

# Модельная ассимиляция и реанализ геокриологических данных: постановка задачи и валидация модели



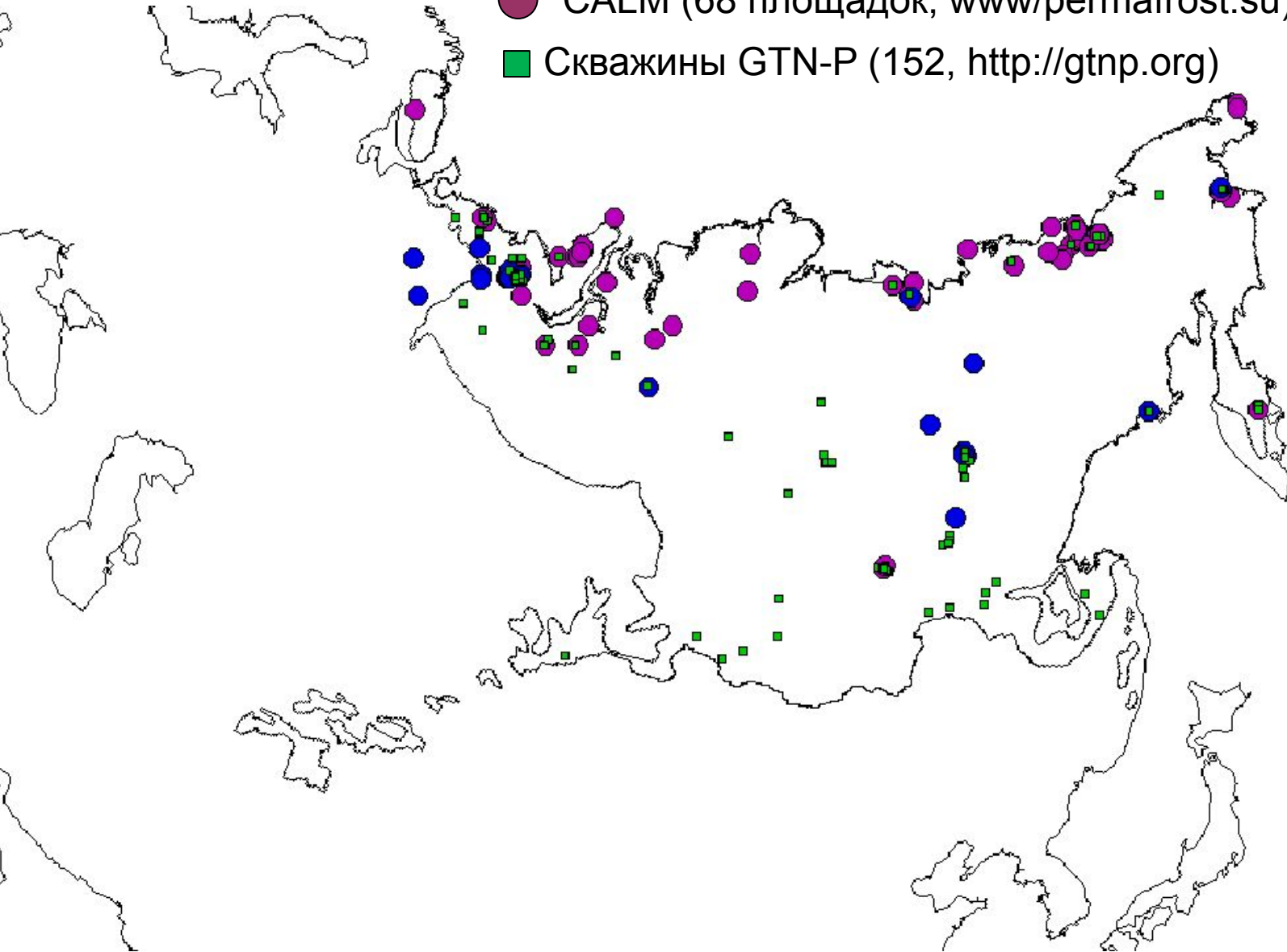
О.А. Анисимов, С.А. Лавров,  
А.Ф. Жирков, Д.А. Каверин

[oleg@oa7661.spb.edu](mailto:oleg@oa7661.spb.edu)

РФФИ, проект 18-05-60005

# Пункты мерзлотных наблюдений

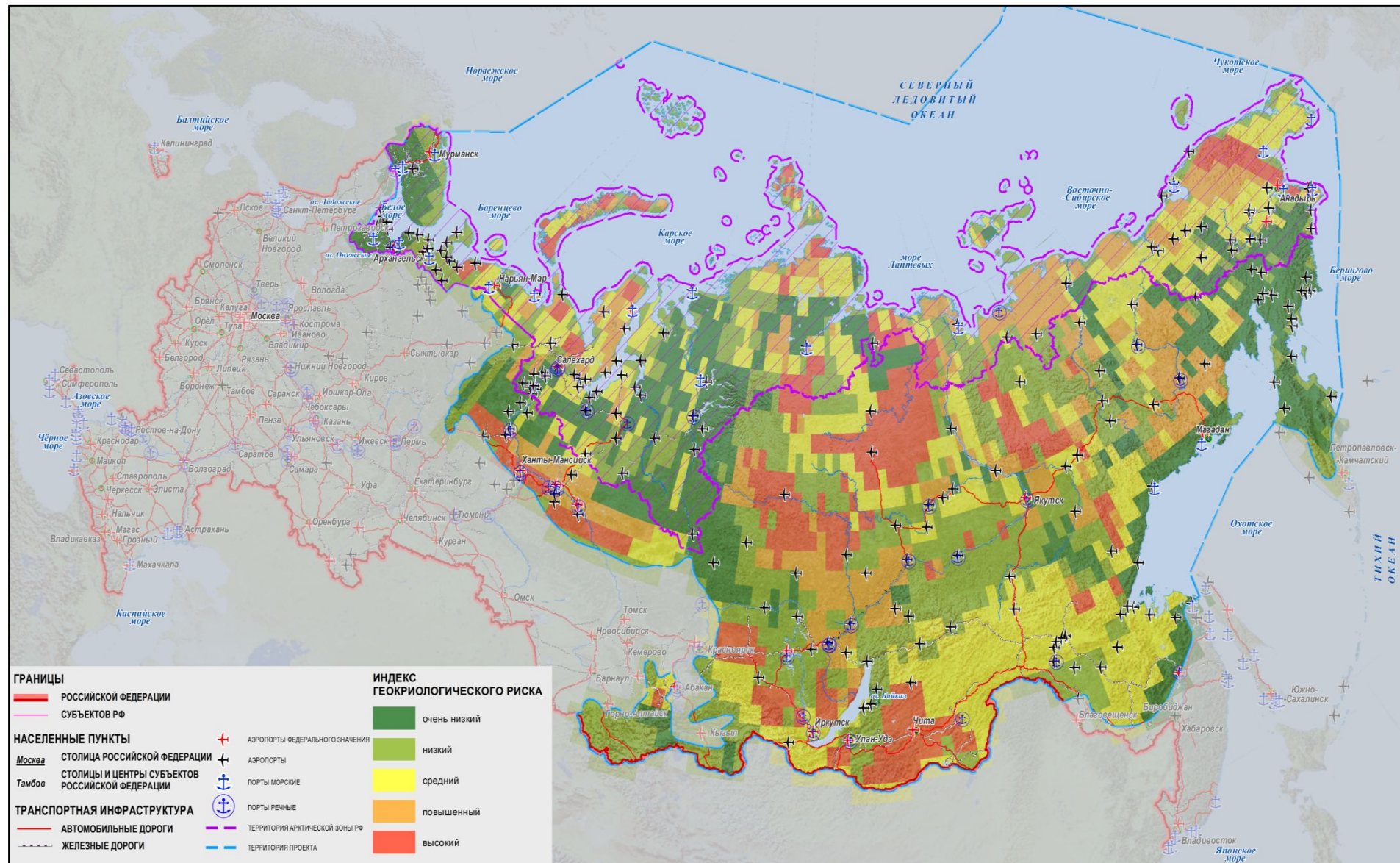
- Стационары и площадки (35 пунктов)
- CALM (68 площадок, [www/permafrost.su](http://www.permafrost.su))
- Скважины GTN-P (152, <http://gtnp.org>)



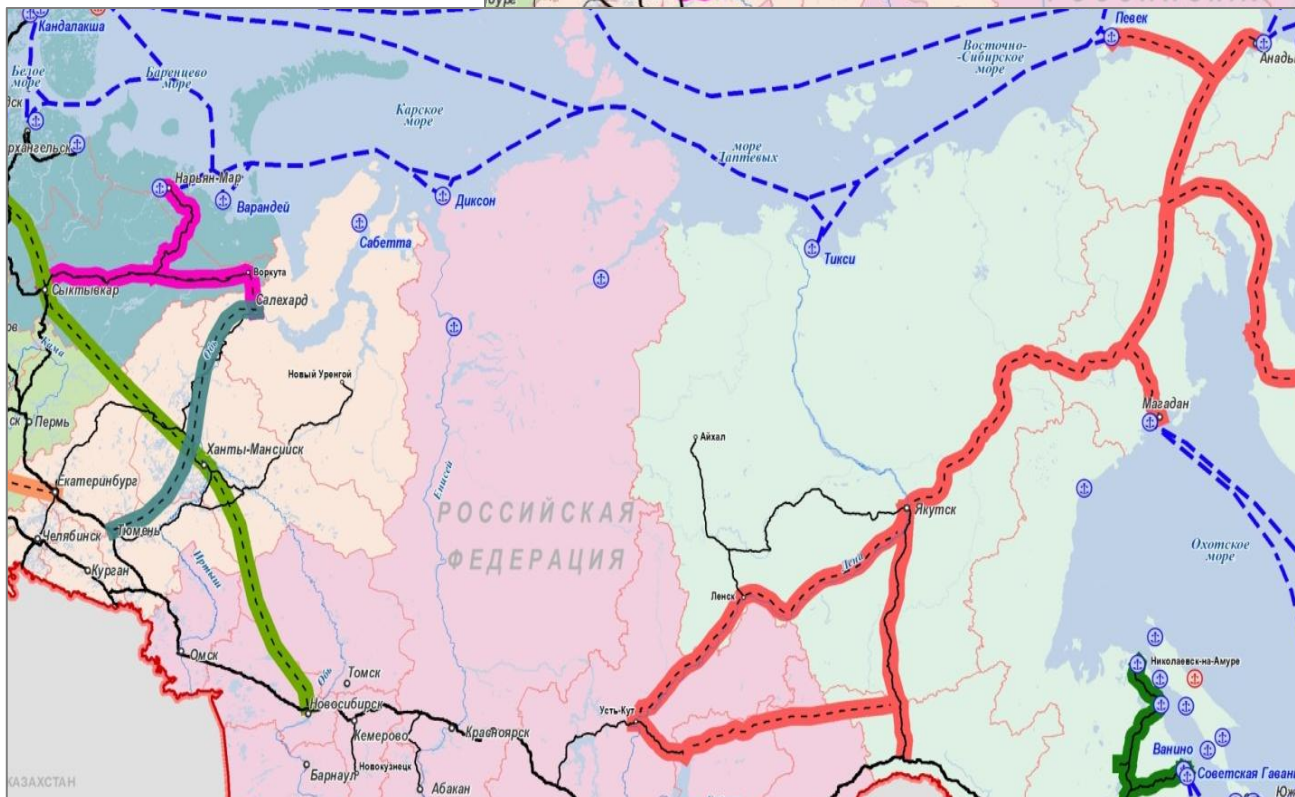
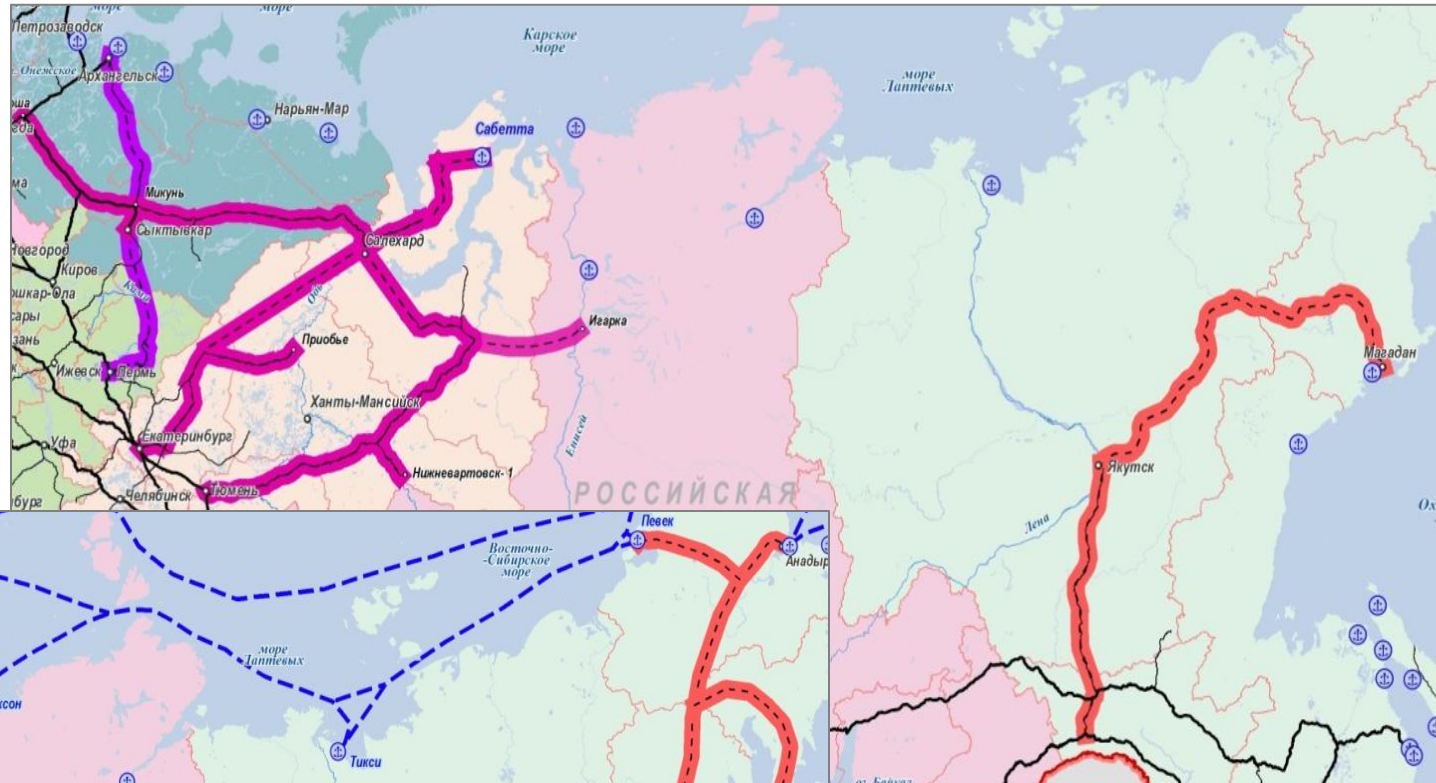
- Измерения носят негосударственный характер, не координируются одним ведомством, данные труднодоступны.
- Сеть неравномерна и нерепрезентативна, выбор многих площадок случаен.
- Лишь на 18 площадках CALM длительность измерений более 10 лет.
- Лишь две характеристики ММГ, среднегодовая температура и мощность СТС, включены в перечень существенных параметров ВМО.

