

# Гидрологический и гляциологический мониторинг высокогорных территорий: опыт ФГБУ «ВГИ»

**Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Калов Р.Х.**

**ФГБУ «Высокогорный геофизический институт»**

VIII Всероссийский объединенный метеорологический и гидрологический съезд  
(ВОМГС-8),

посвященный 190-летию гидрометеорологической службы России  
29 – 31 октября 2024 года, г. Санкт-Петербург

# **Цели и задачи гидрологического и гляциологического мониторинга высокогорных территорий**

Развитие и модернизация технологии мониторинга последствий изменения климата, и активизации разрушительных процессов в нивально-гляциальной зоне, мониторинга пространственно-временных систем селевых бассейнов с целью оценки селевой активности и опасности возможных селепроявлений, оценки опасной динамики ледников, и разработки методического руководства наблюдений за динамикой горных ледников и опасными природными процессами в высокогорной зоне.

Разрабатываемые технологии мониторинга пространственно-временных систем селевых бассейнов и ледников должны обеспечить: заинтересованные учреждения новым видом информационных услуг путем повышения эффективности организации анализа, поиска, хранения и дополнения информации по селевым бассейнам и ледникам с оценкой активности и опасности возможных селепроявлений в селевых бассейнах и разрушительных процессов в ледниковой зоне.

В разработке темы важным моментом является применение беспилотных воздушных судов (БВС) – в ФГБУ «ВГИ» приобретён квадрокоптер DJI Mavic Air 2

# DJI Mavic Air 2 Fly More Combo



Вес – 0,43 кг, время полёта – 21 мин, дальность передачи сигнала – 4 км, высота полёта над точкой запуска – 500 м, фото-видеокамера: видео в формате 4K / 60fps и фотографии с разрешением 48 Мп.

# Комплексный мониторинг высокогорной зоны

Основными объектами мониторинга высокогорной зоны являются ледники, очаги формирования опасных процессов (ОП), зоны транзита и аккумуляции ОП, последствия воздействия ОП на объекты и рекреационные зоны. Вследствие того, что воздействие изменения климата приводит к деградации оледенения, в высокогорной зоне на освободившихся от ледников участках склонов и долин формируются очаги селей, оползней, обвалов, прорывоопасные озёра. В свою очередь ОП влияют на динамику ледников, приводя к наступанию ледников, обвалам и сходам ледников, ледяным и ледово-каменным лавинам. Поэтому мониторинг должен быть комплексным и охватывать всю площадь высокогорной зоны. Такая задача может быть решена только на основе анализа разновременных космоснимков.

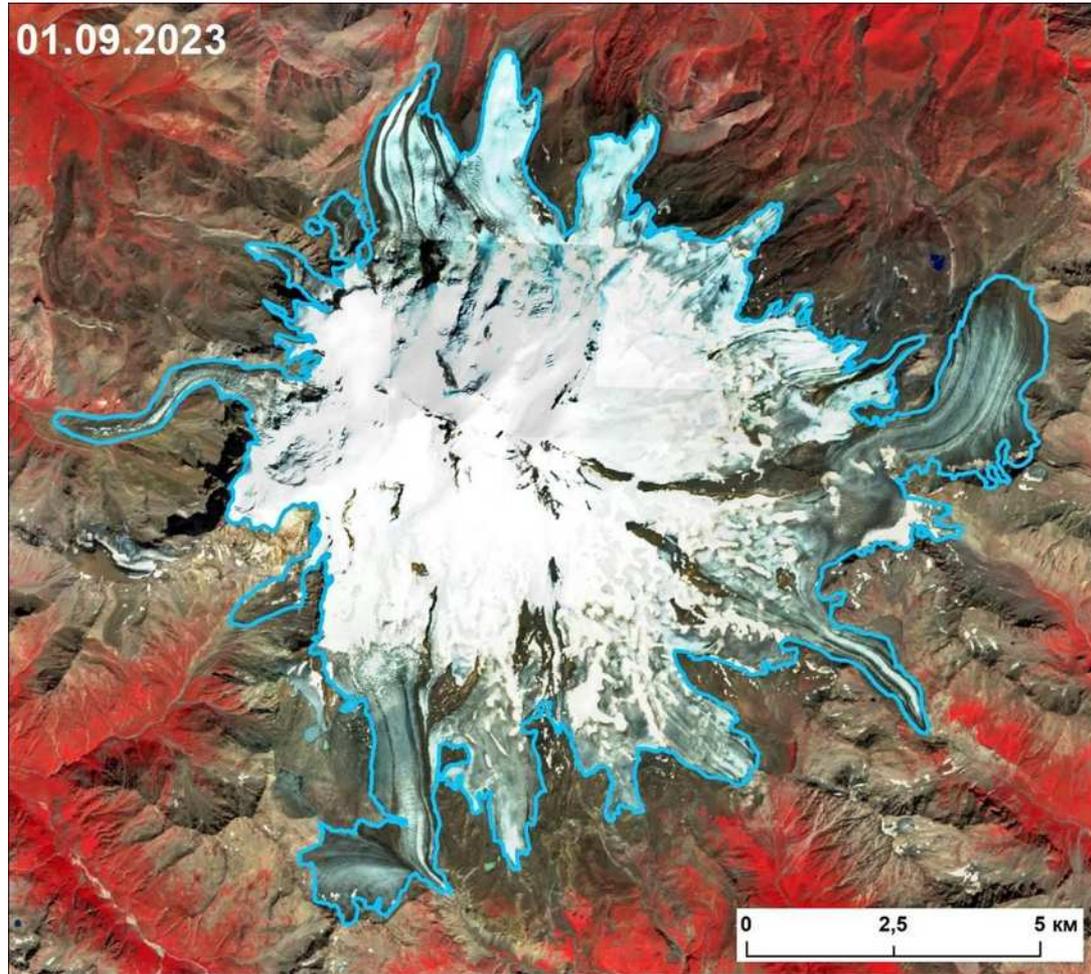
Комплексный мониторинг высокогорной зоны представляет собой систему наблюдений, включающую следующие основные элементы:

- космический мониторинг на основе анализа разновременных космоснимков;
- аэровизуальные наблюдения с борта вертолётa с применением фото-видеоаппаратуры и радаров;
- аэрофотосъёмка (АФС) с применением БВС;
- наземные наблюдения с применением геодезических систем, гидрологических приборов и георадаров, фото и видеоаппаратуры.

В результате космического мониторинга выбираются объекты для проведения аэрофотосъёмки, а также маршруты к точке запуска и оптимальные точки запуска БВС.

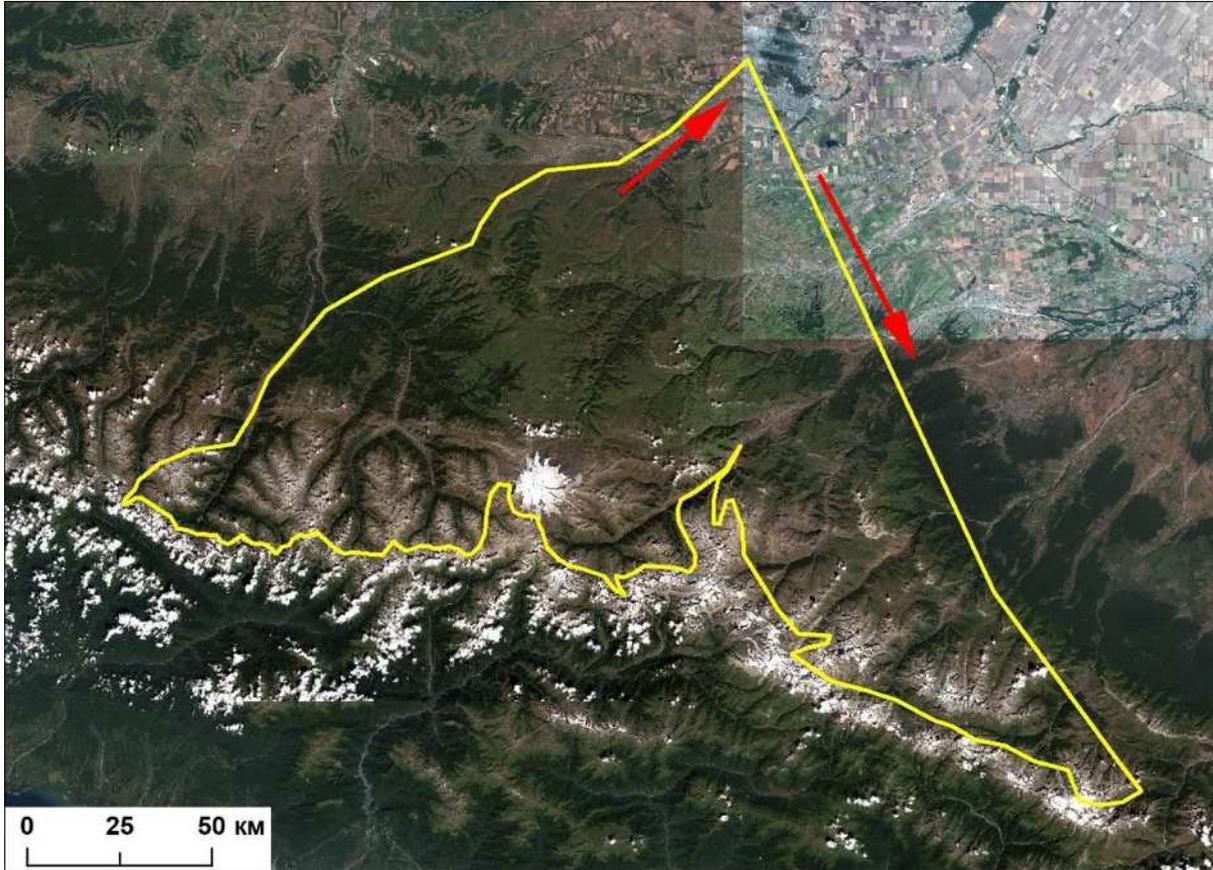
# Космический мониторинг с применением космоснимков Sentinel-2

