

Мелкомасштабное ГТОР-моделирование среднегодовой температуры многолетнемёрзлых пород (на примере Западной и Средней Сибири)

Алексеева Анастасия Ивановна

Географический факультет

МГУ имени М.В. Ломоносова

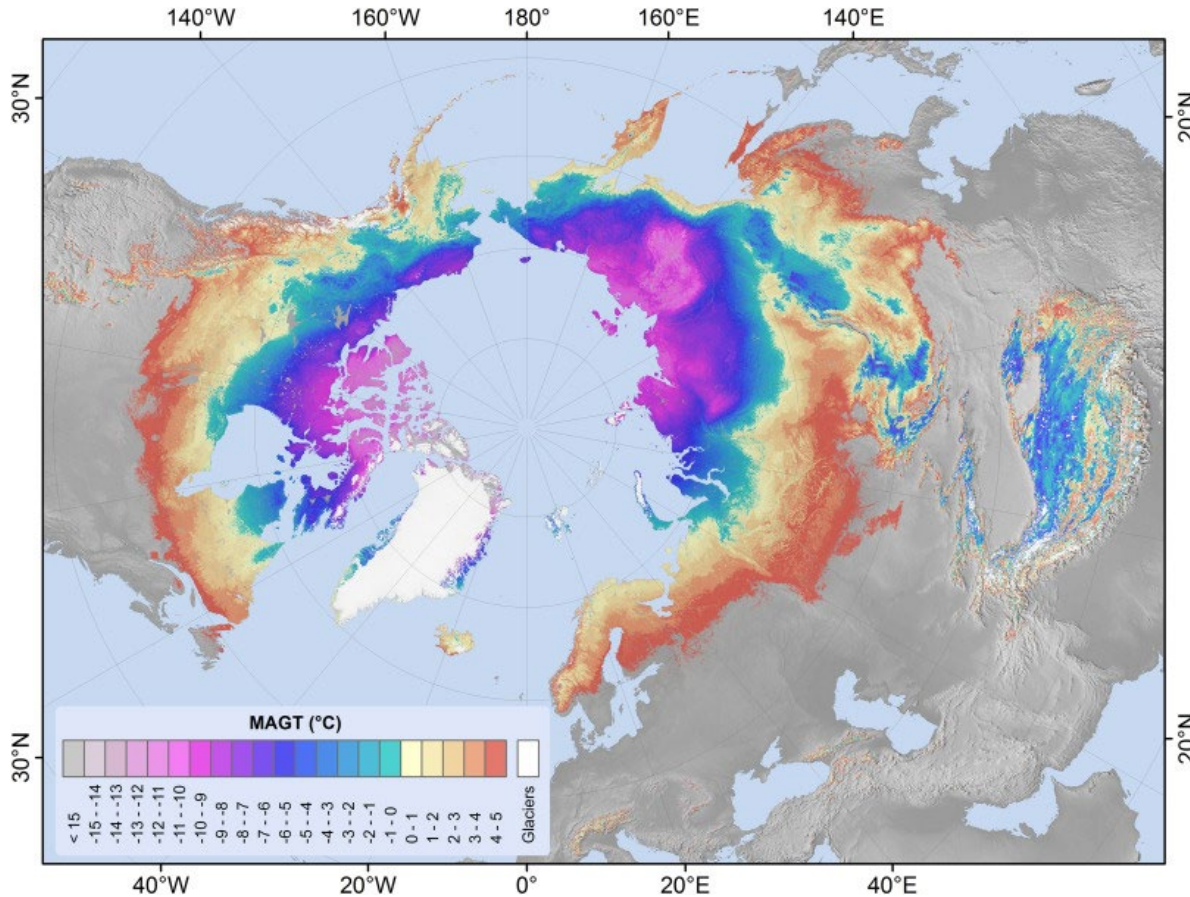
Кафедра картографии и геоинформатики

E-mail: alekseevaai@my.msu.ru

Москва

2024

Актуальность исследования



ТТОР (temperature at the top of permafrost) **equilibrium approach / model** — равновесная модель температуры в верхней части толщи многолетнемёрзлых пород

Набор пространственных данных, содержащий сведения о среднегодовой температуре многолетнемёрзлых пород в глобальном охвате была создан на основе методики ТТОР в 2019 г. [Obu et al., 2019], однако эксперты неоднозначно относятся к этим результатам.

ТТОР-модель предполагает возможность использования **альтернативных наборов входных данных**, чтобы получить иное распределение температур.

Общая формулировка ТТОР-модели

$$MAGT = \begin{cases} \frac{1}{\tau} (n_f FDD + r_k n_t TDD), & \text{если } (n_f FDD + r_k n_t TDD) \leq 0 \\ \frac{1}{\tau} \left(\frac{1}{r_k} n_f FDD + n_t TDD \right), & \text{если } (n_f FDD + r_k n_t TDD) > 0 \end{cases}$$

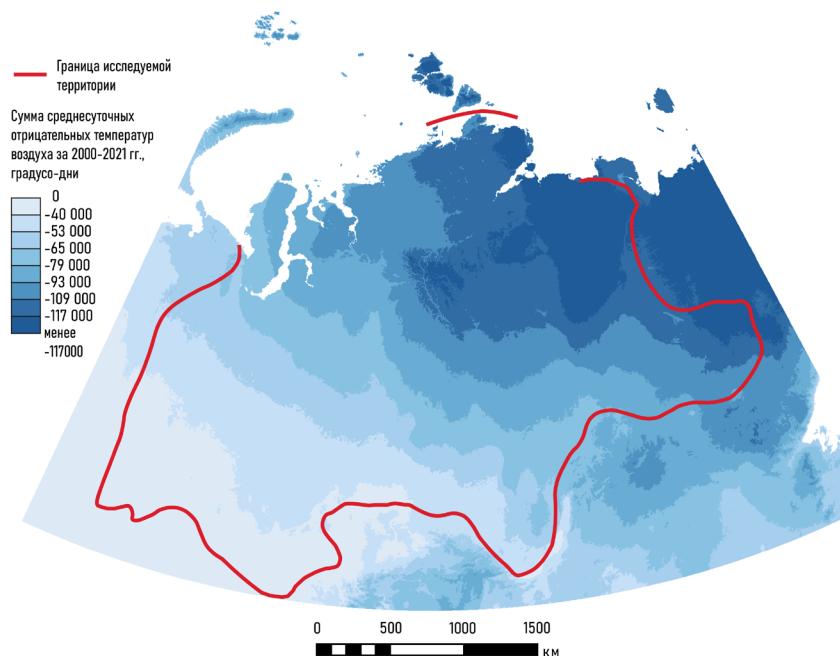
MAGT (Mean annual ground temperature) – среднегодовая температура грунта на глубине подошвы слоя сезонных колебаний температур

