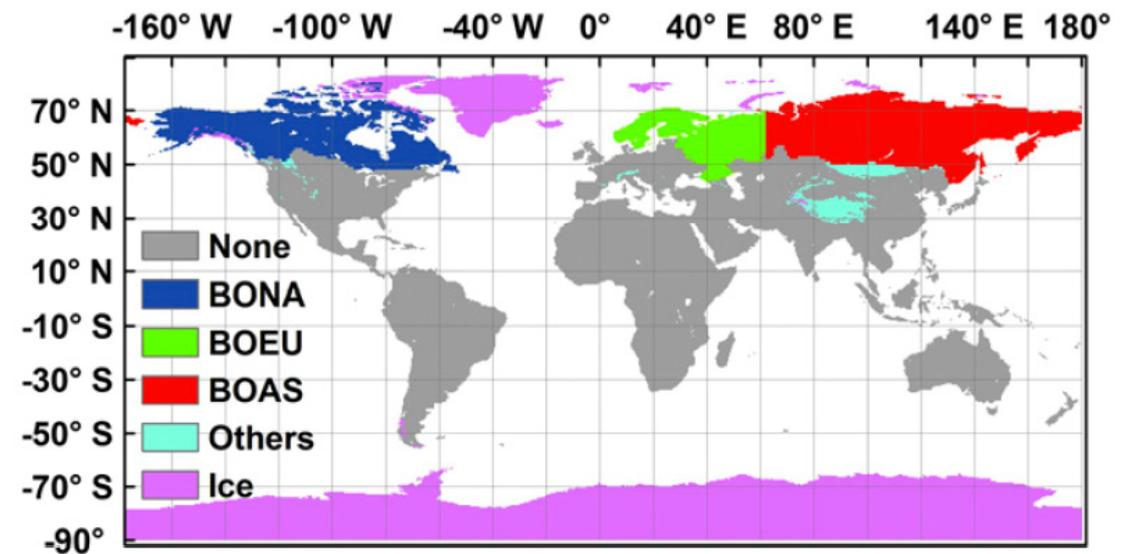
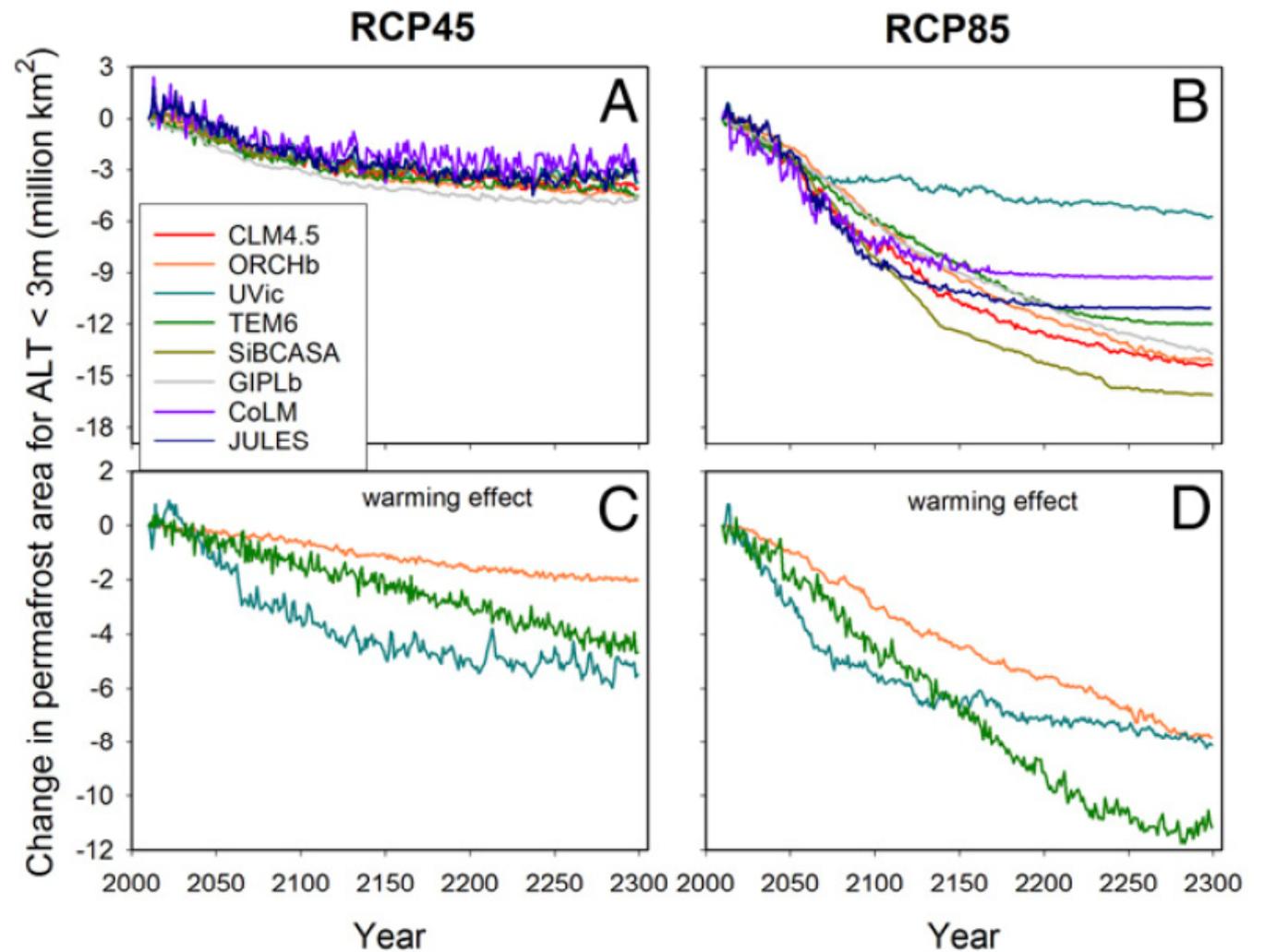


