

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

**Использование метода SBAS для оценки деформации  
поверхности ледников бассейна реки Пскем, Западный Тянь-Шань**

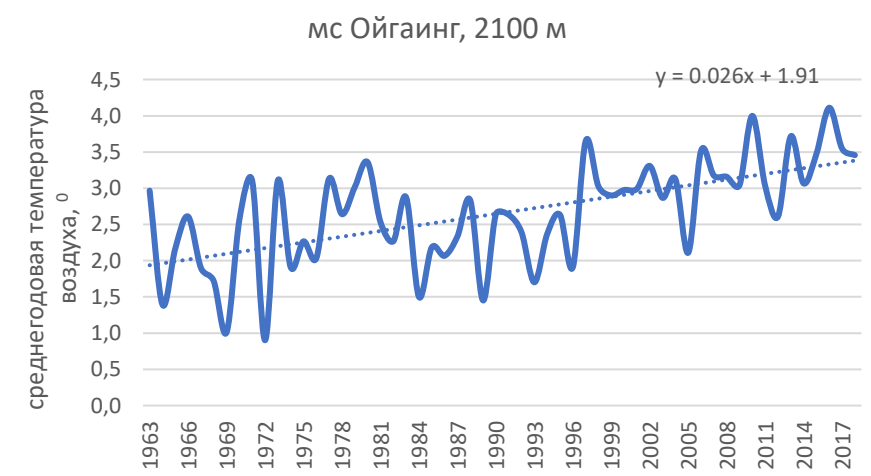
**Семакова Э.Р., Поторжинский М.Г., Семаков Д.Г., Хатамова Н.Д.**

**Астрономический институт им. Улугбека Академии наук Республики Узбекистан**

**12 ноября, 2024**

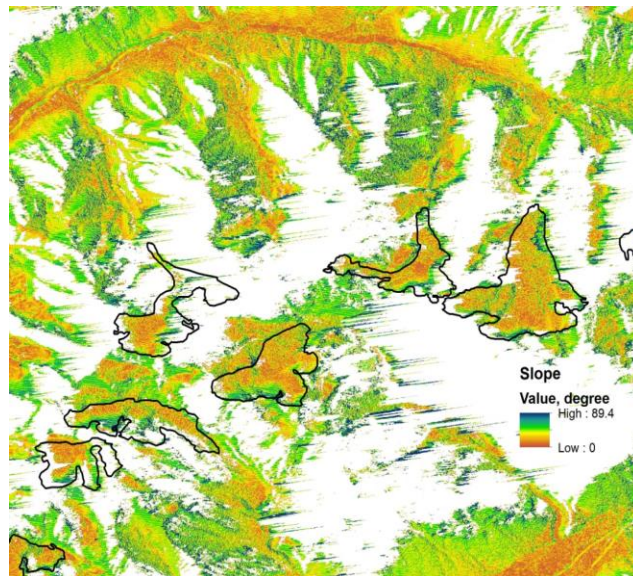
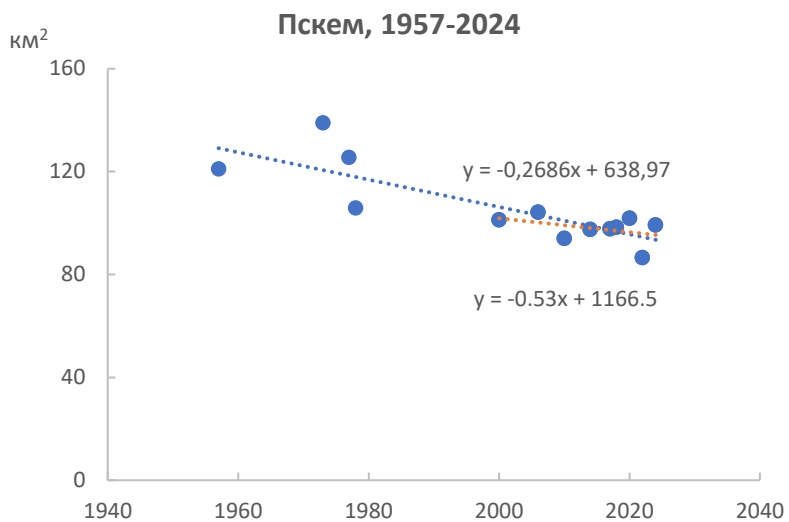
# Район исследования

Бассейн реки Пскем, Западный Тянь-Шань

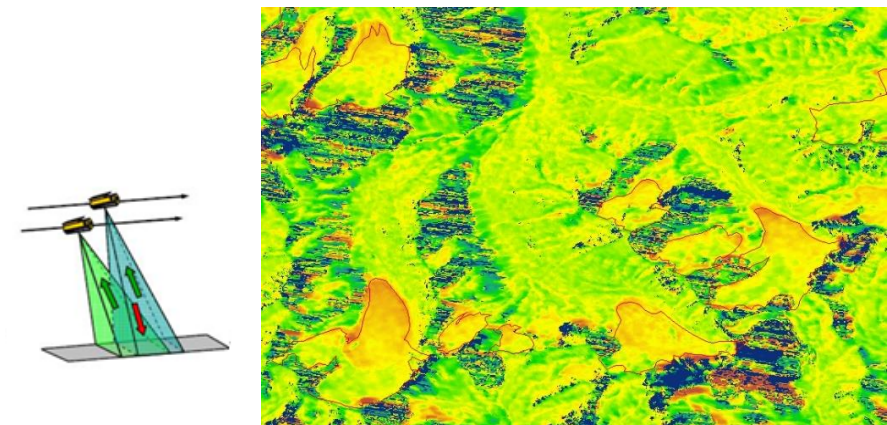




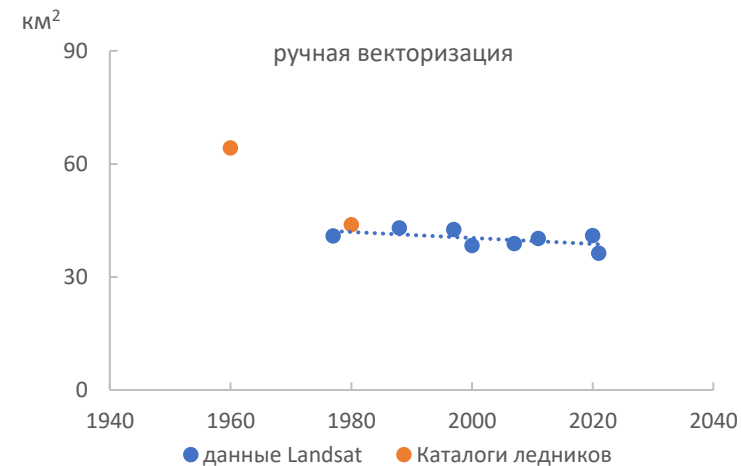
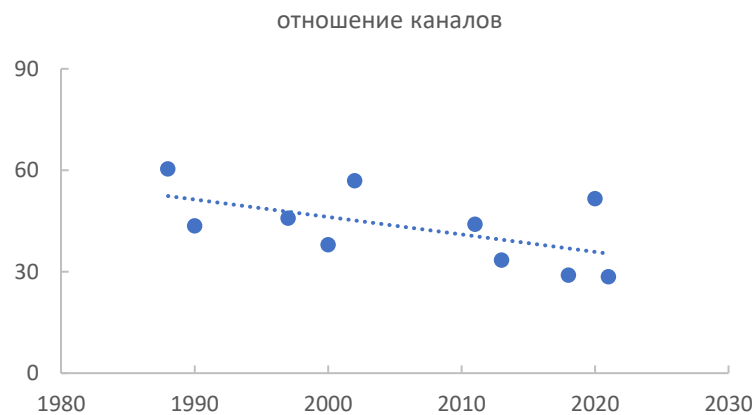
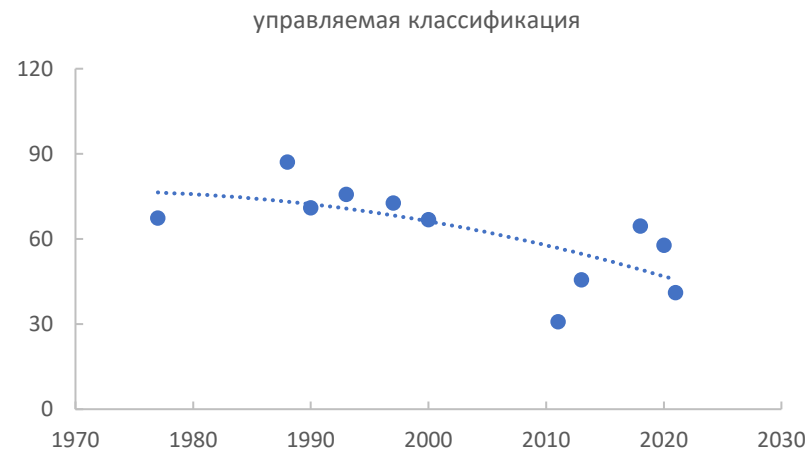
# Оценка изменения площади и высоты ледников по бассейнам рек (Каталог ледников СССР 1957-60 и 1978-80, KH-9, Landsat, ALOS/AVNIR-2, TerraSAR-X/TanDEM-X, SRTM)



Средняя скорость понижения 10 ледников по Пскему =  $-0.68 \pm 3.91$  м/год с 2012 по 2014 гг.  
 Годовой баланс массы =  $-1.08$  м в.э. за этот период.  
 Потеря массы этих ледников = 932.7 кт.



## По бассейнам Гиссаро-Алая



# Гляциологические наблюдения

Ледники Пахтакор (с 2023 г.), Баркрак (с 2016 г.) и Текеш (эпизодические наблюдения)

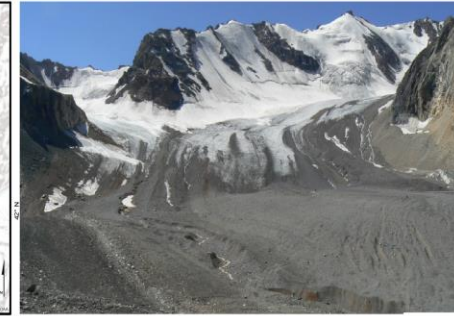
2,7 км<sup>2</sup>

1,89 км<sup>2</sup>

1,3 км<sup>2</sup>

НИГМИ Узгидромета, GFZ (Потсдам),  
Л. Пахтакор

Проекты SATCOS / SICADA, Институт геологии и  
геофизики, НУУз, Узгидромет, л. Баркрак Средний

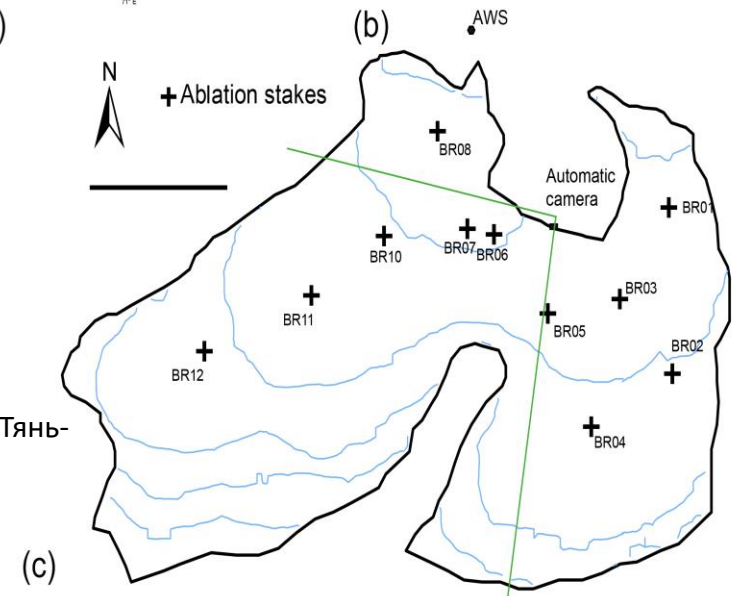


(a)

(b)

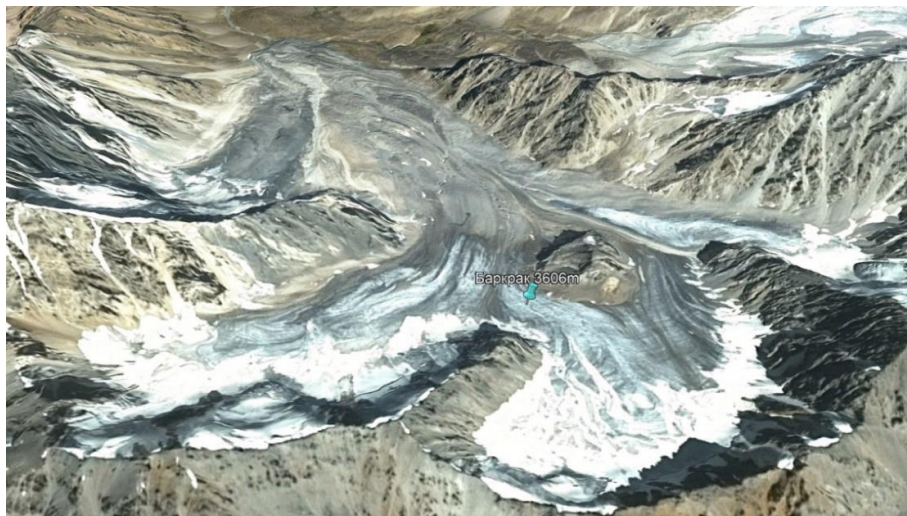
1. Абляционные рейки, GPS-съёмка
2. Автоматическая метеостанция
3. Видеокамера слежения за снеговой линией

М. Петров, Т. Сакс, Ф. Акбаров, Х. Мамиров, С. Суванкулов. Наблюдения баланса массы ледника Баркрак Средний (Западный Тянь-Шань), как часть глобального мониторинга криосферы, проводимого WGMS (Всемирная служба мониторинга ледников). Криосфера. «Центр изучения ледников Национальной Академии наук Таджикистана», № 1-2 (1), 2021, С.45-52.



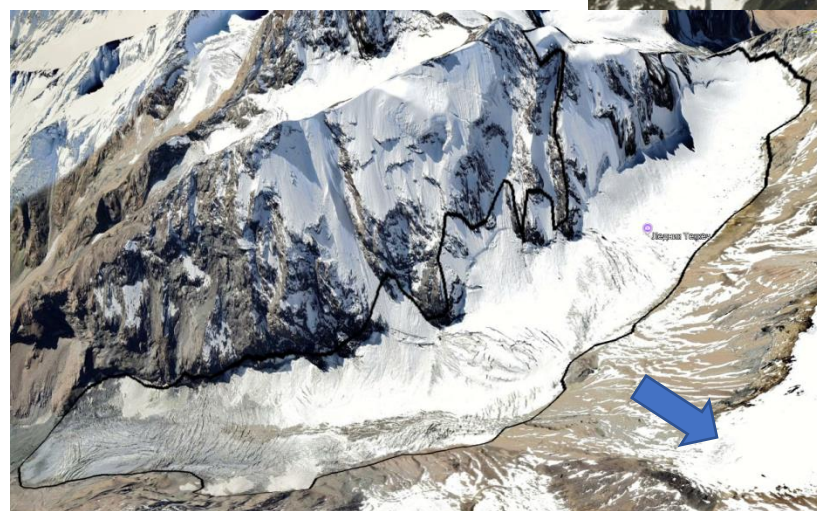
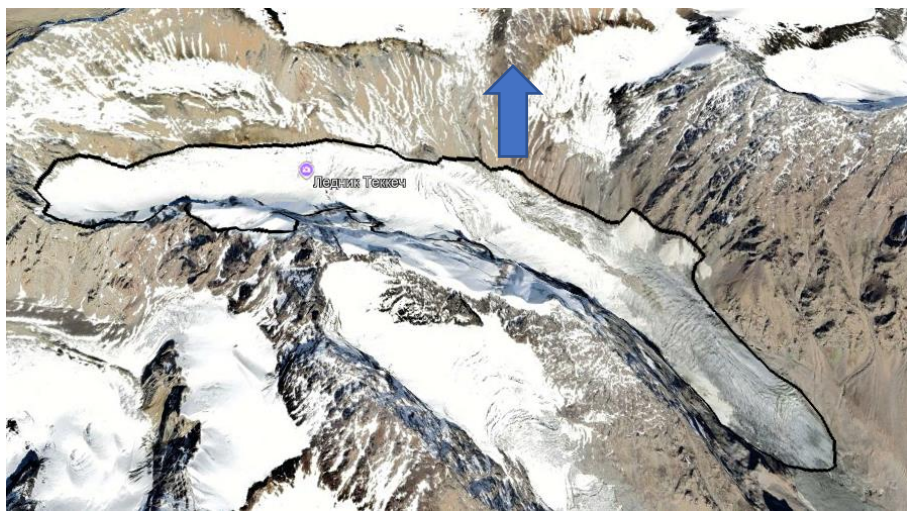
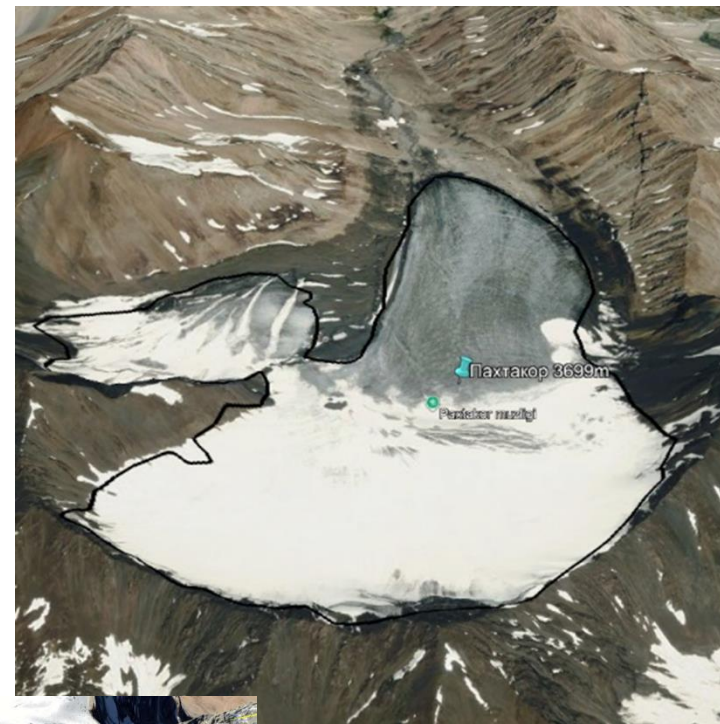


## л. Баркрак Средний, Северная экспозиция



небольшой дополнительный приток снега от схода лавин с Юго-Западного склона

## Л. Пахтакор, Северная экспозиция



л.Текеш, Южная экспозиция, лавинное питание и накопление осадков

# Цель исследования

Оценка изменения высоты поверхности тестовых ледников и анализ их деформационных изменений методами DInSAR и SBAS

## Исходные данные:

1. Интерферометрические данные радиолокационной космической съемки Sentinel-1A SLC за период 2014 - 2024

Режим съемки: IW (Interferometric Wide swath)

Направление орбиты: нисходящая и восходящая

Доступ: Copernicus Open Access Hub

Программное обеспечение: SNAP (ESA) + Snaphu

2. Продукты интерферометрической обработки ASF DAAC НуРЗ 2024 за период 2021 - 2024

Направление орбиты: нисходящая

Программное обеспечение: GAMMA (ASF NASA).

Интервал между съемками – 12 дней, 24 дня, 36 дней, 1 год

# Методика

## 1. DinSAR

обработка пары радарных изображений для создания карт вертикальных смещений поверхности ледников. Пространственное разрешение: 27 м

Критерии подбора пар снимков:

минимальное базовое время между пролетами;  
минимальное базовое расстояние.

Этапы: корегистрация снимков, создание интерферограммы, удаление топографической фазы, фазовая фильтрация методом Гольдштейна, подбор оптимальных параметров в процессе развертки фазы интерферограмм методом потока минимальной стоимости, расчет вертикальных смещений и геопривязка

## 2. SBAS – метод малых базовых линий

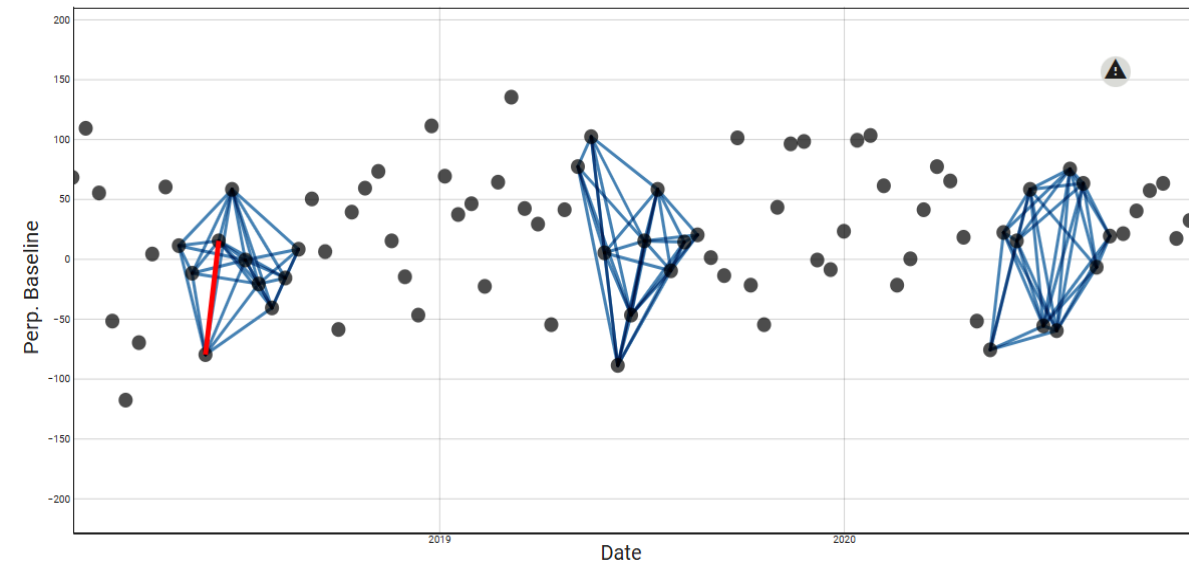
пространственное разрешение: 40; 80 м

Подбор подходящих снимков.

Совместная обработка серии радарных изображений, полученных в повторяющейся геометрии съёмки.

Привязка к отражателю с высокой когерентностью.

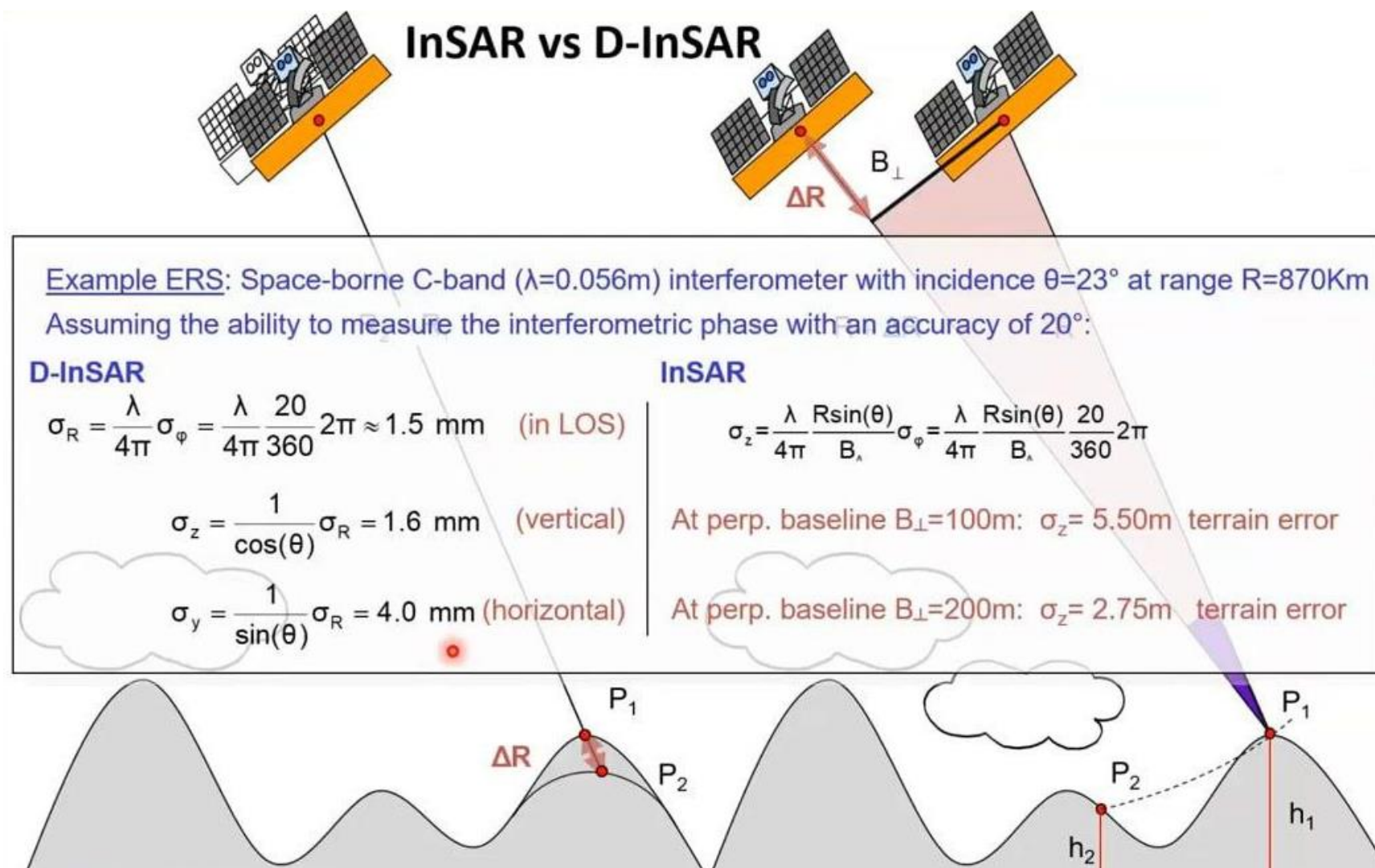
Атмосферная коррекция





## Точность расчетов методами радарной интерферометрии

Точность измерения деформации поверхности системой Sentinel-1, D-InSAR, в направлении на спутник  $\pm 1,5$  мм, в вертикальном направлении  $\pm 1,6$  мм и в горизонтальном направлении  $\pm 4$  мм (проф. Irena Hajnsek)





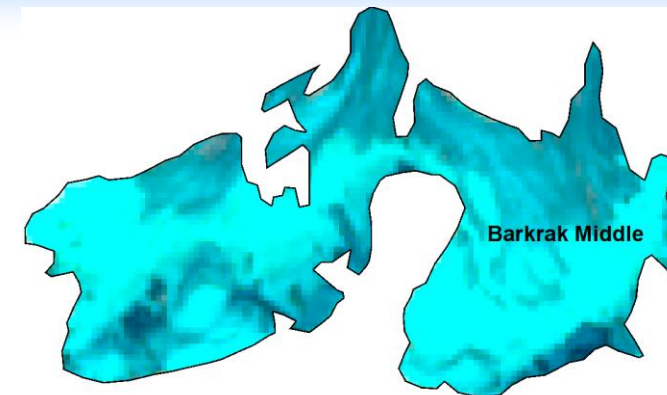
# Результаты

Деформация ледника Баркрак  
интервал съемки 1год (Август),  
расчеты в программе SNAP

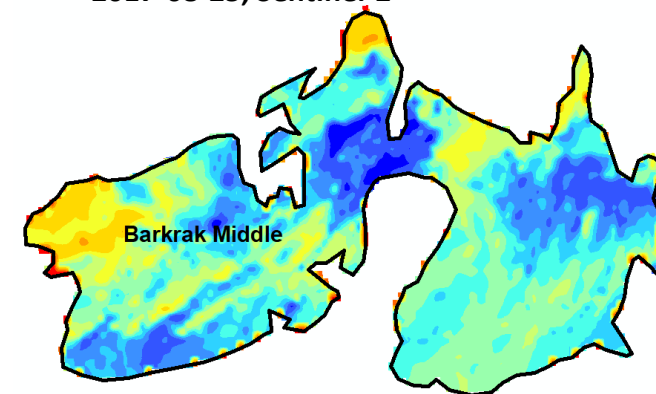
**Среднее** значение деформации =  $-0.1179 \pm 0,0156$  м  
за период с 2018 по 2023 г.

**Мин** = -0,1606 м,

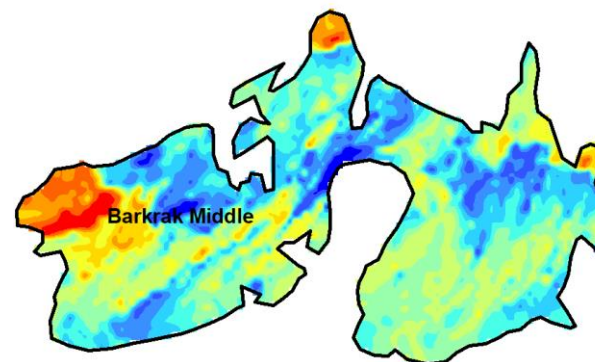
**Макс** = -0,0382 м



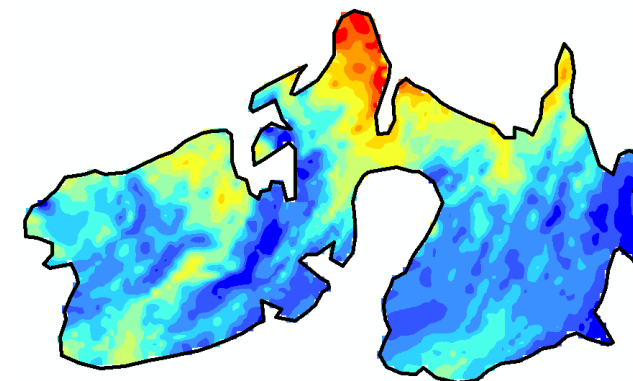
2017-08-25, Sentinel-2



2017-2018-2019-2020:2023, август



2021-2023, август

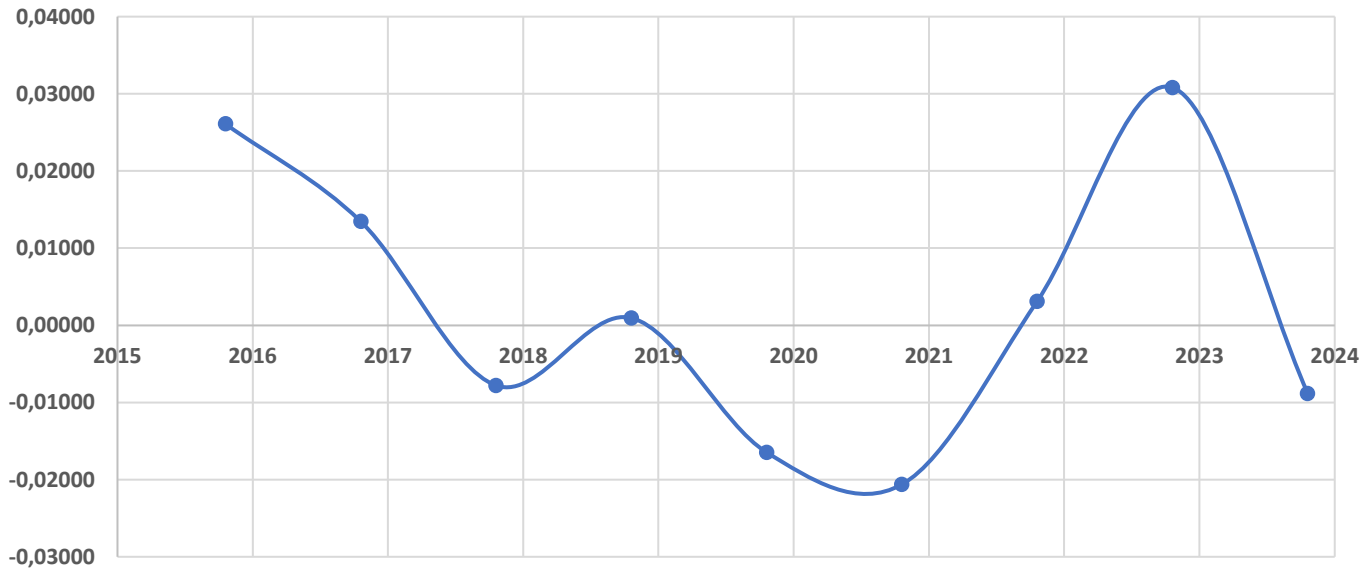


2017-2018, август, B=4м

# Результаты SBAS

интервал съёмки 1 год

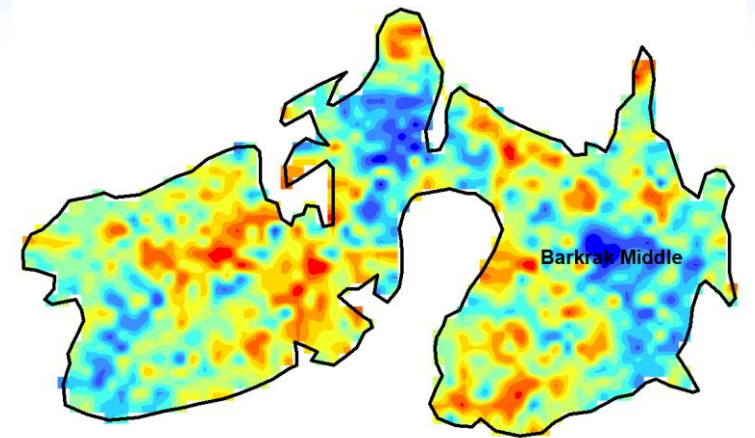
Среднее значение Деформации ледника Баркрак-Средний  
интервал съёмки 1год (Сентябрь) [м]



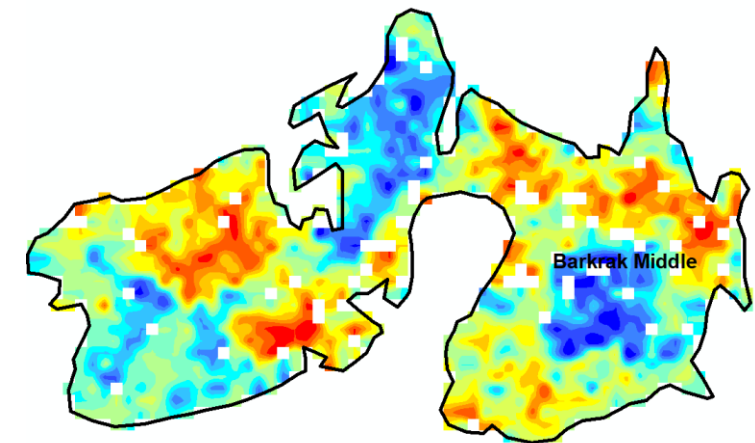
**Среднее** значение деформации = 0.0076 м за период с 2015 по 2023 г.

**Мин** = -15 см

**Макс** = 14 см



2014-2023, сентябрь



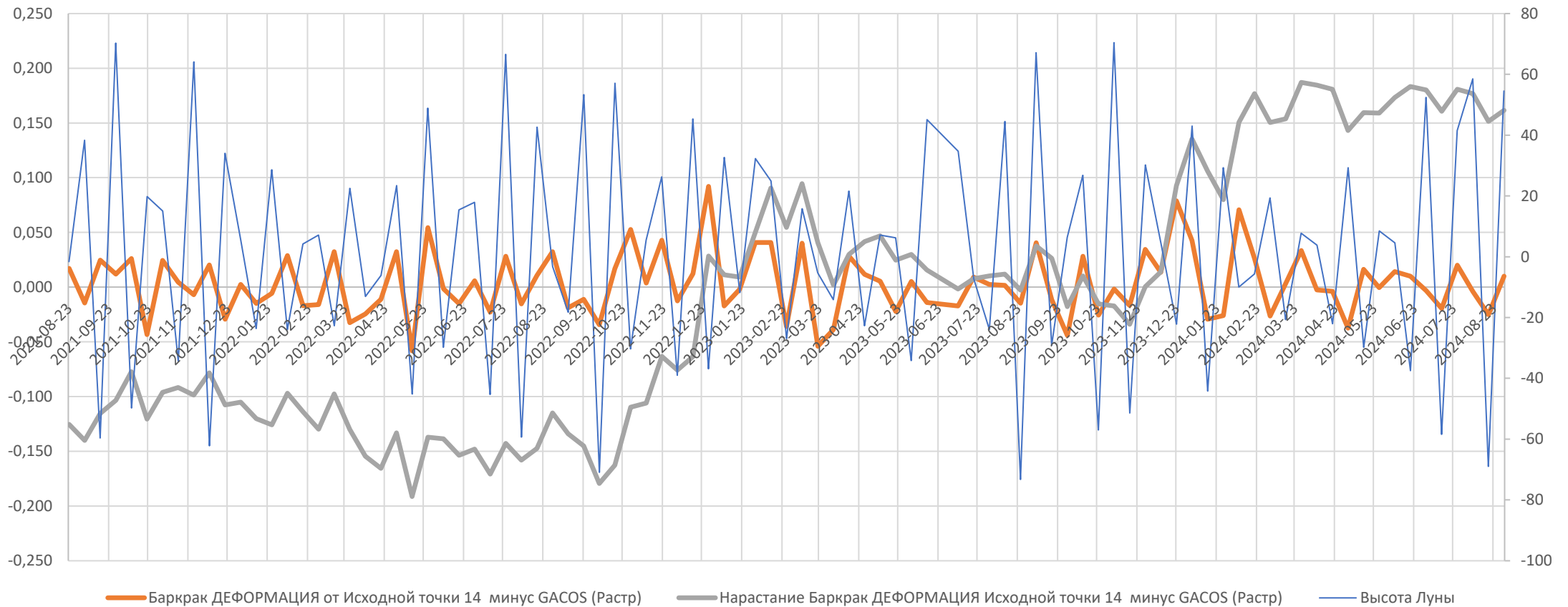
2022-2023, сентябрь



# SBAS, GAMMA, 112 снимков с 2021 по 2024 гг. с интервалом съёмки 12 дней.

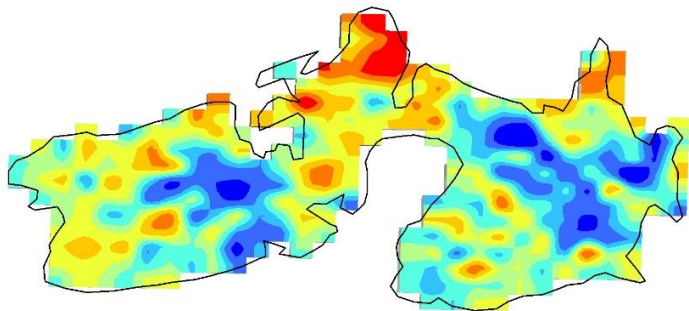
## Вертикальная деформация ледника Баркрак, после атмосферной коррекции и привязки к единой контрольной точке с высокой когерентностью

Сентябрь 2021 - Сентябрь 2024

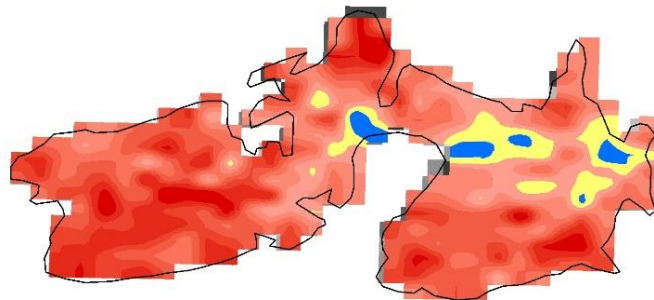


Период с 2021 09 04 по 2024 09 12. Средняя вертикальная деформация ледника Баркрак: +20 см

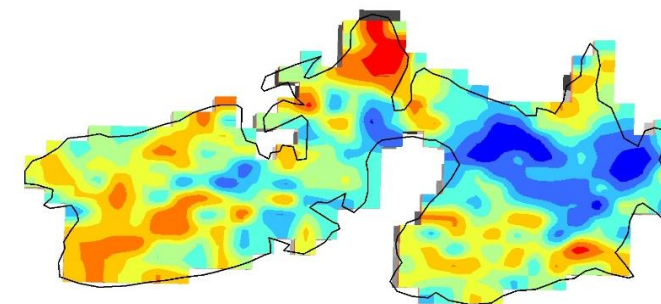
# Карты вертикальной деформации поверхности ледника Баркрак Средний за период с 2021 по 2024 гг.



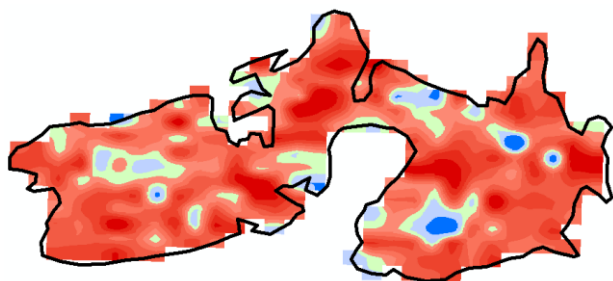
2021 09 04 – 2022 09 11,  
среднее: -0,016 м



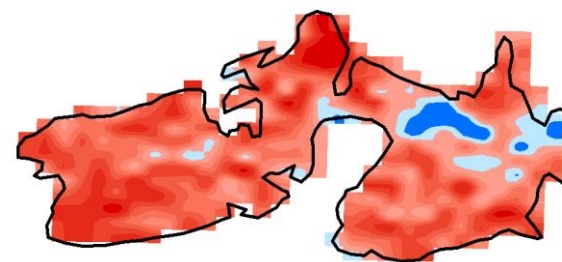
2022 09 11 – 2023 09 18,  
среднее: 0,157



2021 09 04 - 2023 09 18,  
Среднее: 0,140 м



2023 09 18 - 2024 09 24,  
среднее: 0,072 м



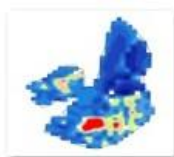
2021 09 04 - 2024 09 24,  
среднее: 0,205 м



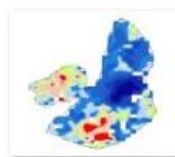
# Вертикальная деформация ледника Пахтакор за 2021 год. Интервал съемки 12 дней.

Синий цвет - вертикальное понижение поверхности ледника.

Красный цвет - вертикальное повышение поверхности ледника Пахтакор.



Pakhtakor\_Et14m  
GACOS\_S1AA\_20  
201226T012127\_  
20210107.jpg



Pakhtakor\_Et14m  
GACOS\_S1AA\_20  
210107T012127\_  
20210119.jpg



Pakhtakor\_Et14m  
GACOS\_S1AA\_20  
210119T012126\_  
20210131.jpg



Pakhtakor\_Et14m  
GACOS\_S1AA\_20  
210131T012126\_  
20210212.jpg



Pakhtakor\_Et14m  
GACOS\_S1AA\_20  
210212T012126\_  
20210224.jpg



Pakhtakor\_Et14m  
GACOS\_S1AA\_20  
210224T012125\_  
20210308.jpg



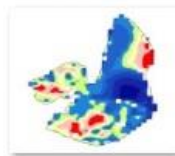
Pakhtakor\_Et14m  
GACOS\_S1AA\_20  
210308T012125\_  
20210320.jpg



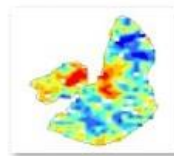
Pakhtakor\_Et14m  
GACOS\_S1AA\_20  
210320T012125\_  
20210401.jpg



Pakhtakor\_Et14m  
GACOS\_S1AA\_20  
210401T012125\_  
20210413.jpg



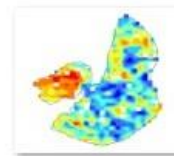
Pakhtakor\_Et14m  
GACOS\_S1AA\_20  
210413T012126\_  
20210425.jpg



Pakhtakor\_Et14m  
GACOS\_S1AA\_20  
210425T012127\_  
20210507.jpg



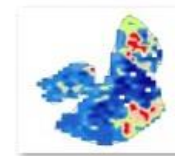
Pakhtakor\_Et14m  
GACOS\_S1AA\_20  
210507T012127\_  
20210519.jpg



Pakhtakor\_Et14m  
GACOS\_S1AA\_20  
210519T012128\_  
20210531.jpg



Pakhtakor\_Et14m  
GACOS\_S1AA\_20  
210531T012128\_  
20210612.jpg



Pakhtakor\_Et14m  
GACOS\_S1AA\_20  
210612T012129\_  
20210624.jpg



Pakhtakor\_Et14m  
GACOS\_S1AA\_20  
210624T012130\_  
20210706.jpg



Pakhtakor\_Et14m  
GACOS\_S1AA\_20  
210706T012131\_  
20210718.jpg



Pakhtakor\_Et14m  
GACOS\_S1AA\_20  
210718T012131\_  
20210730.jpg



Pakhtakor\_Et14m  
GACOS\_S1AA\_20  
210730T012132\_  
20210811.jpg



Pakhtakor\_Et14m  
GACOS\_S1AA\_20  
210811T012133\_  
20210823.jpg



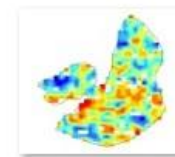
Pakhtakor\_Et14m  
GACOS\_S1AA\_20  
210823T012133\_  
20210904.jpg



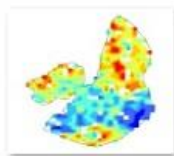
Pakhtakor\_Et14m  
GACOS\_S1AA\_20  
210904T012134\_  
20210916.jpg



Pakhtakor\_Et14m  
GACOS\_S1AA\_20  
210916T012134\_  
20210928.jpg



Pakhtakor\_Et14m  
GACOS\_S1AA\_20  
210928T012135\_  
20211010.jpg



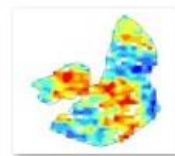
Pakhtakor\_Et14m  
GACOS\_S1AA\_20  
211010T012135\_  
20211022.jpg



Pakhtakor\_Et14m  
GACOS\_S1AA\_20  
211022T012135\_  
20211103.jpg



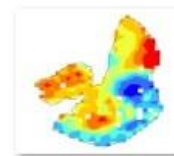
Pakhtakor\_Et14m  
GACOS\_S1AA\_20  
211103T012135\_  
20211115.jpg



Pakhtakor\_Et14m  
GACOS\_S1AA\_20  
211115T012135\_  
20211127.jpg



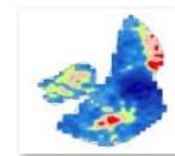
Pakhtakor\_Et14m  
GACOS\_S1AA\_20  
211127T012134\_  
20211209.jpg



Pakhtakor\_Et14m  
GACOS\_S1AA\_20  
211209T012134\_  
20211221.jpg

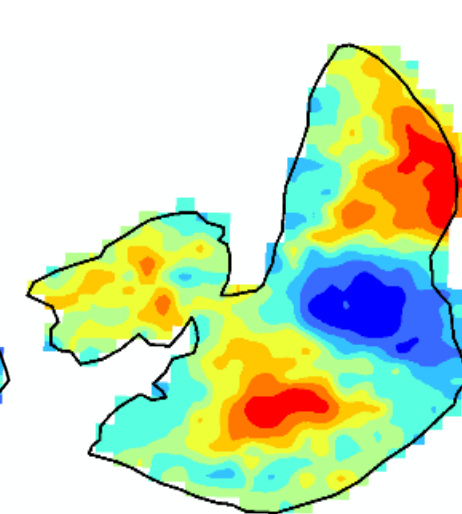
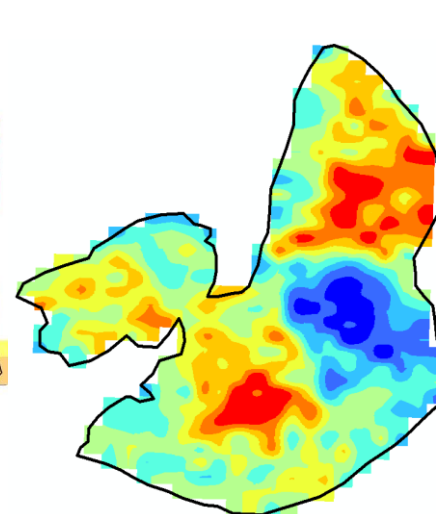
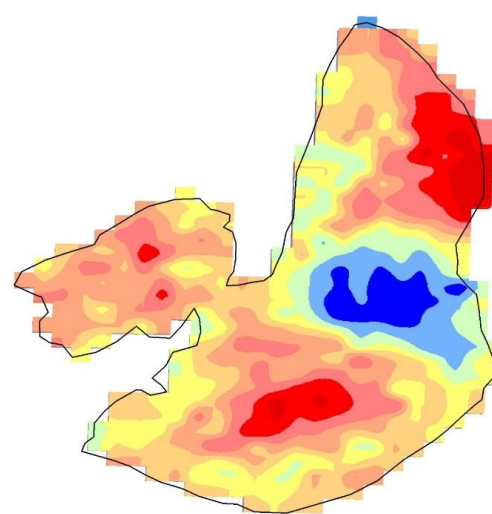
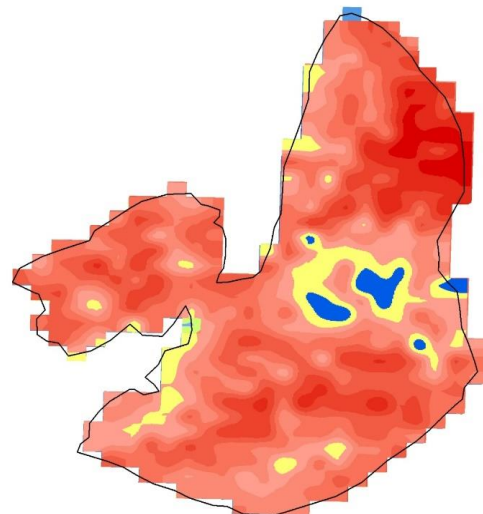
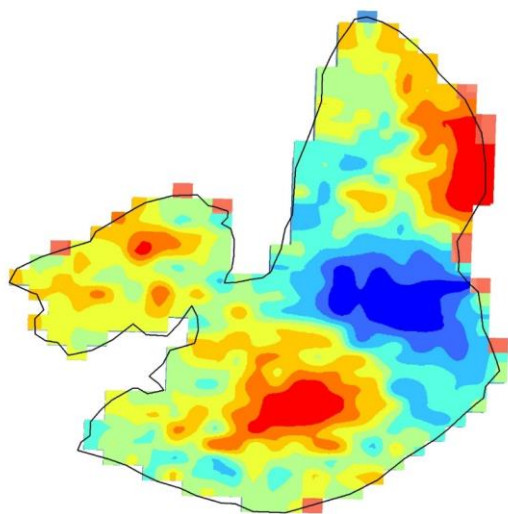


Pakhtakor\_Et14m  
GACOS\_S1AA\_20  
211221T012133\_  
20220102.jpg



SUM\_Pakhtakor\_E  
talon14mGACOS  
\_2021.tif.jpg

# Карты вертикальной деформации поверхности ледника Пахтакор за период с 2021 по 2024 гг.



Вертикальная деформация [м]

- -0,56 - -0,369
- -0,368 - -0,231
- -0,23 - -0,12
- -0,119 - -0,0433
- -0,0432 - +0,0218
- +0,0219 - +0,0831
- +0,0832 - +0,152
- +0,153 - +0,255
- +0,256 - +0,416

2021 09 04 – 2022 09 11,  
среднее: -0,001 м

Вертикальная деформация [м]

- -0,128 - -0,0262
- -0,0261 - +0,0449
- +0,045 - +0,0981
- +0,0982 - +0,144
- +0,145 - +0,192
- +0,193 - +0,248
- +0,249 - +0,311
- +0,312 - +0,397
- +0,398 - +0,519

2022 09 11 – 2023 09 18,  
среднее: 0,164 м

Вертикальная деформация [м]

- -0,636 - -0,338
- -0,337 - -0,135
- -0,134 - +0,0146
- +0,0147 - +0,11
- +0,111 - +0,2
- +0,201 - +0,307
- +0,308 - +0,456
- +0,457 - +0,635
- +0,636 - +0,886

2021 09 04 - 2023 09 18,  
среднее: 0,162 м

Вертикальная деформация [м]

- -0,47 - -0,28
- -0,27 - -0,14
- -0,13 - -0,047
- -0,046 - +0,026
- +0,027 - +0,089
- +0,09 - +0,15
- +0,16 - +0,21
- +0,22 - +0,28
- +0,29 - +0,42

2023 09 18 - 2024 09 24,  
среднее: 0,067 м

Вертикальная деформация [м]

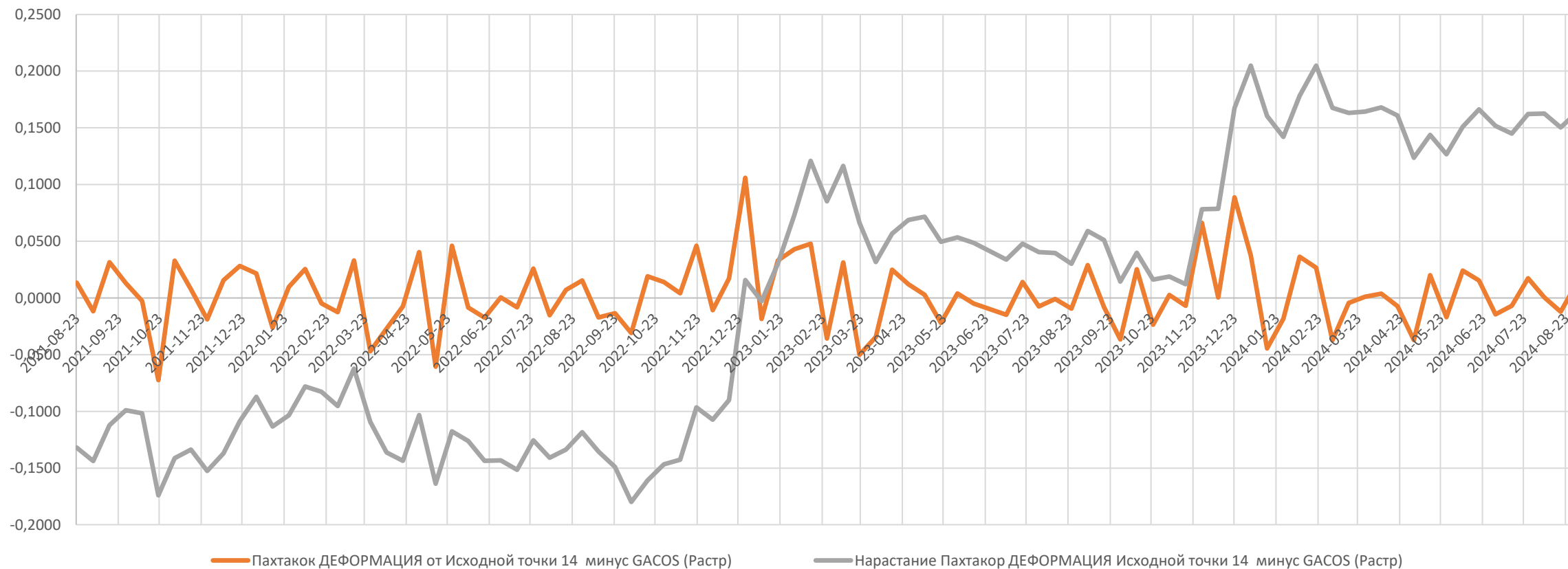
- -0,99 - -0,54
- -0,53 - -0,22
- -0,21 - +0,014
- +0,015 - +0,16
- +0,17 - +0,29
- +0,3 - +0,42
- +0,43 - +0,58
- +0,59 - +0,79
- +0,8 - +1,2

2021 09 04 – 2024 09 24,  
среднее: 0,225 м



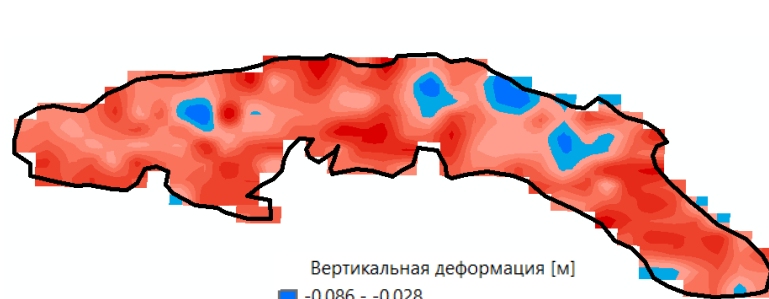
# Динамика изменения вертикальной деформации ледника Пахтакор с 2021-09-04 по 2024-09-12

Сентябрь 2021 - Сентябрь 2024

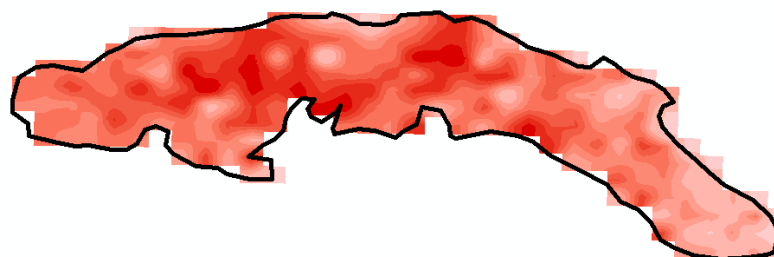


**Средняя вертикальная деформация ледника Пахтакор: +23 см**

# Карты вертикальной деформации поверхности ледника Текеш за период с 2021 по 2024 гг.



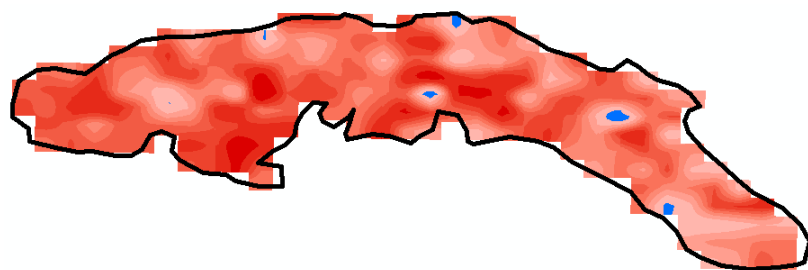
2021 09 04 – 2022 09 11,  
среднее: 0,121 м



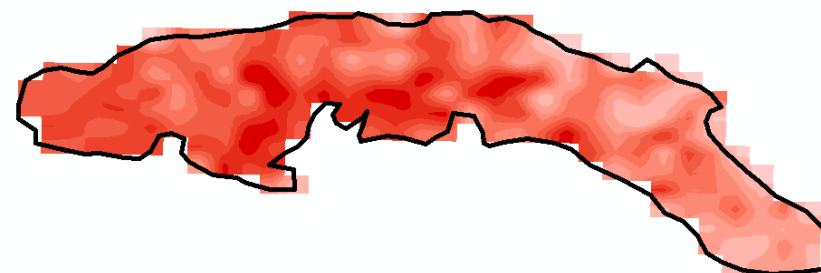
2022 09 11 – 2023 09 18,  
среднее: 0,324 м



2021 09 04 - 2023 09 18,  
среднее: 0,456 м



2023 09 18 - 2024 09 24,  
среднее: 0,187 м

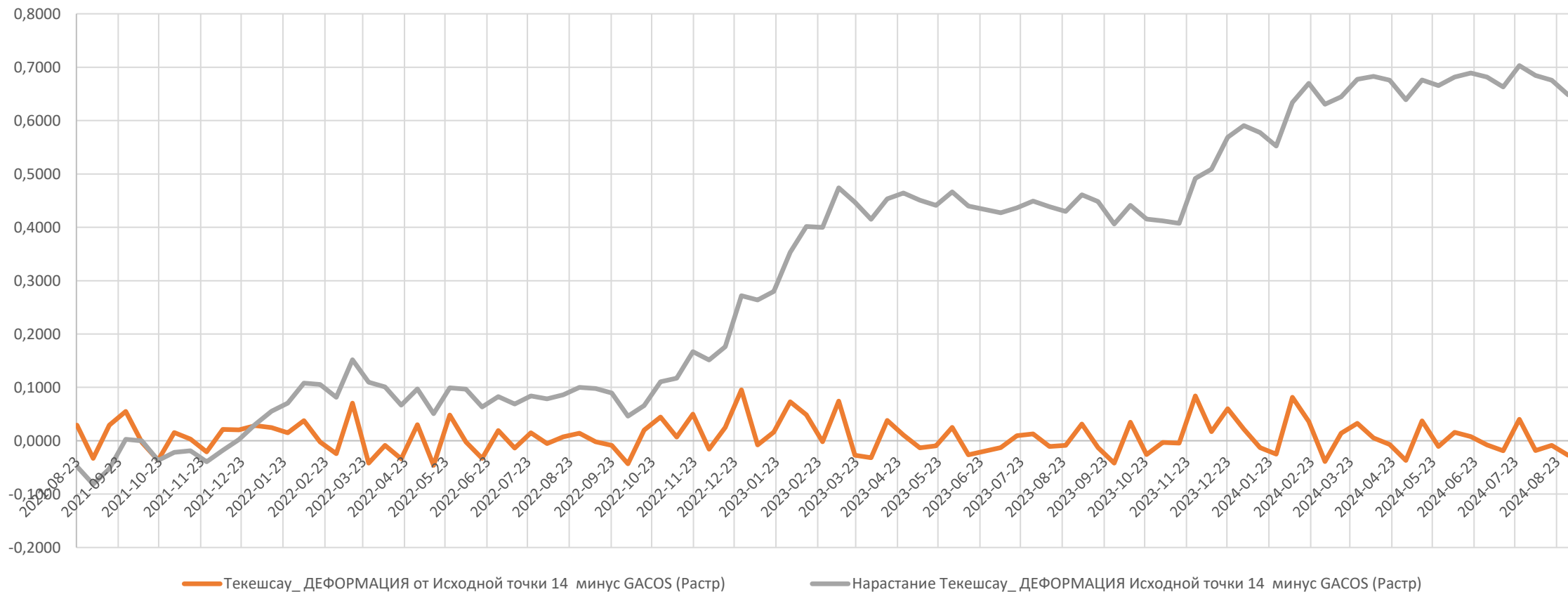


2021 09 04 – 2024 09 24,  
среднее: 0,634 м



# Динамика изменения вертикальной деформации ледника Текеш с 2021-09-04 по 2024-09-12

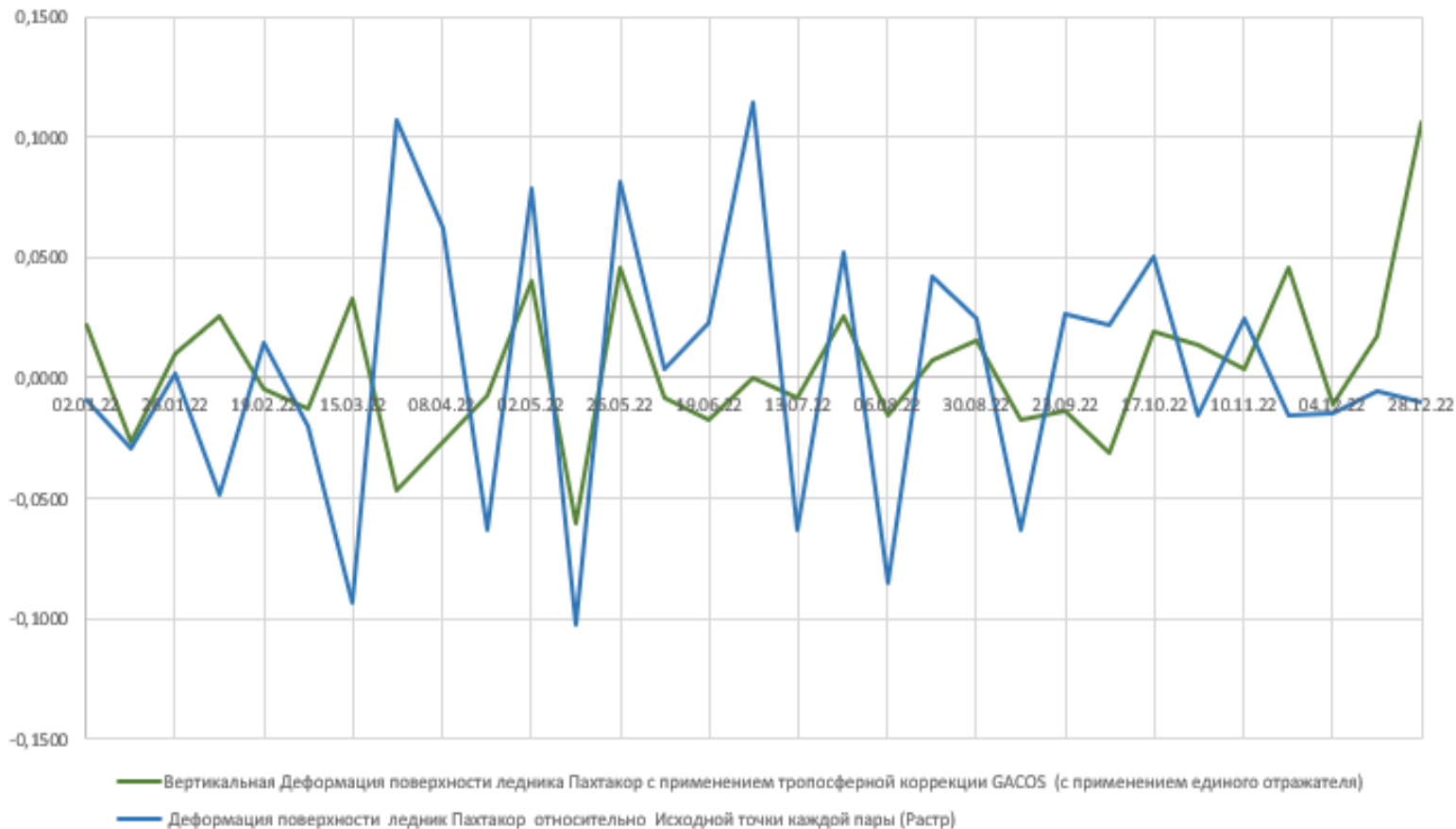
Сентябрь 2021 - Сентябрь 2024



**Средняя вертикальная деформация ледника Текеш: +63 см**

# Выводы

Вертикальная деформация ледника Пахтакор после применения Тропосферной коррекции и перенормировке к единому отражателю



Результаты показали реальные деформации ледников на единую дату перед периодом выпадения снега с сентября по сентябрь с 2021 по 2024 годы.

1. Проведение нормировки значений деформации для всех интерферограмм относительно единого отражателя уменьшает погрешность измерения деформации от 0 до 16 раз.

2. Применение тропосферной коррекции GACOS улучшает однородность рассчитанной деформации.

3. Выбор наименьшей временной базы, 12 дней и меньше (Sentinel - 1B ?, TerraSAR-X / PAZ) и исключение разрывов съемки позволяет увеличить когерентность в данных и, соответственно, достоверность результатов.

4. Для оценки сравнения с наземными наблюдениями необходима карта установки оборудования и абляционных реек, а также метеорологические наблюдения на леднике.

По мере увеличения продолжительности съемки Sentinel-1, появится возможность проводить более точную оценку сравнения с наземными данными

Диапазон значений деформации в местах установки реек на леднике Баркрак существенно больше, чем по данным Sentinel-1. За период с 2021 по 2023 гг. средняя деформация ледника по рейкам составила --0,59 м (убыль высоты поверхности ледника), радарная съемка показала +0,14 м прироста ледника.

# Анализ связи текущей деформации ледника Баркрак Средний с метеорологическими условиями на метеостанции Ойгаинг, 2100 м

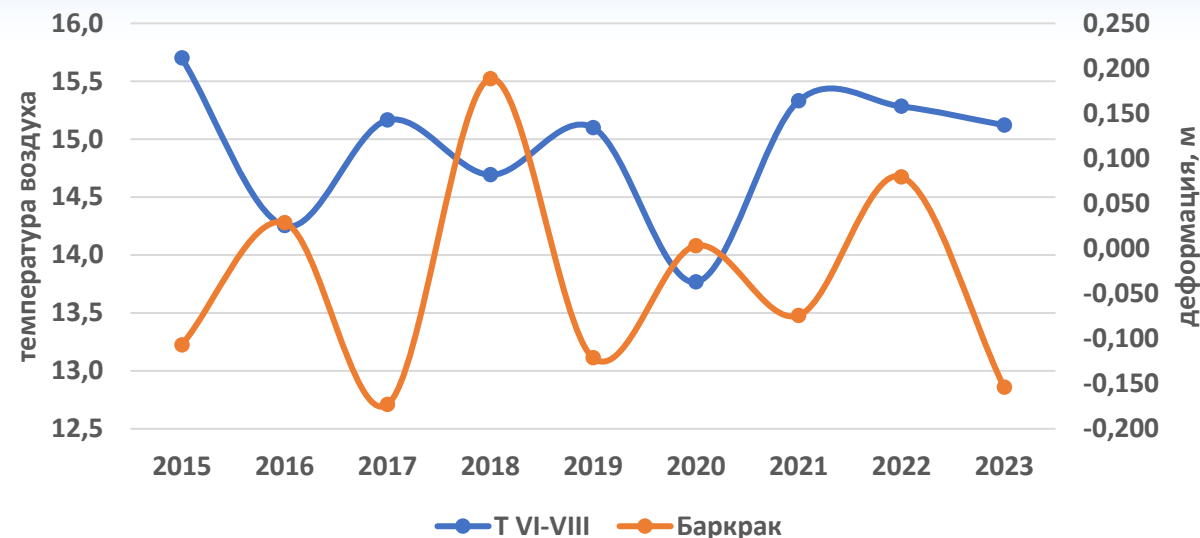
- T (VI-VIII) – средняя температура воздуха с июня по август;
- годовая сумма осадков;
- деформация поверхности ледника

## Карты погоды над ледниками

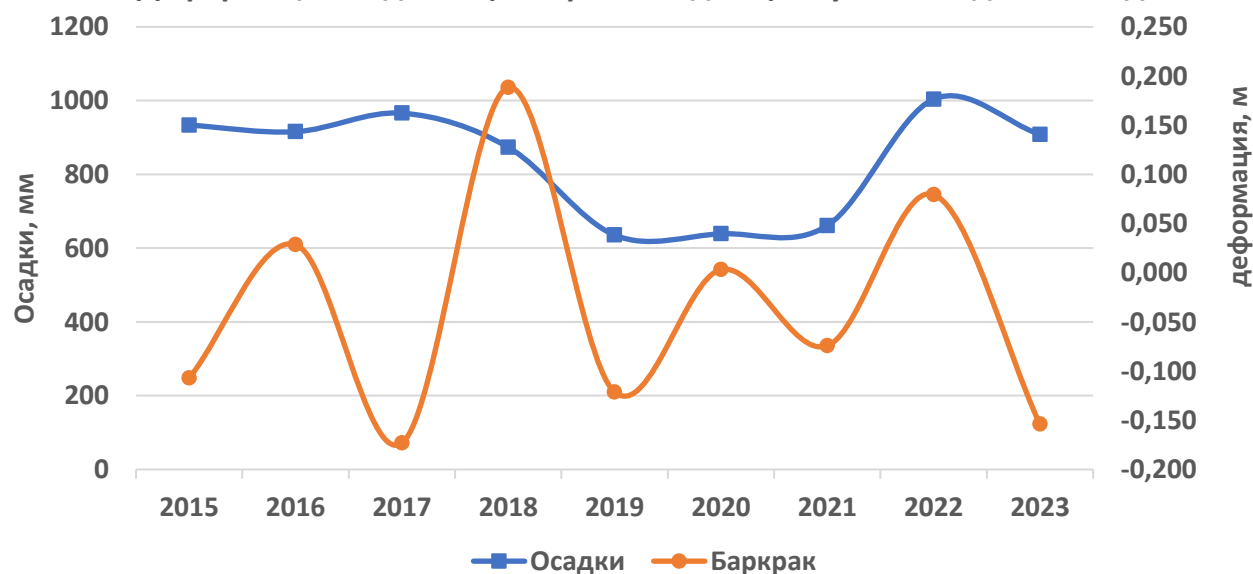
Пахтакор, 3700 м фирновая линия							мс Ойгаинг, 2100 м	
Дата	Температура	Осадки	влажность	ветер	давление	роса	Осадки	Темпер
29.10.2024	-10	снег	88%	6 км/час	1028mb	-13	1	-0.8
30.10.2024	-10	снег	93%	8 км/час	1028mb	-11		-0.5
31.10.2024								-0.7
01.11.2024	-7	снег	26%	2 км/час	1026mb	-23		1.8
02.11.2024	-7		95%	7 км/час	1030mb	-7	0.8	4.0
03.11.2024								3.9
04.11.2024	-3	снег	85%	9 км/час	1024mb	-5	9	4.3
05.11.2024							100	1.4
06.11.2024	-3	снег	98%	6 км/час	1021mb	-3	35	0.6
07.11.2024	-10	снег		9 км/час			9	-2.5
08.11.2024	-13	снег	88%	12 км/час	1033mb	-14	0.5	-2.2
09.11.2024	-12		91%	9 км/час	1032mb	-13		-1.0
10.11.2024	-13	снег	79%	4 км/час	1032mb	-16		-4.3

Градиент температуры = -0,5° на 100 м высоты

Деформация (12 дней) и средняя летняя температура (VI-VIII)

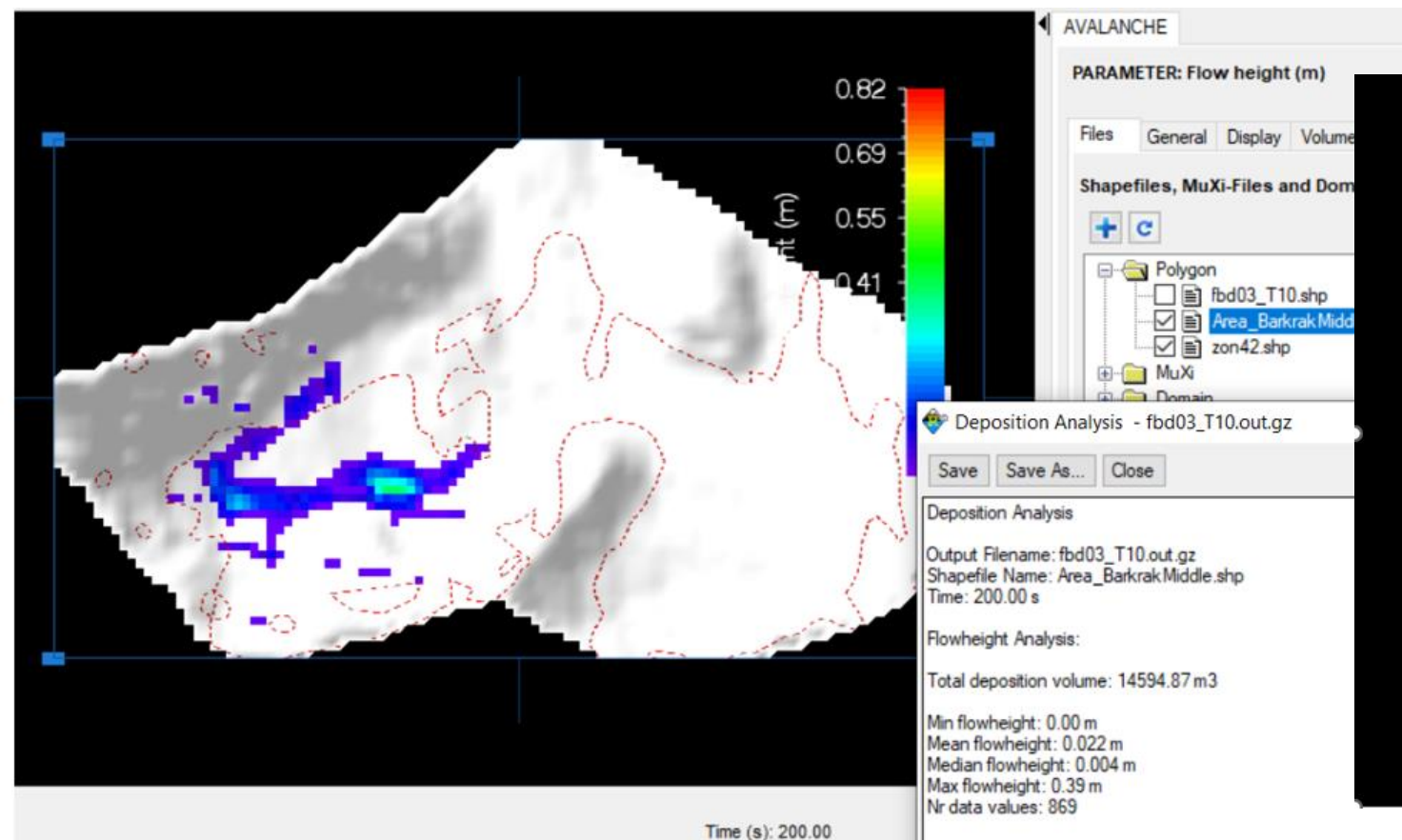


Деформация ледника (интервал 12 дней) и сумма осадков за год

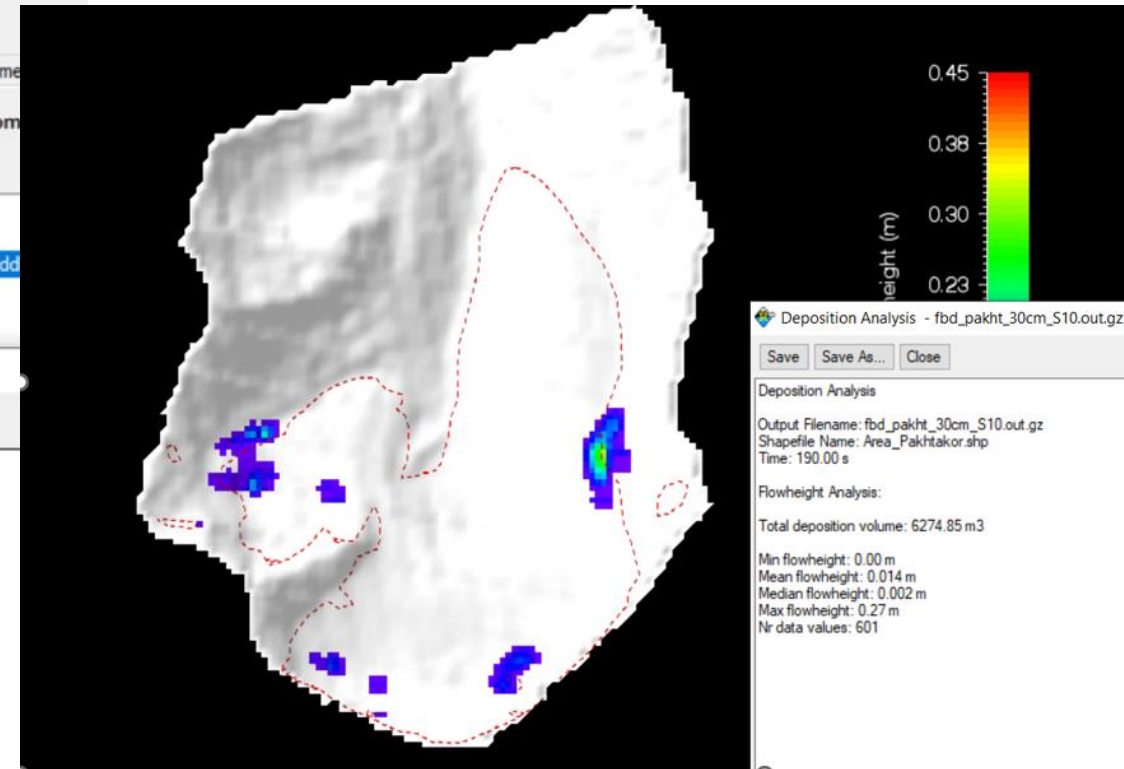




# Оценка возможной толщины лавинных отложений на леднике, RAMMS



**Л. Баркрак:** При толщине ступени отрыва от 30 до 70 см, Средняя толщина лавинных отложений достигает от 0,022 до 0,049 м; (медиана от 4 до 6 мм).  
Объем отложений: от 14,5 до 34,6 тыс. м<sup>3</sup>.



**Л. Пахтакор:** При толщине ступени отрыва от 30 до 70 см, Средняя толщина лавинных отложений достигает от 0,014 до 0,029 м; (медиана от 2 до 4 мм).  
Объем отложений: от 6,2 до 15 тыс. м<sup>3</sup>.

# Оценка скорости движения ледников (м/день)

## Исходные данные:

Амплитудные данные радиолокационной космической съемки Sentinel-1A GRDH за период с 2017 по 2023 гг. (август, сентябрь, октябрь, ноябрь)

Режим съемки: IW (Interferometric Wide swath)

Направление орбиты: нисходящая

Доступ: Copernicus Open Access Hub

Программное обеспечение: SNAP (ESA)

## Метод: Offset Tracking

(Отслеживание смещения) - метод, при котором измеряется движение объекта между двумя изображениями с помощью оптимизации взаимной корреляции интенсивности участков.

Полевые измерения в 1961 г. (Каталог ледников СССР): «скорость движения л.Баркрак наблюдалась в западной части ледника и оказалась равной 21 м/год», ~ 0,057 м/сутки

ID-скорость в ден	Максиму	Минимум	Среднее	Стандарт
11авг_4сен_2021				
Баркрак	0.038	0.004	0.016	0.010
Пахтакор	0.030	0.014	0.023	0.004
Текешсай	0.041	0.017	0.029	0.007
4сен_10окт_2021				
Баркрак	0.065	0.017	0.052	0.011
Пахтакор	0.072	0.033	0.057	0.010
Текешсай	0.046	0.011	0.032	0.010
6авг_30авг_2022				
Баркрак	0.043	0.013	0.021	0.005
Пахтакор	0.064	0.020	0.039	0.008
Текешсай	0.057	0.029	0.045	0.005
11сен_5окт_2022				
Баркрак	0.099	0.017	0.047	0.021
Пахтакор	0.140	0.003	0.051	0.032
Текешсай	0.101	0.018	0.063	0.023
1авг_25авг_2023				
Баркрак	0.029	0.024	0.027	0.001
Пахтакор	0.040	0.020	0.033	0.005
Текешсай	0.028	0.017	0.021	0.002
6сен_30сен_2023				
Баркрак	0.030	0.009	0.016	0.004
Пахтакор	0.044	0.013	0.030	0.007
Текешсай	0.039	0.005	0.020	0.009
12окт_5ноябрь_2023				
Баркрак	0.078	0.007	0.043	0.018
Пахтакор	0.065	0.024	0.044	0.010
Текешсай	0.120	0.024	0.082	0.027
20июн_2июл_2024				
Баркрак	0.125	0.045	0.072	0.017
Пахтакор	0.154	0.058	0.106	0.024
Текешсай	0.246	0.124	0.221	0.028
15 мая_27мая_2024				
Баркрак	0.133	0.083	0.115	0.010
Пахтакор	0.225	0.046	0.170	0.041
Текешсай	0.103	0.064	0.077	0.007
6октябрь_18октябрь_2024				
Баркрак	0.134	0.041	0.093	0.022
Пахтакор	0.157	0.007	0.063	0.040
Текешсай	0.116	0.045	0.088	0.020

**Благодарим за внимание**

**Работа выполнена в рамках проекта IL-5221091352, финансируемого Агентством инновационного развития Республики Узбекистан**