Параметр модели	Расшифровка
<i>FDD</i> (<i>Freezing degree days</i>) <i>TDD</i> (<i>Thawing degree days</i>)	Сумма средних суточных отрицательных и положительных температур воздуха за исследуемый период τ (в сутках), измеряемая в градусо-днях
n_t	Коэффициент пропорциональности между летней температурой воздуха и температурой земной поверхности
n_f	Коэффициент пропорциональности между зимней температурой воздуха и температурой земной поверхности
r_k	Коэффициент, отражающий отношение теплопроводности грунта деятельного слоя в талом и мёрзлом состоянии

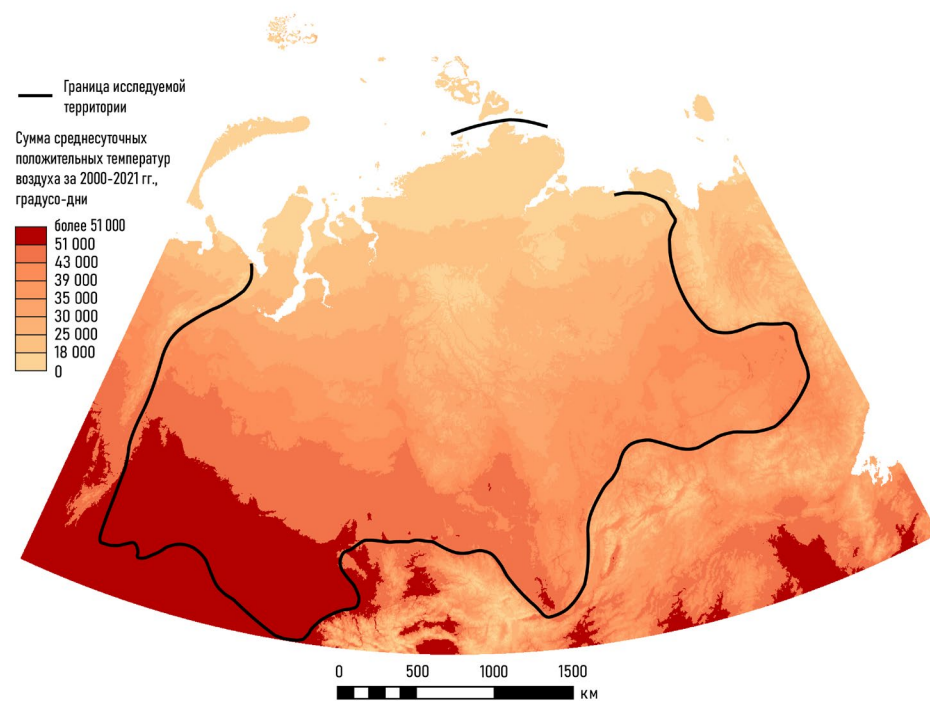
Общая формулировка ТТОР-модели

Параметр модели	Источник вычисления
FDD (<i>Freezing degree days</i>) и TDD (<i>Thawing degree days</i>) — сумма средних суточных отрицательных и положительных температур воздуха за исследуемый период τ (в сутках), измеряемая в градусо-днях	Среднемесячная температура воздуха по данным климатической модели WorldClim 2.1
n_t — коэффициент пропорциональности между летней температурой воздуха / поверхности и температурой земной поверхности	<ul style="list-style-type: none">• Температура почвы, измеренная на оголённых участках грунта при помощи коленчатых термометров Савинова на глубине 5 см (архивы ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»)• Среднесуточная температура воздуха на метеостанциях (архивы ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»)
n_f — коэффициент пропорциональности между зимней температурой воздуха / поверхности и температурой земной поверхности	<ul style="list-style-type: none">• Среднегодовая температура воздуха, вычисленная по данным климатической модели WorldClim 2.1• Высота снежного покрова по данным модели реанализа ERA5-Land, по карте «Высота снежного покрова» из 2 тома Национального атласа России и по измерениям на метеостанциях (архивы ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»)
r_k — коэффициент, отражающий отношение теплопроводности грунта деятельного слоя в талом и мёрзлом состоянии	Карта наземного покрова ESA CCI LC

Входные параметры ТТОР-модели

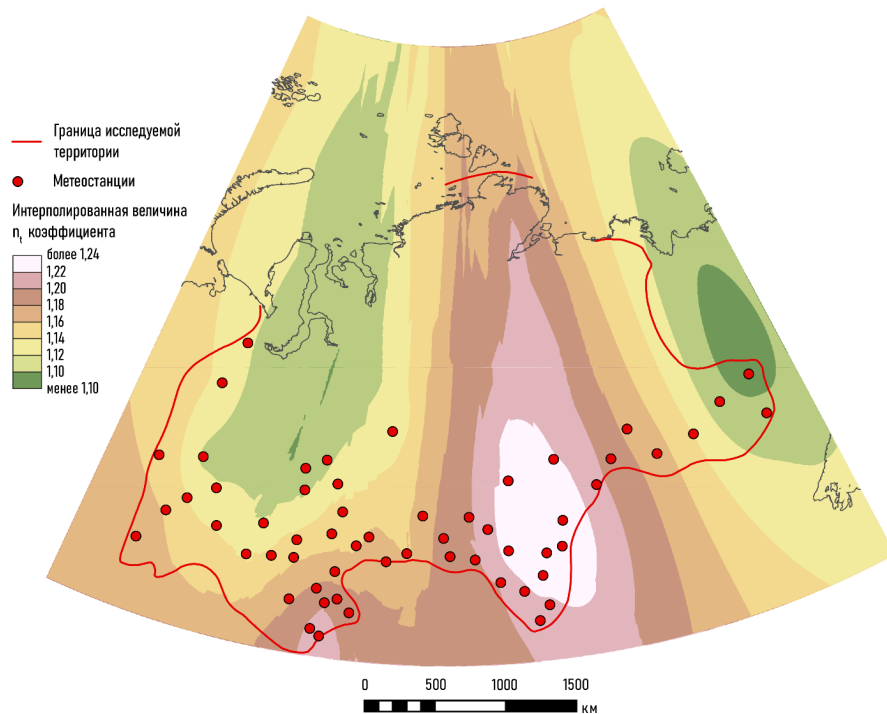


Сумма среднесуточных отрицательных температур воздуха (*FDD*)