Как это соотносится с нуждами актуальных задач?

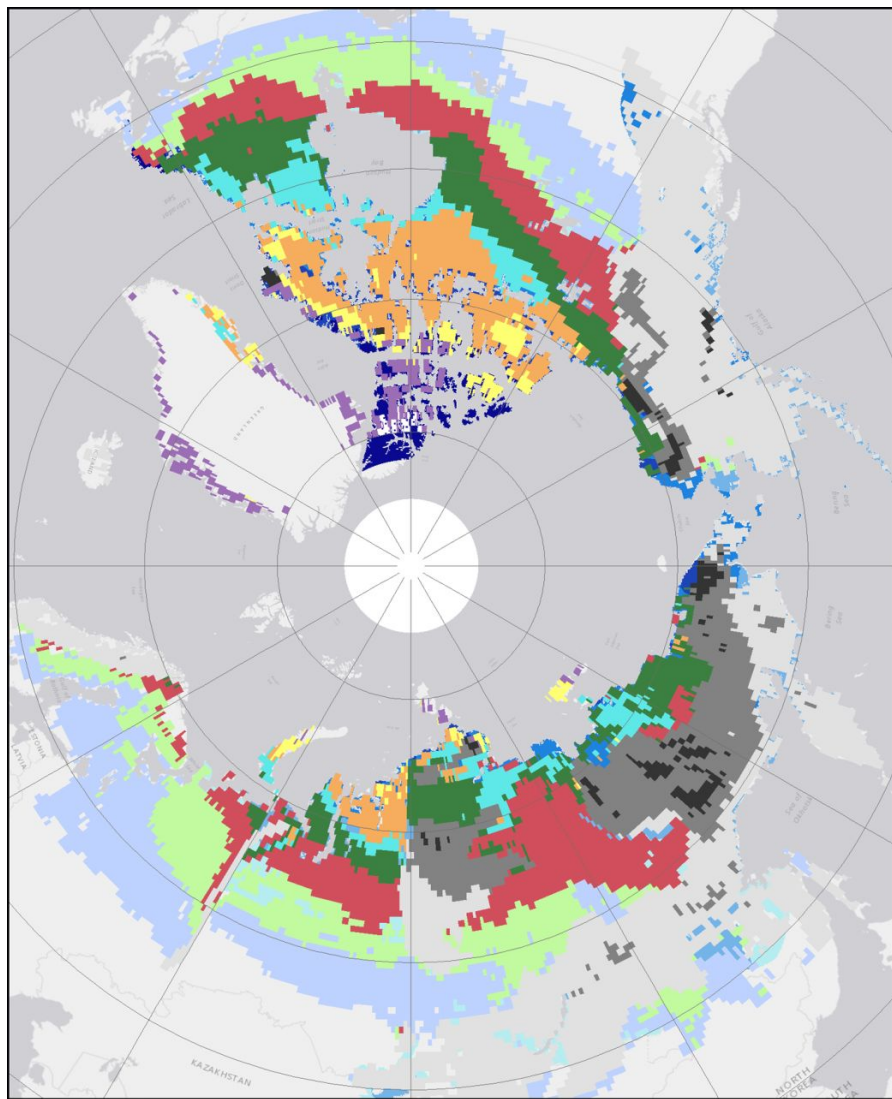
# Оценка рисков для инфраструктуры



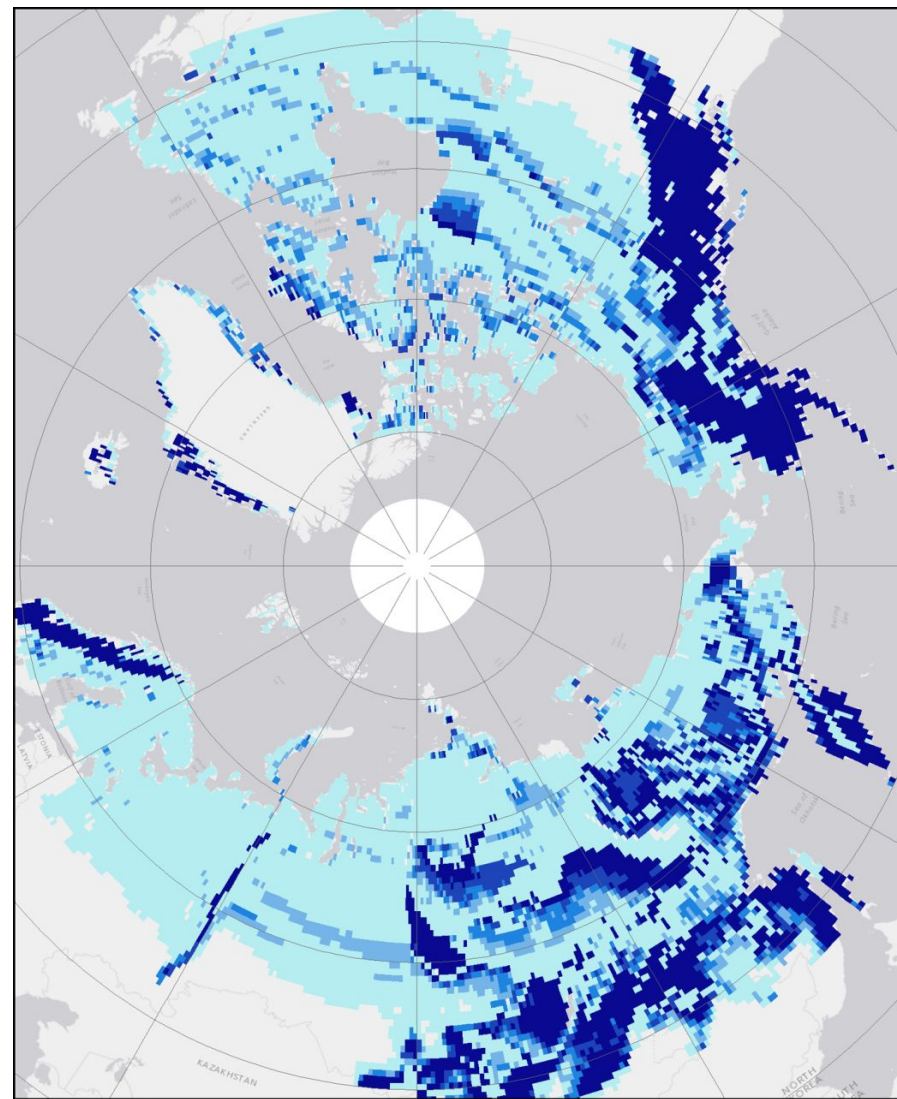
# Проектирование транспортных магистралей



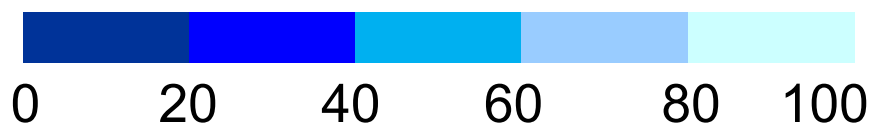
# Оценка рисков для экосистем



Ареалы биомов



Вероятность смены биома, %



# Seven facts you need to know about the Arctic methane timebomb

Dismissals of catastrophic methane danger ignore robust science in favour of outdated mythology of climate safety



Melting ice in the Arctic. Photograph: Getty

Debate over the plausibility of a catastrophic release of methane in coming decades due to thawing Arctic permafrost has escalated after new Nature paper warned that exactly this scenario could trigger cost equivalent to the annual GDP of the global economy.

## Семь фактов о метановой катастрофе

(N.Ahmed, The Guardian)

# Оценка рисков эмиссии метана



Posted by  
Nafeez Ahmed  
Monday 5 August 2013  
06.01 BST  
theguardian.com

BBC RUSSIAN.com

Home News Sport Radio TV Weather Languages

Обновлено: четверг, 11 августа 2005 г., 13:57 GMT 17:57 MCK

Отправить по почте Версия для печати

### Сибирские болота угрожают планете выбросом метана

Миллион квадратных километров замерзших болот Западной Сибири тает и угрожает планете гигантским выбросом метана - газа, способствующего глобальному потеплению. Таков вывод российско-британского исследования, результаты которого опубликованы в четверг журналом "Нью сайентист".



Ученые заметили, что на поверхности тундры стали появляться мелкие озера - вечная мерзлота тает

**МАТЕРИАЛЫ ПО ТЕМЕ:**

- ▶ "Технологичный ответ" Киотскому протоколу 28-07-05 | Технологии
- ▶ Был ли саммит Восьмерки в Шотландии успешным? 08-07-05 | Главная
- ▶ Пески Калахари могут вновь ожить 30-06-05 | Технологии
- ▶ Глобальное потепление "опаснее терроризма" 09-01-04 | Технологии

**ГЛАВНЫЕ МИРОВЫЕ НОВОСТИ**

- ▶ Россия и КНР - за дипломатию по атому Ирана
- ▶ В Минске арестованы оппозиционеры
- ▶ Глава МИД Швеции ушла из-за карикатур
- ▶ Французов призывают к забастовке

RSS | Что такое RSS?

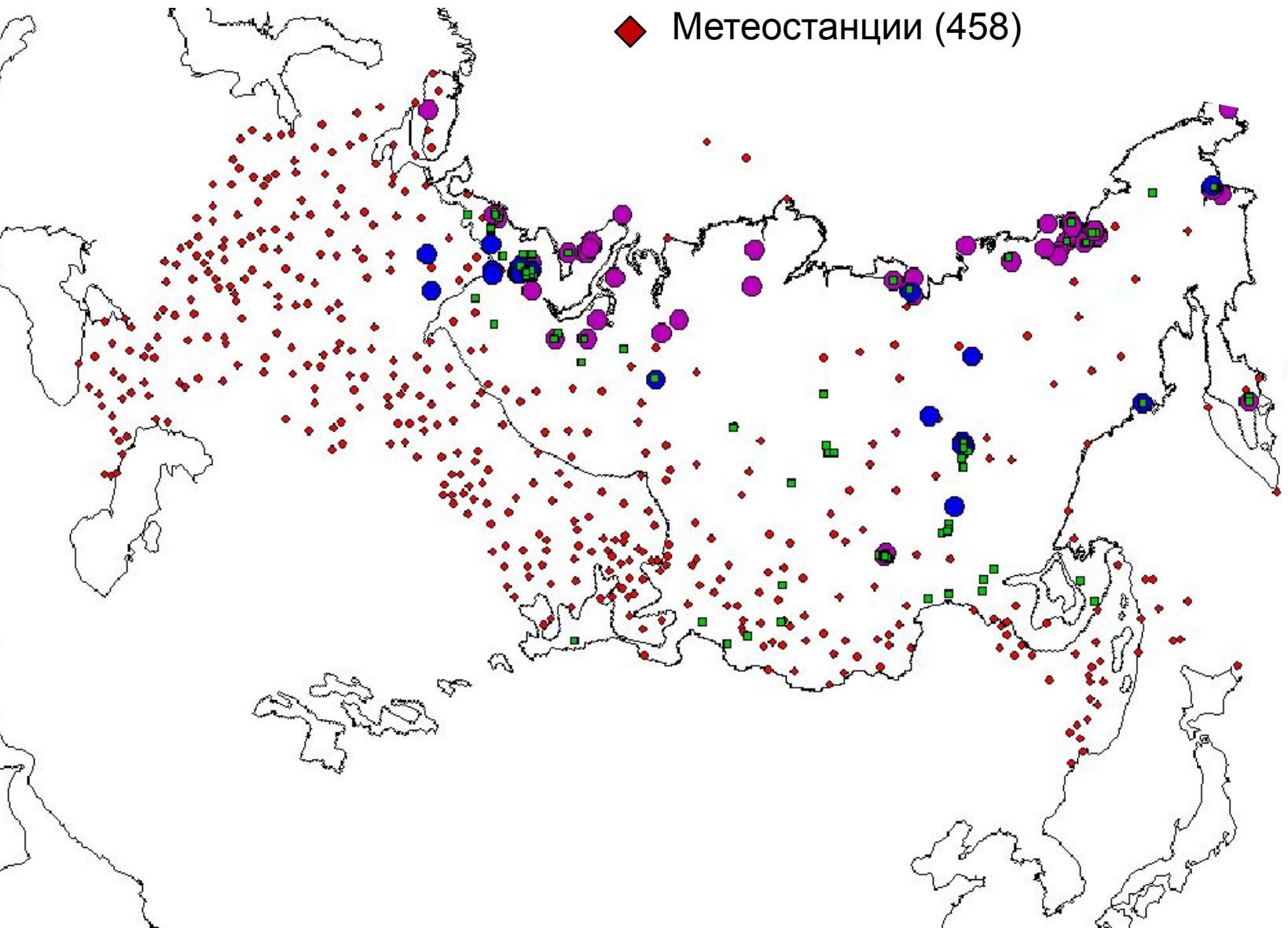
# Расположение площадок наблюдений

● Стационары и площадки (35)