Fig. 1. The spatial extent of the permafrost region in the Northern Hemisphere defined in this study. Subregions include boreal Asia (BOAS), boreal Europe (BOEU), boreal North America (BONA), Glaciers and Ice Sheets (Ice), and other permafrost areas (Other). Reprinted with permission from ref. 2.

# Permafrost dynamics

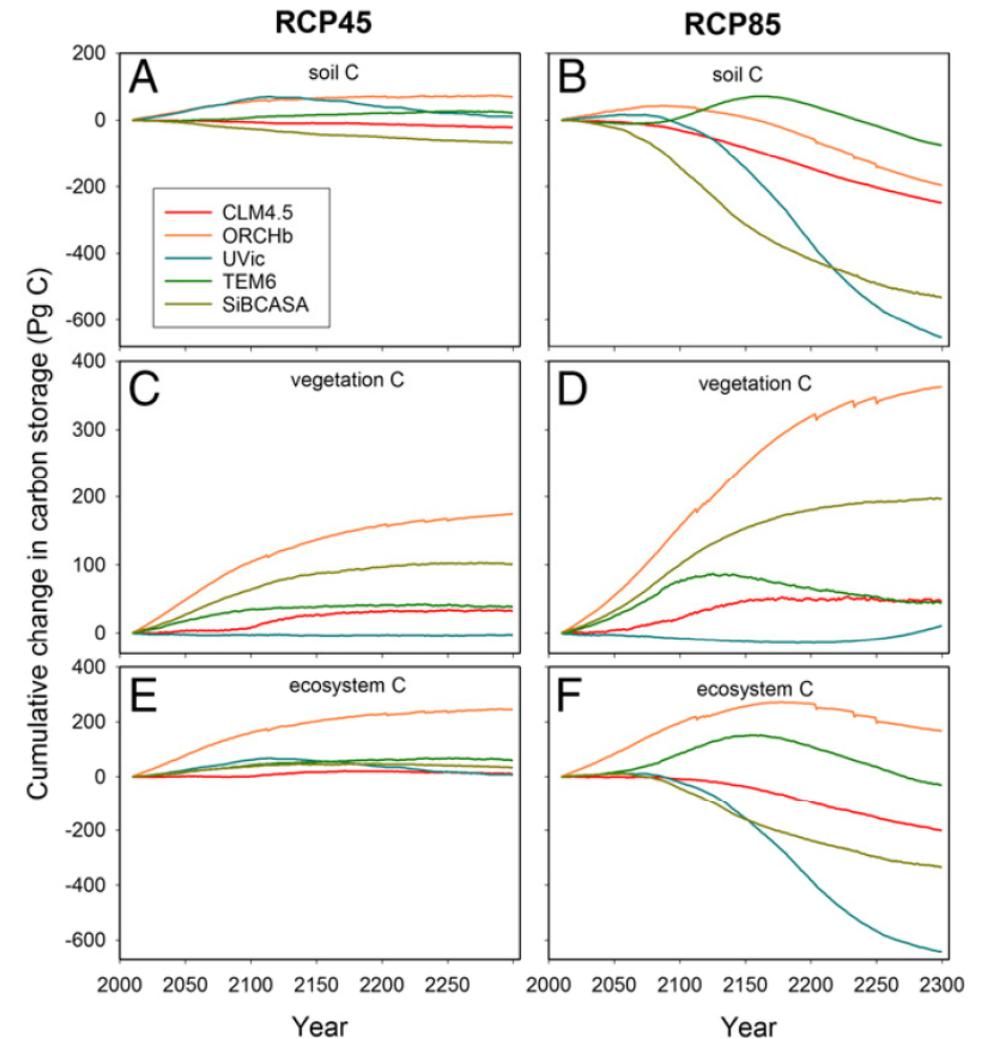
- All models simulated decrease in permafrost areas:
- RCP4.5 - 4.1 mln km<sup>2</sup>,
- RCP8.5 – 12.7 mln km<sup>2</sup>