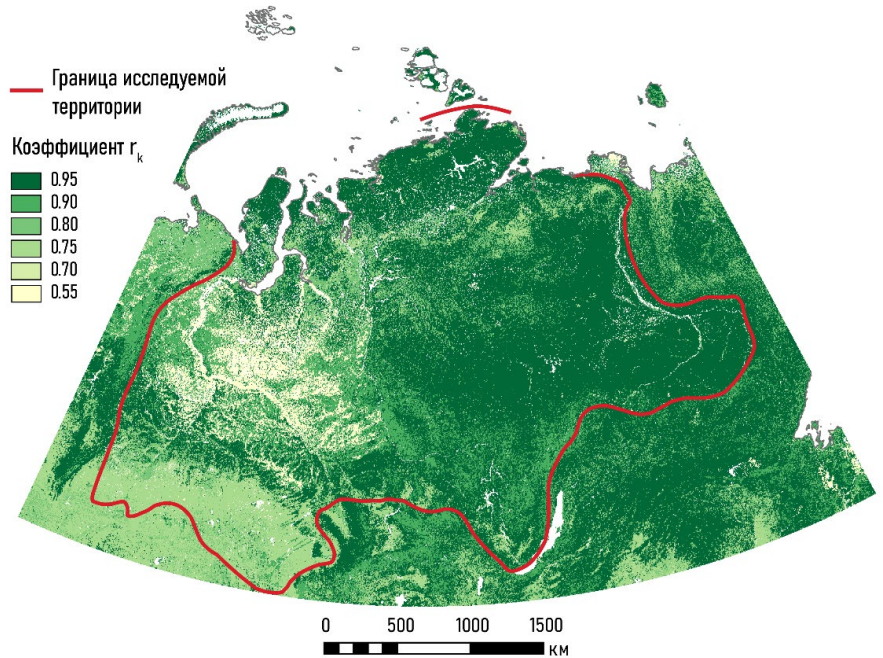


Сумма среднесуточных положительных температур воздуха (*TDD*)

Входные параметры ТТОР-модели

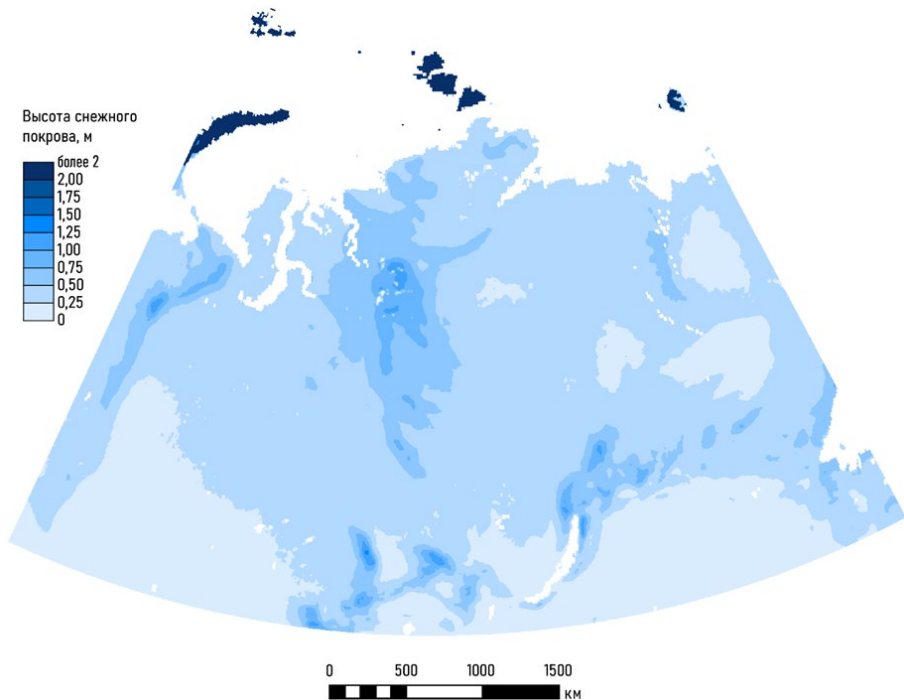


Коэффициент пропорциональности между летней температурой воздуха и температурой земной поверхности (n_t)

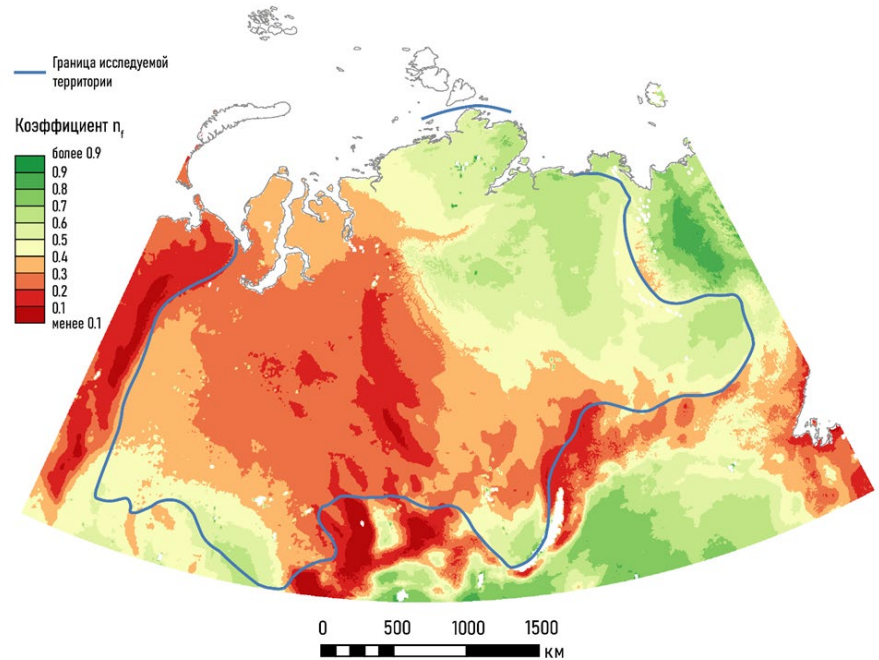


Коэффициент, отражающий отношение теплопроводности грунта деятельного слоя в талом и мёрзлом состоянии (r_k)