● CALM (68)

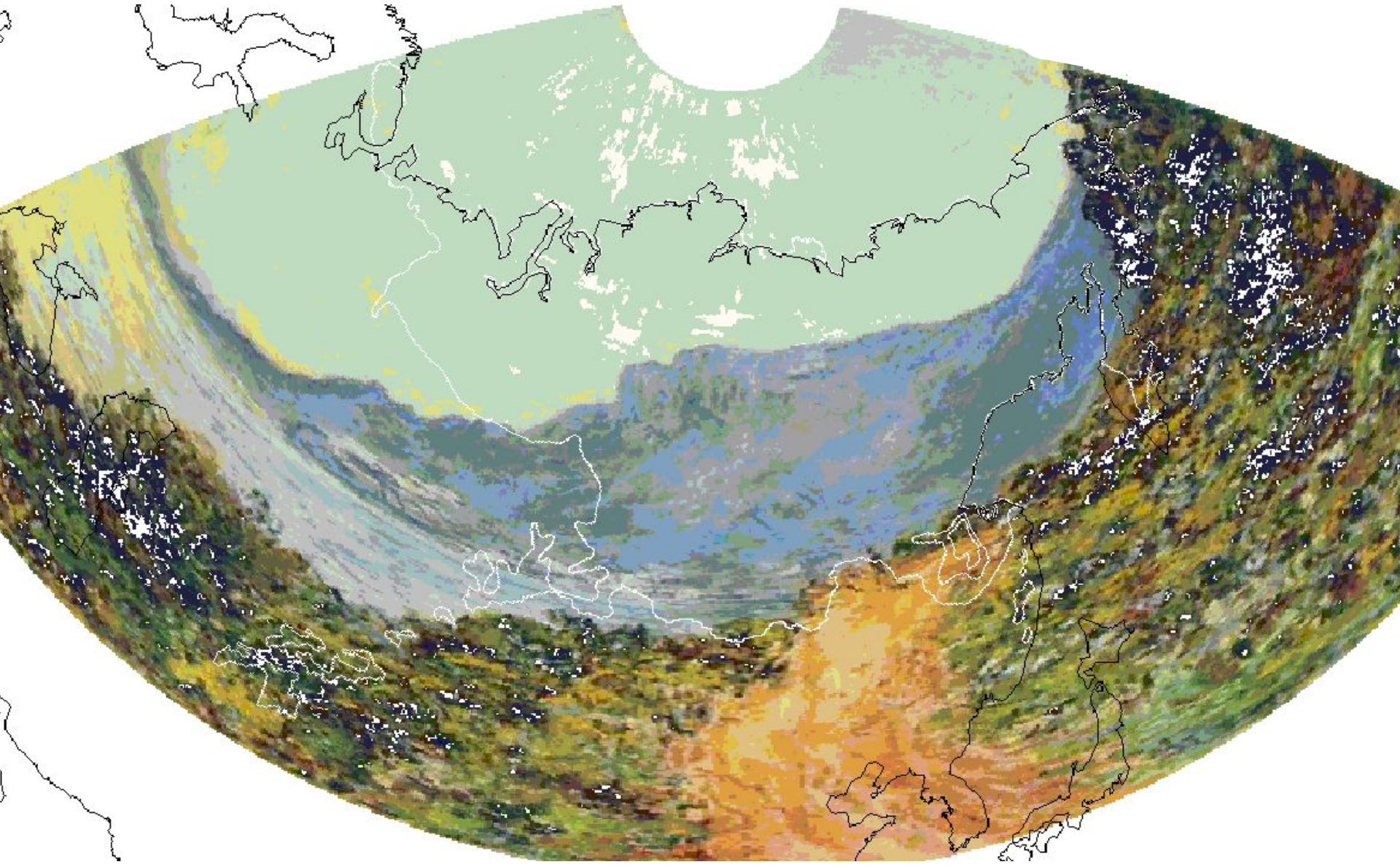
■ Скважины GTN-P (152)

◆ Метеостанции (458)

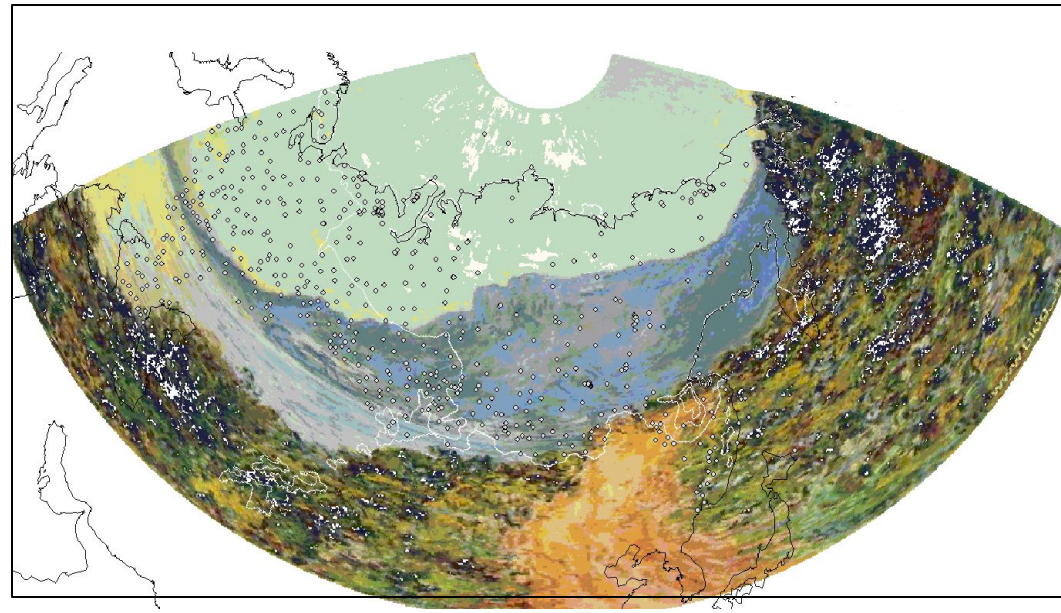
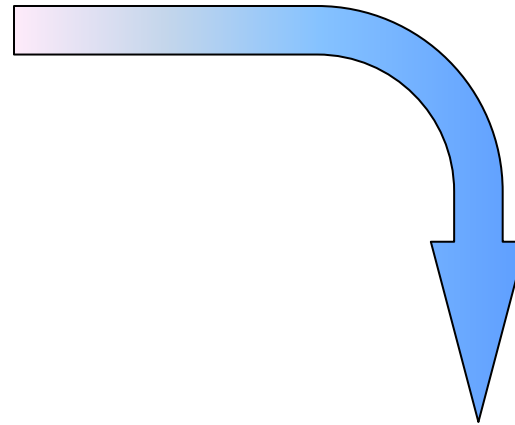
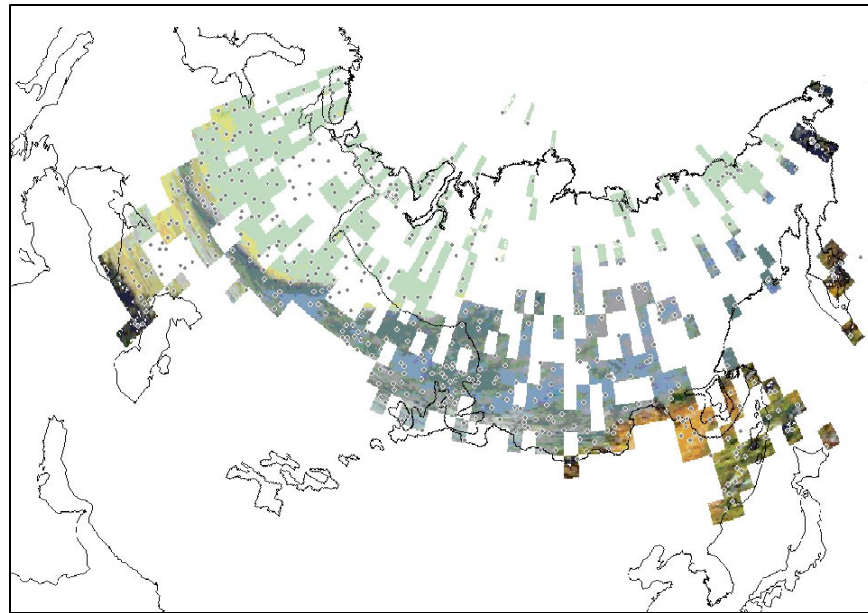




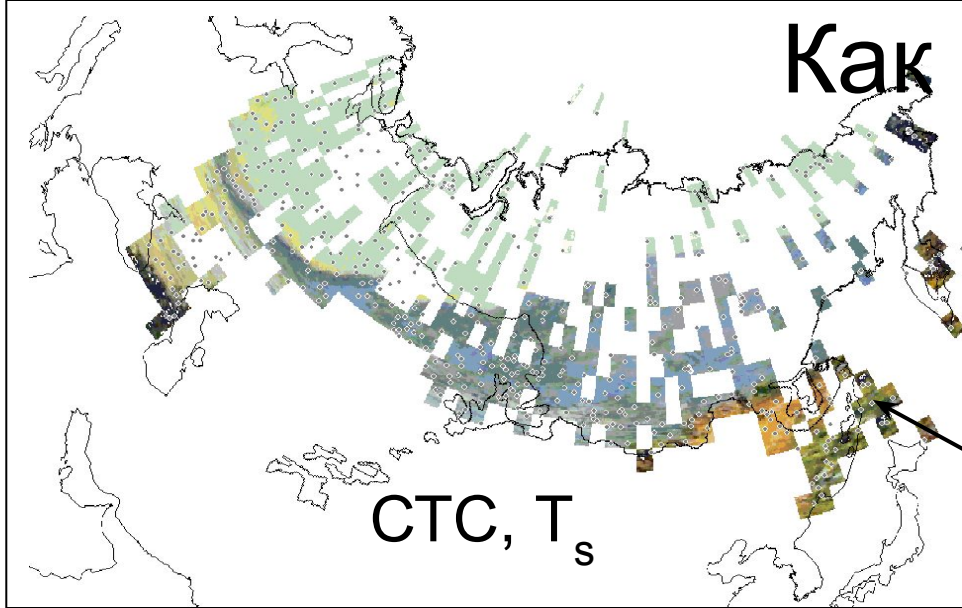
*Полная пространственная картина*  
Данные точечных наблюдений  
*Клод Моне. Пейзаж в Монако.*



