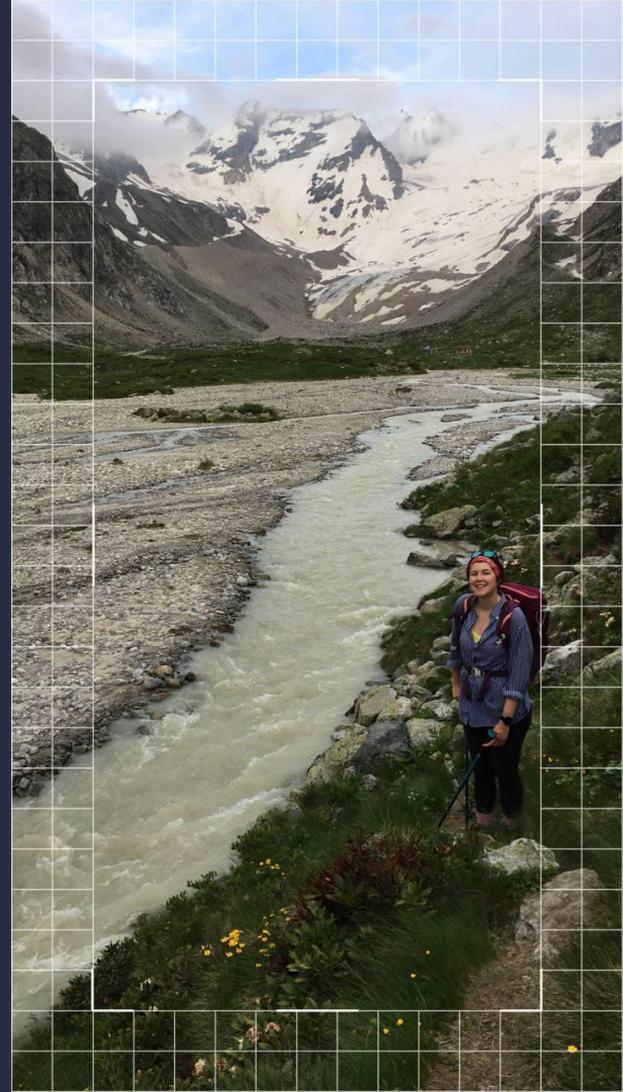


Двадцать вторая международная конференция "СОВРЕМЕННЫЕ  
ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"  
13 ноября, 2024

## Возможности использования данных дистанционного зондирования в горной гидрологии



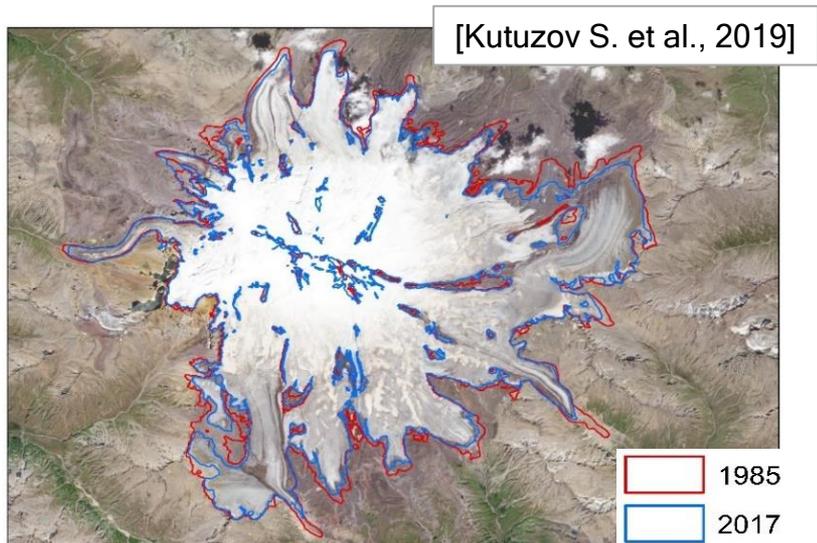
Павлюкевич (Корнилова) Е.Д., Елагина Н.Э., Крыленко И.Н.,  
Гафуров А.А., Мотовилов Ю.Г.