Входные параметры ТТОР-модели

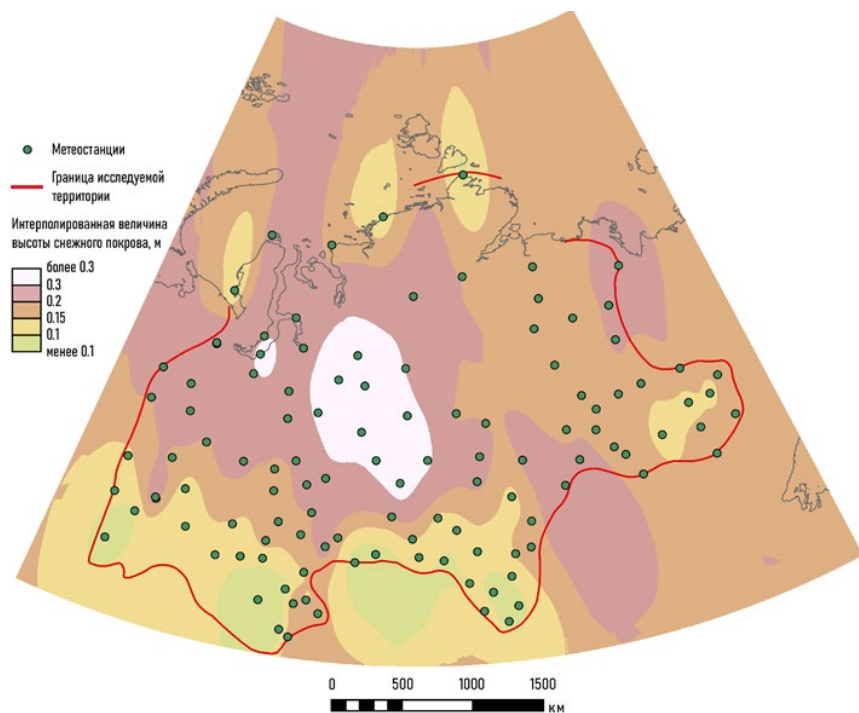


Высота снежного покрова по климатической модели реанализа ERA5-Land

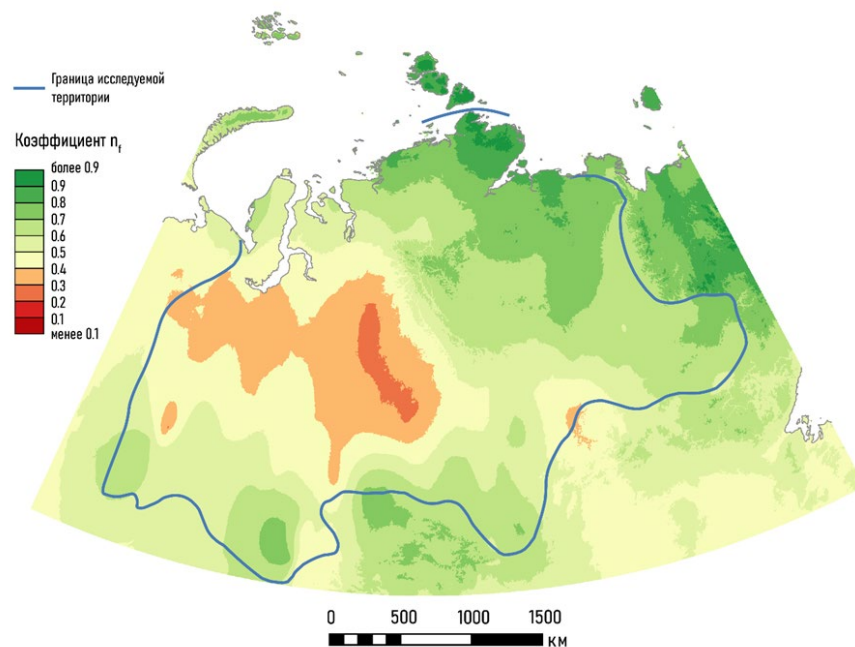


Коэффициент пропорциональности между зимней температурой воздуха и температурой земной поверхности (n_f)