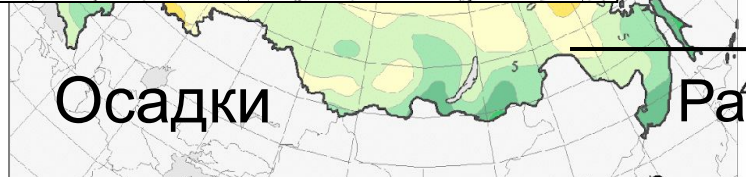
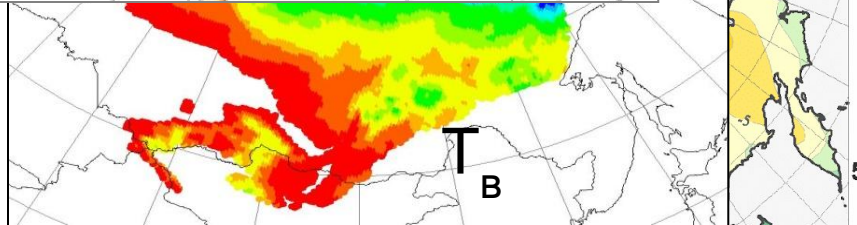
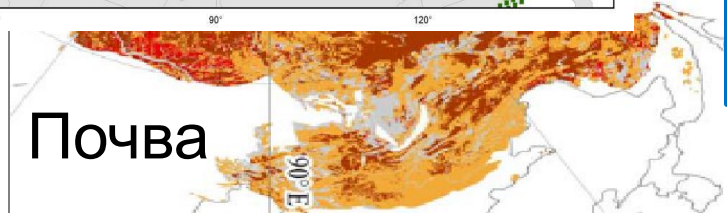
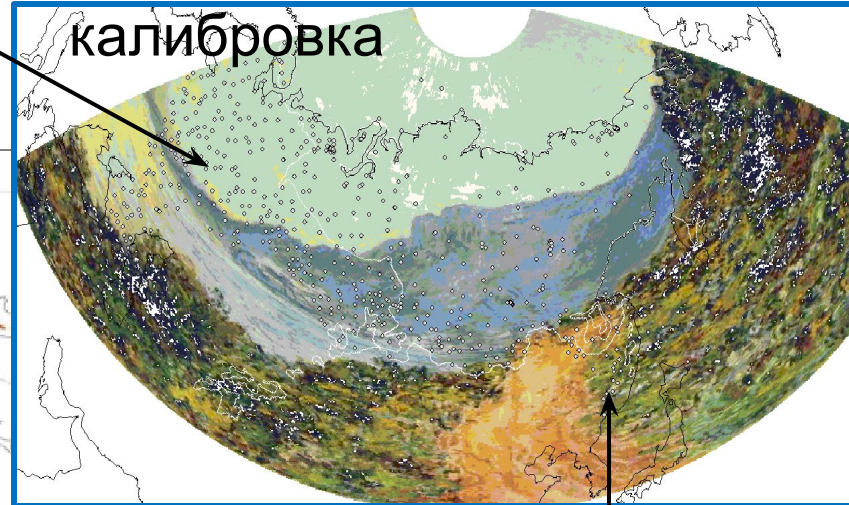
# Реанализ по точечным данным строит пространственно-временной континуум



# Как работает реанализ?



Сравнение и калибровка



Расчет СТС и  $T_s$

# Развитие моделей мерзлоты



Review  
The mathematical representation of freezing and thawing processes in variably-saturated, non-deformable soils  
Barret L. Kurylyk<sup>a\*</sup>, Kunio Watanabe<sup>b</sup>

PERMAFROST AND PERIGLACIAL PROCESSES  
*Permafrost and Periglac. Process.* **19**: 137–156 (2008)  
Published online in Wiley InterScience  
(www.interscience.wiley.com) DOI: 10.1002/ppp.615

## Recent Advances in Permafrost Modelling

*Daniel Riseborough,<sup>1\*</sup> Nikolay Shiklomanov,<sup>2</sup> Bernd Etzelmüller,<sup>3</sup> Stephan Gruber<sup>4</sup> and Sergei Marchenko<sup>5</sup>*

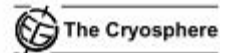
PERMAFROST AND PERIGLACIAL PROCESSES  
*Permafrost and Periglac. Process.* **24**: 286–303 (2013)  
Published online 23 August 2013 in Wiley Online Library  
(wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/ppp.1787

## Палеореконструкции мерзлоты

## New Estimates of Permafrost Evolution during the Last 21 k Years in Eurasia using Numerical Modelling

*D. C. Kitover,<sup>\*</sup> R. T. van Balen, D. M. Roche, J. Vandenbergh and H. Renssen*

The Cryosphere, 6, 613–624, 2012  
www.the-cryosphere.net/6/613/2012/  
doi:10.5194/tc-6-613-2012  
© Author(s) 2012. CC Attribution 3.0 License.



PERMAFROST AND PERIGLACIAL PROCESSES  
*Permafrost and Periglac. Process.* **24**: 268–285 (2013)  
Published online 15 August 2013 in Wiley Online Library  
(wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/ppp.1785

## Гидрология криолитозоны

## Basin Modelling of Temperature and Heat Flow Distributions and Permafrost Evolution, Urengoy and Kuyumbinskaya Areas, Siberia

*Yu. I. Galushkin,<sup>1\*</sup> K. A. Sitar<sup>2</sup> and S. V. Frolov<sup>2</sup>*

## Модели высокого разрешения

## Numerical modeling of permafrost dynamics in Alaska using a high spatial resolution dataset

*E. E. Jafarz<sup>1</sup>, S. S. Marchenko<sup>1</sup>, and V. E. Romanovsky<sup>1,2</sup>*

## Мерзлота в моделях земной системы Diagnosing Present and Future Permafrost from Climate Models

ANDREW G. SLATER

*National Snow and Ice Data Center, Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences,  
University of Colorado Boulder, Boulder, Colorado*

DAVID M. LAWRENCE

*National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado*

## Субаквальная мерзлота

## Modeling sub-sea permafrost in the East Siberian Arctic Shelf: The Laptev Sea region

*D. J. Nicolsky,<sup>1</sup> V. E. Romanovsky,<sup>1,2</sup> N. N. Romanovskii,<sup>3</sup> A. L. Kholodov,<sup>1</sup>  
N. E. Shakhova,<sup>4</sup> and I. P. Semiletov<sup>4</sup>*

## Numerical model of the geothermal regime on the Beaufort Shelf, arctic Canada since the Last Interglacial

*Alan E. Taylor,<sup>1</sup> S. R. Dallimore,<sup>2</sup> P. R. Hill,<sup>2</sup> D. R. Issler,<sup>3</sup> S. Blasco,<sup>4</sup> and F. Wright<sup>2</sup>*

## Эмиссия метана

GEOPHYSICS

## Predicted Methane Emission on the East Siberian Shelf

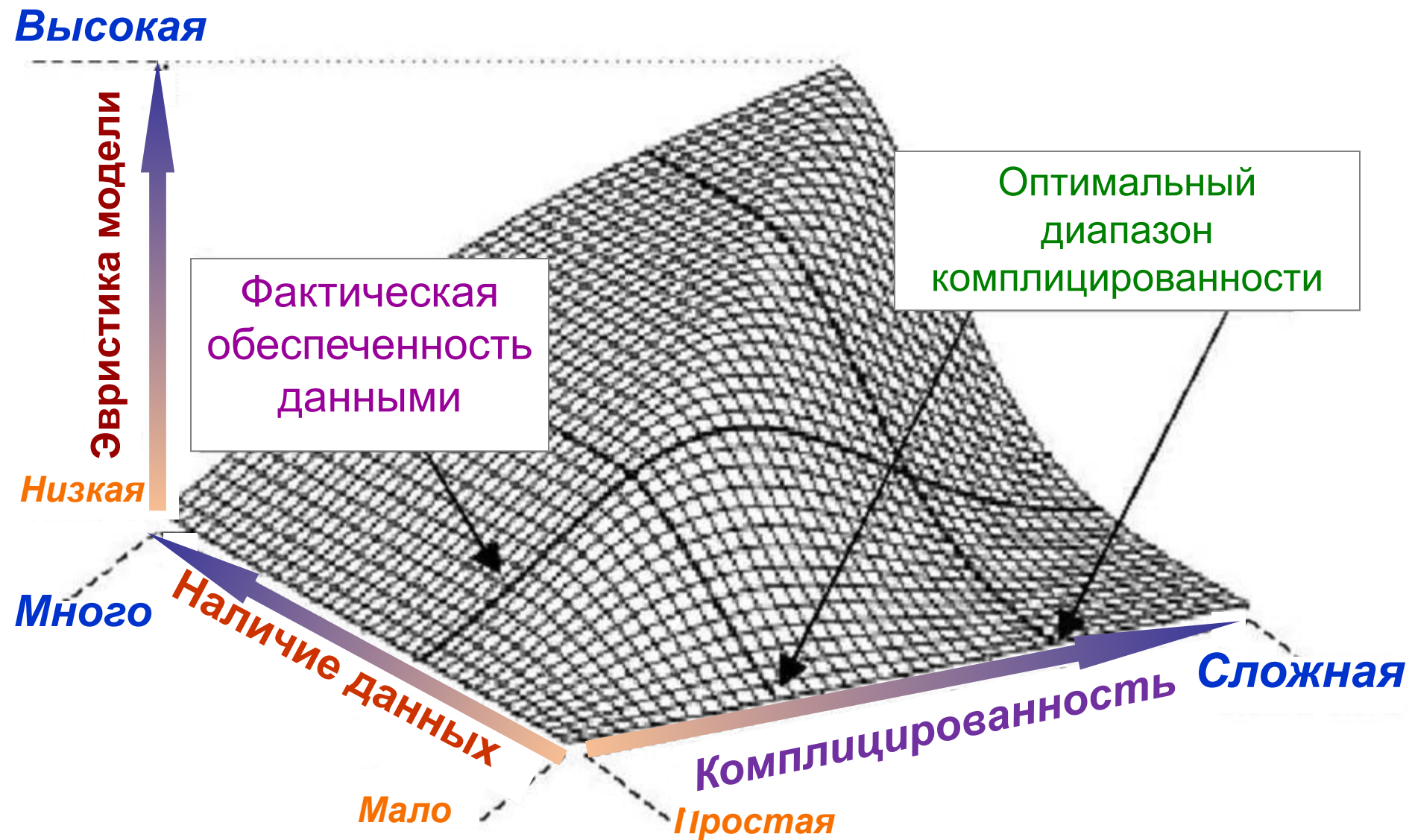
*N. E. Shakhova<sup>a, b</sup>, V. A. Alekseev<sup>b</sup>, and I. P. Semiletov<sup>a, b</sup>*

JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 116, C10027, doi:10.1029/2011JC007218, 2011

## Recent changes in shelf hydrography in the Siberian Arctic: Potential for subsea permafrost instability

*Igor A. Dmitrenko,<sup>1</sup> Sergey A. Kirillov,<sup>2</sup> L. Bruno Tremblay,<sup>3</sup> Heidemarie Kassens,<sup>1</sup>  
Oleg A. Anisimov,<sup>4</sup> Sergey A. Lavrov,<sup>4</sup> Sergey O. Razumov,<sup>5</sup> and Mikhail N. Grigoriev<sup>5</sup>*

# Комплицированность модели



“Данные без модели - хаос, модель без наблюдений - фантазия.”

# Динамическая модель ММГ

Учет кондуктивного теплопереноса, фазовых переходов и засоленности

$$c_a \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho_w L \frac{\partial W}{\partial t} \mathcal{G} - \rho_w L \frac{\partial W_u}{\partial S} \frac{\partial S}{\partial t} \mathcal{G}$$

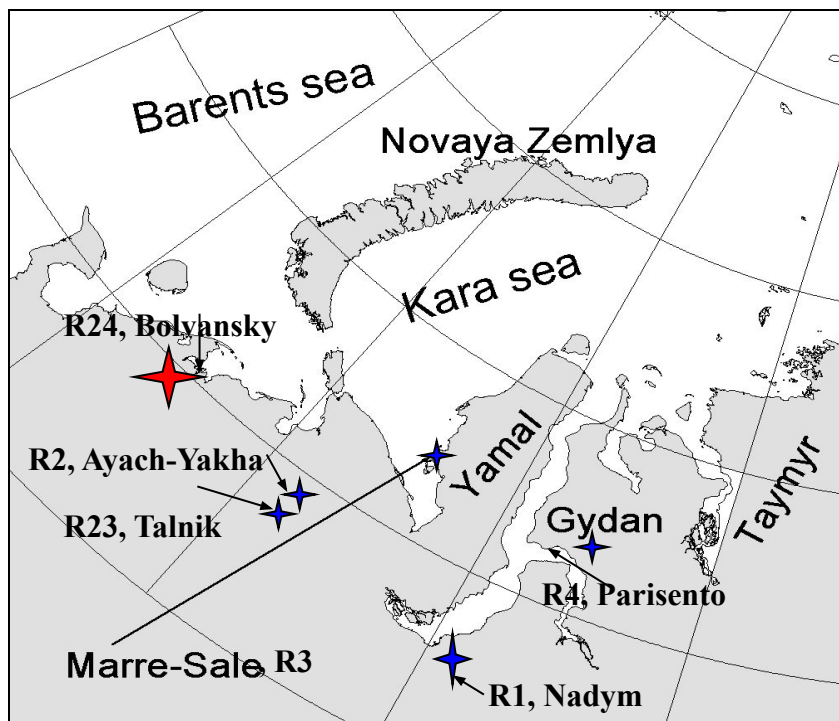
Уравнение диффузии соли

$$\frac{\partial (W_u S)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D_s \frac{\partial S}{\partial z} \right)$$

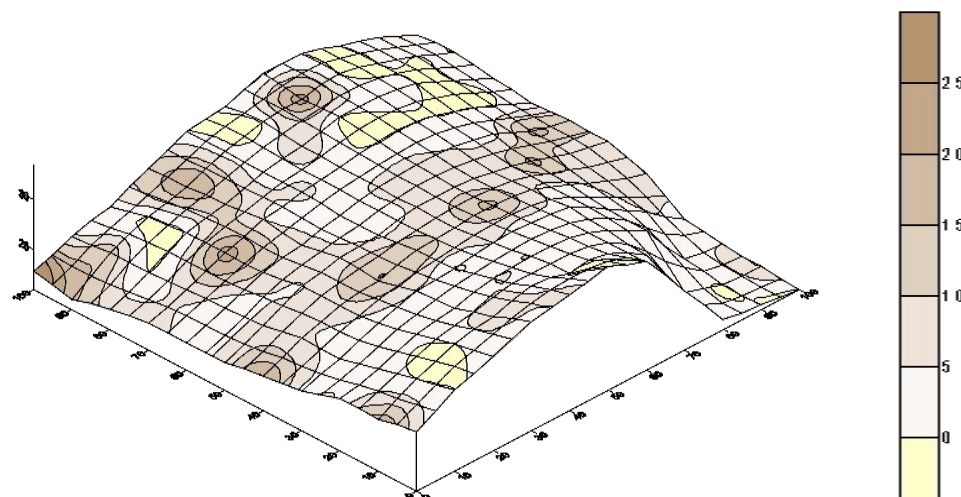
Расчет эффективной теплоемкости

$$c_a = c + \rho_w L \frac{\partial W_u(T)}{\partial T} \mathcal{G} \quad \mathcal{G} = \begin{cases} 0; & \text{если } T \geq 0 \\ 0; & \text{если } T < 0 \text{ и } W \leq W_u(T) \\ 1; & \text{если } T < 0 \text{ и } W > W_u(T) \end{cases}$$

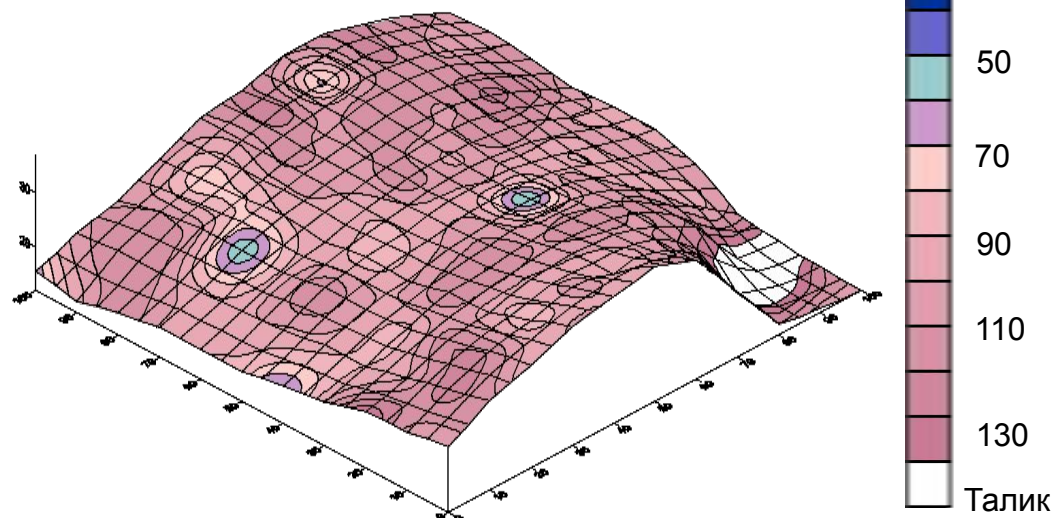
# Влияние топографии и органического слоя на СТС



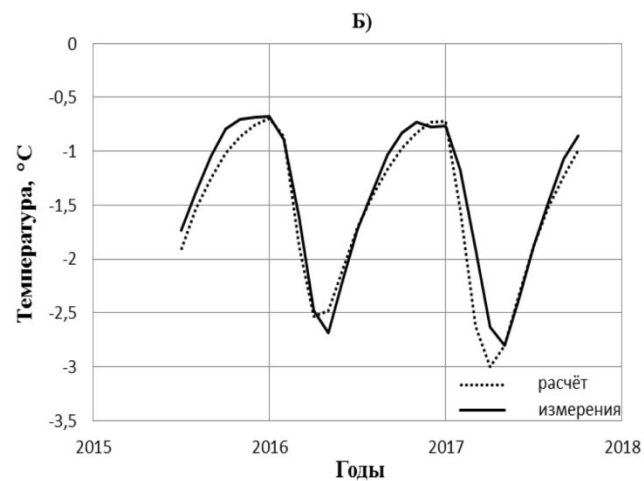
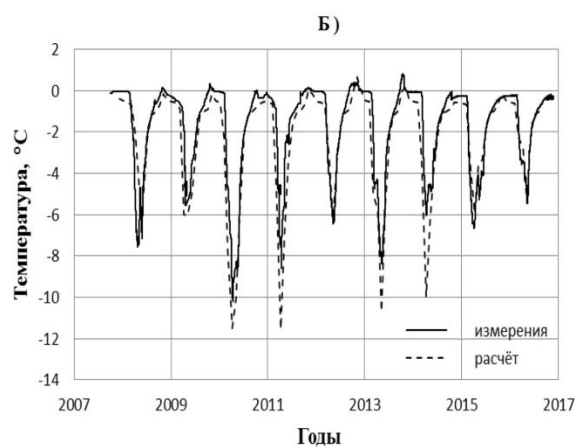
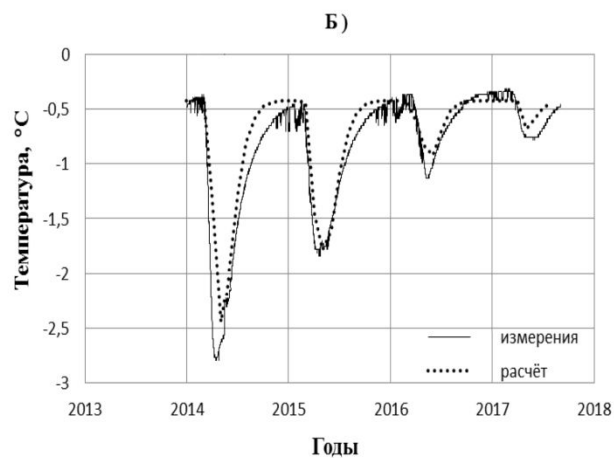
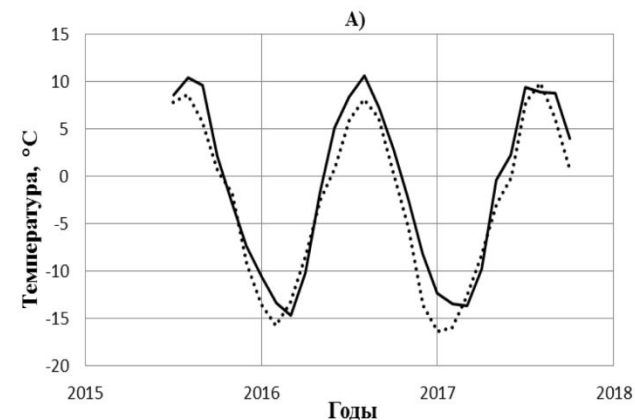
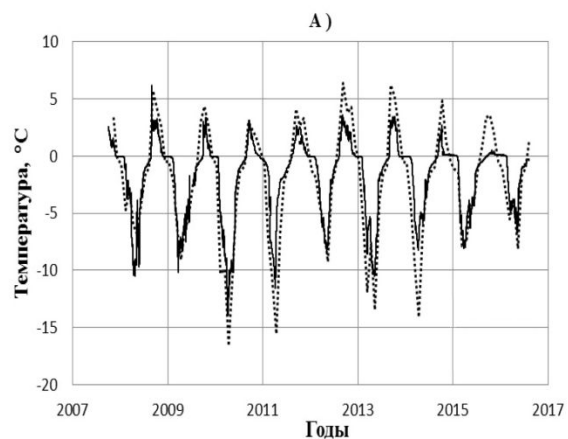
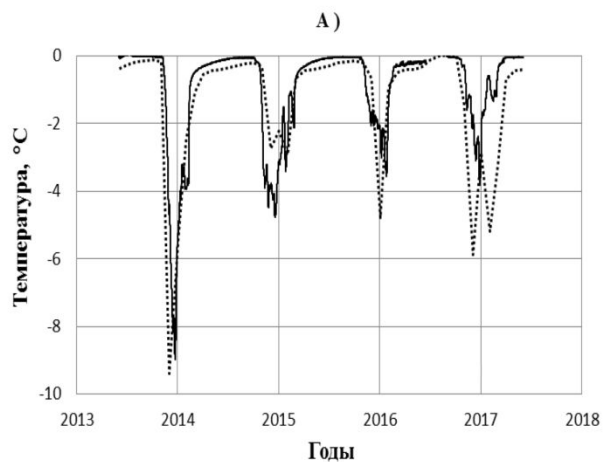
## Толщина органического слоя



## Мощность СТС



# Изменения температуры на глубинах 0.5 м (А) и 3 м (Б) по данным наблюдений на стационарах и расчетам.



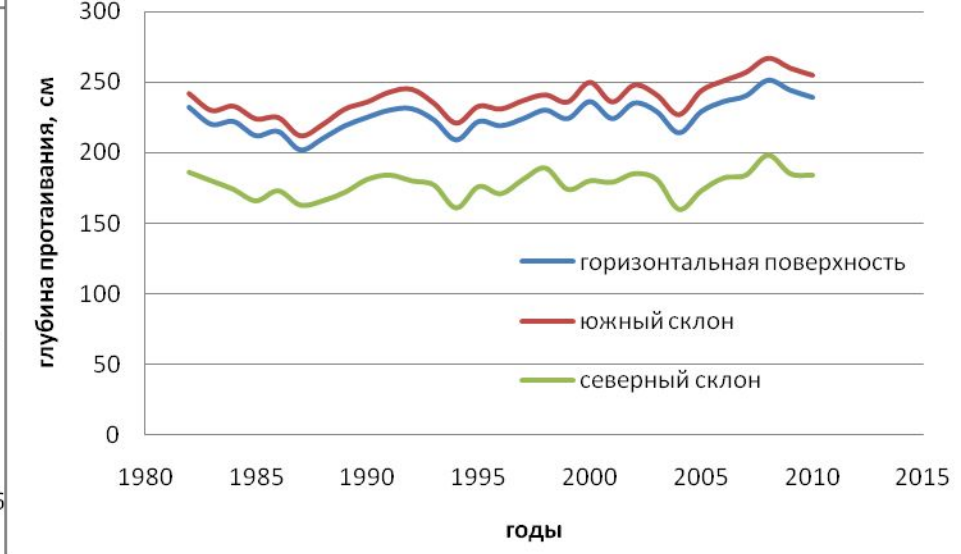
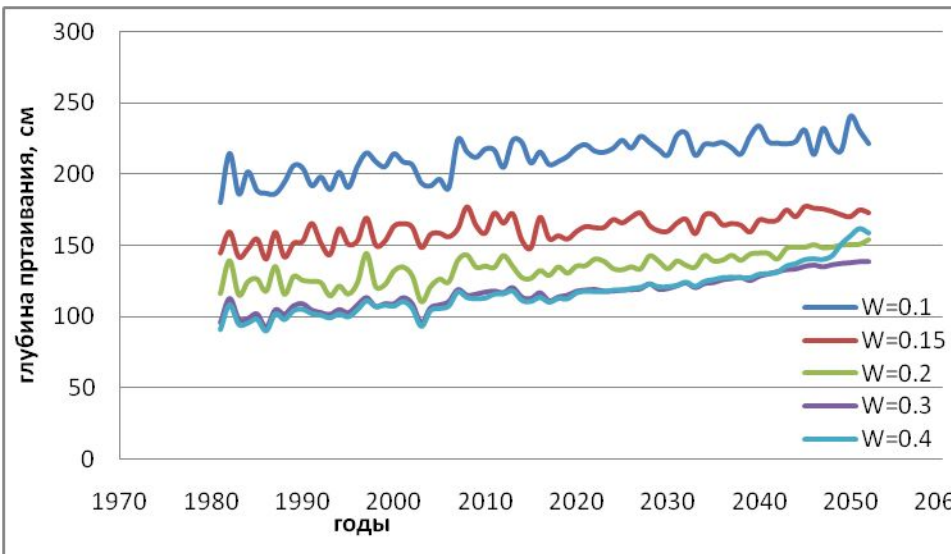
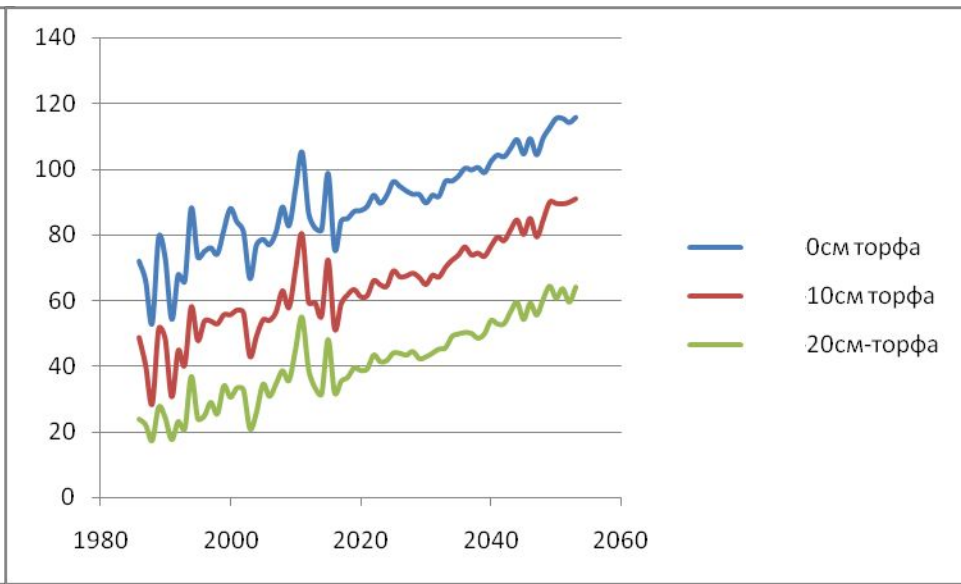
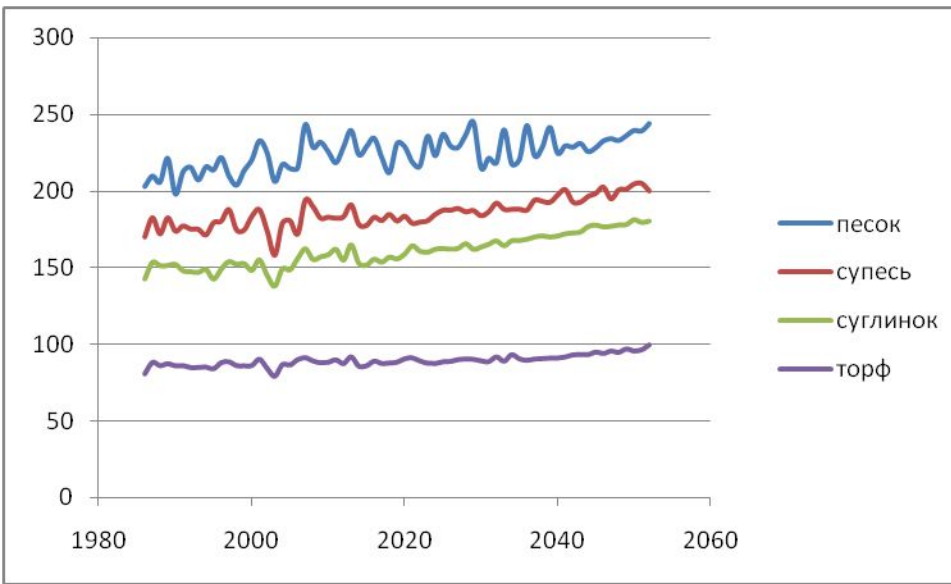
Инта 1 бугор

Петрунь (K58)

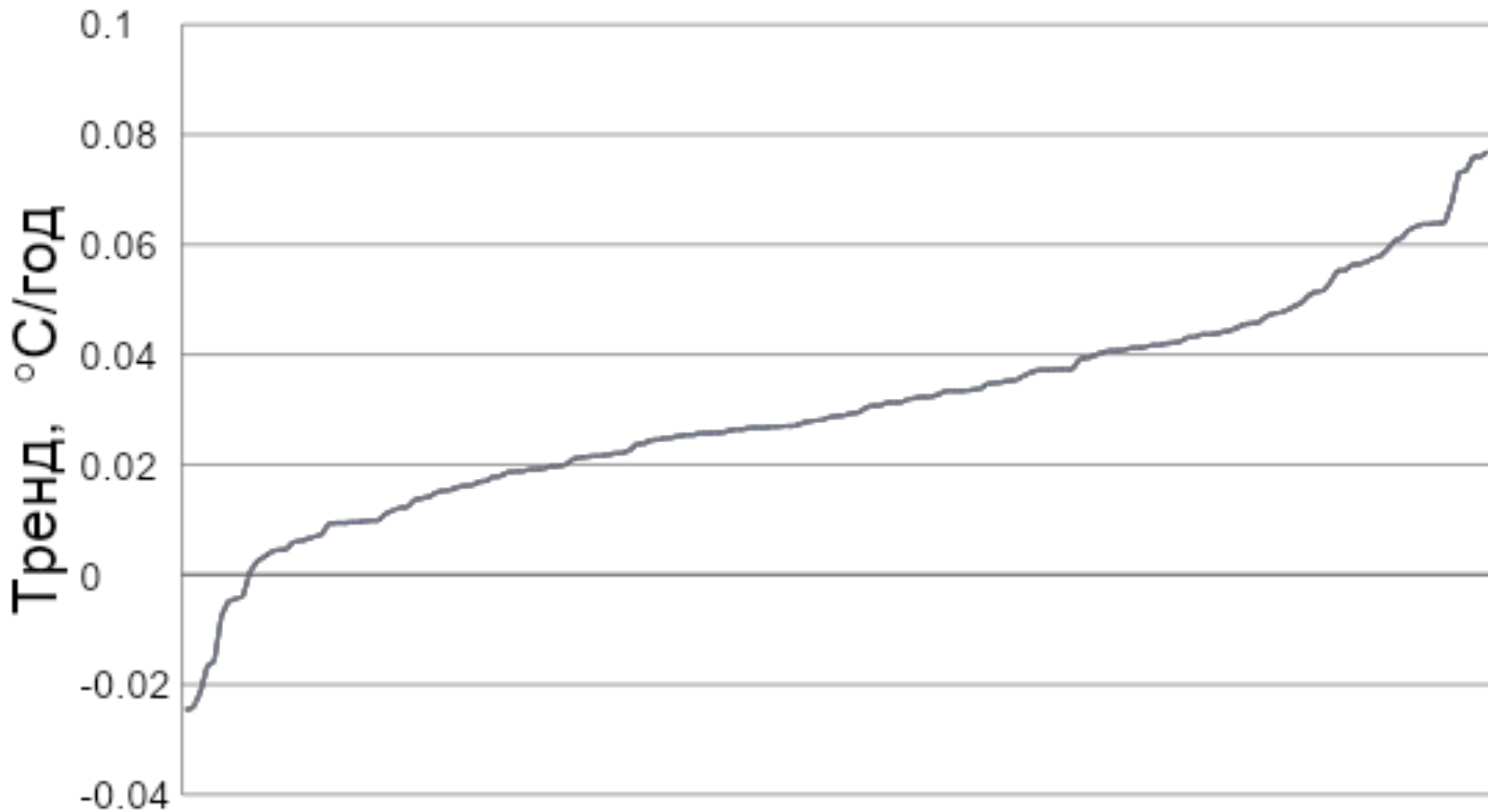
Якутск



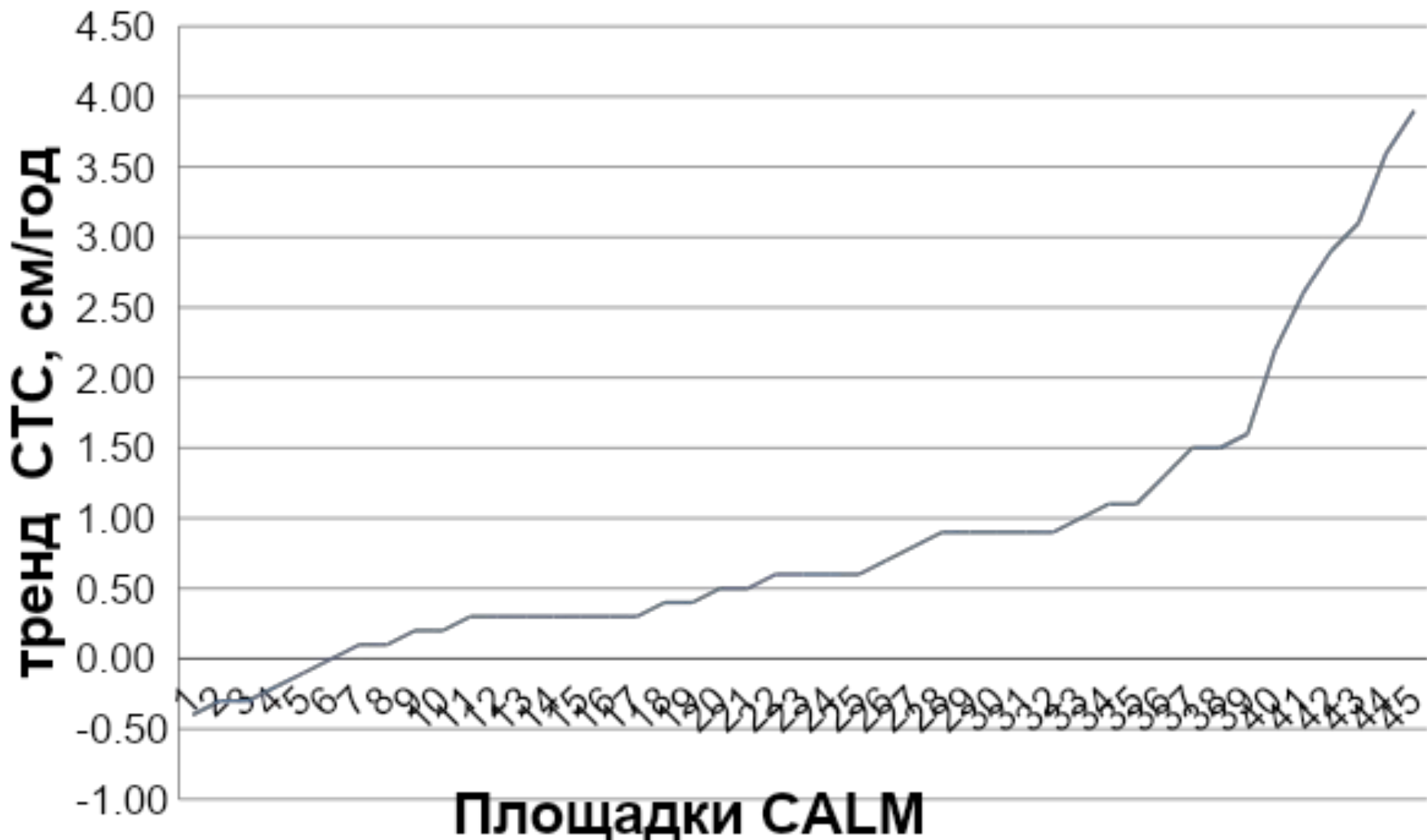
# Чувствительность расчета к влияющим параметрам



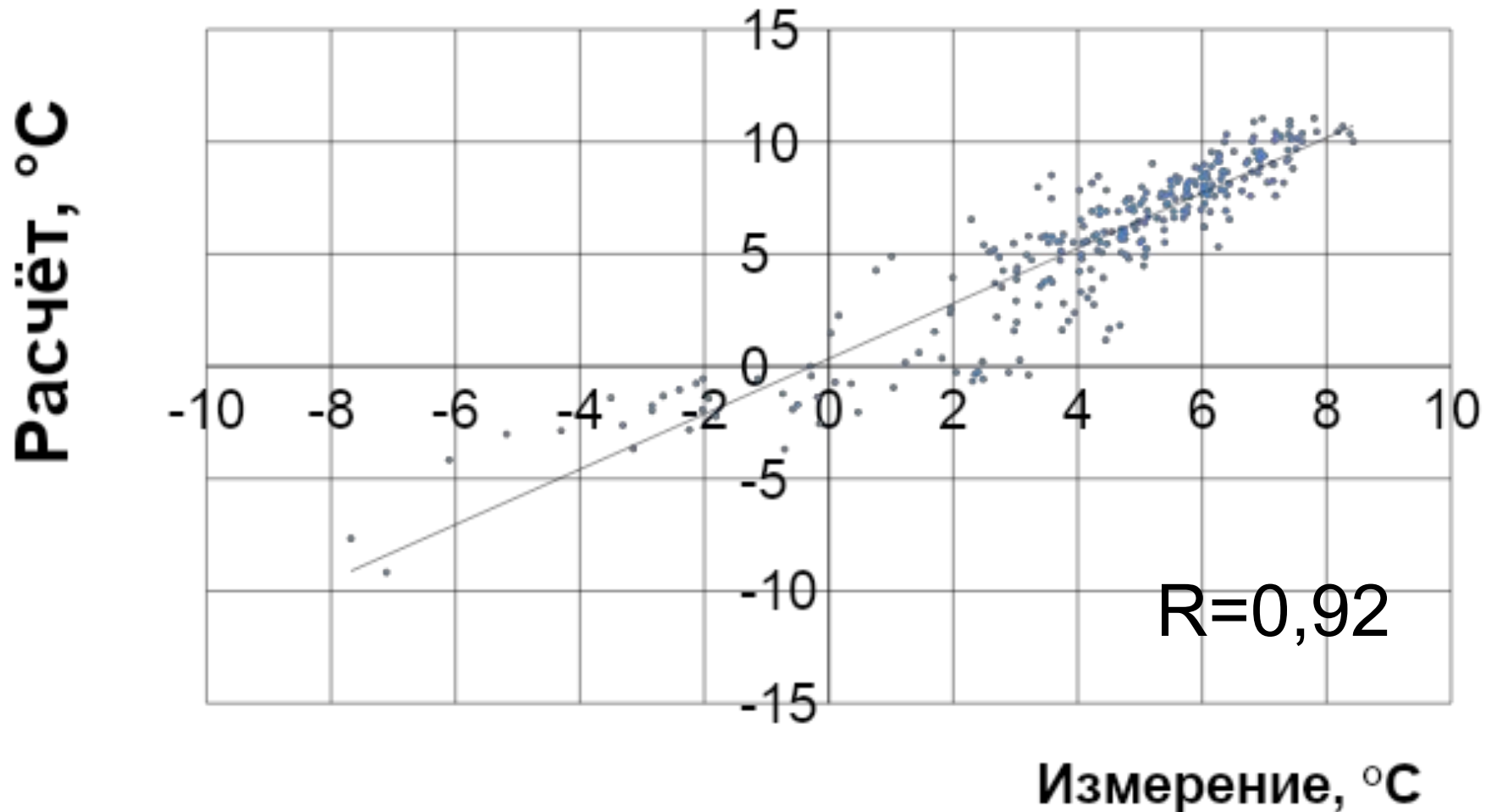
# Ранжированные по возрастанию тренды температуры на глубине 3.2 м за период 1980–2018 гг. по данным метеостанций



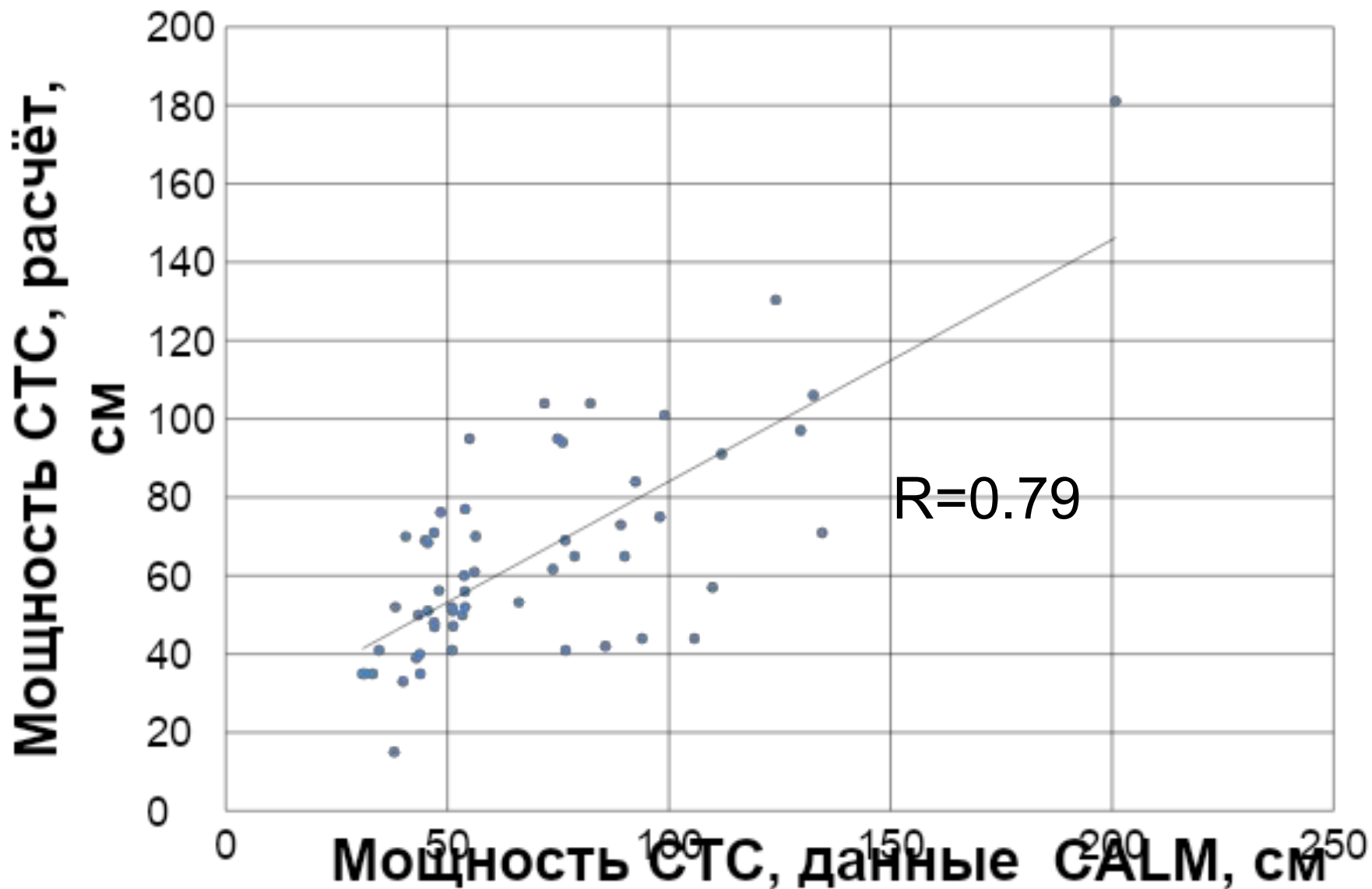
# Ранжированный по возрастанию тренд СТС на 45 площадках CALM, 2004-2018 гг.



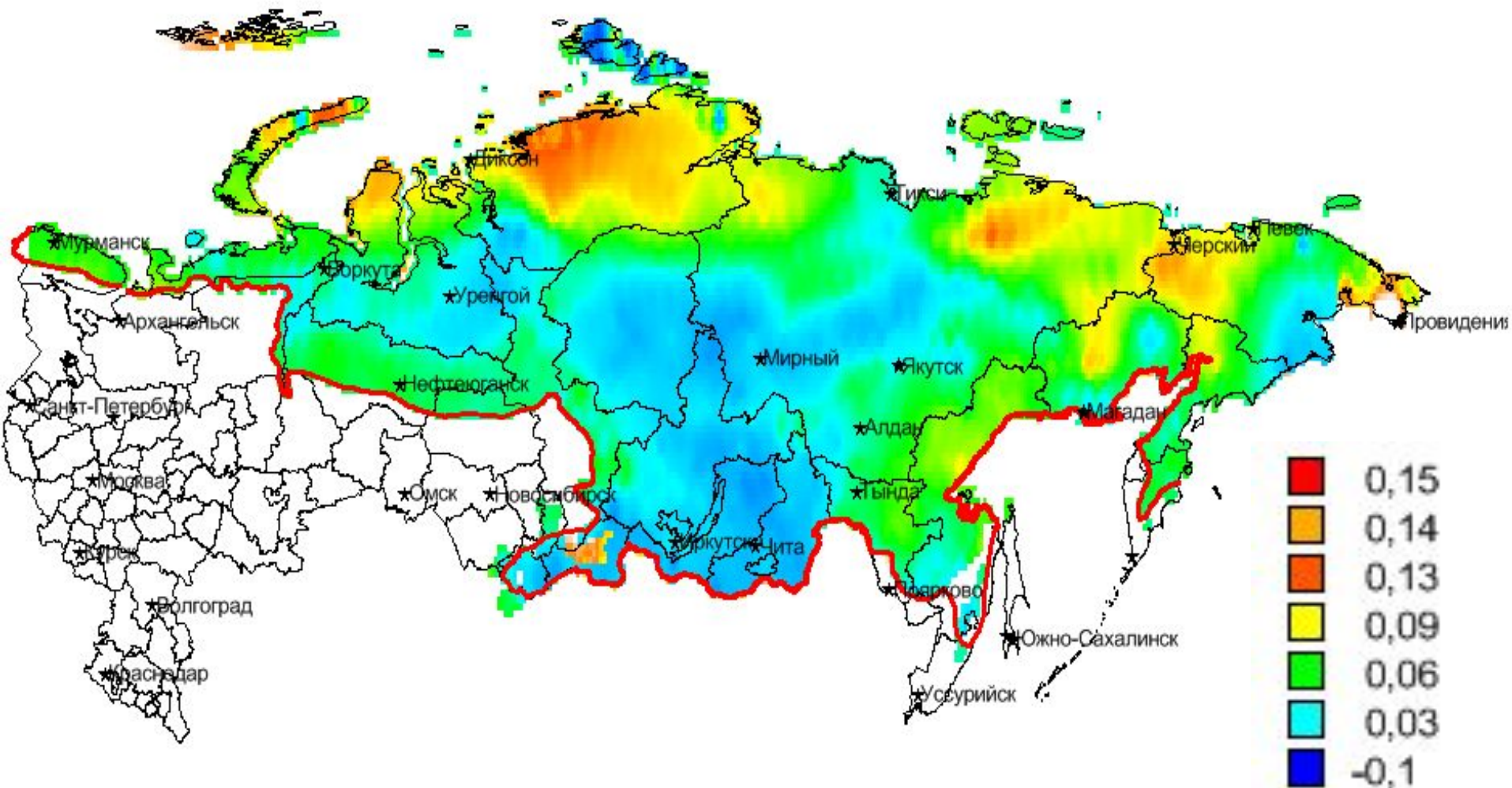
# Сравнение измеренных и расчетных среднегодовых температур грунта на глубине 3,2 м



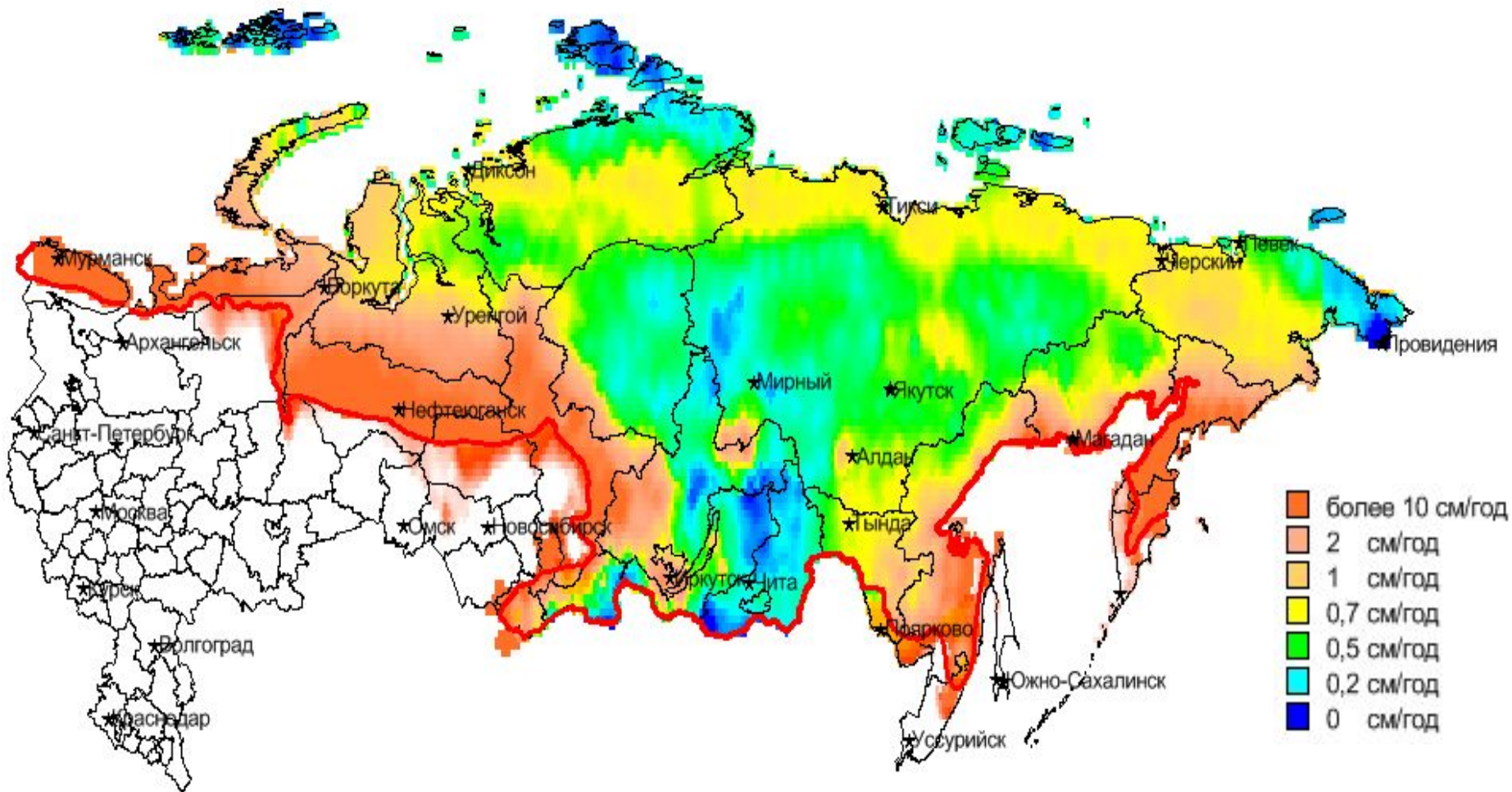
# Сравнение расчетов и наблюдений СТС на площадках CALM



# Тренд температуры почвы на глубине 3.2 м за период 1990-2018. Расчет для супесчаной почвы.

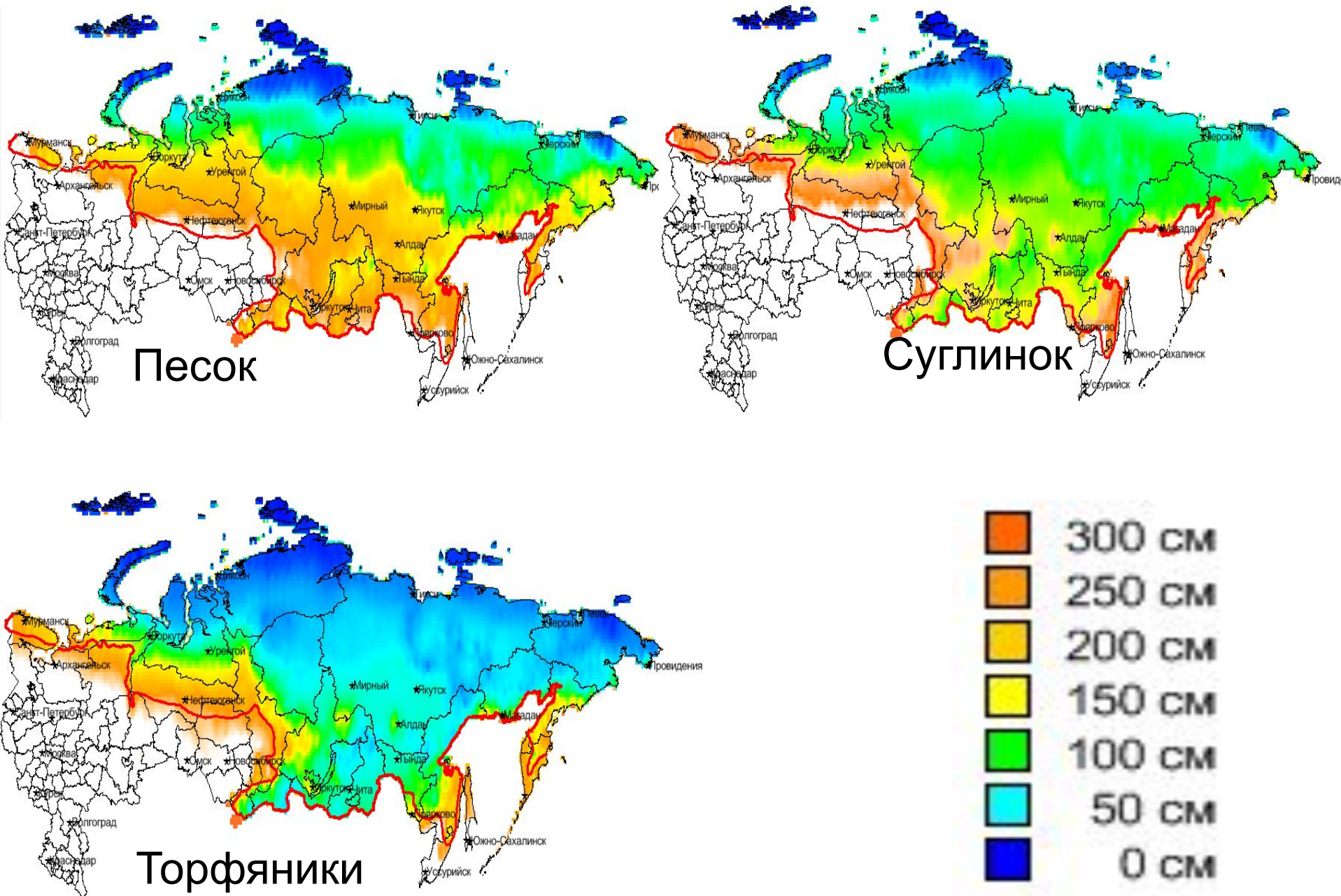


# Тренд СТС, расчет для суглинка по данным 1990-2018 гг.



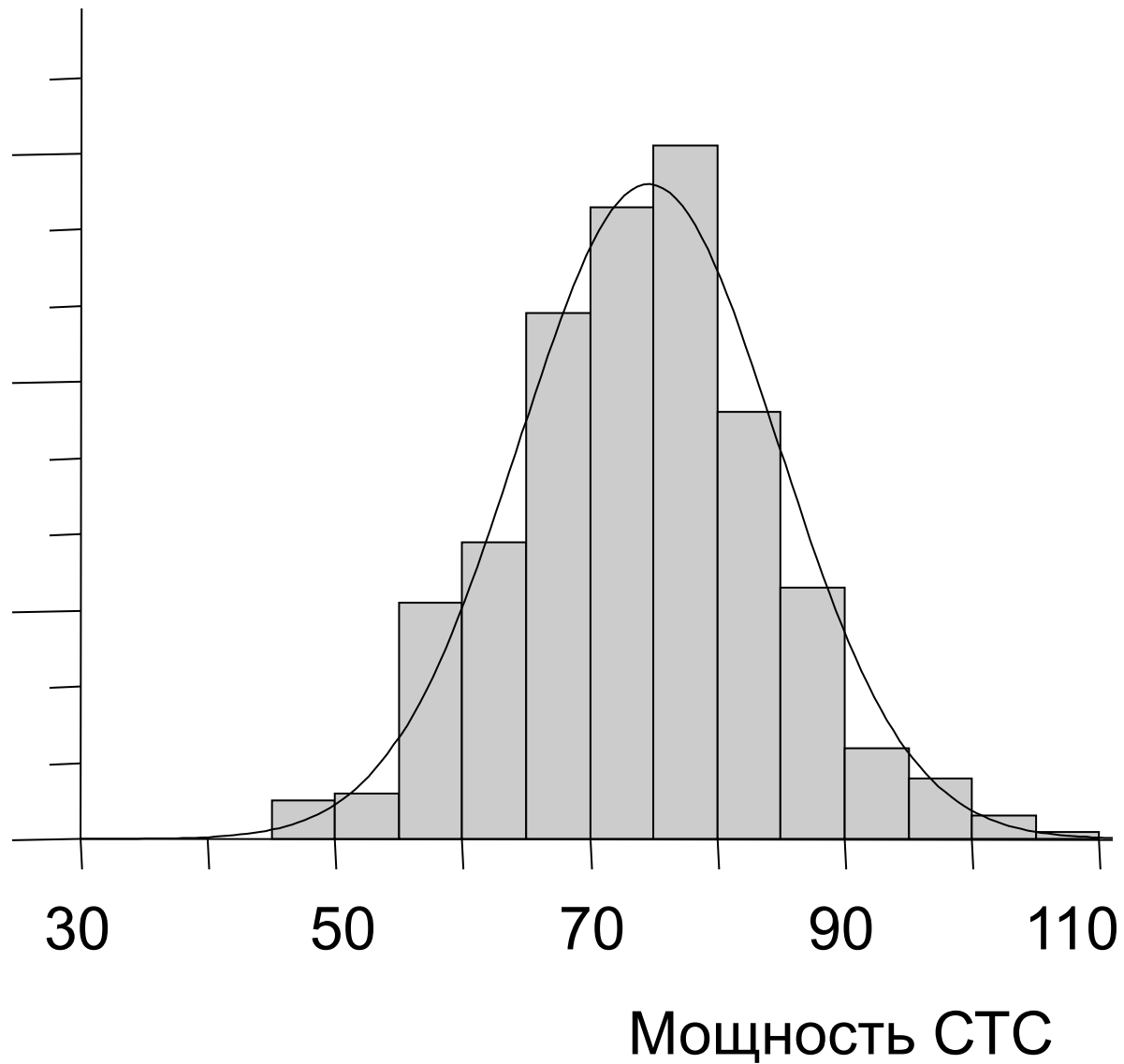
Средняя величина тренда СТС по данным CALM 0.87см/год,  
по данным реанализа 1.1см/год

# Расчетная мощность СТС на начало 1990-х гг.





# Учет мелкомасштабной изменчивости



# Ансамблевый расчет

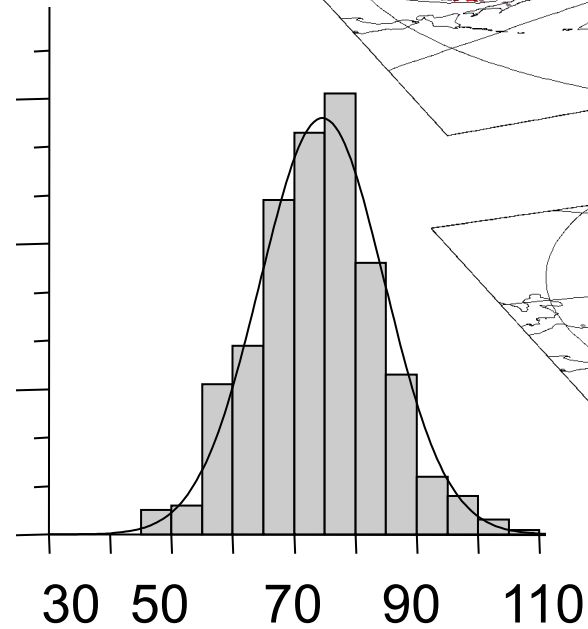
Мощность СТС

< 0.5 м

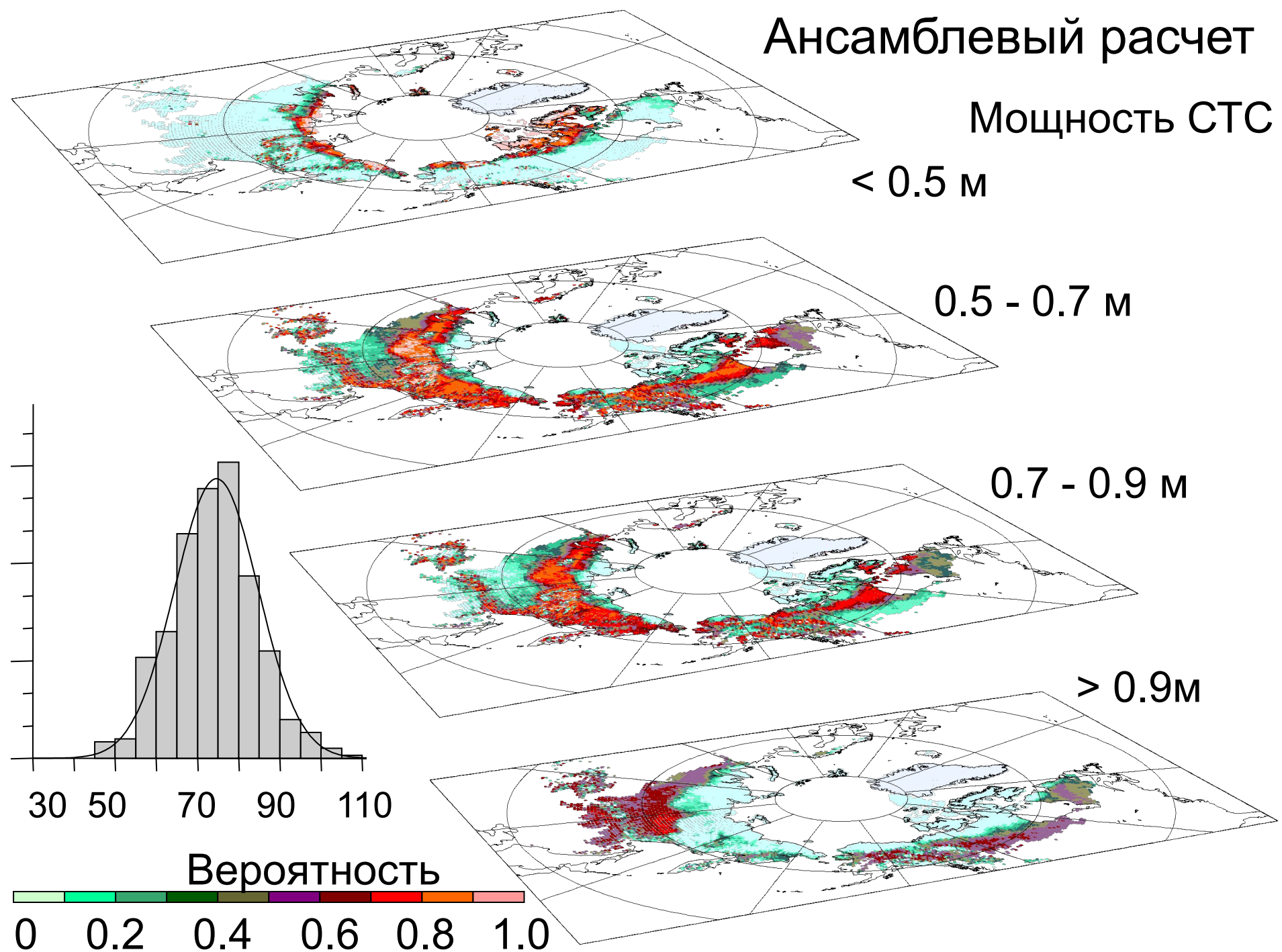
0.5 - 0.7 м

0.7 - 0.9 м

> 0.9 м



Вероятность



# Выводы

- При существующей системе мерзлотных наблюдений реанализ является безальтернативным методом обеспечения данными большинства актуальных задач.
- Накопленные данные позволяют провести калибровку модели ММГ высокого уровня комплицированности.
- Коэффициенты корреляции расчетов с наблюдениями в целом по криолитозоне составляют 0,92 для температуры грунта и 0,79 для мощности СТС.
- Ансамблевые расчеты позволяют учесть мелкомасштабную изменчивость параметров ММГ и получить вероятностные оценки температуры и СТС.