The loss is mainly explained by the increase in air temperature



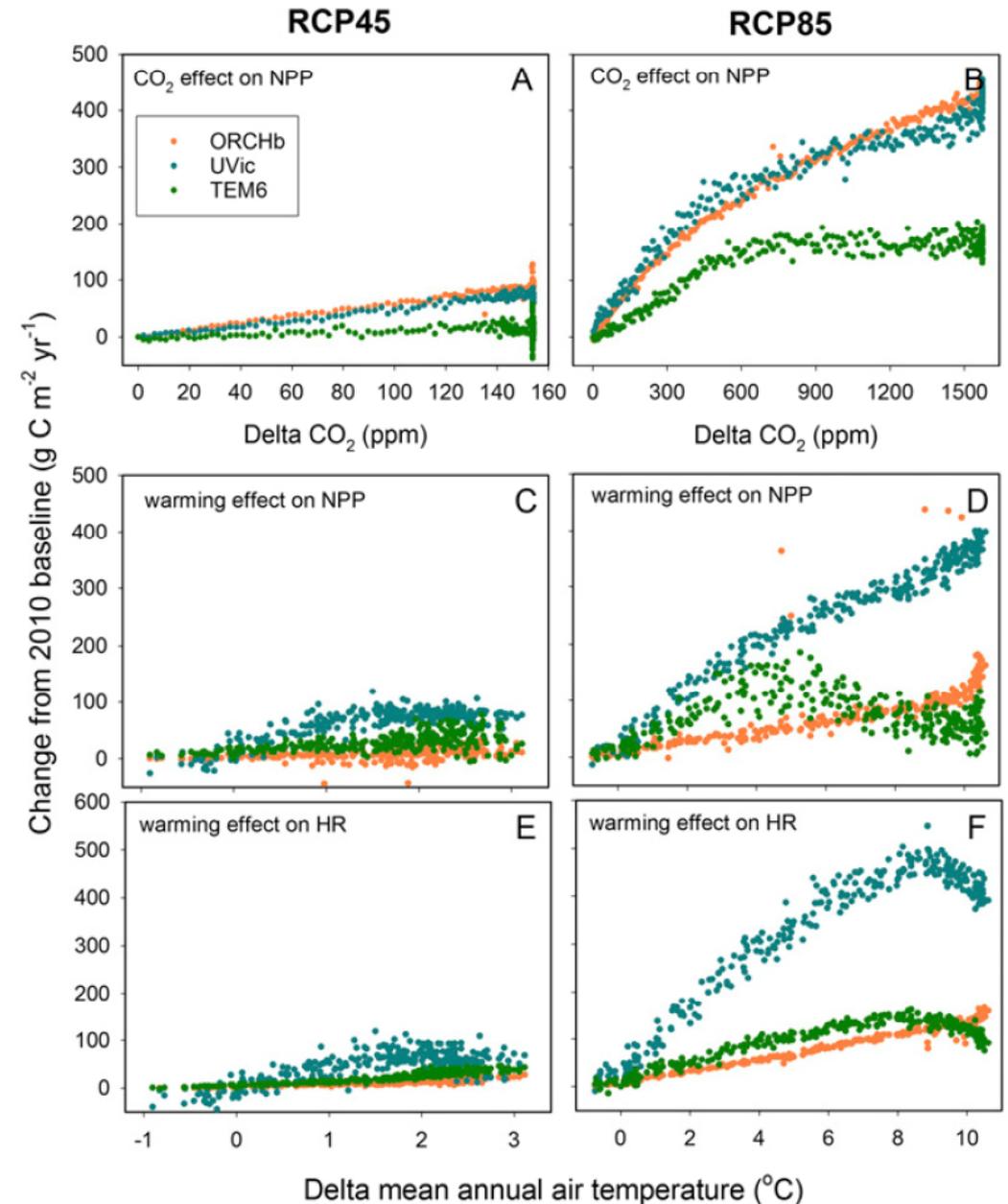
# Changes in simulated carbon storage

- A and B – soil storage – mainly decreases, but some models project increase in storage, especially under mitigation scenario
- C and D – vegetation storage – mainly increase, quite comparable with losses from soil
- E and F – ecosystem reaction
- Mitigation scenario – C sink
- Little or no action – 4 of 5 project permafrost area to be a source, but very different outcome, from strong source to strong sink



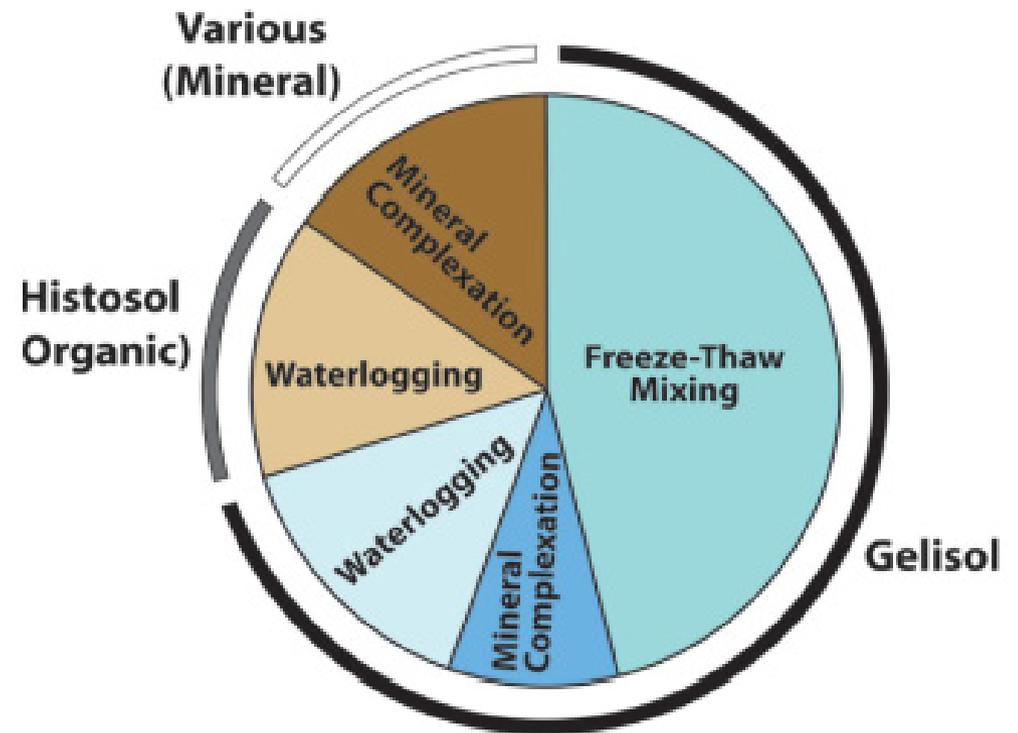
# Model sensitivity

- Only CO<sub>2</sub> increase or only temperature increase, other climatic factors being fixed
- Drastic increase in NPP due to carbon dioxide fertilization under RCP85 in two models, green model simulates N-related constrain on productivity
- NPP response is btw 1.9 and 15.4% - mean 13% from FACE experiment in temperate forests
- NPP and respiration response to temperature are also poorly constrained under RCP85



- Chart according to proportional storage of carbon in permafrost zone (0-3 m)

/ Second state of the carbon cycle report (SOCCR II), Ch. 11, 2018



# Siberian craters

- Can Siberian craters be hydrates explosions?

These two are located on Yamal Peninsula.