Входные параметры ТТОР-модели

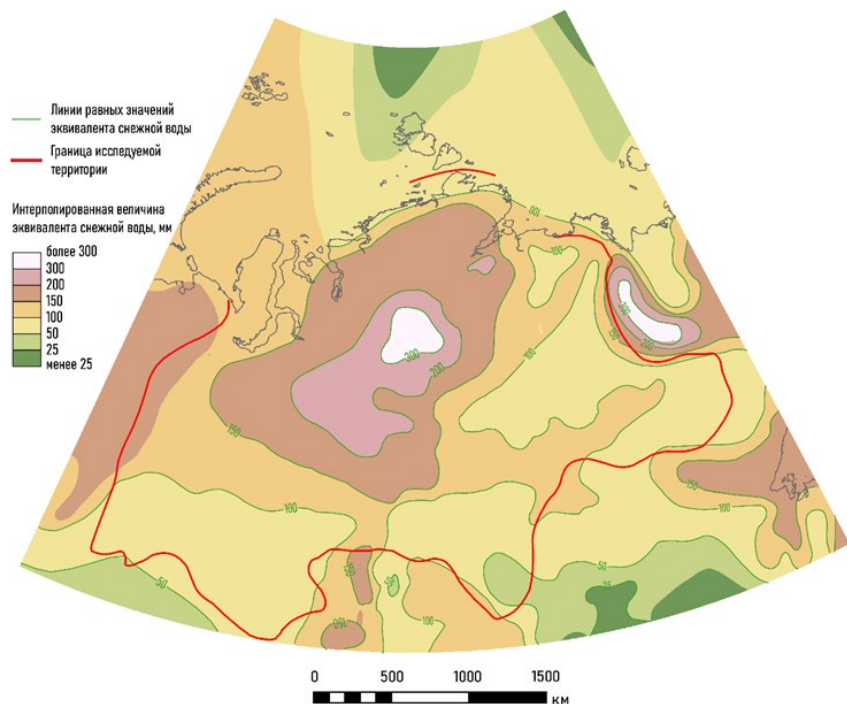


Высота снежного покрова по измерениям на метеостанциях

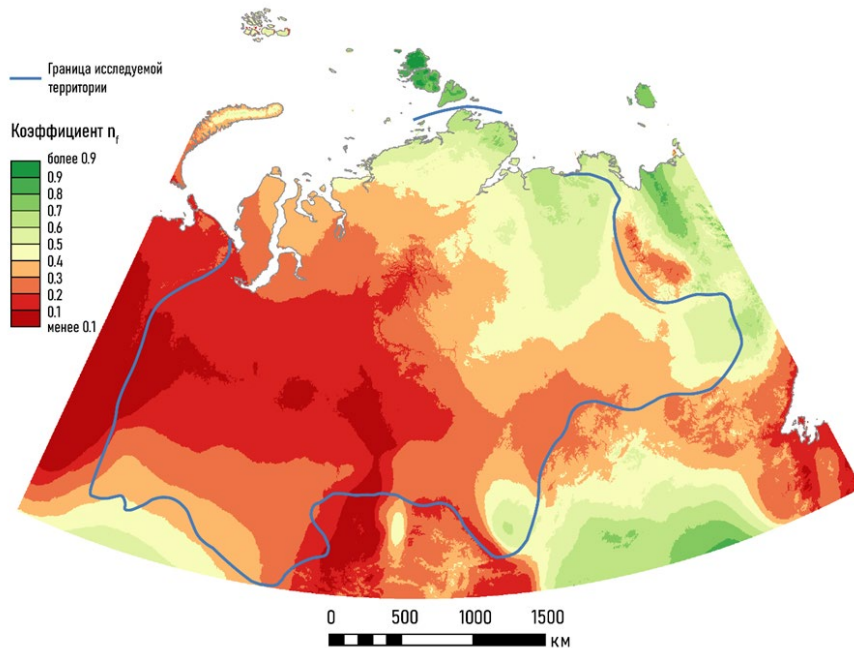


Коэффициент пропорциональности между зимней температурой воздуха и температурой земной поверхности (n_f)

Входные параметры ТТОР-модели

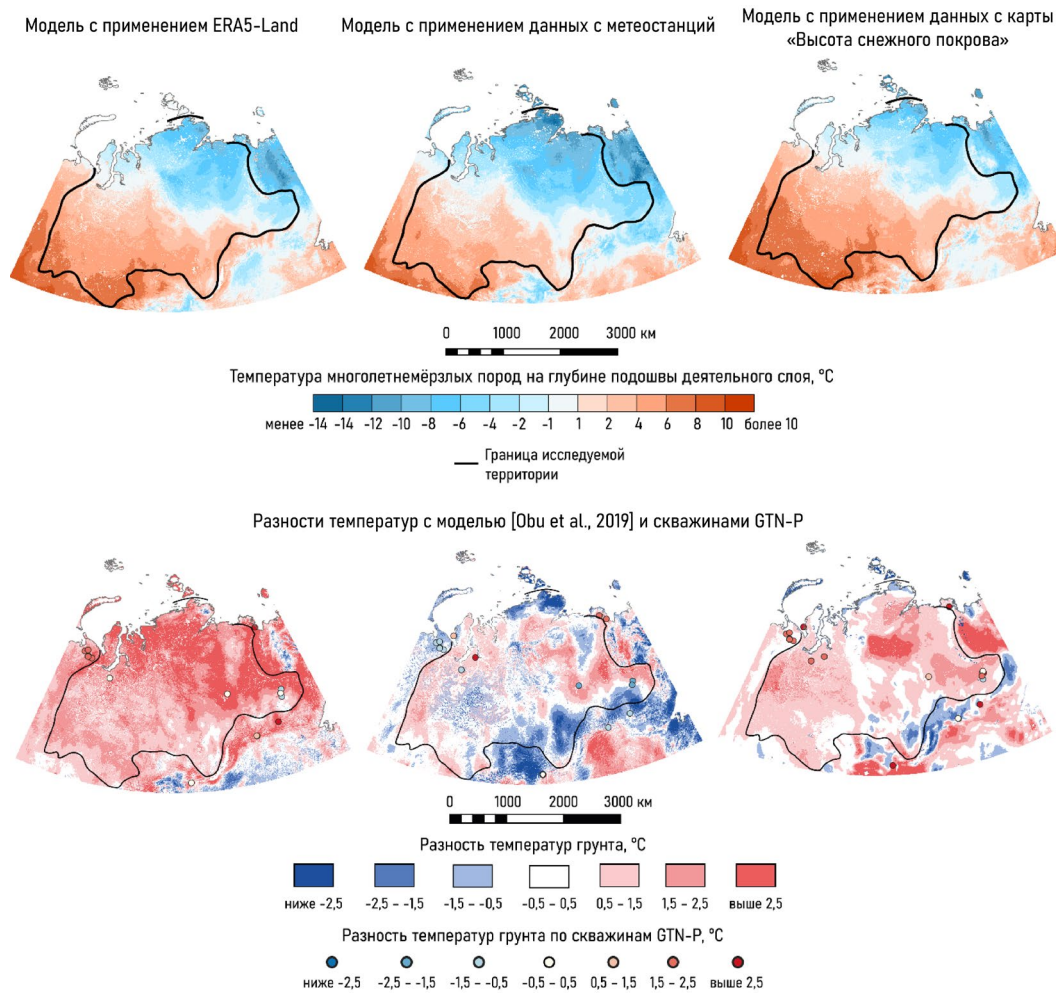


Водный эквивалент снежного покрова по карте «Высота снежного покрова» из Национального атласа



Коэффициент пропорциональности между зимней температурой воздуха и температурой земной поверхности (n_f)