## Актуальность

Применение данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) является особенно актуальным для труднодоступных горных территорий.

В связи с высокой чувствительностью горных регионов к изменению климата, зачастую ДДЗ используются для изучения динамики природных объектов, расположенных в пределах горных водосборов, таких как приледниковые озера, ледники и другие.



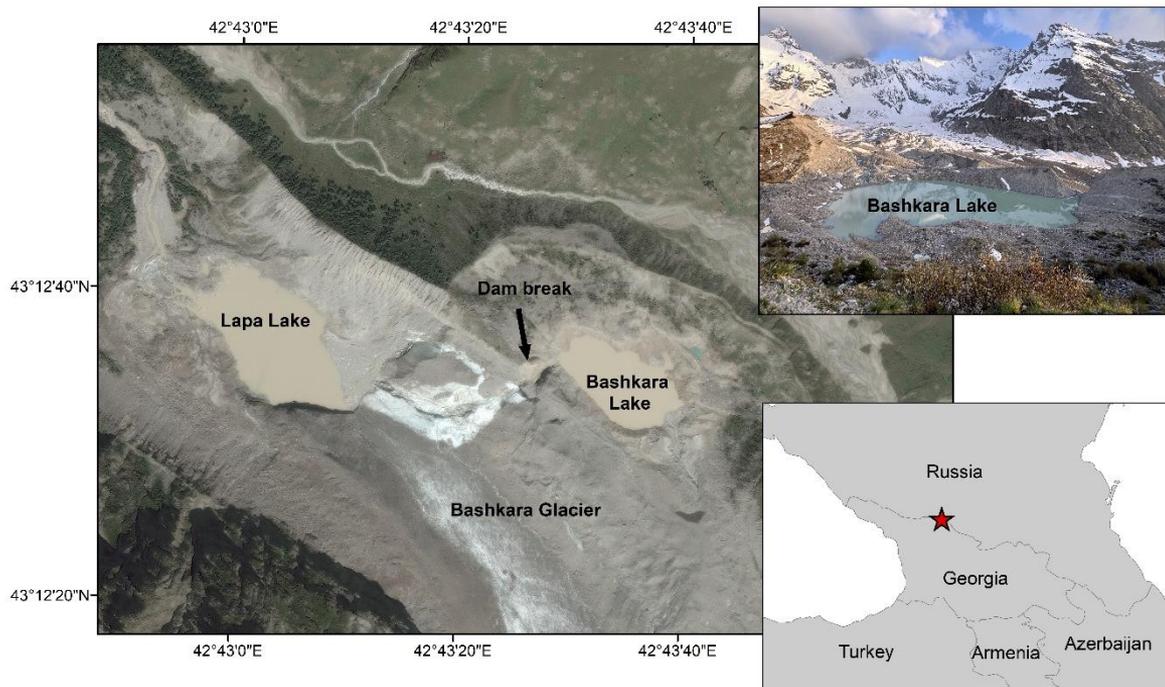
Сокращение площади оледенения Кавказа



Дистанционный мониторинг пульсации ледника Русского географического общества в 2000-2011 гг.

# Мониторинг приледниковых озер

В горных районах наблюдается рост темпов деградации оледенения, что приводит к активизации процесса формирования прогляциальных озер и увеличению частоты их прорывов, поэтому так важен их мониторинг.



Расположение системы Башкаринских озер



Прорыв озера Башкара  
1 сентября 2017 года

## Мониторинг приледниковых озер

- Изменение площади Башкаринских озер путем сопоставления космических снимков в период с 2017 по 2020 г.
- Оценка отступления ледника Башкара

Date	Спутниковый снимок	Разрешение, m	Объекты исследования
01.08.2017	Pleiades	0.5	Изменения площади озер
03.09.2017	SPOT 6	1.5	
29.07.2018	Sentinel-2	10	
27.07.2019	Sentinel-2	10	
16.07.2020	Sentinel-2	10	
18.07.2021	Sentinel-2	10	
28.07.2022	Sentinel-2	10	
26.07.2023	Sentinel-2	10	
30.07.2024	Sentinel-2	10	Оценка отступления ледника
13.08.2017	Sentinel-2	10	
30.09.2017	Sentinel-2	10	
28.09.2024	Sentinel-2	10	