20 July 2017

**The  
Guardian**



## **All hell breaks loose as the tundra thaws**

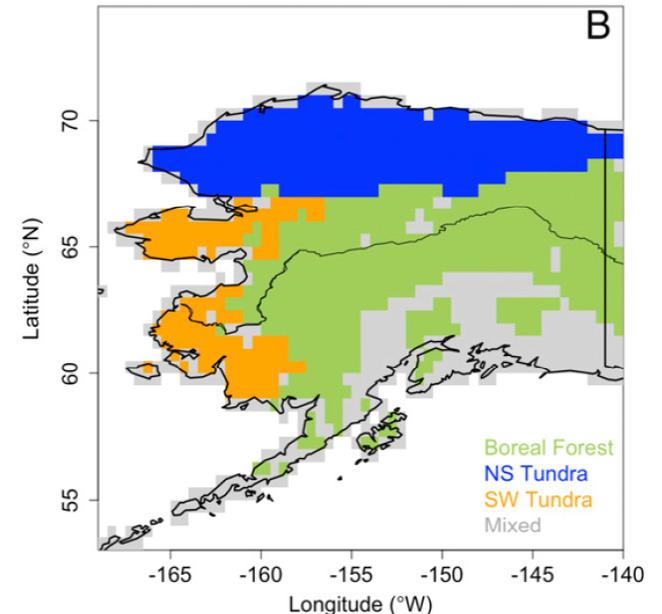
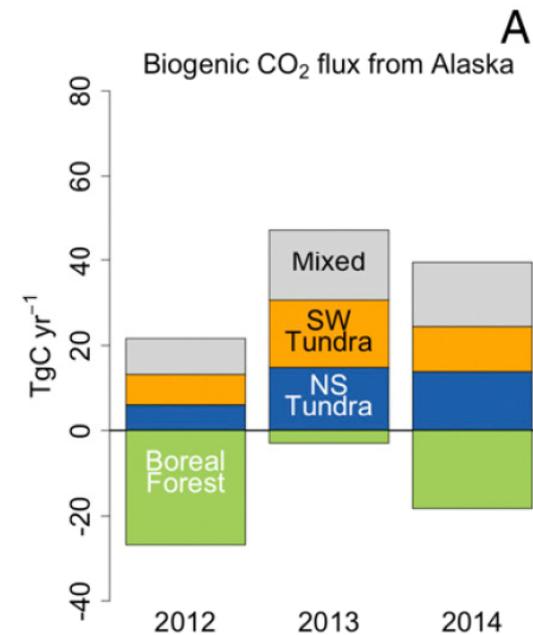
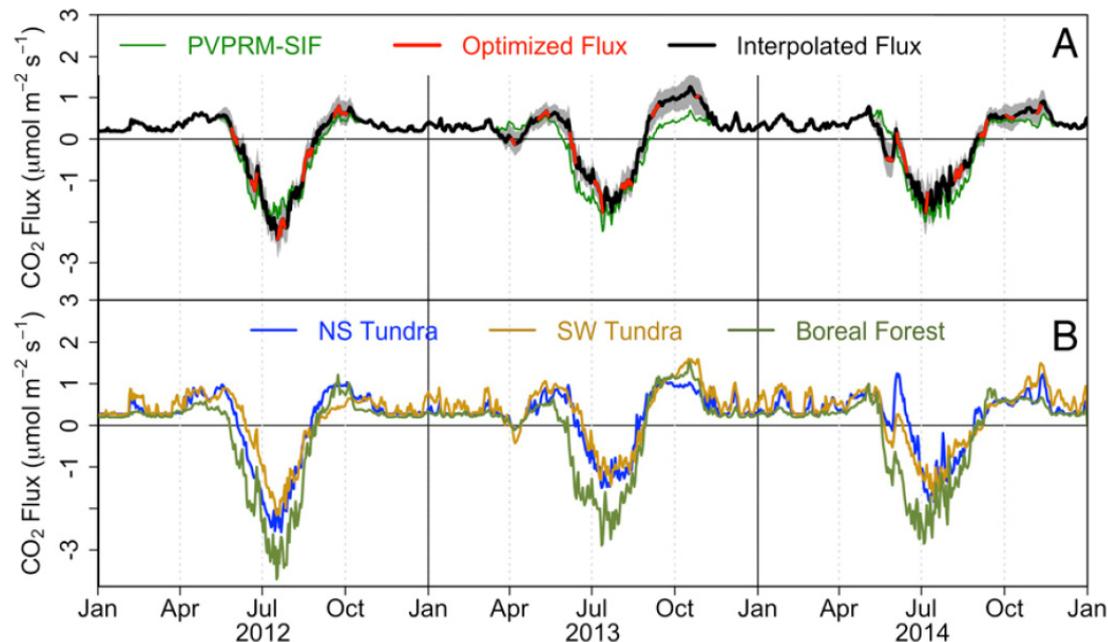
A recent heatwave in Siberia's frozen wastes has resulted in outbreaks of deadly anthrax and a series of violent explosions