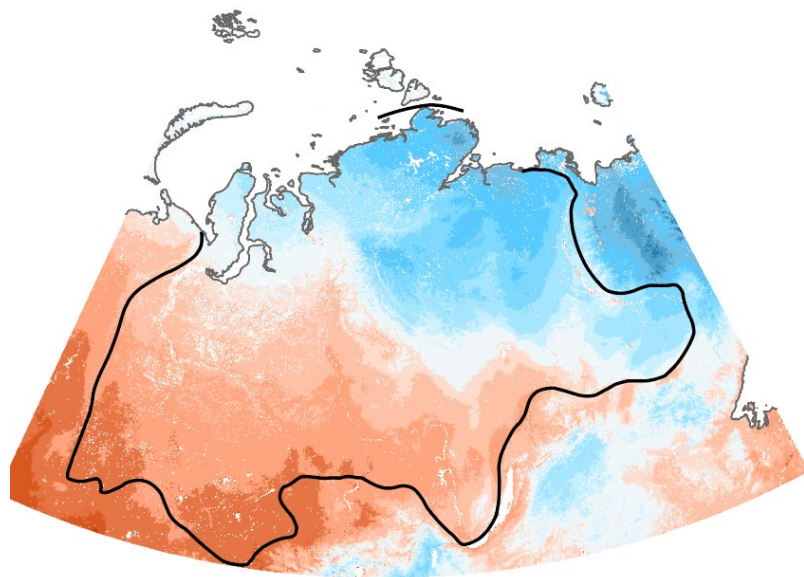
Результаты моделирования



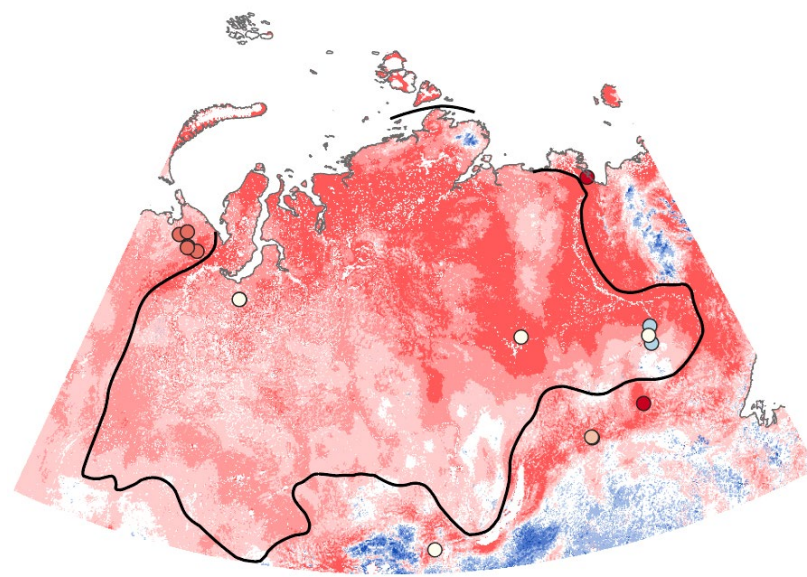
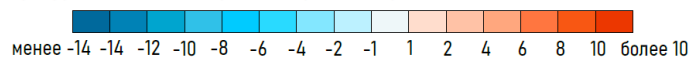
Если не учитывать особенности высотного распределения температур грунта на наиболее высоких частях Среднесибирского плоскогорья, то по всем моделям ход температур имеет черты **широтной зональности**, а температуры увеличиваются с **северо-востока на юго-запад**

Максимум температуры грунта для Западной и Средней Сибири составил **+9,4 °C** (ERA5-Land), а **минимум** достиг **-16,5 °C** (метеостанции).

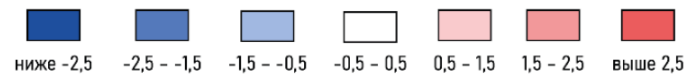
Результаты моделирования, ERA5-Land



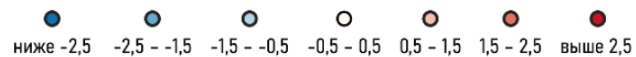
Температура многолетнемерзлых пород на глубине подошвы деятельного слоя, °C



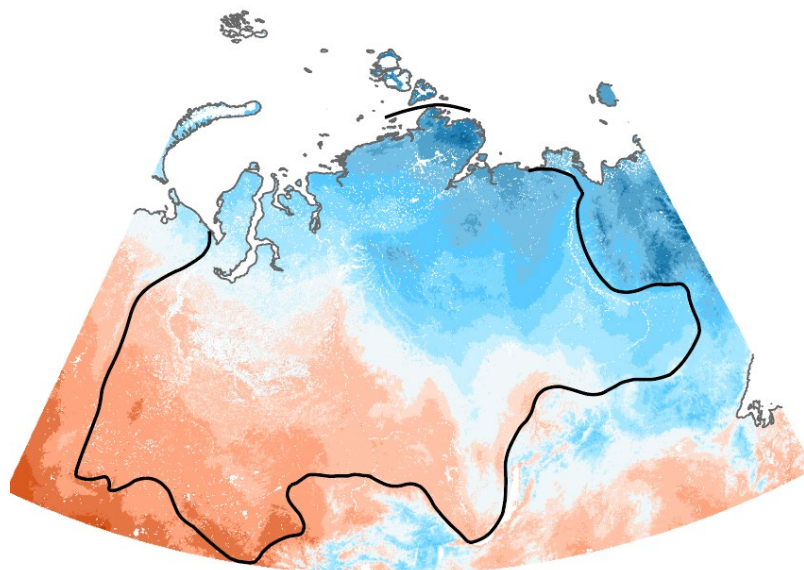
Разность температур грунта, °C



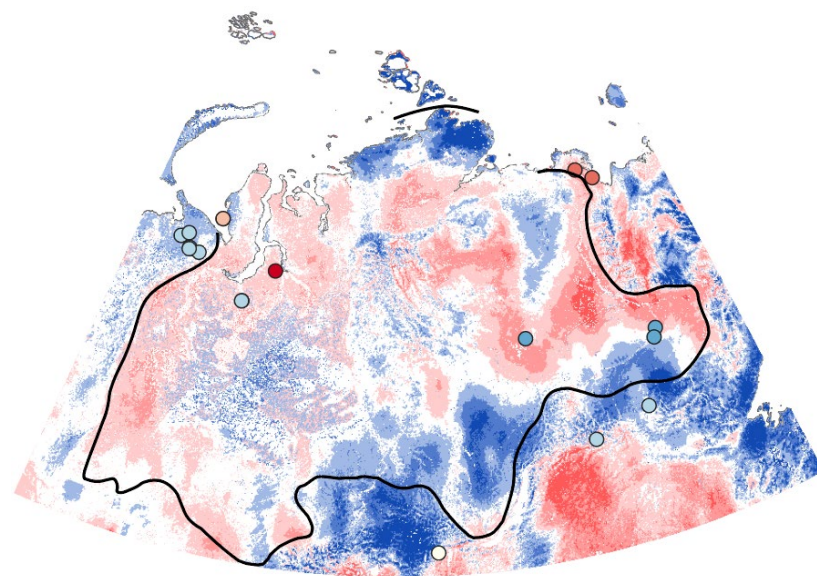
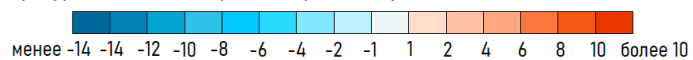
Разность температур грунта по скважинам GTN-P, °C



