

Двадцать вторая международная конференция  
"СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ  
КОСМОСА"

**Изменения поля силы тяжести Земли - индикатор  
деградации многолетней мерзлоты**

*А.В. Киселев, В.И. Горный, А.А. Тронин, П.А. Безрученко*

*E-mail: [v.i.gornyy@mail.ru](mailto:v.i.gornyy@mail.ru)*



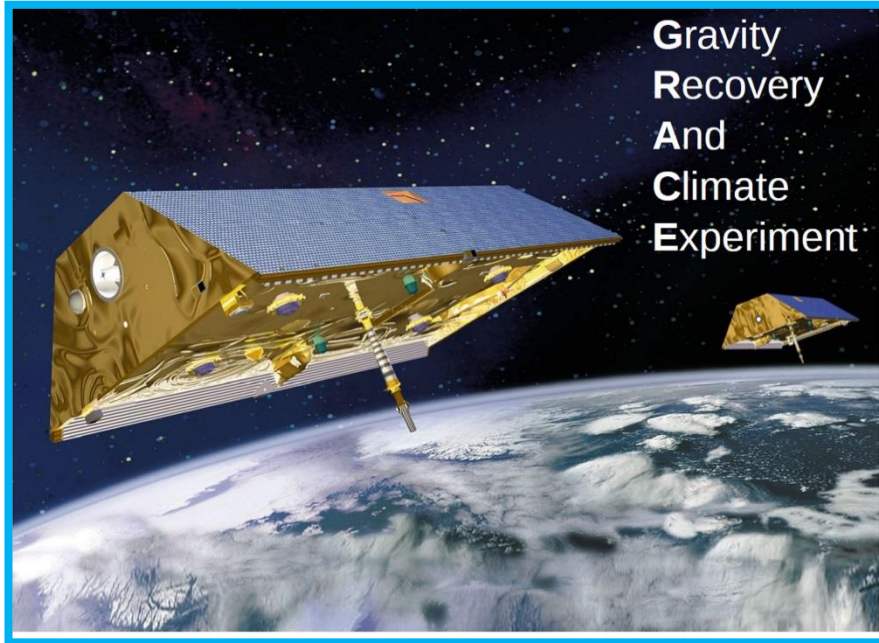
Санкт-Петербургский  
Федеральный исследовательский центр  
Российской академии наук



12 ноября 2024 г.  
Санкт-Петербург

# Спутниковая система измерения силы тяжести Земли

Измерение вариаций поля силы тяжести Земли  
тандемом спутников GRACE и GRACE FO (2002-2024 гг)



Высота орбиты: 300-500 км;

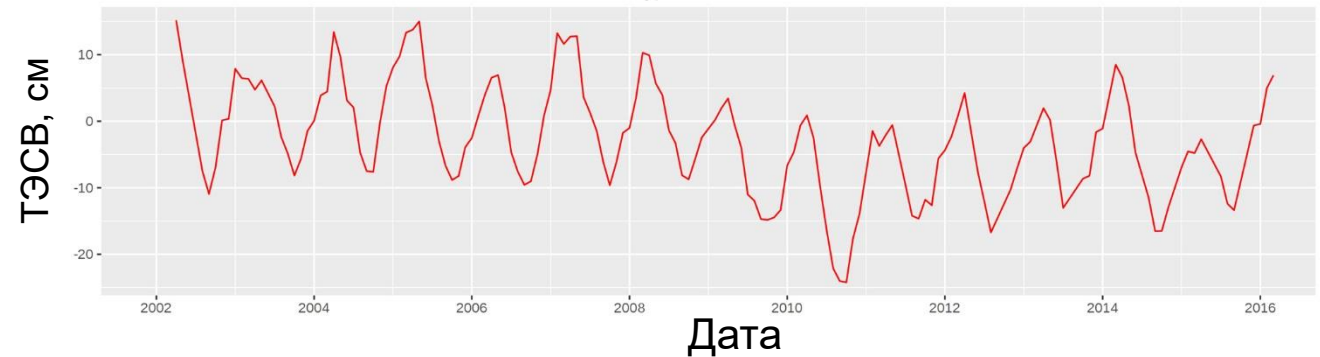
Расстояние между спутниками: 220 км;

Разрешение на местности:  $1^\circ \times 1^\circ$  (111 km x 111 km);

**СКВО = ~ 2 см** толщины эффективного слоя влаги (ТЭСВ);

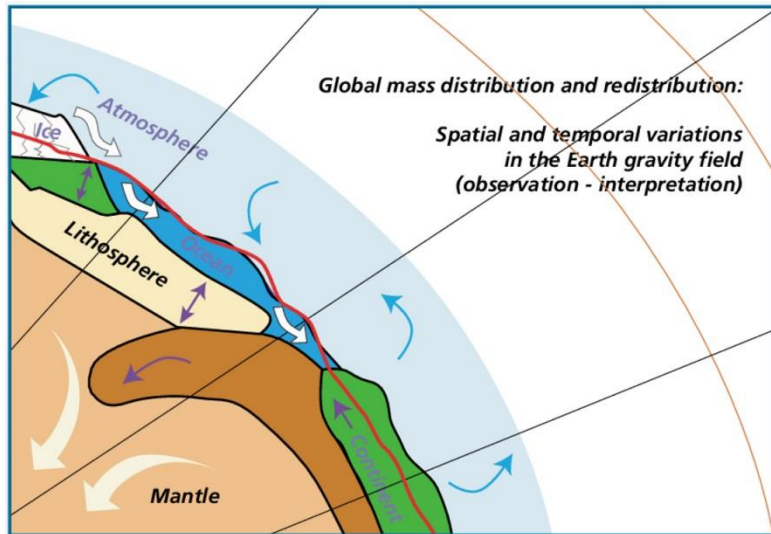
Повторяемость результатов: 1 месяц – цифровая карта ТЭСВ, см

Пример мониторинга изменения ТЭСВ



# Причины вариаций поля силы тяжести Земли

Динамика земных масс и астрономические факторы – причины вариаций



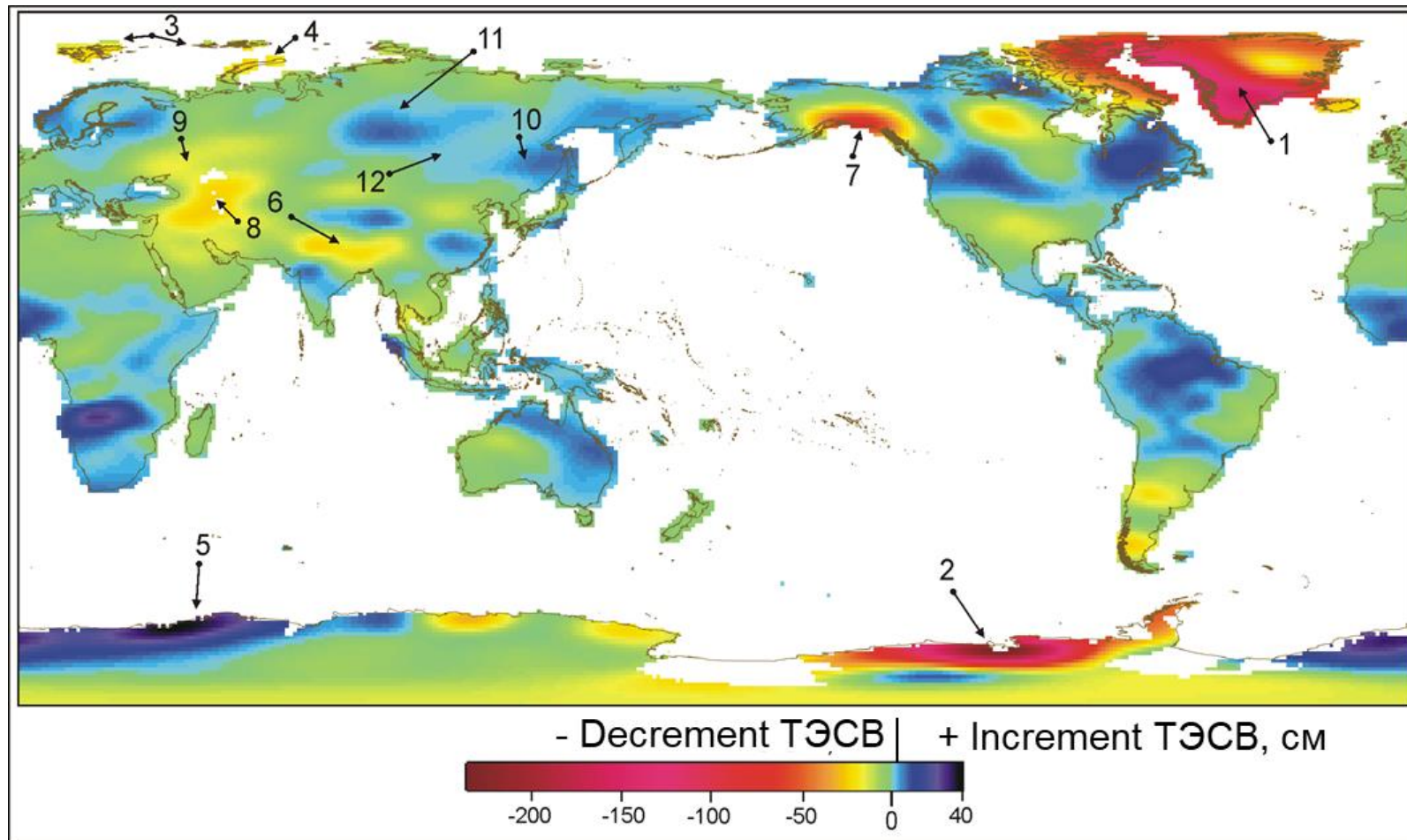
Временные вариации поля силы тяжести Земли возникают при изменении положения масс относительно орбиты:

- ▶ твердой фазы земной коры, мантии и ядра;
- ▶ воды и флюидов в коре, мантии и ядре;
- ▶ поверхностных вод, снега и льда;
- ▶ атмосферы, включая водяной пар.

Стандартный продукт: цифровая ежемесячная глобальная карта ТЭСВ.

# Мониторинг состояния покровных ледников

Глобальная карта скорости изменения (линейного тренда) ТЭСВ  
2002 -2016 гг



- 1- Гренландия.
- 2- Антарктида –Земля Элсуэрта..
- 3 - Архипелаги Шпицберген и Земля Франца Иосифа.
4. Архипелаг Новая Земля.
5. Антарктида - Земли Эндерби и Кемпа.
6. Горные ледники Гималаев.
7. Горные ледники Аляски.
8. Ближневосточная засуха.
9. Район снижения влагозапаса на юге В-Европейской равнины.
10. Повышение влагозапаса в бассейне р. Амур.

# Картирование деградации многолетней мерзлоты по изменениям поля силы тяжести

## Состояние проблемы

Деградация покровных ледников Антарктиды и Гренландии [1-3].

Деградация горных ледников в Гималаях [1, 5] и на Аляске [1, 4].

**Деградация многолетней мерзлоты Северной Евразии и Северной Америки [6,7] – попытка картировать появление таликов за период в 6 лет.**

1. Arendt A.A., Luthcke S.B., Larsen C.F., Abdalati W., Krabill W.B., Beedle M.J. Validation of high-resolution GRACE mascon estimates of glacier mass changes in the St Elias Mountains, Alaska, USA, using aircraft laser altimetry // *Journal of Glaciology*. 2008. Vol. 54, No. 188. P. 778-787.
2. Киселев А. В., Горный В. И., Крицук С. Г., Тронин А. А. Индикация опасных природных явлений вариациями гравитационного поля Земли (по данным спутниковых съемок системой GRACE) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13. № 6. С. 13–28. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-13-28.
3. Bibi, S., Wang, L., Li, X., Zhang, X., & Chen, D. (2019). Response of groundwater storage and recharge in the Qaidam Basin (Tibetan Plateau) to climate variations from 2002 to 2016 // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 9918–9934. <https://doi.org/10.1029/2019JD030411>
4. Chen J.L., Tapley B.D., Wilson C.R. Alaskan mountain glacial melting observed by satellite gravimetry // *Earth and Planetary Science Letters*. V. 248. Issues 1–2. 2006. P. 368–378. ISSN 0012-821X. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2006.05.039>.
5. Bingshi Liu et al. Reconstructing GRACE-like time series of high mountain glacier mass anomalies // *Remote Sensing of Environment/ Volume 280, October 2022, 113177*.
6. Muskett R.R and Romanovsky V.E. Groundwater storage changes in arctic permafrost watersheds from GRACE and in situ measurements // *Environ. Res. Lett.* 4 (2009) 045009 (8pp) doi:10.1088/1748-9326/4/4/045009.
7. Landerer F.W., Swenson S.C., Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates, *Water Resources Research*, 2012, Vol. 48, W04531, p. 11. DOI: 10.1029/2011WR011453.

# Факторы, определяющие «быстрые» вариации поля силы тяжести

## Баланс изменений масс

$$\Delta M = \Delta m_{\text{водоемы}} + \Delta m_{\text{ледн.}} + \Delta m_{\text{почв. влага}} + \Delta m_{\text{снег}} + \Delta m_{\text{подз. воды}} + \Delta m_{\text{раст.}} + \Delta m_{\text{мерзл.}} + \Delta m_{\text{атм.}}$$

### Приращение / дефицит масс:

$\Delta M$  – на исследуемой территории;

$\Delta m_{\text{водоемы}}$  – в водоемах;

$\Delta m_{\text{ледники}}$  – в ледниках;

$\Delta m_{\text{почв. влага}}$  – в почве;

$\Delta m_{\text{снег}}$  – в снежном покрове;

$\Delta m_{\text{подз. воды}}$  – в подземных водах;

$\Delta m_{\text{раст}}$  – в растительном покрове;

$\Delta m_{\text{мерзлота}}$  – в мерзлоте;

$\Delta m_{\text{атм.}}$  - в атмосфере (испарение, сублимация).

$\Delta m_{\text{атм}}$  - учитывается при создании стандартного продукта.

### Не учтены:

- катастрофические землетрясения;
- постледниковые поднятия.

## Цели исследования

1. Проверка гипотезы, предполагающей, что в зоне многолетней мерзлоты Северной Евразии за последние два десятилетия, рост мощности сезонно-талого слоя (СТС) под влиянием глобального потепления мог привести к измеримым спутниками GRACE и GRACE FO снижениям поля силы тяжести Земли;
2. Выявление пространственно-временных особенностей многолетних трендов поля силы тяжести Земли под влиянием потепления климата.

# Материалы и методы

## Архивные материалы спутниковых съемок

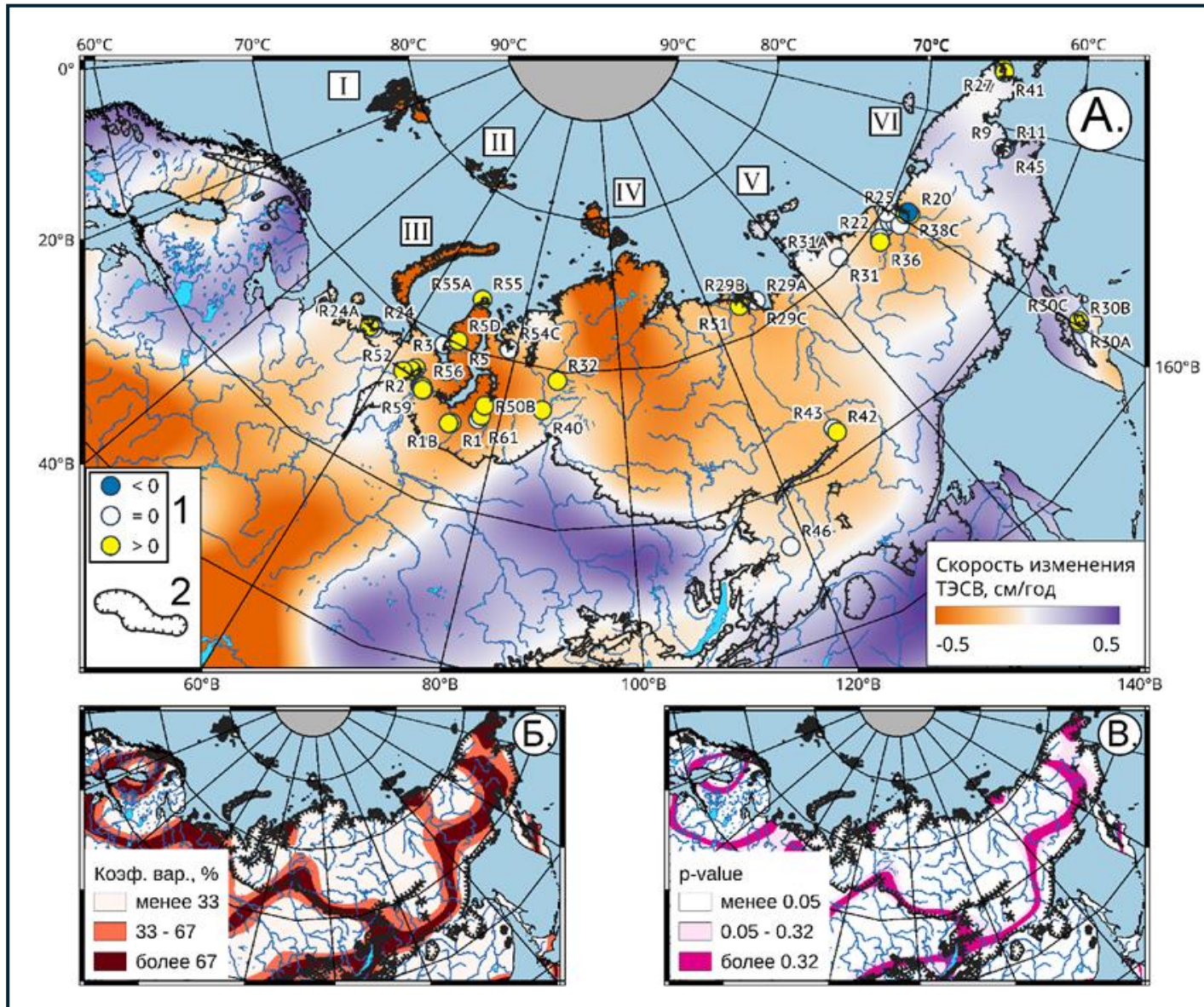
<i>Спутник</i>	<i>Частота получения результ.</i>	<i>Время функционир.</i>	<i>Картируемая величина</i>	<i>Стандартный продукт</i>
GRACE	1 мес	2002 – 2017	ТЭСВ, см	Water-Equivalent-Thickness Surface-Mass Anomaly RL06 v.4
GRACE FO	1 мес	2018 – н.в.	ТЭСВ, см	Water-Equivalent-Thickness Surface-Mass Anomaly RL6.2 v.4
Terra	2 раза/ сутки	2000 – н.в.	Температура, К	MOD11A1 v. 6.1
Aqua	2 раза/ сутки	2000 – н.в.	Температура, К	MYD11A1 v. 6.1
Terra	1 мес	2000 – н.в.	НДВИ	MOD13A3
Миссия Global Precipitation Measurement	1 раз в сутки	2000 – н.в.	Осадки, мм/сут	GPM_3IMERGM v.07

Результаты мониторинга в скважинах мощности СТС на 20-ти тестовых площадках,  
Проект: **Circumpolar Active Layer Monitoring Network-CALM** (<https://www2.gwu.edu/~calm/>)



**Качественный анализ  
отражения деградации многолетней мерзлоты в  
дистанционно-измеренных характеристиках  
подстилающей поверхности**

# Пространственное распределение линейного тренда сентябрьских ТЭСВ в Северной Евразии за период 2002-2023 гг



А. Цифровая карта линейного тренда сентябрьских ТЭСВ

Б. Коэффициент вариации

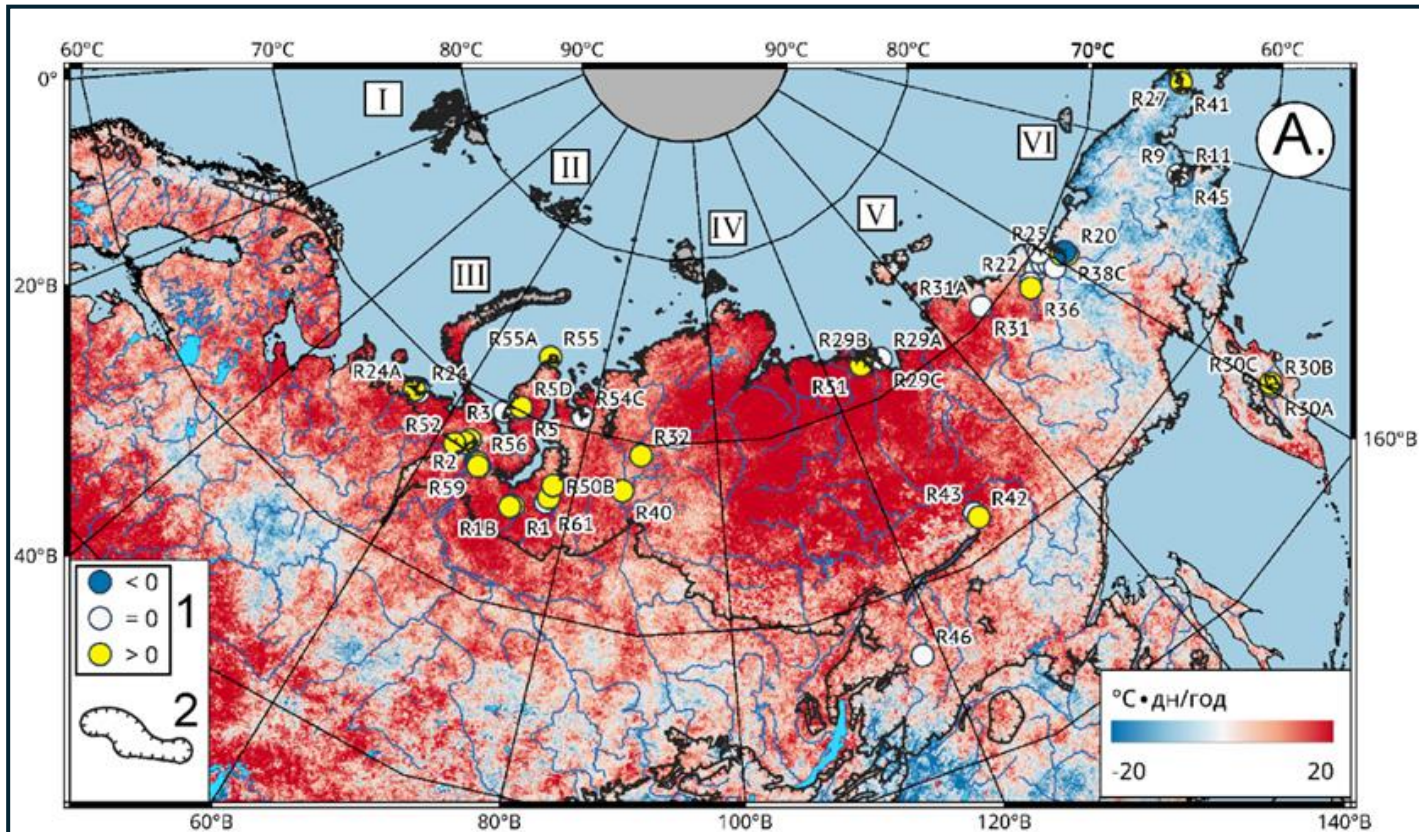
В.  $p$  - значение.

Условные обозначения:

1. Пункты наземного мониторинга тренда глубины СТС.

2. Граница зоны ММ.

# Сравнение пространственных распределений трендов температуры подстилающей поверхности и ТЭСВ



А. Цифровая карта линейного тренда сумм активных температур подстилающей поверхности за 2002-2023 гг

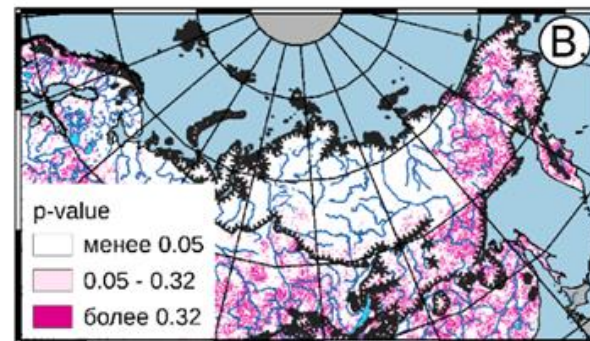
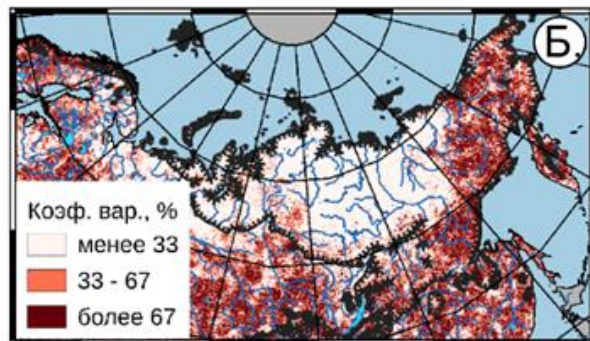
Б. Коэффициент вариации

В.  $p$  - значение.

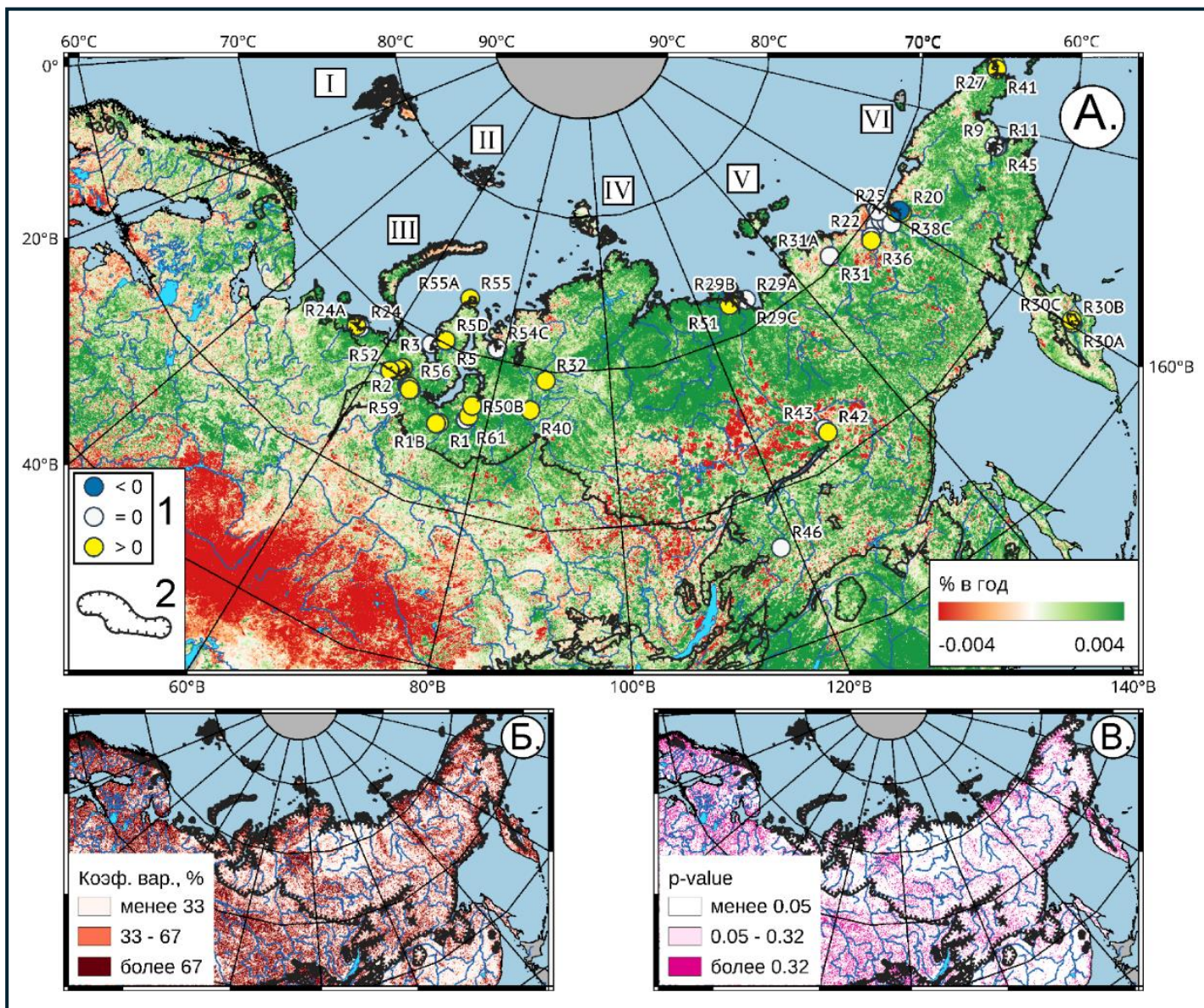
Условные обозначения:

1. Пункты наземного мониторинга тренда глубины СТС.

2. Граница зоны ММ.



# Сравнение пространственных распределений трендов температуры подстилающей поверхности, НДВИ и ТЭСВ



А. Цифровая карта линейного тренда НДВИ за 2002-2023 гг

Б. Коэффициент вариации

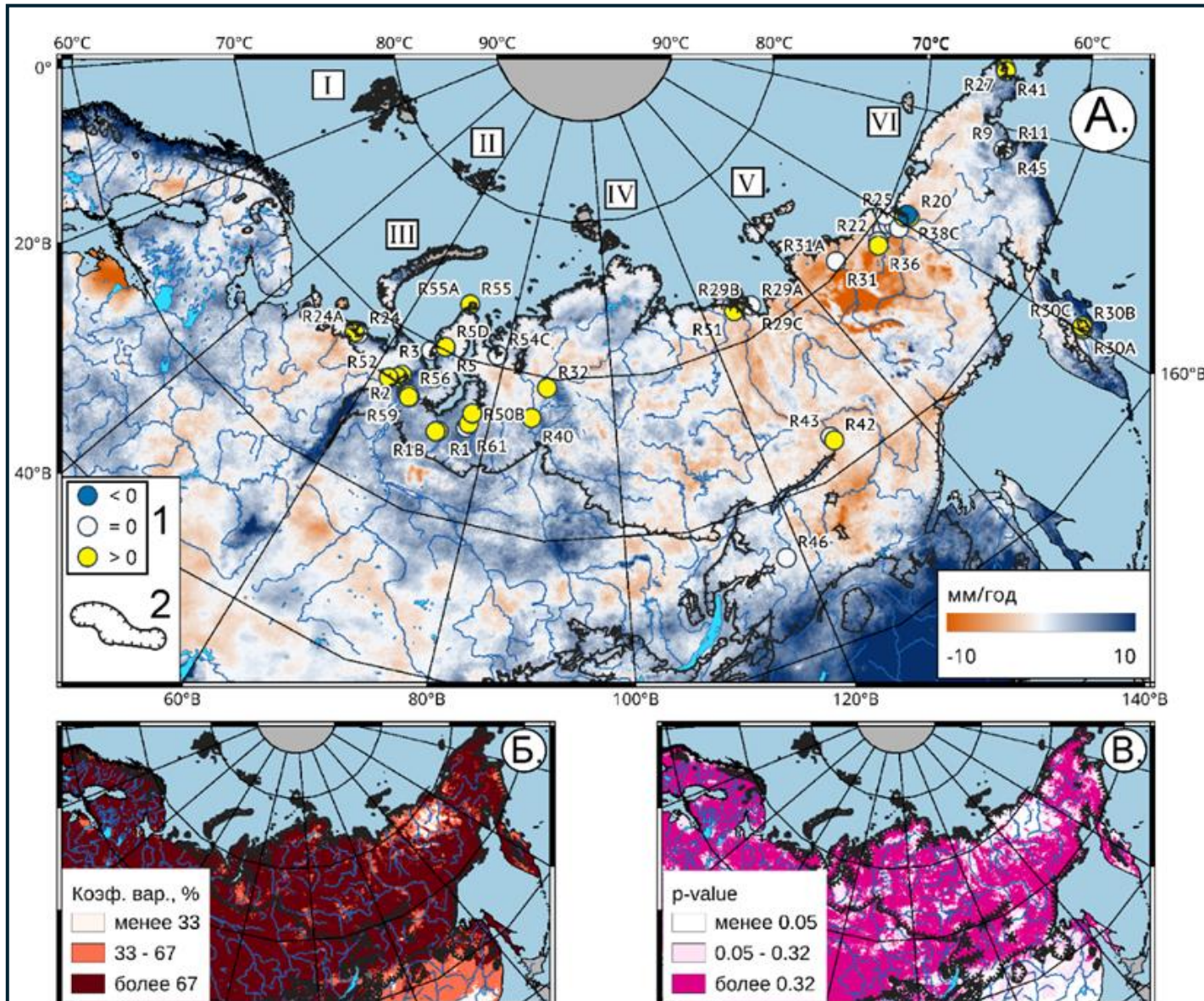
В.  $p$  - значение.

Условные обозначения:

1. Пункты наземного мониторинга тренда глубины СТС.

2. Граница зоны ММ.

# Качественный анализ пространственного распределения трендов температуры подстилающей поверхности, НДВИ, осадков и ТЭСВ



А. Цифровая карта линейного тренда годовых осадков за 2002-2023 гг

Б. Коэффициент вариации

В.  $p$  - значение.

Условные обозначения:

1. Пункты наземного мониторинга тренда глубины СТС.

2. Граница зоны ММ.

# Выводы

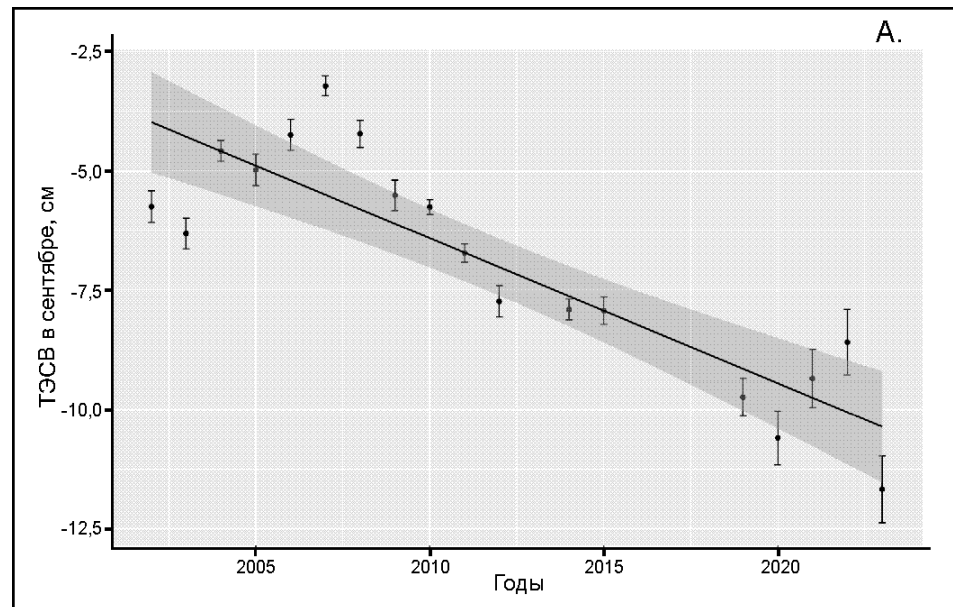
## по результатам качественного анализа

- Области повышения сумм активных температур подстилающей поверхности и НДВИ совпадают с частью зоны многолетней мерзлоты, лежащей к западу от меридиана  $140^\circ$  ВД и за последние два десятилетия отмечены снижением поля силы тяжести Земли (отрицательным трендом ТЭСВ);
- Современная граница зоны многолетней мерзлоты картируется узкими зонами смены знака тренда ТЭСВ с отрицательного на положительный и высокими значениями коэффициента вариации и  $p$ -значения.
- Территория к востоку от меридиана  $140^\circ$  ВД (бассейн р. Колымы и п-ов Чукотка) отличается от западной области по многолетнему режиму изменения дистанционно-измеренных характеристик подстилающей поверхности, малой достоверностью определения тренда и высокой вариативностью.  
Это указывает на различные стадии мерзлотных режимов территорий, расположенных к западу и к востоку от меридиана  $140^\circ$  ВД. Для получения достоверных результатов требуется более продолжительный спутниковый мониторинг этого региона.

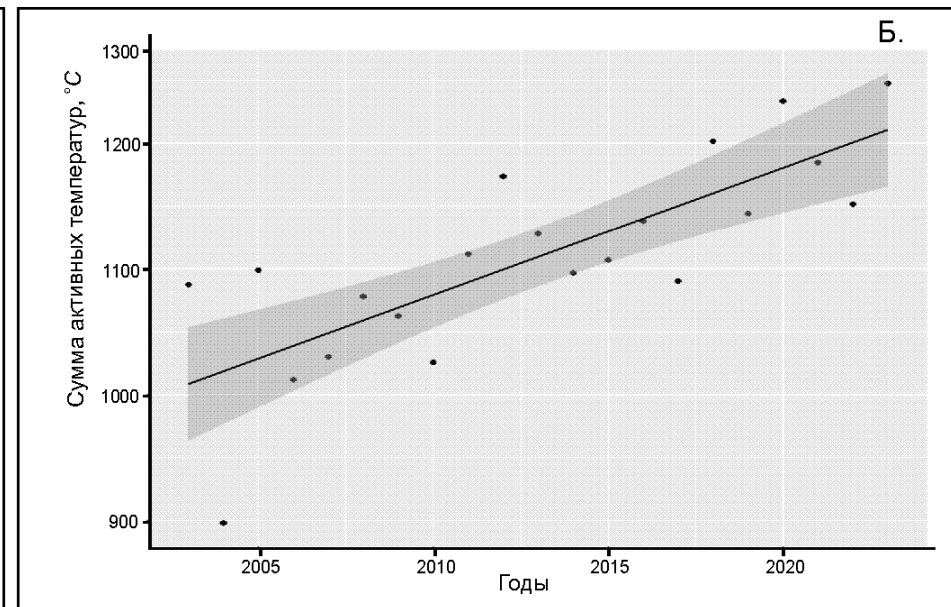
**Количественный анализ отражения деградации  
многолетней мерзлоты в  
дистанционно-измеренных характеристиках  
подстилающей поверхности**

# Многолетние изменения дистанционно измеренных характеристик подстилающей поверхности в зоне многолетней мерзлоты Северной Евразии (к западу от меридиана 140°ВД)

ТЭСВ средних по площади в сентябре

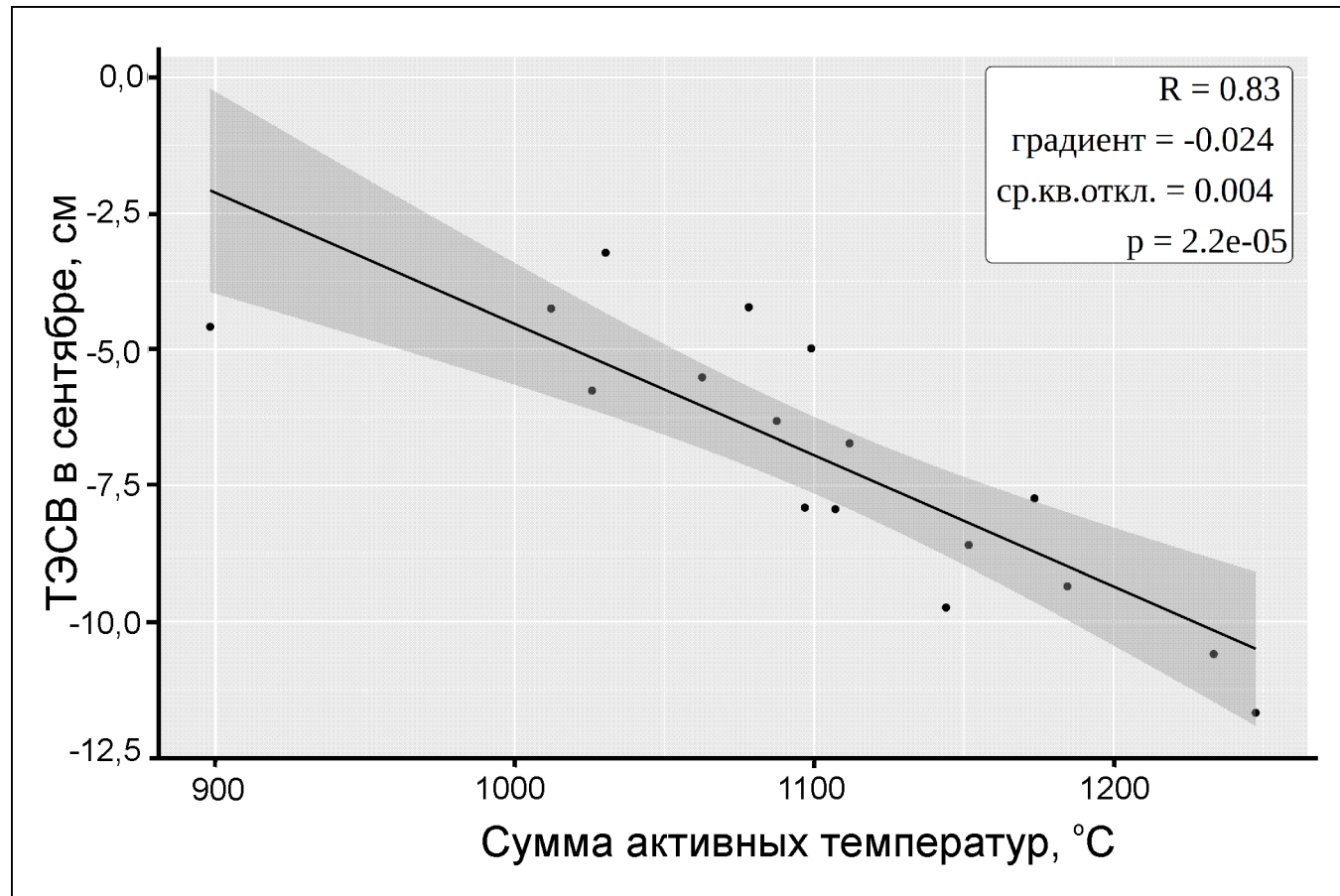


Сумма средних по площади значений активных температур





# Корреляция дистанционно измеренных характеристик подстилающей поверхности, усредненных на площади зоны многолетней мерзлоты к западу от меридиана 140°ВД