**S**trange things have been happening in the frozen tundra of northern Siberia. Last August a boy died of anthrax in the remote Yamal Peninsula, and 20 other infected people were treated and survived. Anthrax hadn't been seen in the region for 75 years, and it's thought the recent outbreak followed an intense heatwave in Siberia, temperatures reaching over 30C that melted the frozen permafrost.

# Importance of early winter respiration

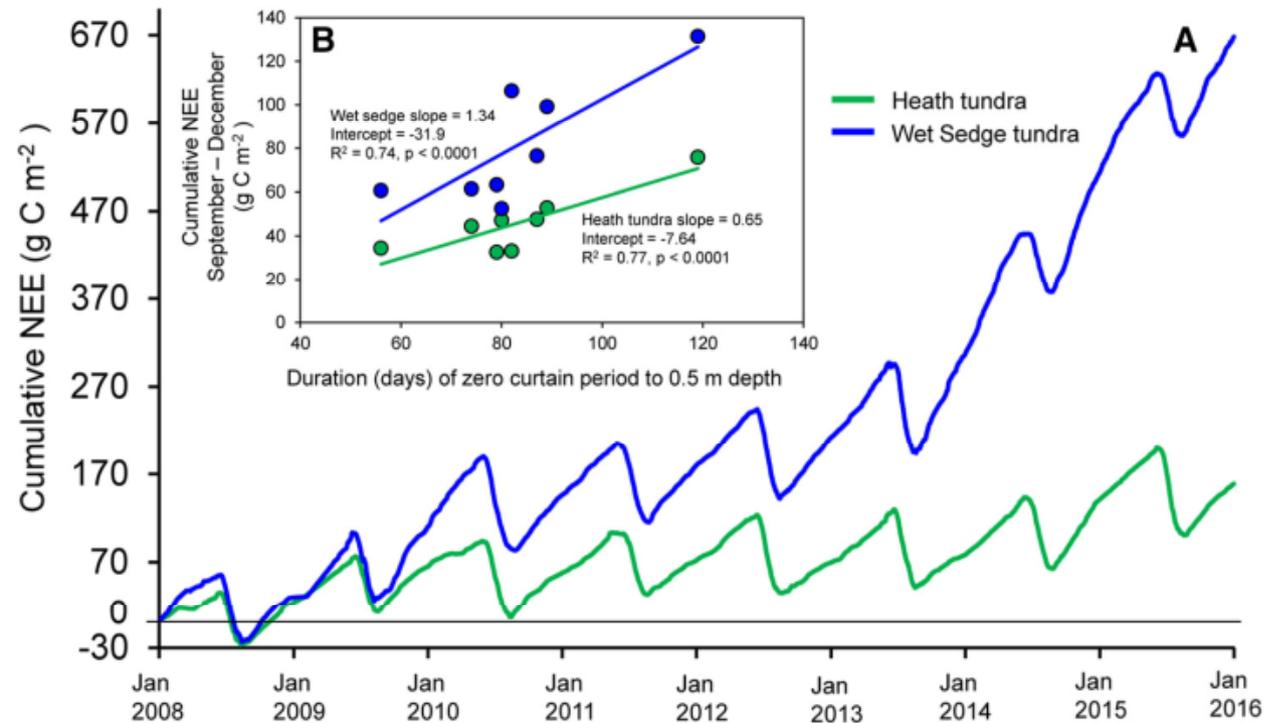
(Commane et al., PNAS, 2017, Euskirchen et al., Ecology, 2017)

- Prolongation of warm season
- Regional assessment: Flights were made during approximately two weeks of each month between May and September 2012, April and October 2013, and May and November 2014.



# Greenhouse gase emissions

- Carbon loss: 0.5% per year in wet sedge tundra, 0.2% per year in heath tundra.



Northern Alaska,  
68 37'N 149 18'W

The longest series of GHG flux measurements  
in Alaskan Arctic tundra

Negative values of NEE – terrestrial sink

Euskirchen et al., 2017