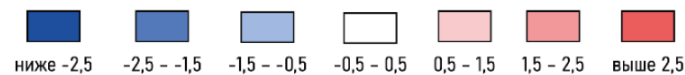
Результаты моделирования, метеостанции



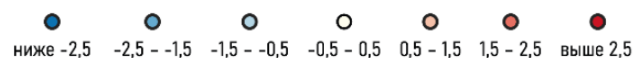
Температура многолетнемерзлых пород на глубине подошвы деятельного слоя, °C



Разность температур грунта, °C

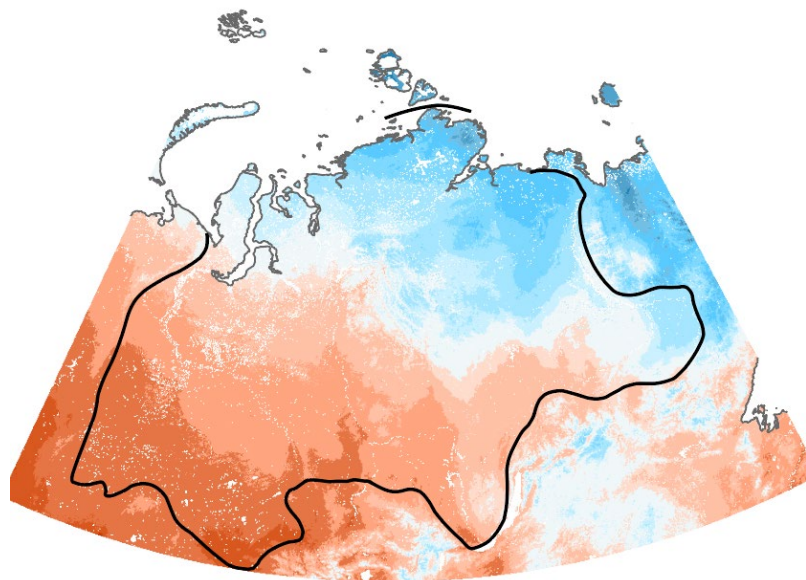


Разность температур грунта по скважинам GTN-P, °C

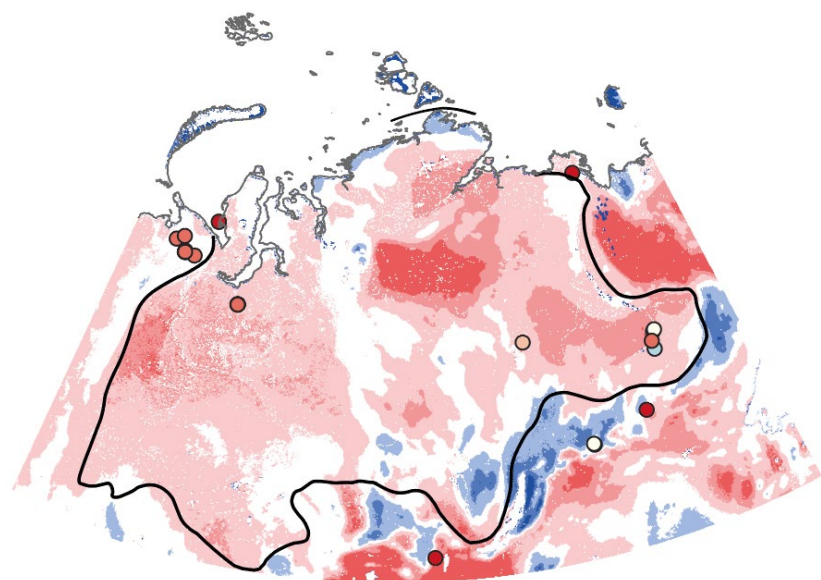




Результаты моделирования, карта высот снежного покрова



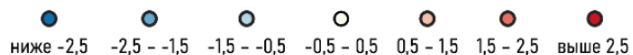
Температура многолетнемерзлых пород на глубине подошвы деятельного слоя, °C



Разность температур грунта, °C



Разность температур грунта по скважинам GTN-P, °C



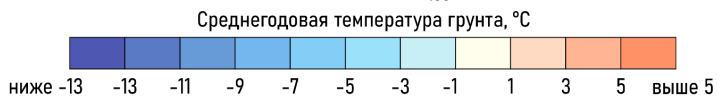
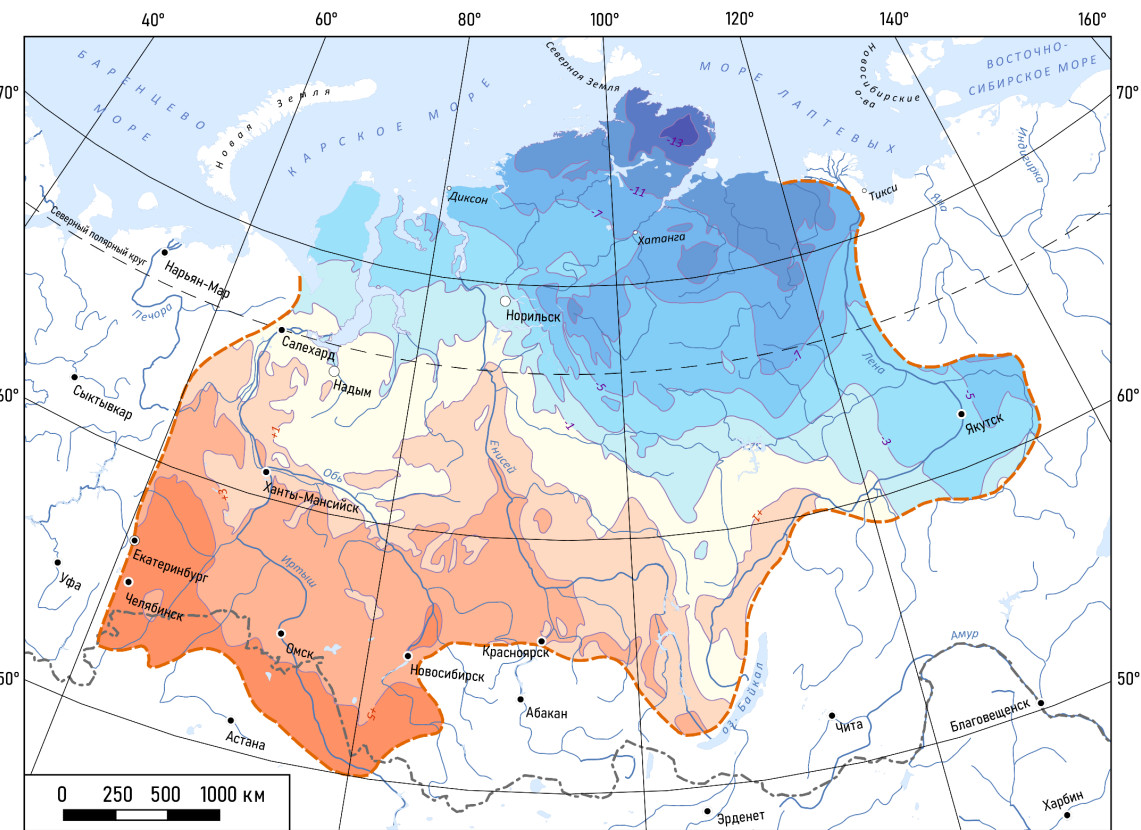
Результаты моделирования