Набор данных дистанционного зондирования

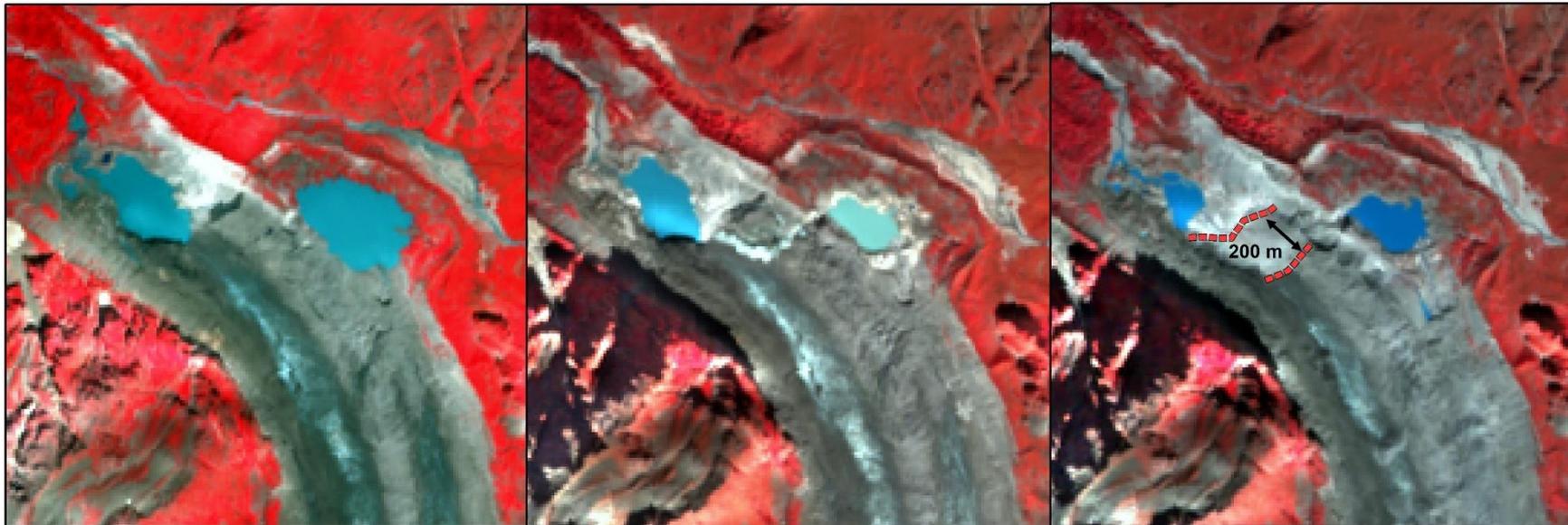
## Мониторинг приледниковых озер

Из-за высокой степени заморенности ледника трудно оценить уменьшение его площади. Однако на снимках отчетливо видно отступление языка ледника, которое с 2017 по 2024 год составило около 210 метров.

13.08.2017

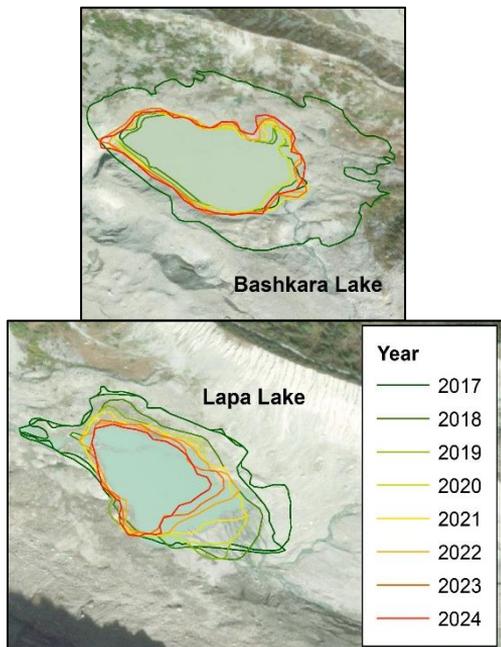
30.09.2017

28.09.2024

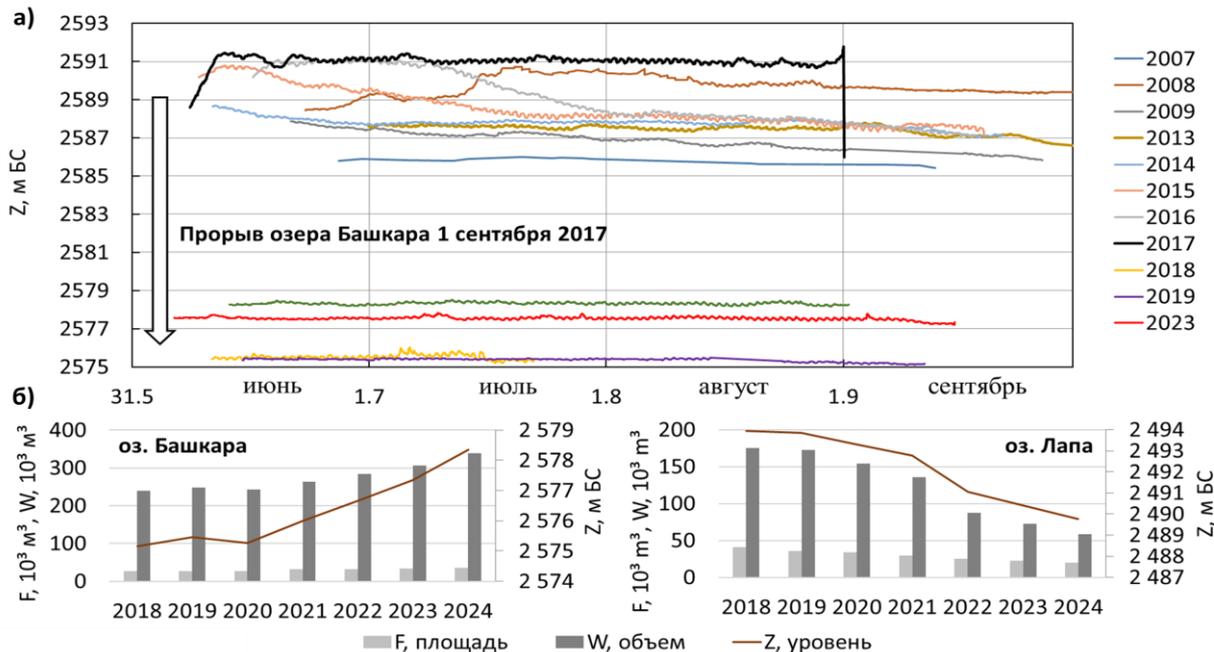


# Мониторинг приледниковых озер

После прорыва 1 сентября 2017 года система озер продолжила развиваться и изменяться на фоне интенсивной деградации ледника Башкара. За семь лет площадь озера Лапа уменьшилась на 62%, в то время как площадь озера Башкара увеличилась на 22%.



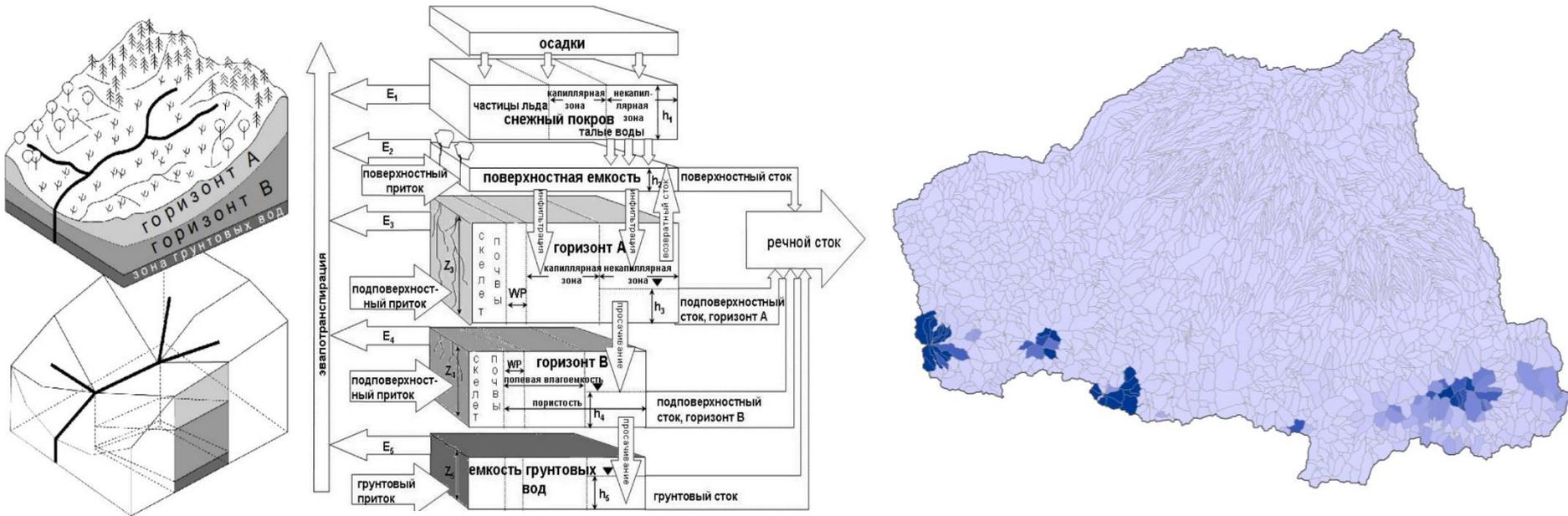
Изменение площади озер Башкара и Лапа



а) Колебания уровня воды в озере Башкара в теплые периоды 2007-2024 гг.,  
б) Изменение площади, уровня и объема воды в озерах в 2018-2024 гг.

# Д33 – источник для валидации моделей формирования стока

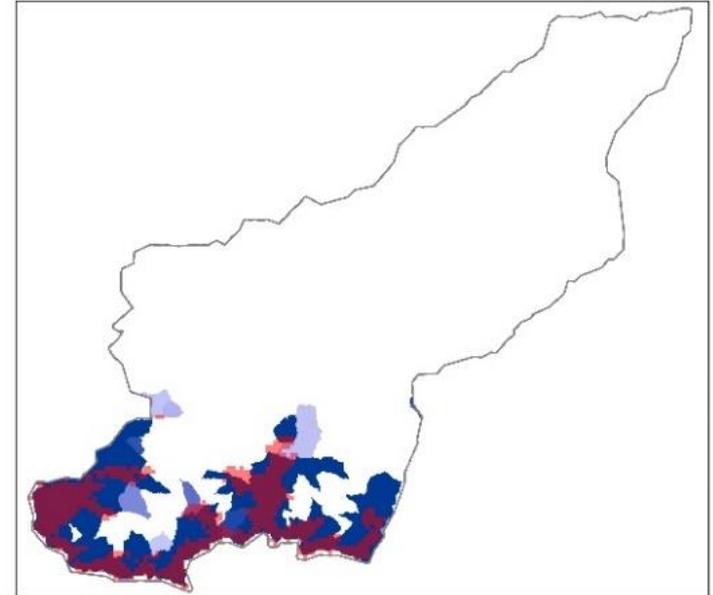
В исследовании использовались данные о снежном покрове со снимков спектрорадиометра MODIS для валидации модели ECOMAG (Motovilov et al., 1999) на примере выдающегося по водности 2017 г.



Схематизация речного бассейна и вертикальная структура гидрологической модели для элементарной площадки [Мотовилов, 2016]

Суммарные снегозапасы на водосборе, мм

- Данные по результатам моделирования отображаются по удельным водосборам, средняя площадь которых  $9.9 \text{ км}^2$ , и внутри удельного водосбора все модельные характеристики осреднены, а площадь пиксела космического снимка  $0.25 \text{ км}^2$  -> косвенная оценка качества моделирования
- Снежный покров на склонах гор характеризуется значительной пространственной неоднородностью, в то время как ЦМР, лежащая в основе модели не настолько детальная -> погрешность



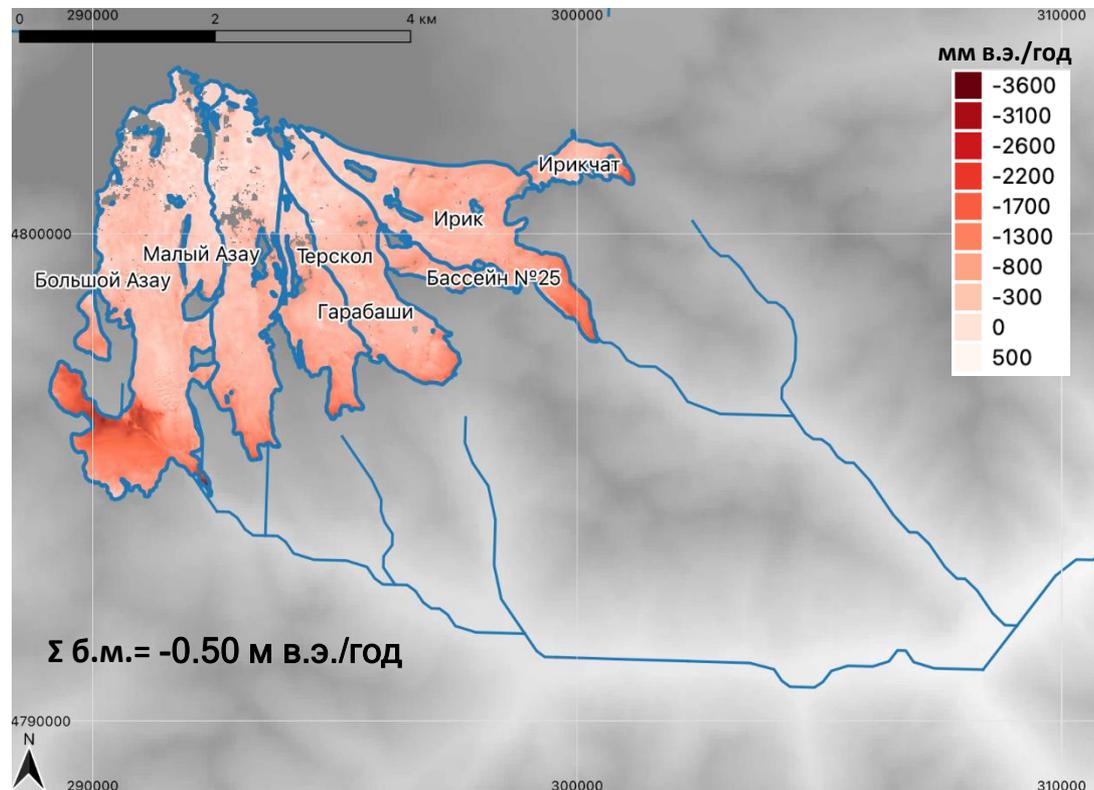
Пространственное распределение  
снежного покрова по данным  
MODIS и результатам  
моделирования

# Геодезический баланс массы ледников

Геодезический баланс массы ледников Эльбруса с 1997 по 2017 гг. (Kutuzov et al., 2019; Elagina et al., 2024).