На основе данных космоснимков Sentinel-2 с сайта <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser> проведена оценка темпов деградации ледников Эльбруса. В программе ArcMap построены электронные слои внешних границ ледников Эльбруса. Ниже показаны границы ледников Эльбруса в 2023 г.



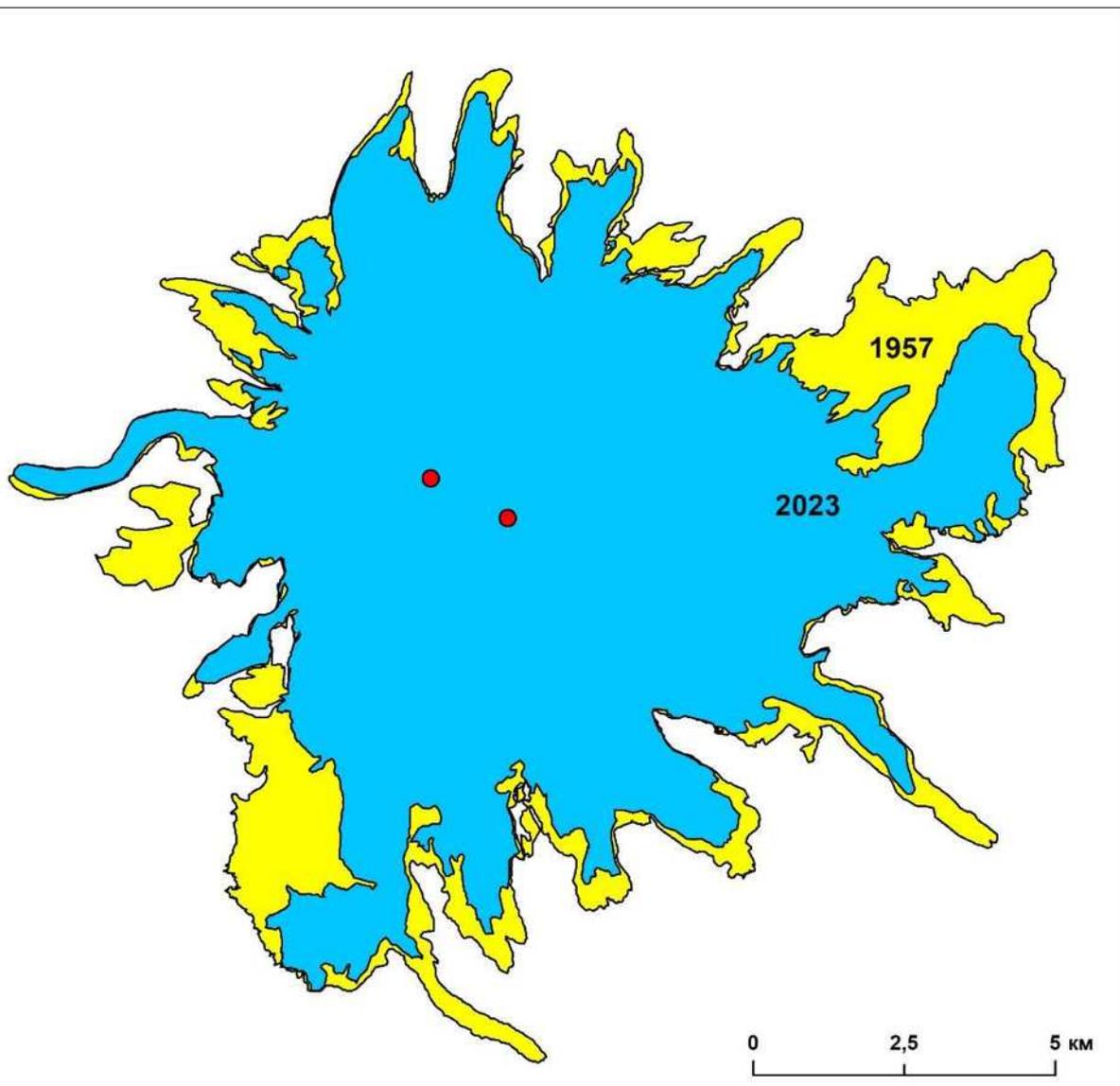
Для оценки изменений площади ледников за период 1957-2023 использованы аэрофотоснимки 1957 г.

**Исследования динамики ледников и озёр на Центральном и Западном Кавказе  
проводилось по результатам аэровизуальных наблюдений (19.09.2023)  
и дешифрирования космоснимков**



Маршрут облёта высокогорной зоны на вертолёте компании Heliaction. Протяжённость маршрута 908 км, сфотографированы ледники, озёра, проявления обвальных процессов. По этим данным уточнены границы ледников, озёр (проведена оценка опасности прорыва), зон поражения обвальными процессами.

# Деградация оледенения Эльбруса за 1957-2023 гг.



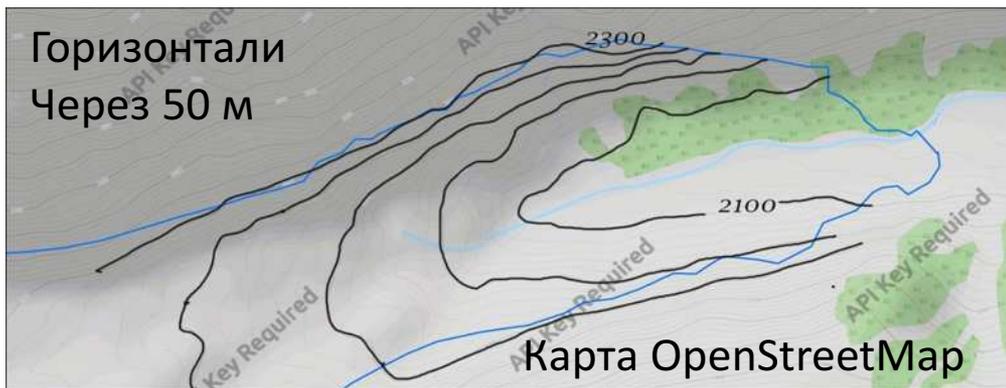
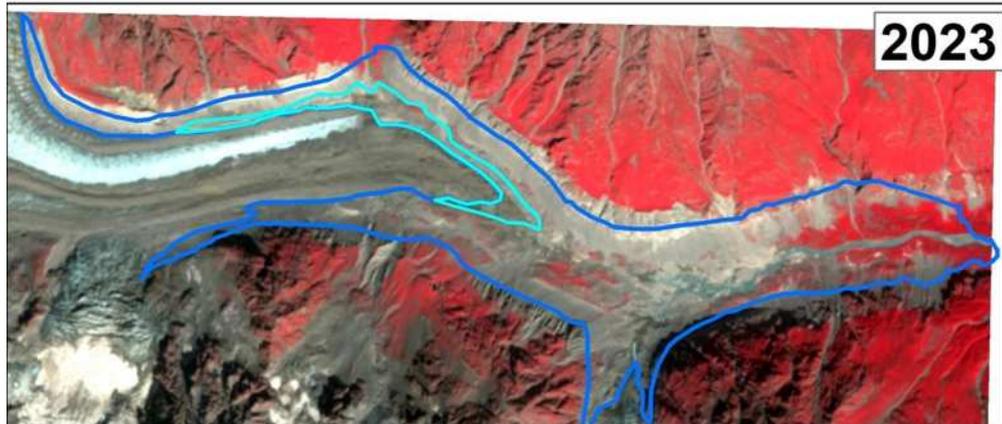
Убыль площади ледников Эльбруса за 1957-2023 гг. составила  $30,0 \text{ км}^2$  (22,4%). В 2023 г. площадь ледников Эльбруса составила  $104,4 \text{ км}^2$ .

За период 2015-2023 гг. (за 8 лет) убыль площади составила  $9,7 \text{ км}^2$  ( $1,21 \text{ км}^2$  в год).

**Темпы деградации в 21 веке увеличились в 6 раз**

Ледник Джикиуганкез на севере Эльбруса уменьшился по площади на  **$8,49 \text{ км}^2$**

# Деградация ледника Дых-Су в ущелье Черек-Балкарский за 1960-2023 гг.



Убыль площади за 1960-2023 гг. составила **3,28 км<sup>2</sup>**,

длина уменьшилась на **3,4 км** (максимум для всех исследованных ледников).

Салатный контур – 2015-2023 гг.

Стаявший язык ледника имел толщину в 1957 г. **до 200 м.**

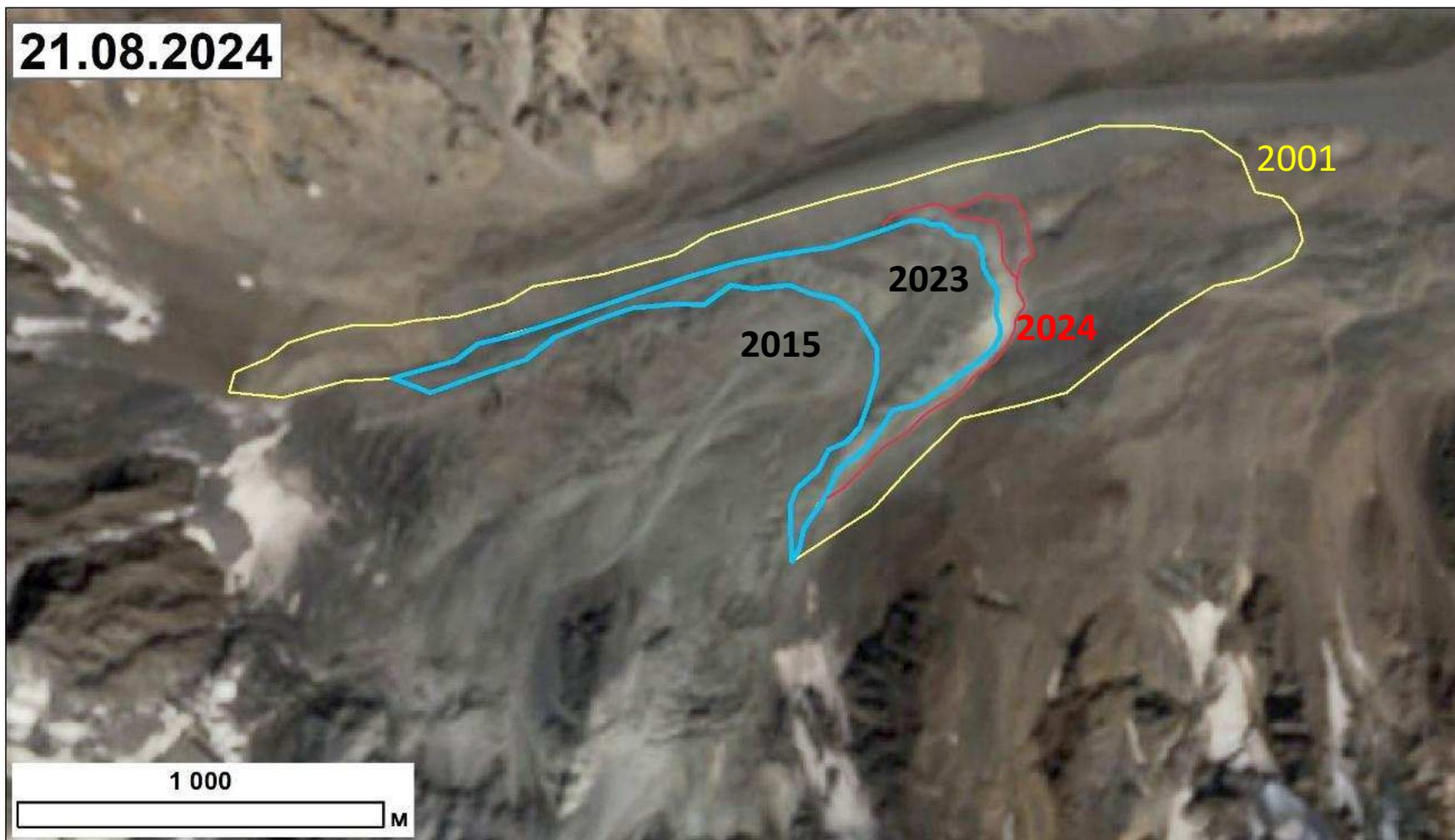
**Другие ледники со значительным отступанием**

Длина ледника Шаурту в Чегемском ущелье уменьшилась на 3,0 км,

ледника Большой Азау на склоне Эльбруса – на 2,7 км,

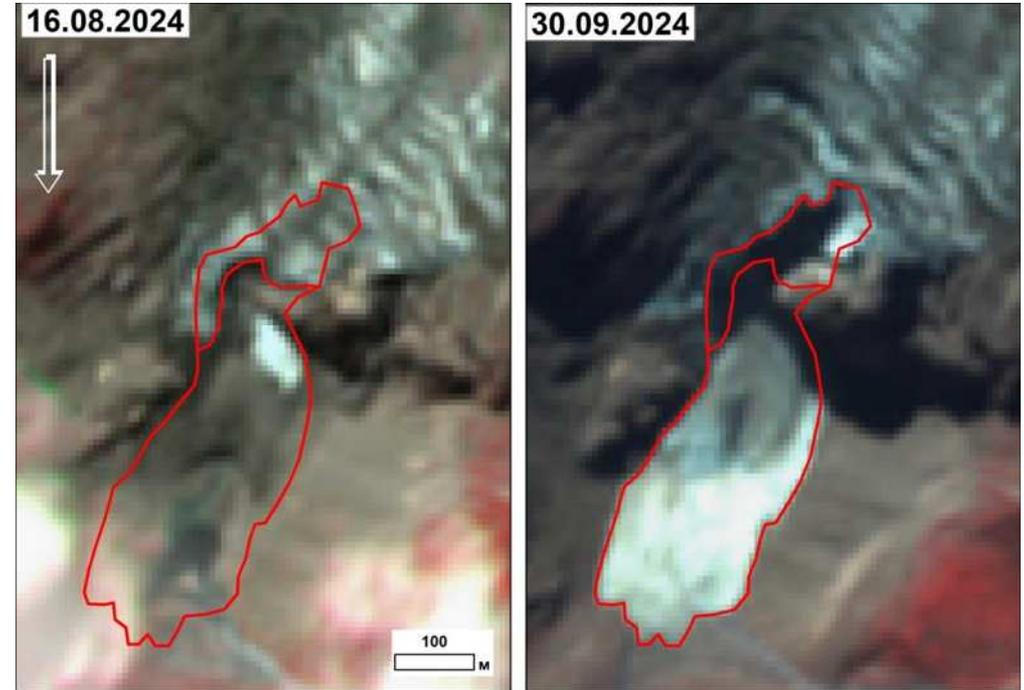
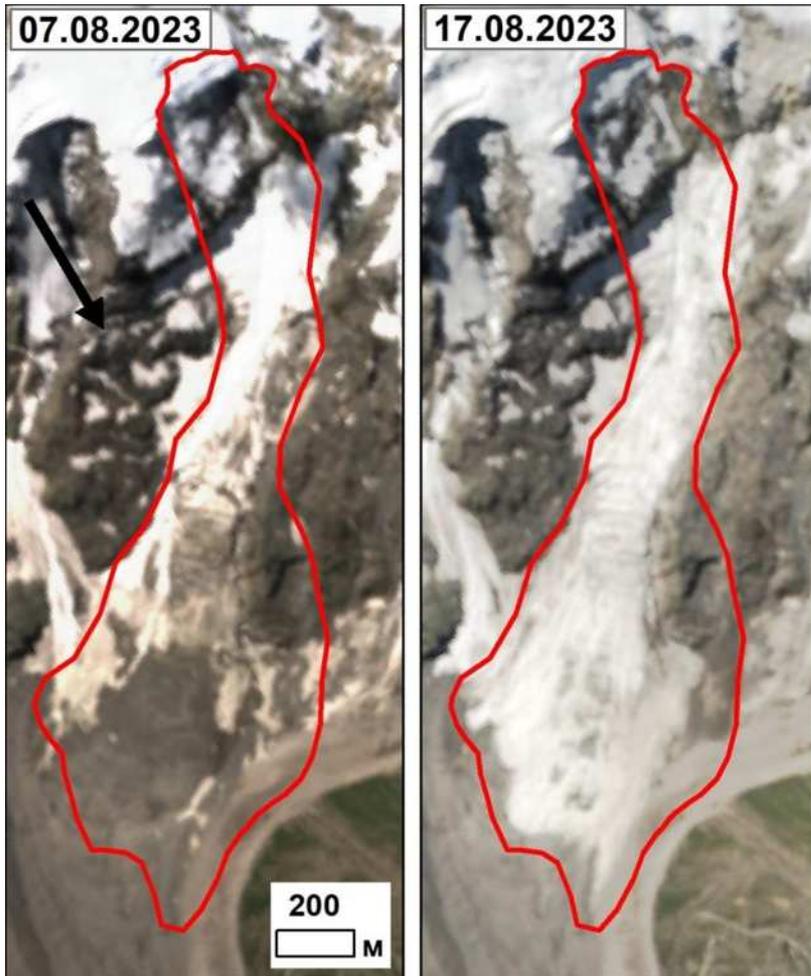
ледника Караугом в долине р. Урух - на 2,5 км

## Состояние возрождающегося ледника Колка в 2024 г.



До параметров ледника перед его сходом в 2002 г. осталось набрать 403,3 тыс. м<sup>2</sup>. При увеличении площади 18-19 тыс. м<sup>2</sup> за год потребуется 22 года. Но сход ледника возможен и при меньших параметрах.

По данным космоснимков определены параметры обвала висячего ледника на склоне г. Дыхтау 12 августа 2023 г. и обвала льда ледника Нижний Кулак в Чегемском ущелье 15 сентября 2024 г.



Площадь обвалившегося блока – 15,5 тыс. м<sup>2</sup>  
Дальность выброса в плане 650 м,  
Площадь зоны поражения – 89,5 тыс. м<sup>2</sup>.  
Объём около 0,5-0,7 млн м<sup>3</sup>

Ширина обвалившегося массива льда – 230 м,  
Площадь в плане – 20,1 тыс. м<sup>2</sup>  
Объём – около 1 млн м<sup>3</sup>  
Высота линии отрыва – 4370 м , дальность выброса – 2,7 км  
Погиб 1 турист

# Определение отступления и изменения толщины ледника Башиль по данным аэрофотосъёмки



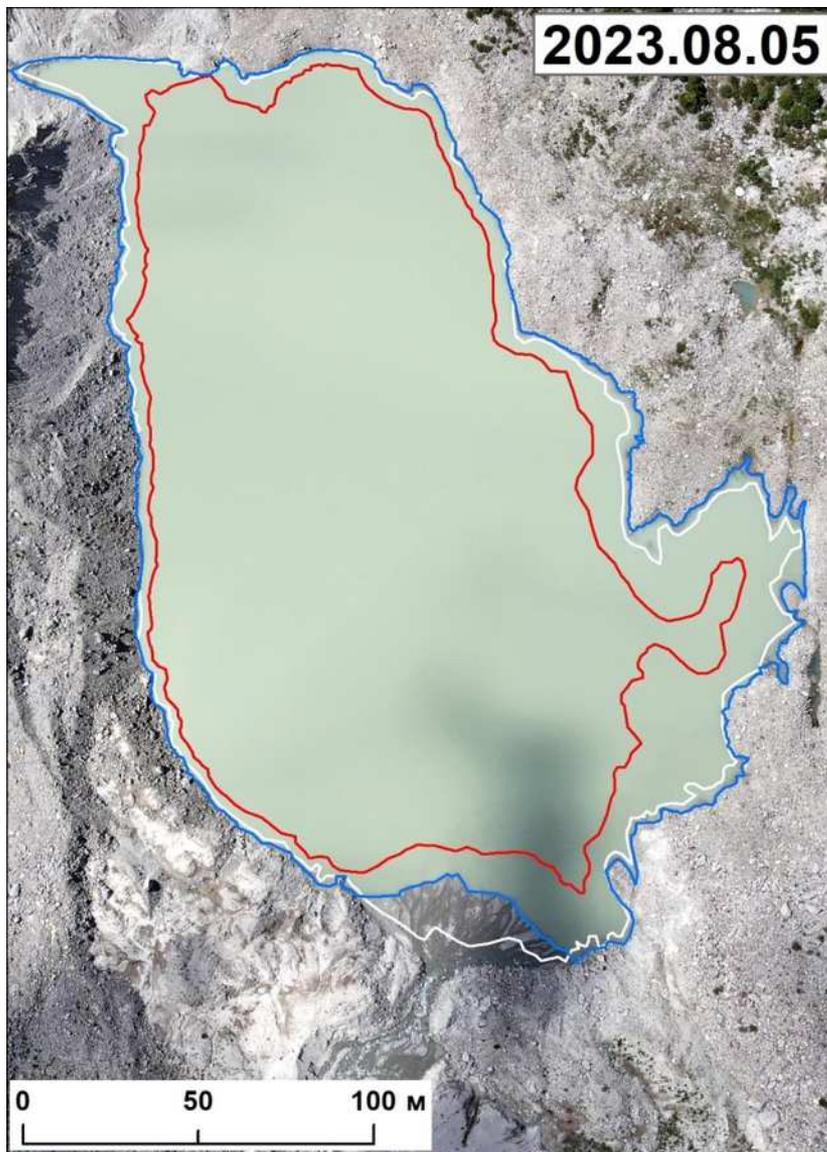
Изменение параметров ледника определялось с использованием ортофотопланов и цифровых моделей рельефа, построенных в программе **Agisoft Metashape Professional** (ООО «ЖИВОЙ СОФТ»)

Отступление языка ледника по данным сравнения ортофотопланов по фронту составило около 100 м за счёт быстрого таяния узкой части, граничащей с выходом коренных пород.

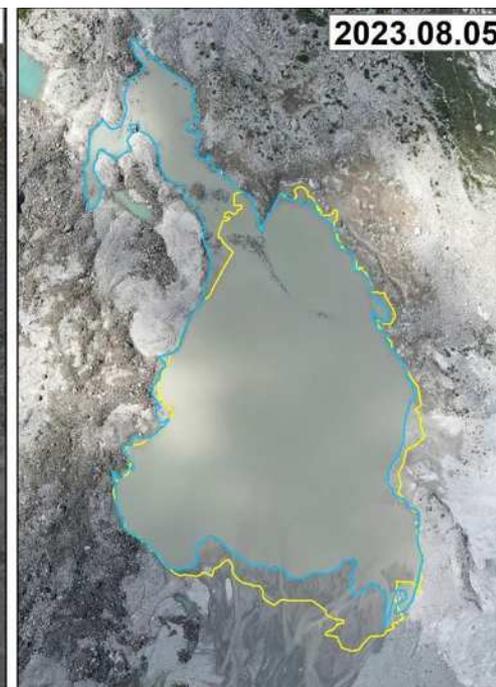
Средняя толщина стаявшего льда за 2022-2023 гг. участка в зоне абляции: 5,6 м.

Такие же материалы получены для ледников Донгузорун, Мижирги, Безенги. Данные обрабатываются.

# Определение изменения площади Башкаринских озёр в долине р. Адылсу по ортофотопланам



Озеро Башкара Красный контур – 2017 г.,  
Белый контур – 2022 г.,  
Синий контур – 2023 г.