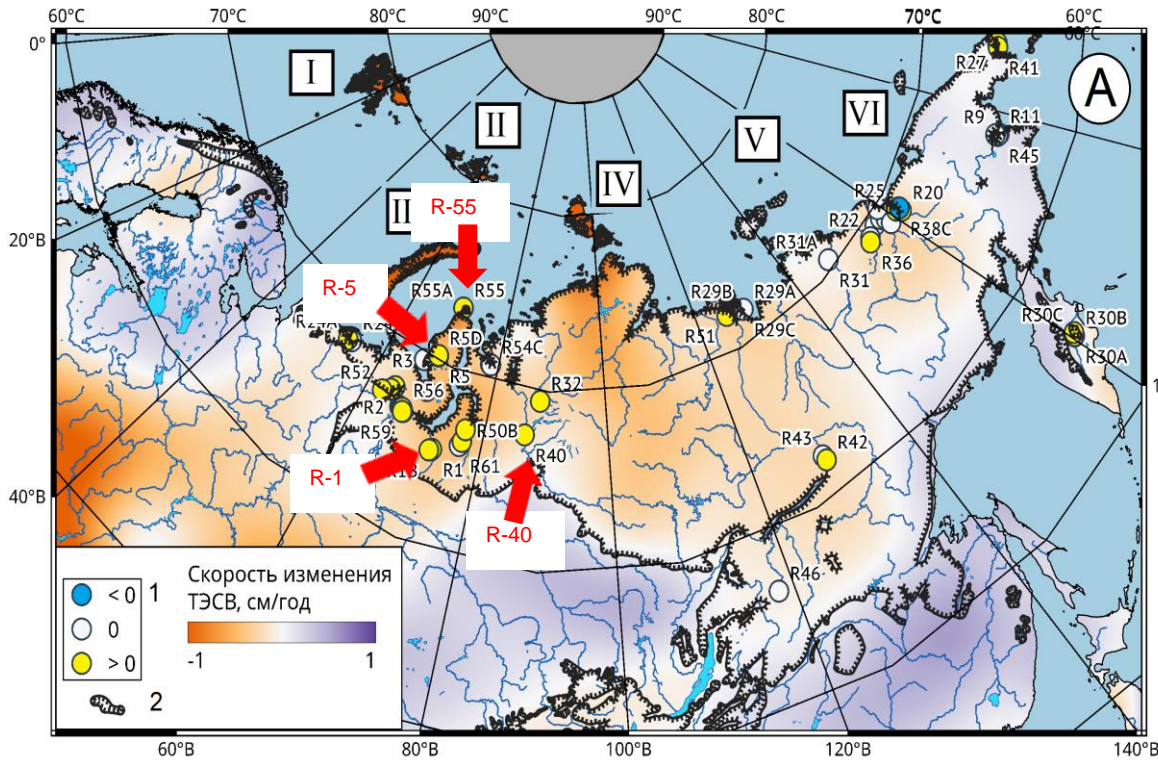


**Вывод:** изменения ТЭСВ - отражают потепления климата.

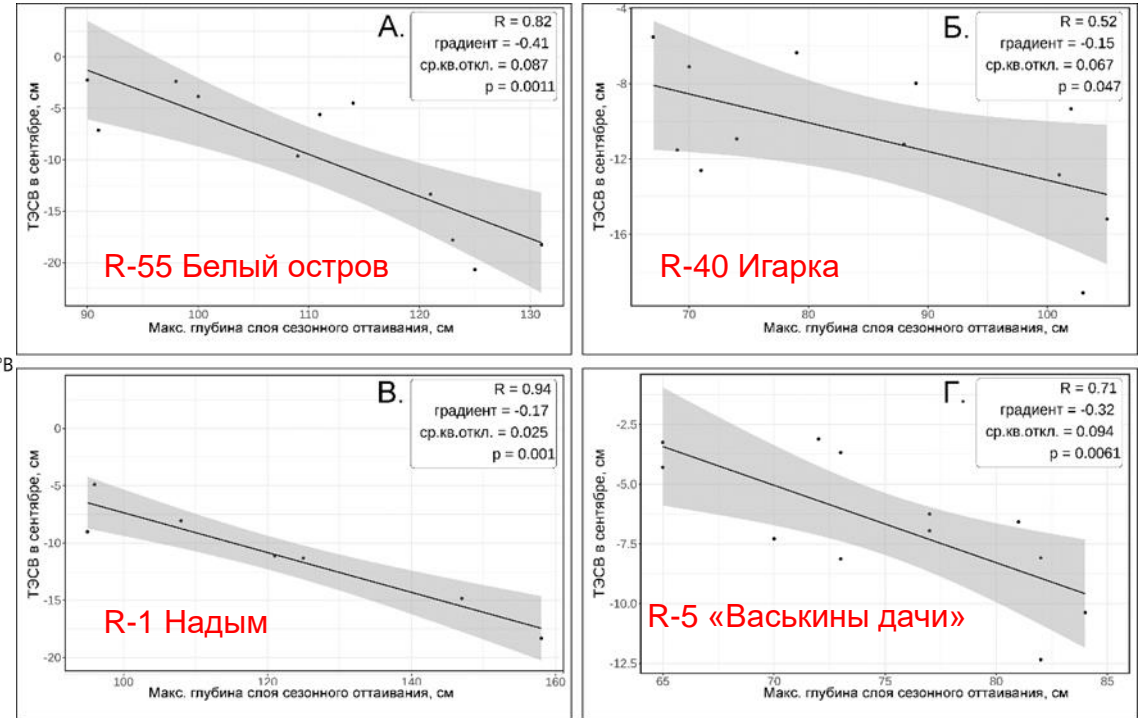
# Индикация

## МОЩНОСТИ СЕЗОННО-ТАЛОГО СЛОЯ СЕНТЯБРЬСКИМИ ЗНАЧЕНИЯМИ ТЭСВ

Площадки мониторинга мощности сезонно-талого слоя  
(проект: Circumpolar Active Layer Monitoring Network-CALM)



Корреляции ТЭСВ с мощностью сезонно-талого слоя



**Вывод:** многолетний рост мощности сезонно-талого слоя индицируется снижением поля силы тяжести.

Это подтверждает гипотезу о выносе дополнительных масс талой воды за пределы деградирующей зоны многолетней мерзлоты в условиях потепления климата.

# Влияние деградации многолетней мерзлоты Северной Евразии на уровень океана

При деградации ММ характер изменения масс на территории, соответствующей одному пикселю:

$$\Delta m_{\text{водоемы}} \geq 0; \Delta m_{\text{раст.}} \geq 0; \Delta m_{\text{подз. воды}} \geq 0; \Delta m_{\text{почв. влага}} \geq 0; \Delta m_{\text{мерзл.}} < 0;$$

Поверхностный сток в океан :

$$\Delta M \sim - \Delta m_{\text{мерзл.}} + \Delta m_{\text{водоемы}} + \Delta m_{\text{раст.}} + \Delta m_{\text{подз. воды}} + \Delta m_{\text{почв. влага}}$$

Если принять, что:  $\Delta m_{\text{водоемы}} + \Delta m_{\text{раст.}} + \Delta m_{\text{подз. воды}} + \Delta m_{\text{почв. влага}} = 0$ ,

т.е. вся талая вода скатилась в океан, то верхняя оценка  $V$ - объема талой воды, поступившей в океан за период 2002-2023 гг. будет:

$$V = \sum_{T_0=2002}^{T_f=2023} S \cdot \sum_{x=1; y=1}^{X, Y} \{ \text{ТЭСВ}[x, y, (T + 1)] - \text{ТЭСВ}(x, y, T) \}$$

где  $S$  – площадь пикселя,  $\text{м}^2$ ; ТЭСВ, см  
 $x, y$  - номера пикселей на цифровой карте.  
 $T$  – номер года.

# Верхняя оценка объема воды, поступившей в океан из-за таяния многолетней мерзлоты в период с 2002-2023 гг

Объем:  $2,70 \cdot 10^{11} \text{ м}^3$

Площадь мирового океана  $\sim 361 \cdot 10^{12} \text{ м}^2$

Вклад талых вод за период с 2002 по 2023 гг. в подъем уровня океана из-за деградации многолетней мерзлоты Северной Евразии составил: 0,7 мм, или:  $\sim 0,03 \text{ мм/год}$ .

Скорость подъема уровня океана за последние 30 лет составляла от 2,1 до 4,5 мм/год (Hamlington, Bellas-Manley, Willis, 2024).

**Вывод:** Можно утверждать, что вклад Северной Евразии от деградации многолетней мерзлоты за два прошедших десятилетия не является основной причиной повышения уровня мирового океана.

*B. D. Hamlington, A. Bellas-Manley, J. K. Willis, et al. The rate of global sea level rise doubled during the past three decades // Communications Earth & Environment volume 5, Article number: 601 (2024), <https://www.nature.com/articles/s43247-024-01761-5>*

## Заключение

В зоне многолетней мерзлоты Северной Евразии, к западу от меридиана  $140^{\circ}$ ВД в течение двух последних десятилетий наблюдается отрицательный линейный тренд ТЭСВ, достигающий  $-0,5 \text{ см}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{год}$ , вызванный возрастанием мощности сезонно-талого слоя под влиянием потепления климата, что является признаком деградации многолетней мерзлоты.

За последние два десятилетия дополнительный объем сезонно-талой воды на территории многолетней мерзлоты в Северной Евразии оценен в  $\sim 2,7 \cdot 10^{11} \text{ м}^3$ , часть которой в результате поверхностного стока поступила в океан.

Верхняя оценка подъема уровня мирового океана за последние два десятилетия, вызванного деградацией многолетней мерзлоты в Западной и Центральной Сибири за последние 21 год составила  $0,7 \text{ мм}$ , что пока не является основной причиной подъема уровня мирового океана.