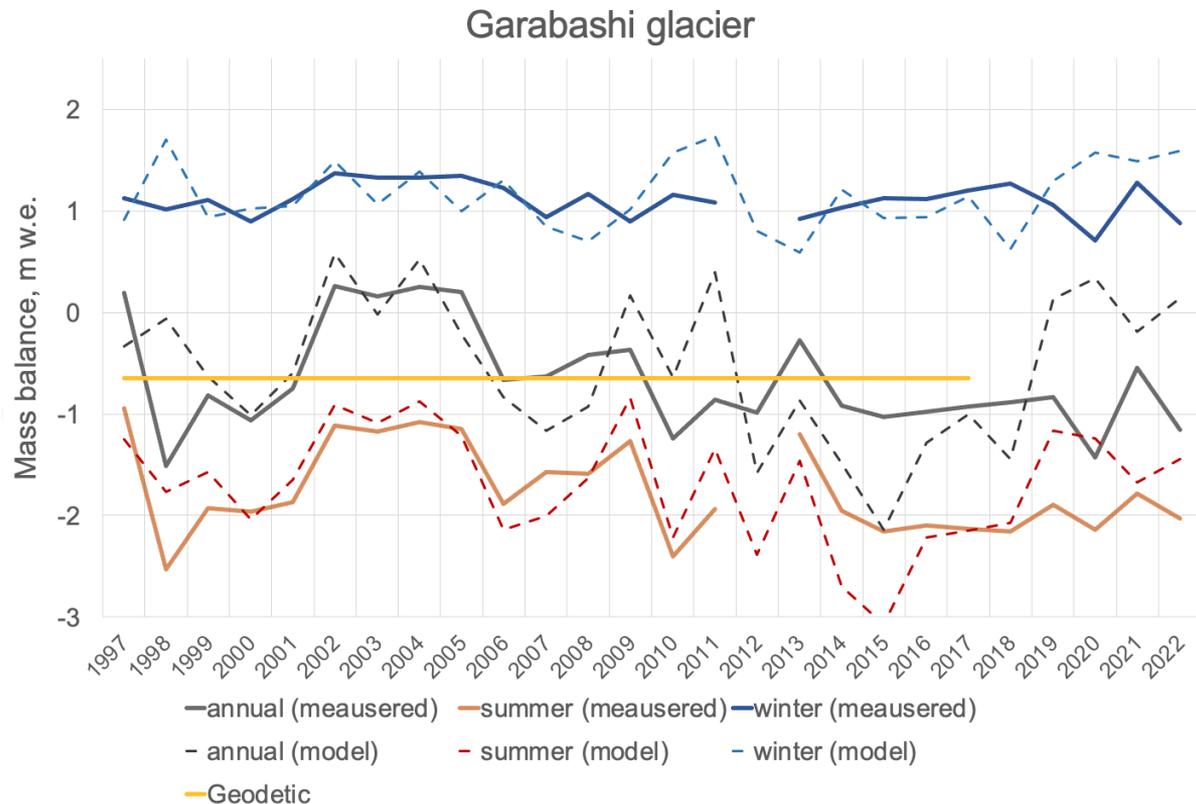
Разность двух ЦМР:

- ЦМР Pléiades 2017 года, полученная в рамках инициативы "Обсерватория ледников Pléiades" Французского космического агентства (CNES)
- ЦМР 1997 года с разрешением 0,5 м, полученная географическим факультетом МГУ (Золотарев, Харьковец, 2000)



Геодезический баланс массы ледников Эльбруса в бассейне Баксана, осредненный за 20 лет с 1997 по 2017 гг.

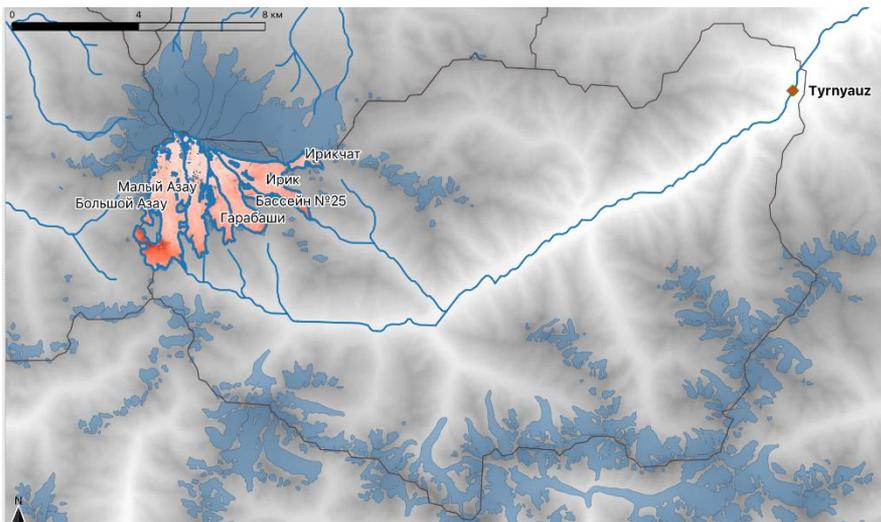
Сопоставление модельных балансовых рядов (энергобалансовая модель A-Melt)  
с геодезическим балансом массы (-0.65 м в.э./год)



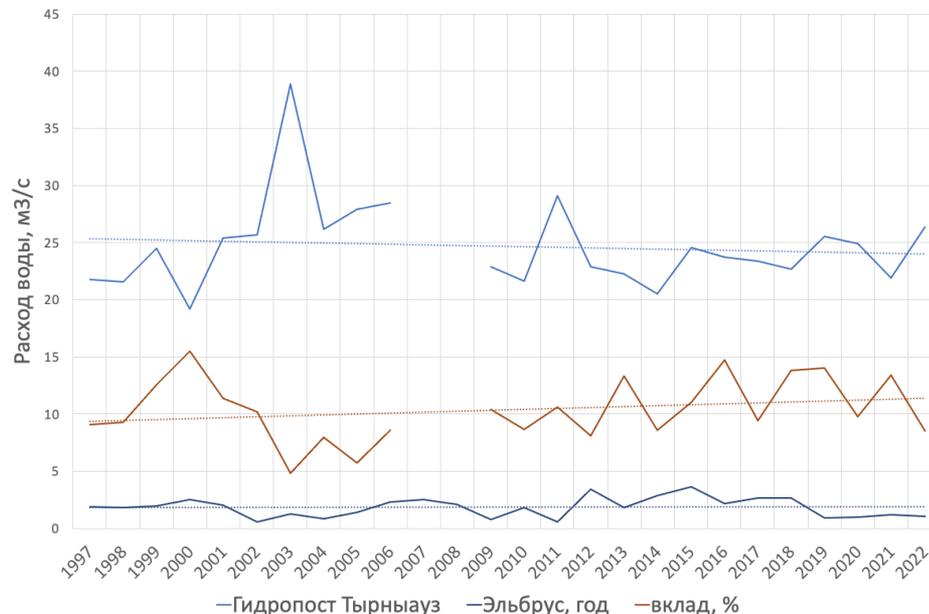
# Ледниковый сток с Эльбруса по модели A-Melt

Смоделированный общий сток с ледников Эльбруса в бассейне реки Баксан: Большой Азау, Малый Азау, Гарабаши, Терскол, Бассейн №25, Ирик, Ирикчат.

Стоком считается талая вода, покидающая ледник, за исключением той, что повторно замерзла в толще ледника.



Высокогорная часть бассейна р. Баксан



Среднегодовой расход воды и ледникового стока в створе гидропоста г. Тырныауз

1. ДЗЗ позволяет анализировать динамику различных природных объектов, расположенных в пределах горных территорий, включая приледниковые озера.

В данной работе исследовалось изменение площади Башкаринских озер путем сопоставления космических снимков в период с 2017 по 2020 г. За семь лет площадь озера Лапа уменьшилась на 62%, в то время как площадь озера Башкара увеличилась на 22%. Данные результаты подтверждаются наблюдениями за динамикой уровня воды в обоих озерах и повышают вероятность повторного прорыва озера при дальнейшем отступании ледника.

2. ДЗЗ является дополнительным источником для валидации моделей формирования стока.

Модель ECOMAG корректно имитирует внутригодовой ход изменения снежного покрова. Результаты моделирования о покрытости снегом на конец августа хорошо совпадают с данными MODIS и в целом соответствуют среднегодовому положению климатической снеговой линии.

3. ЦМР позволяет дистанционно оценивать изменение высоты поверхности и объема ледника за определенный период, что дает возможность определить среднюю годовую величину баланса массы.

Данным методом было оценено среднее значение потери массы ледников, питающих реку Баксан, которое с 1997 по 2017 гг. составило -0.50 м в.э./год, а вклад ледниковой компоненты с ледников Эльбруса в речной сток Баксана в г. Тырныауз составляет 10%, с тенденцией увеличения ледникового стока на 21,9%/10 лет по модельным данным.