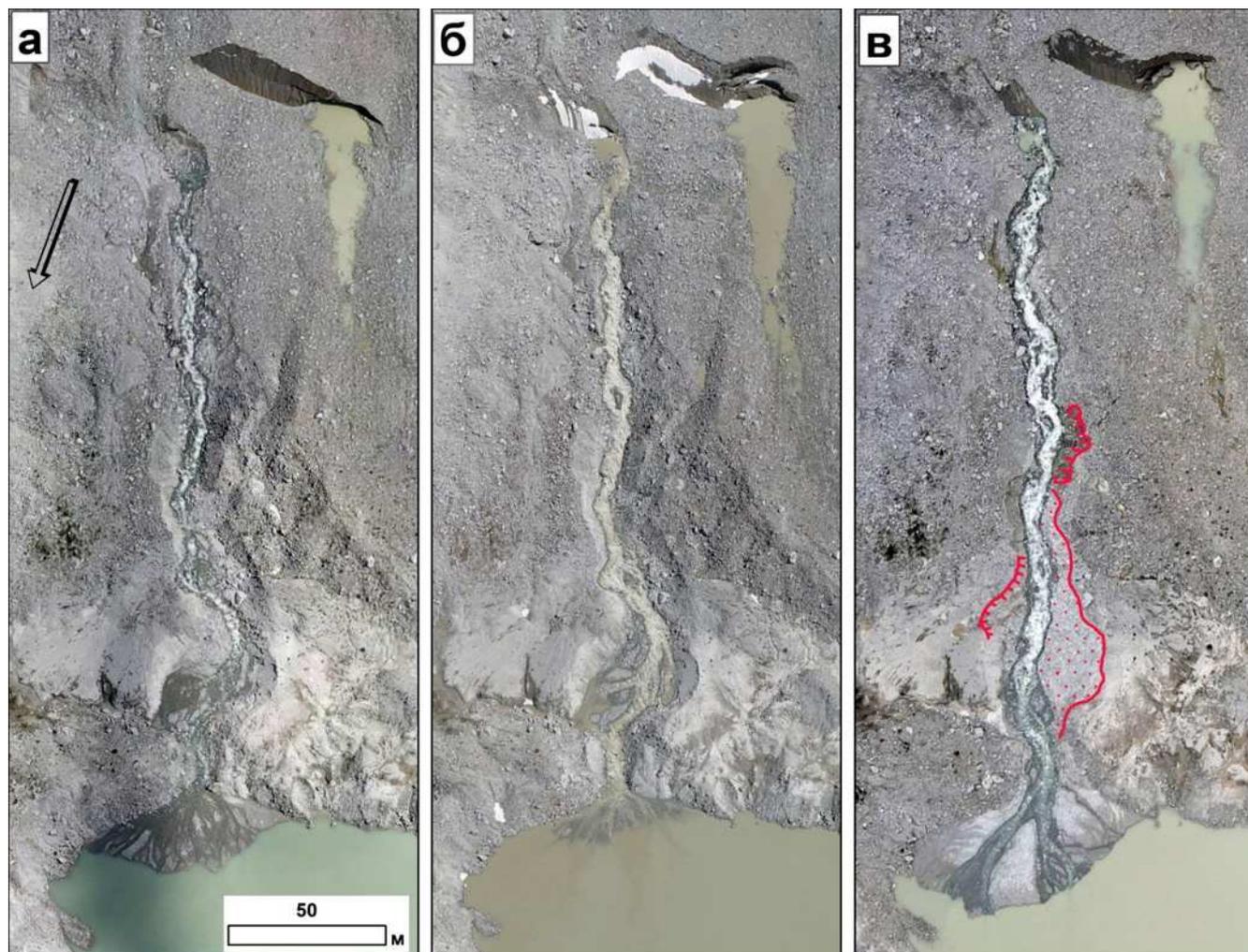


Озеро Лапа  
Жёлтый контур – 2022 г.  
Синий контур – 2023 г.

площадь озера Башкара увеличилась  
— с 32,80 до 33,45 тыс. м<sup>2</sup>,

Увеличение площади озера Лапа за счёт таяния  
мёртвого льда  
- с 27,58 тыс. м<sup>2</sup> до 26,78 м<sup>2</sup>.

## Увеличение притока воды в озеро Башкара в 2024 г. и сход селя в озеро



Участок притока воды в озеро Башкара (**фрагменты ортофотопланов**): а – 05.08.2023, б – 06.06.2024, в – 29.06.2024. Красные линии с зубчиками – бровки эрозионных откосов. Красная линия и крап красных точек – участок отложений потока.

Следует отметить, что обычно расход потока с озера Башкара был меньше, чем у потока с ледника Башкара на участке у его конца. Но в 2024 г. произошло резкое изменение в дренажной системе подлёдных потоков ледника Башкара, и большая часть талого ледникового стока устремилась в сторону озера Башкара.

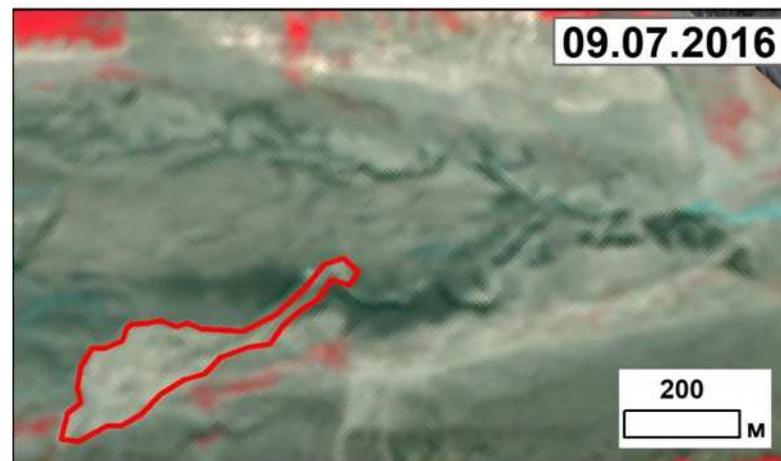
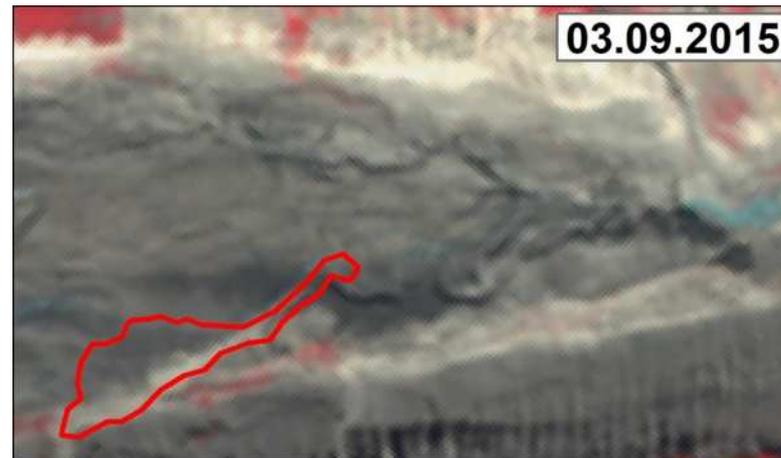
# Необычные изменения на конце ледника Безенги в 2023-2024 гг. (сравнение ортофотопланов)



Изменения на шлейфе пролювиально-коллювиальных отложений с правой береговой морены (сдвиг и сползание) вследствие вовлечения в движение наступающим ледником в правой части языка

Смещение вниз истока реки Черек-Безенгийский на расстояние около 220 м

# Оценка деградации крупнейшего ледника Кавказа - ледника Безенги - за 1957-2024 гг.



Отложение селевой массы площадью 41 тыс. м<sup>2</sup> в 2016 г. привело к наступанию правой части ледника в 2023-2024 гг. и деформации склоновых отложений. См. предыдущий слайд.

При этом левая часть ледника отступает.

Убыль площади – 0,83 км<sup>2</sup>, отступление – 900 м

## Изменения условий развития селевых процессов в долине р. Герхожансу в результате подвижки оползня Бузулган (ортофотопланы, ЦМР)



Зона отложений селя 5 августа 2022 г. – 24400 м<sup>2</sup> , объём отложений – около 90 тыс. м<sup>3</sup>  
Средняя толщина отложений – 3,6 м, максимальная 11-13 м

07.09.2020



## Новый селевой очаг на оползне Бузулган (перспективные фотографии с квадрокоптера)

Глубина врезания селевого потока в дно нового русла на участке бокового откоса оползня достигала 10-15 м. Объем вынесенного материала с участка оползня составил около 160 тыс. м<sup>3</sup>.

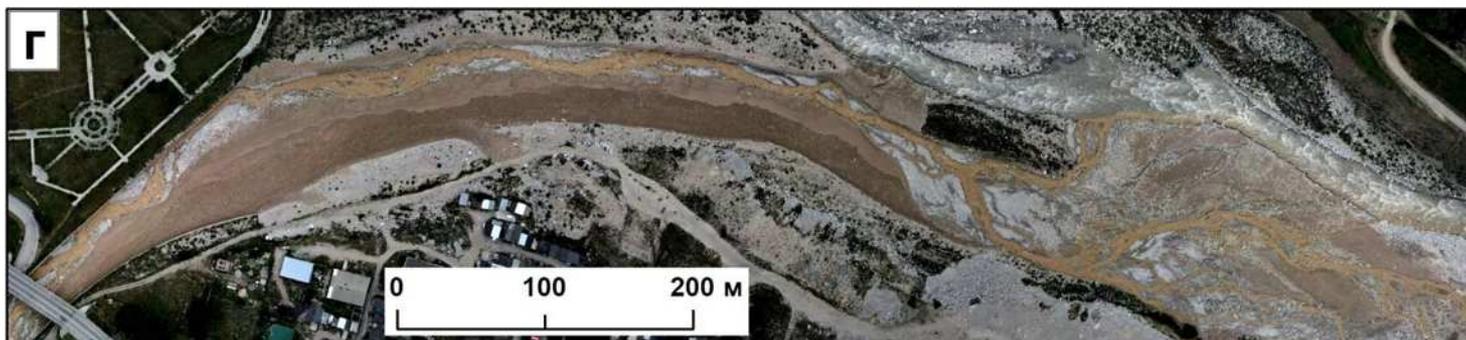
Сель 2022 г. по реке Герхожансу отличался от всех последних селей появлением в результате подвижки оползня Бузулган значительной промежуточной зоны аккумуляции на участке выше оползня и дополнительного протяжённого селевого очага вдоль тела оползня.

05.07.2023



В будущем при оценке последствий селей на р. Герхожансу необходимо учитывать возможность поступления существенного дополнительного материала в селевой поток на участке оползня и выше его и распределения этого материала на участке селепропускного лотка и в пойме р. Баксан.

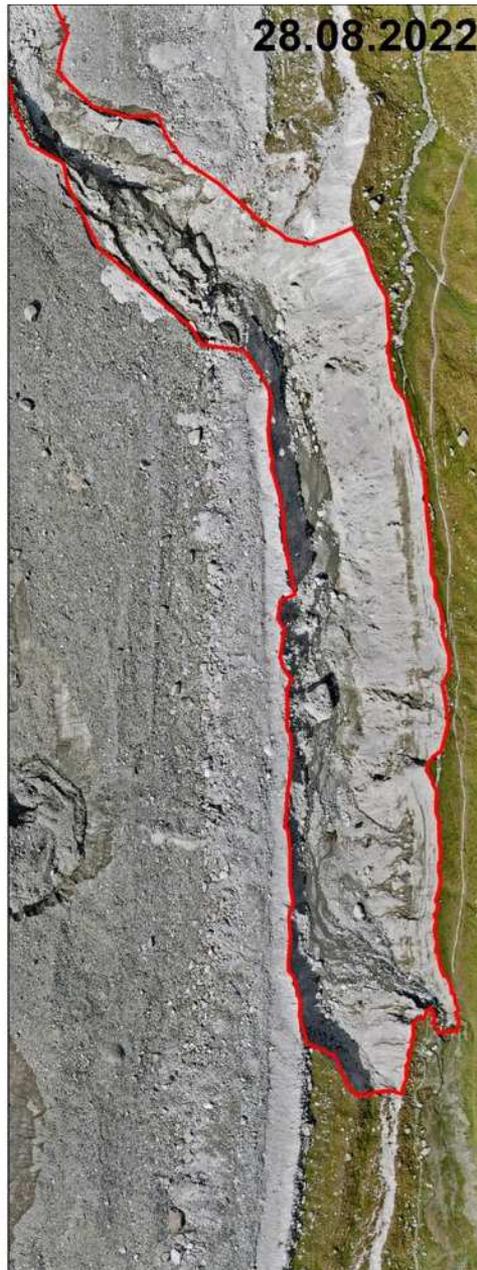
## Зона аккумуляции селя 05.08.2022 на р. Герхожансу (наземные фотографии и ортофотопланы)



а – фото М.Д. Докукина 20.07.2022, б – фото М.М. Хаджиева 05.08.2022.

Ортофотопланы участка ниже автодорожного моста и впадения р. Герхожансу в р. Баксан: в – 14.07.2022, г – 09.08.2022. Объем отложений по данным ЦМР - 160 тыс. м<sup>3</sup>, включая 21 тыс. м<sup>3</sup>, что отложилось в лотке на участке выше автодорожного моста.

# Необычный сель на реке Мижирги (правый приток р. Черек-Безенгийский) 13.08.2022



Ортофотопланы до и после селя

Сель образовался в результате сдвига разжиженной массы береговой морены длиной 230 м, объемом 110 тыс. м<sup>3</sup>



а – 26.07.2022, б – 28.08.2022

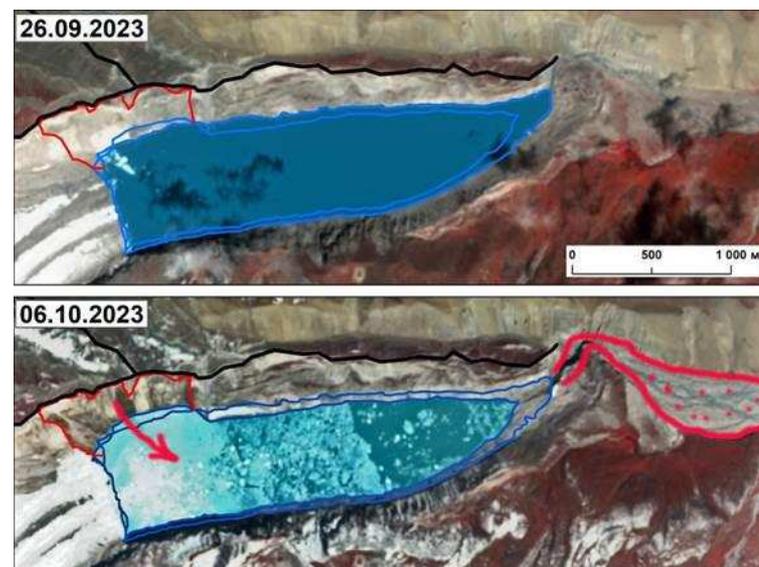
Фото с квадрокоптера

# Прорывы ледниковых озёр – постоянная угроза в период деградации ледников

**Озеро Башкара** (Кавказ, Россия) 1 сентября 2017 г. в результате размыва моренной плотины прорывным паводком с ледника и волной по озеру от выпадения ливней слоем 143 мм на его поверхность



**Озеро Лхонак Южное** 4 октября 2023 в Сиккиме (Индия) в результате обрушения массива береговой морены объёмом 5 млн м<sup>3</sup> и размыва конечной морены волной. Ниже по долине разрушена плотина ГЭС



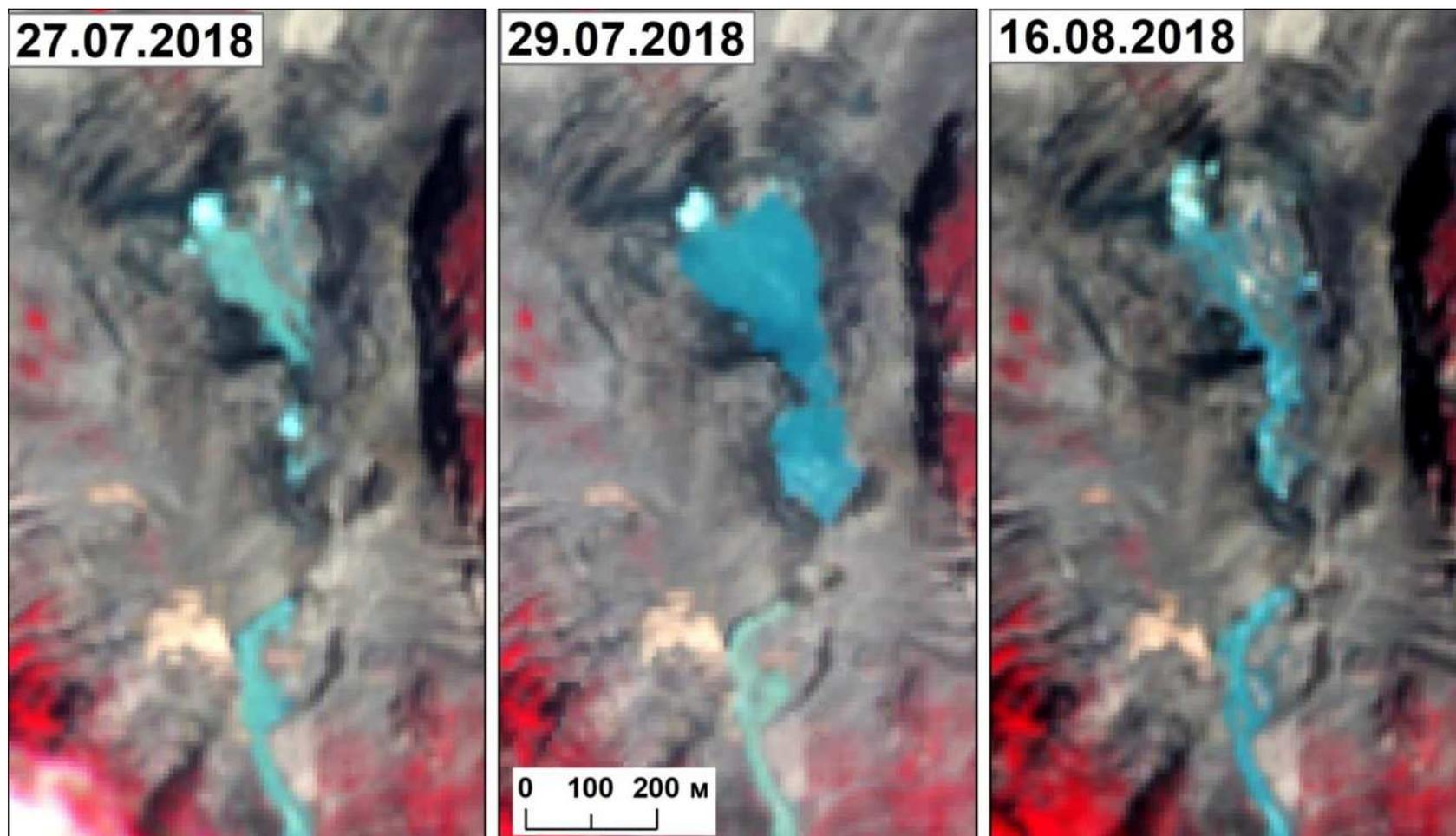
## Озёра до прорыва могут существовать более 100 лет

Озеро Чорабари в Индии существовало с 19 века и имело подземный канал стока. Его прорыв произошёл в 2013 г. после полного заполнения котловины в результате аномальных ливней и схода селя в озеро.

Площадь озера в момент заполнения котловины составила 67 тыс. м<sup>2</sup>.

В 3-х километрах ниже в лагере паломников у храма Кедарнатх погибло 127 человек, а всего в долине ниже по течению погибло около 6000 человек.

## Крупные озёра могут образоваться быстро – даже за двое суток



Формирование озера на леднике Лекзири площадью 60 тыс. м<sup>2</sup> и объёмом около 350 тыс. м<sup>3</sup> **за двое суток** 27-29 июля 2018 г.

Прорыва не произошло, так как вода из озера вытекла постепенно

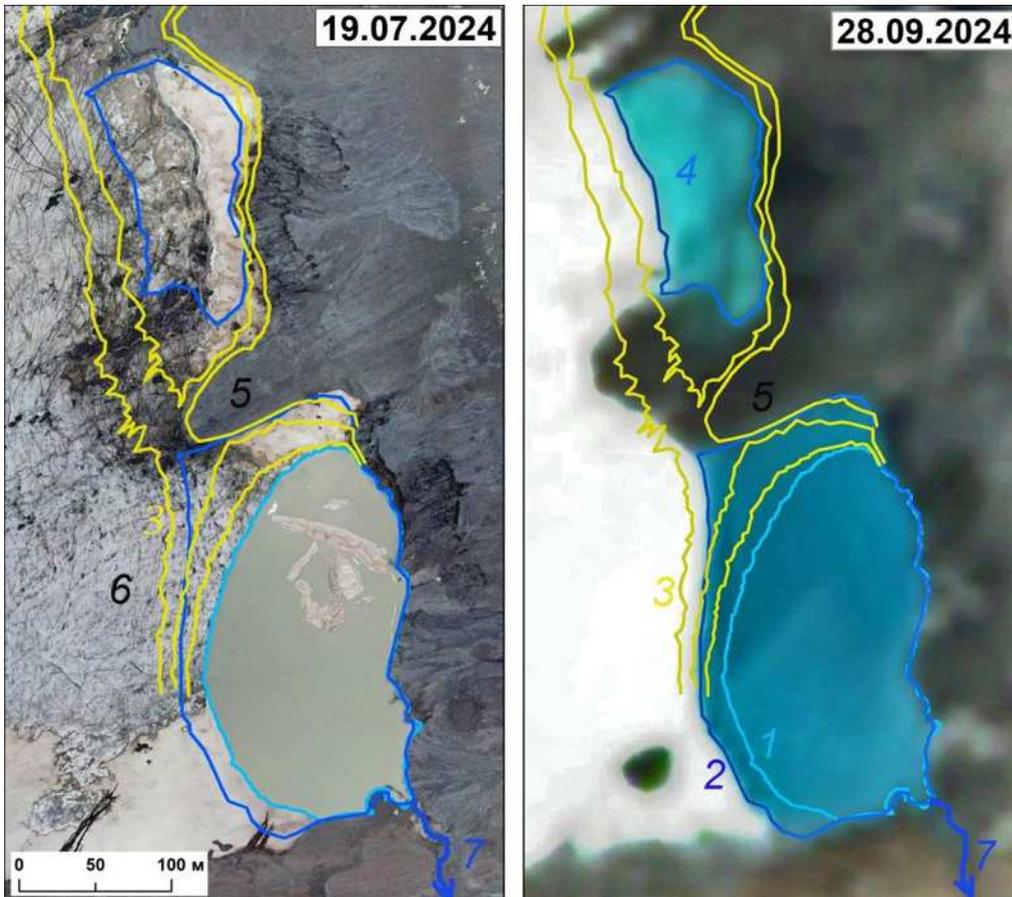
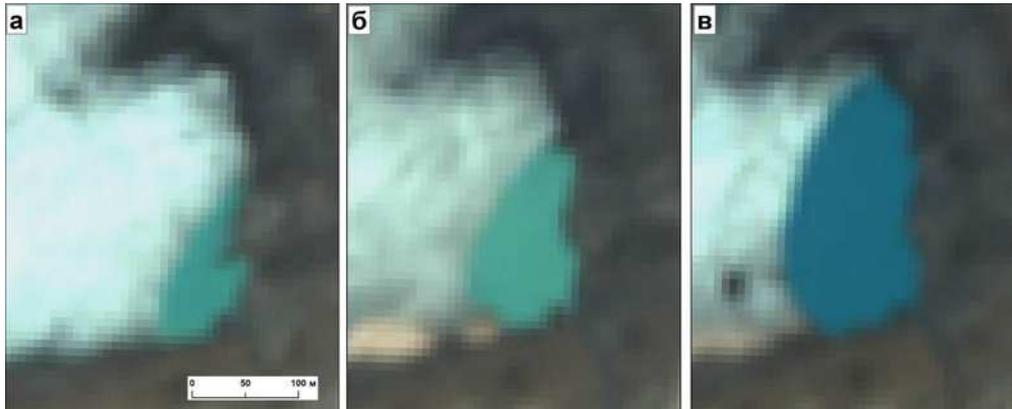
# Мониторинг потенциальной угрозы прорыва озера Южное Бирджалы на севере Эльбруса (анализ космоснимков и аэрофотосъёмки)

Рост озера и уменьшение ледяной плотины  
а – 01.09.2020, б – 30.08.2021,  
в – 30.08.2023 (22,9 тыс. м<sup>2</sup>)

В результате аэрофотосъёмки 19.07.2024  
выявлено, что площадь озера  
увеличилась до 25,4 тыс. м<sup>2</sup>, а высота гребня  
ледяной плотины составляет менее 2 м и  
сделан вывод о возможном прорыве озера  
по поверхности ледяной плотины при  
дальнейшем её понижении.

Дальнейший анализ космоснимков показал,  
что к концу сентября площадь озера достигла  
35,2 тыс. м<sup>2</sup> и из-под льда  
обнажились коренные породы, ставшие  
прочной плотиной и прорыв озера стал  
невозможным.

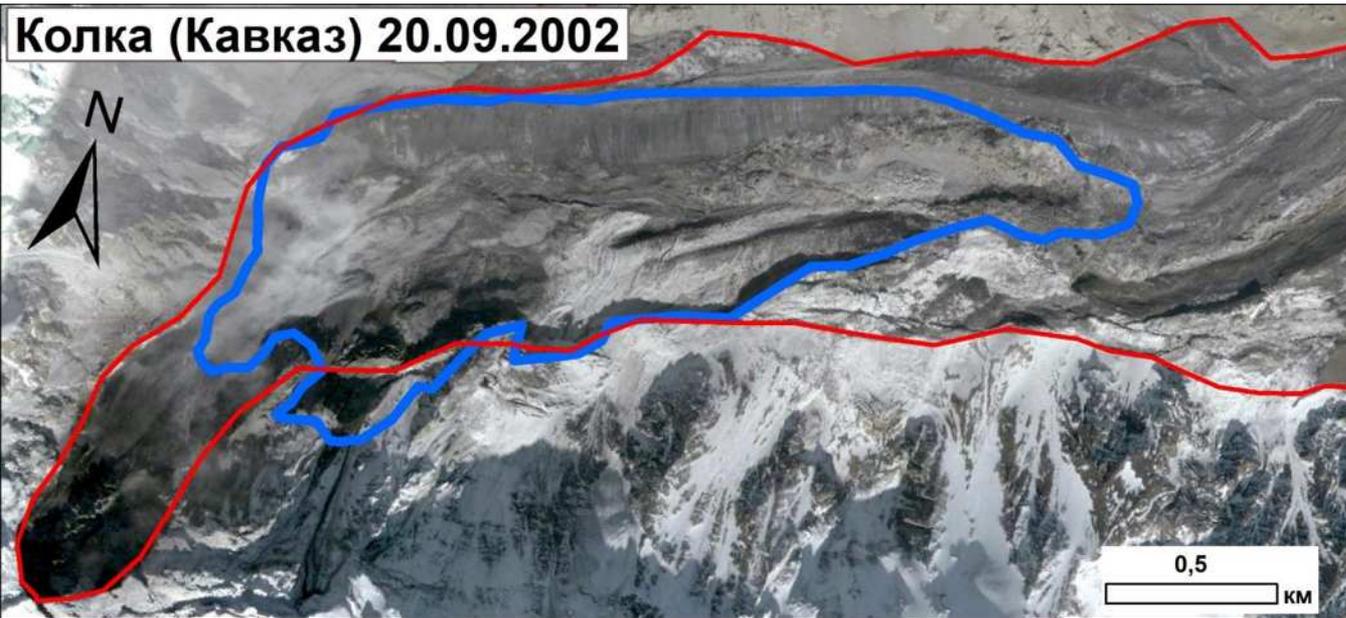
1 – граница озера Южное Бирджалы  
19.07.2024; 2 – граница озера Южное  
Бирджалы 28.09.2024; 3 – горизонтали  
рельефа через 1 м; 4 – озеро Южное  
Бирджалы 2; 5 – выступ коренных  
вулканических пород, сглаженных ледником,  
6 – ледник Бирджалычиран, 7 – русло стока  
воды с озера Южное Бирджалы



# Сходы ледников (Glacier detachments)

– новая угроза 21 века

Колка (Кавказ) 20.09.2002



Седонгпу (Восточный Тибет) 16.10.2018



Объём сброшенного вниз льда достигал 130 млн м<sup>3</sup> – ледники Колка и Седонгпу. Скорость движения – до 300 и более км/час. Дальность выброса – до 19 км. Всего в мире зафиксировано около **40 случаев** сходов ледников в разных горных районах.

В будущем сходы ледников возможны в районах, где они раньше не фиксировались и не предполагались, что определяет необходимость мониторинга ледников.

# Моренные пьедесталы – потенциальная угроза селей гигантских объёмов

**моренный пьедестал:** аккумулятивная форма рельефа ледникового происхождения, содержащая в большом количестве лёд, выраженная в виде языкообразного массива, возвышающегося над дном долины или поверхностью склона на 50-70 м и имеющего трапециевидный поперечный профиль благодаря ровным скатам береговых морен его окаймляющих.

Селевой процесс происходит за счёт разжижения всего объёма пьедестала и стекания масс вниз.

Уклоны пьедесталов могут быть минимальными – 8-9°



Очаг селя 1940 г. в долине р. Адырсу (Кавказ). Объём около 3 млн м<sup>3</sup> вынесен за 60 часов (П.В. Ковалёв, 1957)



Селевым процессом с моренного пьедестала ледника Седонгпу (Тибет) в 2021 г. вынесено **335 млн м<sup>3</sup>** обломочного материала (Kääb A. et al., 2022)

# Потенциальный селевой очаг в моренном пьедестале ледника Донгузорун (Чегеткарачиран) в Приэльбрусье



Мощность пьедестала – до 60-70 м  
Возможно формирование селевых врезов во фронтальной зоне пьедестала с углами наклона более  $8^\circ$   
Возможна подвижка ледника вследствие очередного обвала и формирование подпрудного озера  
Возможен сход части ледника вместе с селевой массой объёмом порядка 5-7 млн м<sup>3</sup>



## Участились сходы каменных и ледово-каменных лавин со стенок ледниковых цирков

Сход ледника в 2016 г. и ледово-каменной лавины 07.02.2021 с горы Ронти в Индии космоснимок Planet в момент схода лавины



Сход каменной лавины со склона цирка Хасаутского ледника в долине р. Аксаут 01.01.2022 (КЧР, Россия)



Объём ледово-каменной лавины 7 февраля 2021 г. в Индии превышал **25 млн м<sup>3</sup>**, дальность выброса –16 км. **Далее по долине шёл селевой поток.**

Каменная лавина на леднике Ламплуг (Аляска) в 2016 г. достигала по объёму **70 млн м<sup>3</sup>**, по площади зоны поражения – **21,8 км<sup>2</sup>**

Каменная лавина в цирке Хасаутского ледника в КЧР (Россия) 01.01.2022 имела объём более **7 млн м<sup>3</sup>** дальность выброса – **6,4 км.**

## **Научное сотрудничество в области гляциологического и гидрологического мониторинга**

За последние 5 лет (2020-2024 гг.) были проведены совместные исследования и обследования со специалистами МГУ при изучении каменных и ледово-каменных лавин, приледниковых озёр, селевых процессов (18 совместных публикаций), со специалистами КБГУ, КБГАУ, ГУ МЧС России по КБР.

При изучении сходов ледников специалисты ВГИ сотрудничали с ведущими зарубежными гляциологами и гидрологами. Изучение сходов ледников на Памире проведено вместе со специалистами Института инженерной экологии в Цюрихе (Швейцария) и Кооперативного института исследований в области наук об окружающей среде при Университете Колорадо в Боулдере (США).

Обобщение по всем случаям сходов ледников в мире проведено совместно с 14 специалистами Университета Осло (Норвегия), Кооперативного института исследований в области наук об окружающей среде при Университете Колорадо в Боулдере (США), Университета Гренобль Альпы (Франция), Института инженерной экологии в Цюрихе (Швейцария), Аргентинского института мерзлотоведения, гляциологии и наук об окружающей среде, Департамента географии Национального университета Куйо (Мендоса, Аргентина), компании Geoestudios (Чили), Департамента геологии Университета Чили, Центра космических исследований биосферы Университета Тулузы (Франция), Института планетарных наук (Аризона США), Географического факультета МГУ.

Совместно с 52 специалистами 13 стран проведено исследование ледово-каменной лавины в округе Чамоли штата Уттаракханд (Индия) 07.02.2021 (США, Канада, Индия, Непал, Швейцария, Австрия, Германия, Франция, Нидерланды, Швеция, Чили, Аргентина, Великобритания).

Всего по теме мониторинга опубликовано за 2020-2024 гг. 74 статьи.

# Выводы

1. Многократно увеличились темпы деградации горных ледников, что в будущем приведёт к нехватке пресной воды, особенно в районах Центральной Азии.
2. С деградацией ледников связана активизация опасных природных процессов в высокогорной зоне : прорывы озёр, сходы ледников и ледово-каменные и каменные лавины, селевые процессы с гигантскими объёмами выноса на моренных пьедесталах и других массивах с тающими льдами. Возможны каскадные процессы, когда следствие одного процесса становится причиной другого и увеличивается зона поражения.
3. В связи с появлением новых угроз в горах возрастает значение комплексного непрерывного мониторинга высокогорной зоны. В ФГБУ «ВГИ» подготовлено Руководство по наблюдениям за динамикой горных ледников и опасными природными процессами в высокогорной зоне на основе использования простейшего БВС.
4. В 2025-2029 гг. ФГБУ «ВГИ» будет продолжена разработка новых методов мониторинга на основе применения беспилотных воздушных судов. В 2025-2026 гг. планируется освоение технологии мониторинга с использованием российских БВС геодезического класса (Геоскан 401 Геодезия), что даст возможность оценивать изменения объёмов крупных ледников целиком, а также наблюдать за высокими скально-ледовыми склонами с целью оценки опасности опасных природных процессов и предупреждения об этом с целью снижения возможного ущерба.
5. В будущем целесообразно создание системы наблюдательной сети за динамикой ледников и опасными природными процессами в рамках Росгидромета.

Благодарим за внимание!