Результат моделирования	Минимальное отклонение от модели 2019 года, °C	Максимальное отклонение от модели 2019 года, °C	СКО разностей с моделью 2019 года, °C	Среднее значение отклонений от модели 2019 года, °C	Минимальное отклонение от GTN-P, °C	Максимальное отклонение от GTN-P, °C	СКО разностей с GTN-P, °C	Среднее значение отклонений от GTN-P, °C
Модель с ERA5-Land	-3,6	+12,5	1,2	+2,1	-1,4	+11,1	2,9	+2,0
Модель по данным с метеостанция м	-7,2	+10,4	1,1	+0,1	-3,7	+2,8	1,5	-0,5
Модель по данным карты высот снежного покрова	-11,0	+7,9	1,1	+0,9	-1,9	+5,5	1,8	+2,3



Лучший результат (среднее значение отклонений от GTN-P составило $-0,5$ °C при СКО равном $1,5$ °C) показала модель с использованием данных с метеостанций

Среднегодовая температура грунта на подошве слоя сезонных колебаний температур на территории Западной и Средней Сибири



— Линии равной среднегодовой температуры грунта, °С

--- Граница территории исследования

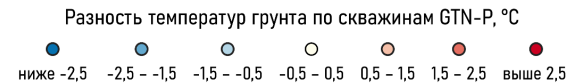
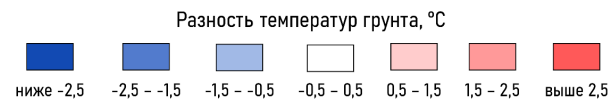
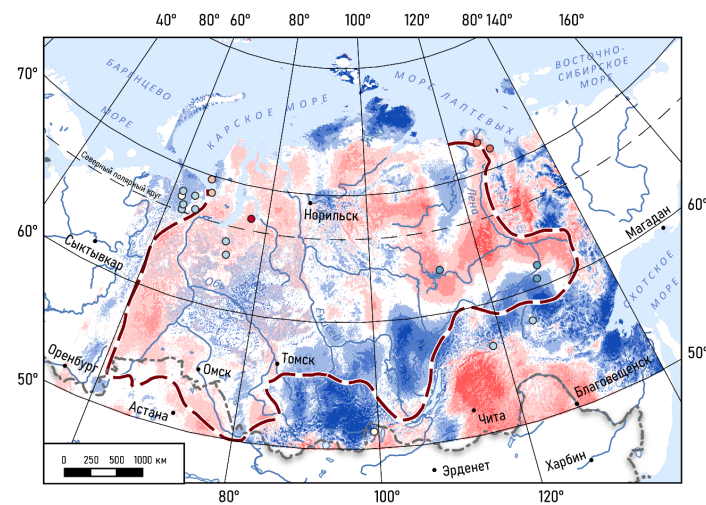
Карта создана на основе методики ТТОР-моделирования по следующим данным: среднесуточная температура воздуха по климатической модели WordClim; измерения температуры воздуха, высоты снежного покрова и температуры почвы на глубине 5 см по метеостанциям (архивы ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»); классы наземного покрова по карте ESA CCI LC.

Минимальная температура грунта: -16,5 °С

Максимальная температура грунта: +7,7 °С

Среднее отклонение температур от скважин проекта GTN-P: -0,5 °С

Разность температур грунта с ТТОР-моделью 2019 года [Obu et al., 2019]* и скважинами GTN-P**



--- Граница территории исследования

* Obu J. et al. Pan-Antarctic map of near-surface permafrost temperatures at 1 km2scale // Cryosphere. 2020. Volume 14. Issue 2. P. 497-519.

** Biskaborn B. et al. Permafrost is warming at a global scale // Nat. Commun. 2019. Volume 10.

Равнопромежуточная по меридианам коническая северо-азиатская проекция с главными параллелями 15° и 65° с.ш. и средним меридианом 95° в.д. (ESRI: 102026)

ВЫВОДЫ

- Изменение высоты снежного покрова приводит к **значительным изменениям среднегодовой температуры** грунта на глубине подошвы слоя сезонных колебаний температур
- Модель наиболее достоверна при использовании данных о снежном покрове с метеостанций, так как в среднем разность моделированной и измеренной температур составила **-0,5 °С при СКО равном 1,5 °С**, тогда как по данным предыдущих исследований для Азиатской части России оно соответствует 2,4 °С [Obu et al., 2019].
- Таким образом, посредством использования альтернативных входных данных удалось **улучшить результат ТТОР-моделирования** для территории Западной и Средней Сибири. На основе полученной модели была создана карта **среднегодовой температуры грунта** на глубине подошвы слоя сезонных колебаний температур в масштабе 1:22 500 000.

Алексеева Анастасия

МГУ имени М.В. Ломоносова

Географический факультет

Кафедра картографии и геоинформатики

Электронная почта: alekseevaai@my.msu.ru

Мелкомасштабное ТТОР-моделирование
среднегодовой температуры
многолетнемёрзлых пород
(на примере Западной и Средней Сибири)

Для связи в Telegram:

