

Выявление признаков подготовки катастрофических склоновых процессов для предупреждения чрезвычайных ситуаций

Беккиев М.Ю., *д. т. н., проф., ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), директор, г. Нальчик, Россия*

SPIN-код: 3699-5690

Докукин М.Д., *к. геогр. н., ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), в. н. с., г. Нальчик, Россия*

SPIN-код: 3790-9078

Калов Р.Х., *к. физ.-мат. н., доц., ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), зам. директора, г. Нальчик, Россия*

SPIN-код: 1973-2586

Акаев А.Р., *ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), вед. инженер, г. Нальчик, Россия*

SPIN-код: 37350-4424

Аннотация

На основе анализа разновременной аэрокосмической информации приводятся выявленные в разных горных районах мира признаки подготовки схода ледников, каменных и ледово-каменных лавин, гляциальных селей: наступание и ускорение движения ледников; формирование новых систем трещин; разрывные нарушения на склонах и массивах; небольшие обвалы, которые можно обнаружить за определенный период времени.

Катастрофические процессы могут развиваться на соседних участках склонов, где они были выявлены ранее, и повторяться через разные промежутки времени. Своевременное обнаружение признаков подготовки катастрофических процессов позволяет провести мероприятия по предупреждению чрезвычайных ситуаций, снижению риска и ущерба от них.

Ключевые слова: космоснимок; сход ледника; каменная лавина; ледово-каменная лавина; признаки подготовки; чрезвычайные ситуации.

Введение

Потепление климата приводит к ускорению деградации ледников. На участках освобожденных от льда ледников активно развиваются катастрофические склоновые и русловые процессы. Сами ледники испытывают пульсации и обрушения (сходы), которые ранее не фиксировались или происходили очень давно, как, например, сходы ледника Колка были в 1902 и 2002 гг. Сход ледника Колка в 2002 г. стал неожиданностью и принес человеческие жертвы и разрушения. При этом был сделан вывод, что это уникальное явление, присущее только участку склона горы Казбек. В дальнейшем было зафиксировано много случаев, подобных сходу ледника Колка, в том числе в 2022 г. в Альпах и на Тянь-Шане [4, 11, 12]. И в настоящее время уже нельзя исключать того, что сход ледника может произойти в любом горном районе на крутых (до 25–30 °С) и очень пологих (до 8–9 °С) склонах. Кроме этого возможен сход каменных и ледово-каменных лавин на участках, где их раньше не было, например, каменная лавина 01.01.2022 в долине р. Аксаут (Карачаево-Черкесская республика) [6] с дальностью выброса 6,4 км и площадью поражения 3,2 км², или где они раньше наблюдались (каменная лавина в долине р. Харгабахк в Чеченской Республике с дальностью выброса 7,5 км в 2006 г. [5]).

Целью настоящей статьи является обобщение материалов по признакам подготовки катастрофических процессов в высокогорной зоне на основе материалов дистанционного зондирования Земли. Использовались космоснимки Sentinel-2 с сайта <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser> и космоснимки сервиса Google Earth, материалы аэрофотосъемок квадрокоптером DJI Mavic Air 2S Fly More Combo.

Признаки подготовки ледников к сходу

Были изучены изменения положения фронта языков ледников, конфигурации трещин, смещения отдельных точек на поверхности ледников на хребте Ару в Западном Тибете и ледников на хребте Петра Первого на Памире до их схода. Характеристики процессов схода ледников приведены в работах [12, 13]. При анализе космоснимков до и после схода ледников выявлялись различия, которые стали видны за определенный период времени до схода ледника. Материалы сравнения и выявленные признаки подготовки ледников к сходу изложены в работах [2–4, 7–8].

Ледники Ару (северный 1 и южный 2) перед их сходом вели себя по-разному. Ледник Ару 1 перед сходом 17 июля 2016 г. медленно наступал, и ширина его языка увеличивалась. С 2 октября 2015 г. по 9 апреля 2016 г. его наступание составило 100 м. При этом конфигурация трещин на участке его отрыва долгое время практически не менялась, хотя движущаяся ледниковая масса по бокам имела четкие границы. Ледник Ару 2, наоборот, не показывал признаков наступания (рис. 1).

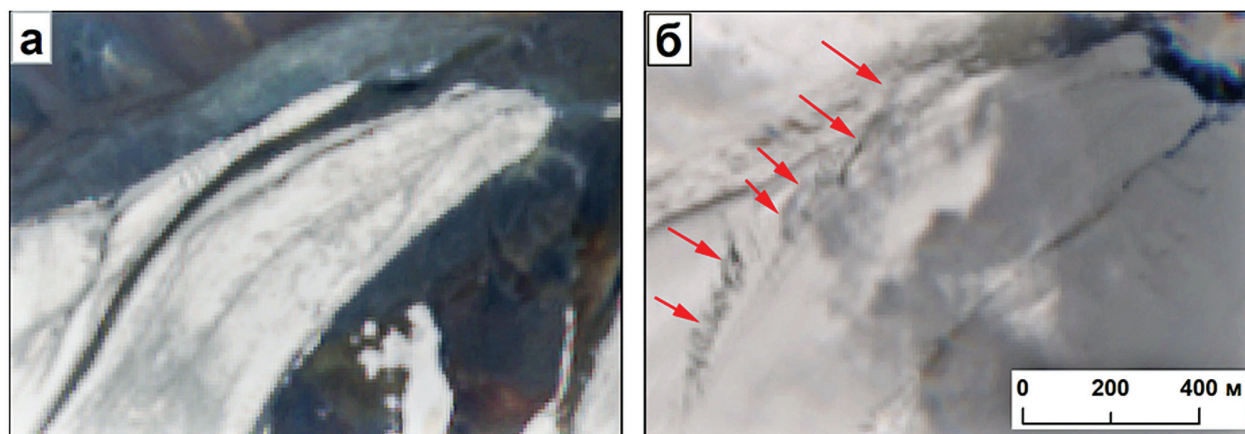


Рис. 1. Динамика ледника Ару 2 (южный) в западном Тибете перед его сходом на космоснимках Sentinel-2: а — 21.07.2016, б — 19.09.2016. Стрелками показаны трещины, разорвавшие соседние потоки льда ледника

На космоснимке 19.09.2016 (за два дня до схода ледника 21 сентября 2016) видны четкие трещины, буквально разорвавшие левую часть ледника. Трещины захватывали и участки левых потоков льда, отделенных от основного потока срединной мореной.

Перед сходом ледника в долине р. Шураки Капали на склоне хребта Первого на Памире были выявлены особенности его динамики и морфологии. В период с 12 мая по 28 июня ледник наступил на 110 м, в среднем — 2,3 м/сут. Максимальное смещение опознанных точек на поверхности ледника за период 8–28 июня составило около 45 м (2,2–2,3 м/сут), что свидетельствует о равномерной скорости движения ледника в течение 1,5 месяца. В этот период происходило изменение конфигурации трещин, и к 28 июня верхняя часть сходящей ледниковой массы заметно отделилась от основной части ледника (рис. 2, в).

Следует отметить, что различия в формировании трещин выявлены в основном в левой и верхней части ускорившегося массива ледника.

В работе [10] перед сходом ледника Колка выявлены разломы в теле ледника, а также начало ускоренного движения ледника, выраженное в крутом уступе ледникового тела на северо-западе тыловой части ледника. Но при этом отмечается, что фронт ледника до катастрофы оставался стационарным. Такое состояние ледника перед сходом, как и ледника Ару 2, свидетельствует о значительных напряжениях в теле ледника, возникающих в результате его движения в верхней части и торможения в нижней.

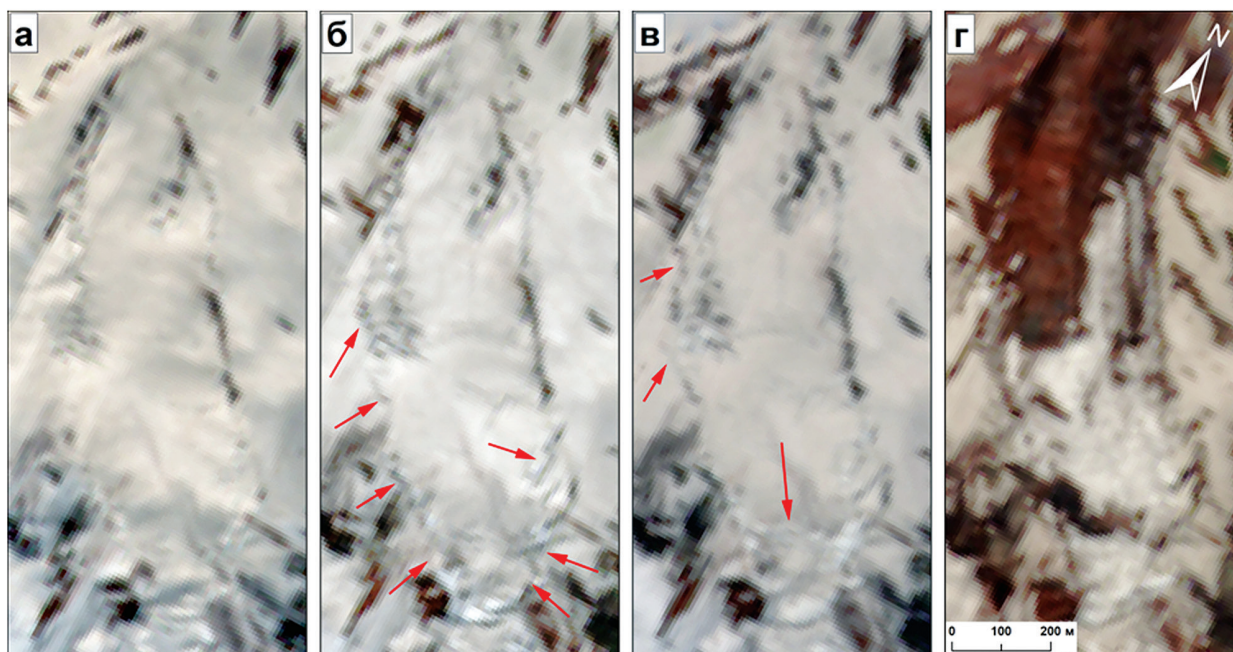


Рис. 2. Динамика ледника в верховьях р. Шураки Капали (хребет Петра Первого, Таджикистан, Памир) на космоснимках Sentinel-2: а — 08.06.2017; б — 21.06.2017; в — 28.06.2017; г — 18.07.2017. Стрелками показаны участки новых трещин по сравнению с предыдущим космоснимком

Далеко не все сошедшие ледники обнаруживали признаки готовящегося схода и обрушения, в том числе ледник на склоне г. Мармолада в Альпах, внезапный сход которого 3 июля 2022 г. привел к гибели людей [4]. И, наоборот, выявленные случаи ускоренного наступания ледника в долине р. Алибек в 2018 г. и формирования новой системы трещин на леднике на склоне г. Андыртау в долине р. Баксан в 2010 г. не стали сходаобразующими [2]. В этом плане следует отметить исследования динамики ледника Планпансье в Итальянских Альпах с применением камер и радаров [11]. Практически ежегодно в период достижения скорости движения ледника до 1–1,5 м/сут в июле-августе прекращается движение на автомобильной трассе к курорту Курмайор, и закрываются туристические маршруты. Сравнение космоснимков показало, что граница зоны ледника, разбитой на множество блоков с широкими зияющими трещинами, остается неизменной из года в год [2]. Ледник за последние 5 лет отступил на 30 м. В 2017 г. произошел один крупный обвал льда (объемом 55 тыс. м³ [11]). Но каждый год на основе анализа динамики ледника ожидается обвал льда объемом 250–500 тыс. м³. Процессы, происходящие на леднике Планпансье, показывают, что, несмотря на детальный мониторинг и доскональную изученность ледника, предвидеть, когда случится крупный обвал или сход ледника, не всегда удастся вследствие их сложности и многофакторности.

Вместе с тем важно отметить следующие выявленные особенности:

- в катастрофические процессы вовлекаются соседние ледники после схода одного из них через разные промежутки времени (от двух месяцев до года — ледники в Тибете и на Памире);
- сход ледников может происходить в любое время года;
- один ледник может испытывать несколько сходов в течение короткого периода;
- сходу ледника могут предшествовать обвалы горных пород и льда (ледник Колка и ледник на хребте Амни Мачен в восточном Тибете);
- на участках соседних с сошедшим ледником долин могут происходить наступания ледников и пульсации (пульсация ледника Дидаль на Памире, пульсация ледника в долине Шип Крик на Аляске).

Признаки подготовки к сходу каменных и ледово-каменных лавин

После схода ледово-каменной лавины с горы Ронти в Гималаях (округ Чамоли в штате Уттаракханд, Индия) 7 февраля 2021 г. группой специалистов было проведено исследование условий формирования и последствий этого катастрофического события (погибло 204 человека [14]). На рис. 3 показано постепенное формирование трещины отрыва ледово-скального блока на горе Ронти за период 2017–2021 гг.

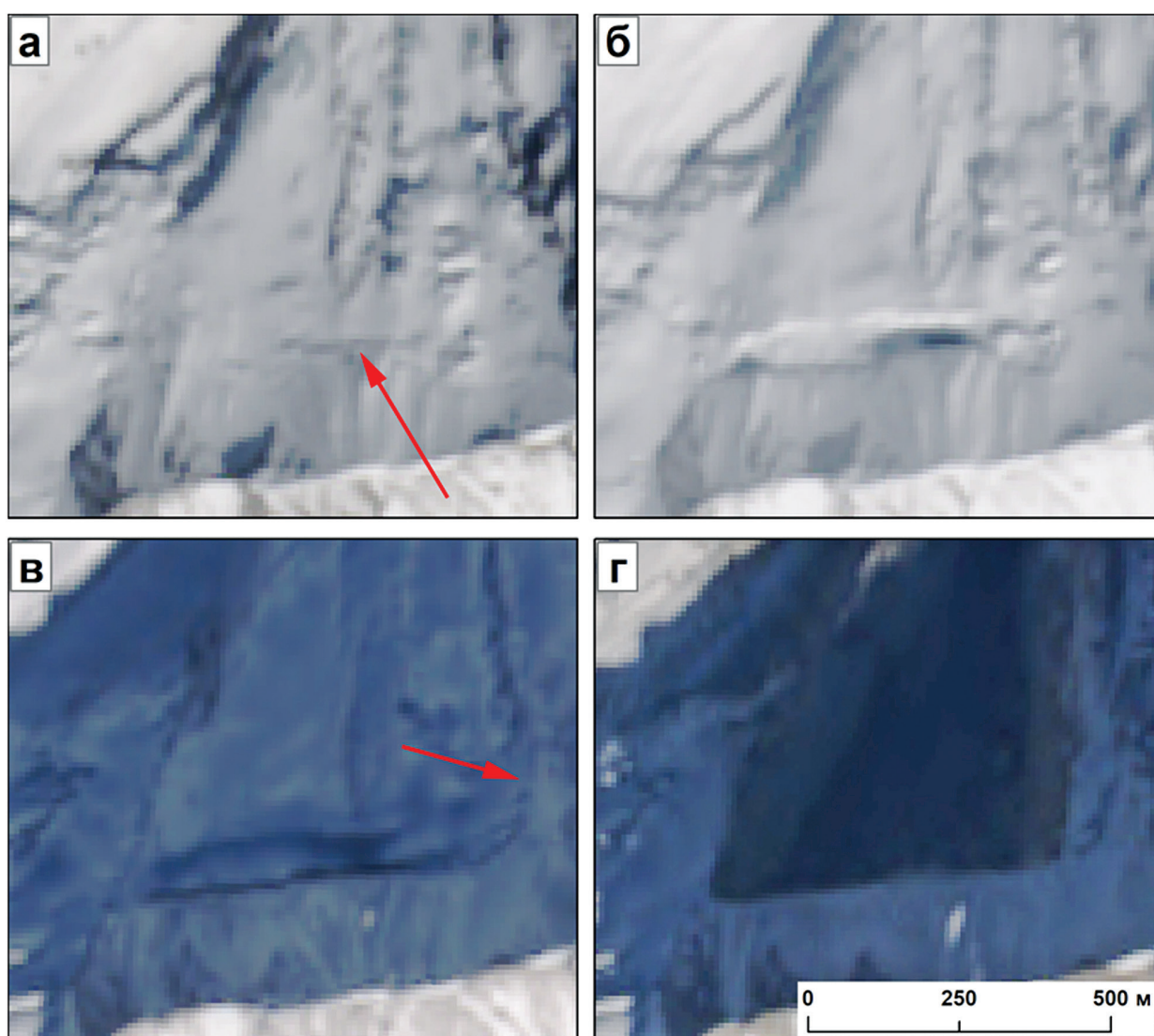


Рис. 3. Динамика трещины на склоне горы Ронти перед сходом ледово-каменной лавины на космоснимках Sentinel-2: а — 28.03.2017; б — 28.03.2019; в — 05.02.2021; г — 10.02.2021. Стрелками показаны участки трещины

Формирование трещины началось после схода ледника (19–24 сентября 2016 г.) на соседнем участке горы к западу от места отрыва блока ледово-каменной лавины и продолжалось более 4 лет [7]. С другой стороны, сход ледово-каменной лавины 7 февраля, возможно, повлиял на динамику соседнего ледника, который сошел в августе 2021 г., не набрав объема, какой был у него до схода в 2016 г. [4].

В работе [1] приведены данные о сходе каменных лавин на участке Главного Кавказского хребта, среди которых была каменная лавина с вершины 3512,7 м на склоне цирка ледника Лекзири (Грузия) 21.03.2019 (рис. 4б) с дальностью выброса около 2 км. Анализ космоснимков показал, что за два дня до этого был небольшой обвал с этого же места (рис. 4а).

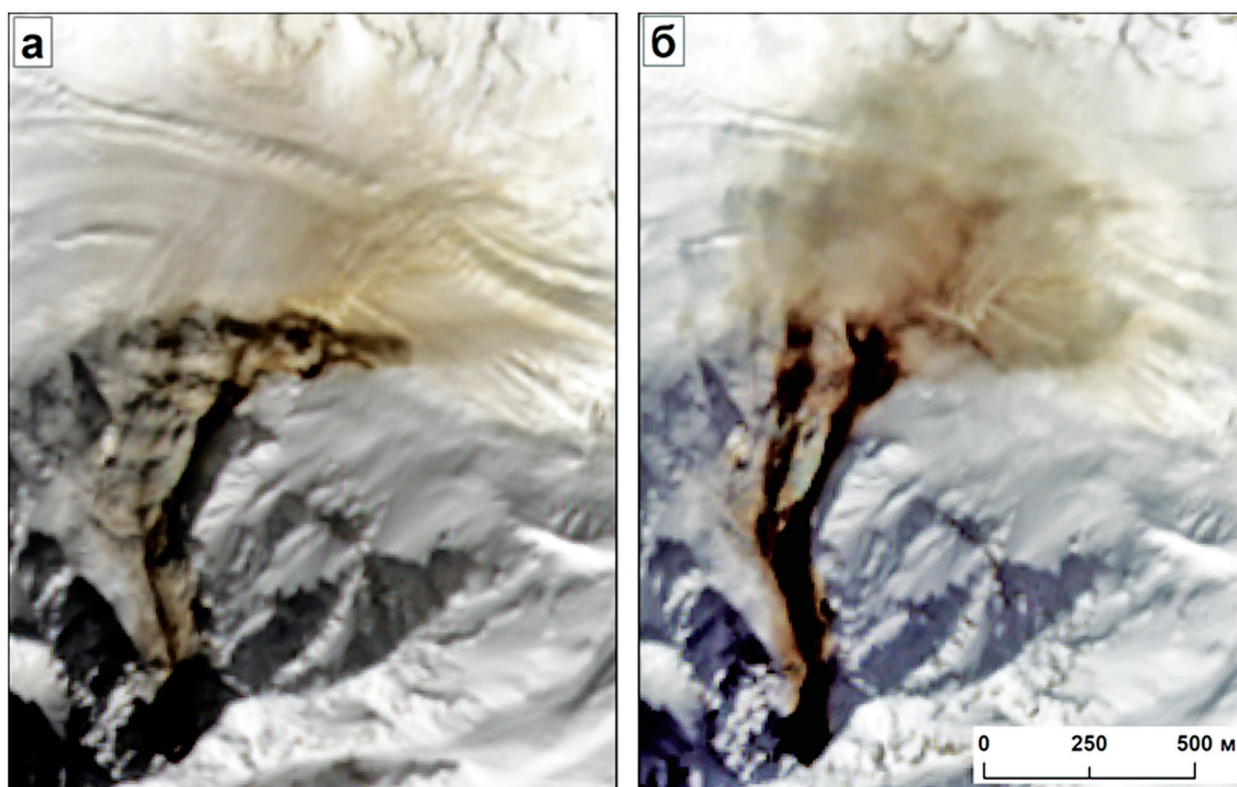


Рис. 4. Обвалы с горы 3512,7 м на правом склоне цирка ледника Лекзири (Грузия) на космоснимках Sentinel-2: а — 19.03.2019; б — 21.03.2019

Через месяц в 3,5 км от участка каменной лавины на леднике Лекзири сошла снежно-ледово-каменная лавина с горы Башкара (24 апреля 2019 г. [9]) с площадью зоны поражения 0,93 км². В свою очередь, лавине с горы Башкара предшествовал небольшой обвал в период 12.07—13.08.2018 г. с площадью зоны поражения 0,082 км².

Эти факты свидетельствуют о том, что обвалы и каменные лавины могут сходить с одних и тех же участков через определенные периоды времени (от нескольких дней до года и более) и могут влиять на сход каменных лавин на соседних с ними участках горных хребтов как дестабилизирующий фактор [3]. Небольшие обвалы могут быть предвестниками крупных и, наоборот, после крупных обвалов можно ожидать остаточные явления в виде небольших обвалов, как это показала каменная лавина 01.01.2022 в долине р. Аксаут [6]. После схода гигантской каменной лавины со стенки цирка Хасаутского ледника уже в июне 2022 г. на участке отрыва каменной лавины происходили обрушения с дальностью выброса 1,2 км с шириной зоны отложений более 400 м. Но перед сходом каменной лавины 1 января 2022 г. видимых признаков подготовки на космоснимках выявлено не было.

Таким образом, как и в случаях схода ледников, в некоторых случаях на космоснимках бывают видны признаки их подготовки. К тому же каменные лавины могут влиять на сход ледников [1] и, наоборот, сход ледников может провоцировать сход каменных лавин на соседних участках.

Признаки подготовки селевого процесса на массивах морен

Определение участков появления новых селевых очагов в ходе продолжающейся деградации ледников является сложной проблемой. В некоторых случаях перед сходом селей на массивах морен могут возникать деформации и образуются трещины, по которым происходит сдвиг моренных масс. В 2022 г., по данным аэрофотосъемок, до и после селя в долине р. Мижирги (бассейн р. Черек Безенгийский) на участке будущего селевого очага была выявлена протяженная трещина за 17 дней перед сходом селевого потока 13 августа (рис. 5б).

В кармане береговой морены к тому времени уже была четкая зияющая трещина протяженностью 450 м и шириной до 1,5 м, по которой происходило сползание массива береговой морены и в которую уходил водный поток, протекавший здесь ранее. Произошли водонасыщение массива морены и его сход в виде плотного грязекаменного потока, отложениями которого была занесена часть территории альплагеря Безенги. В дальнейшем можно будет предполагать развитие подобных

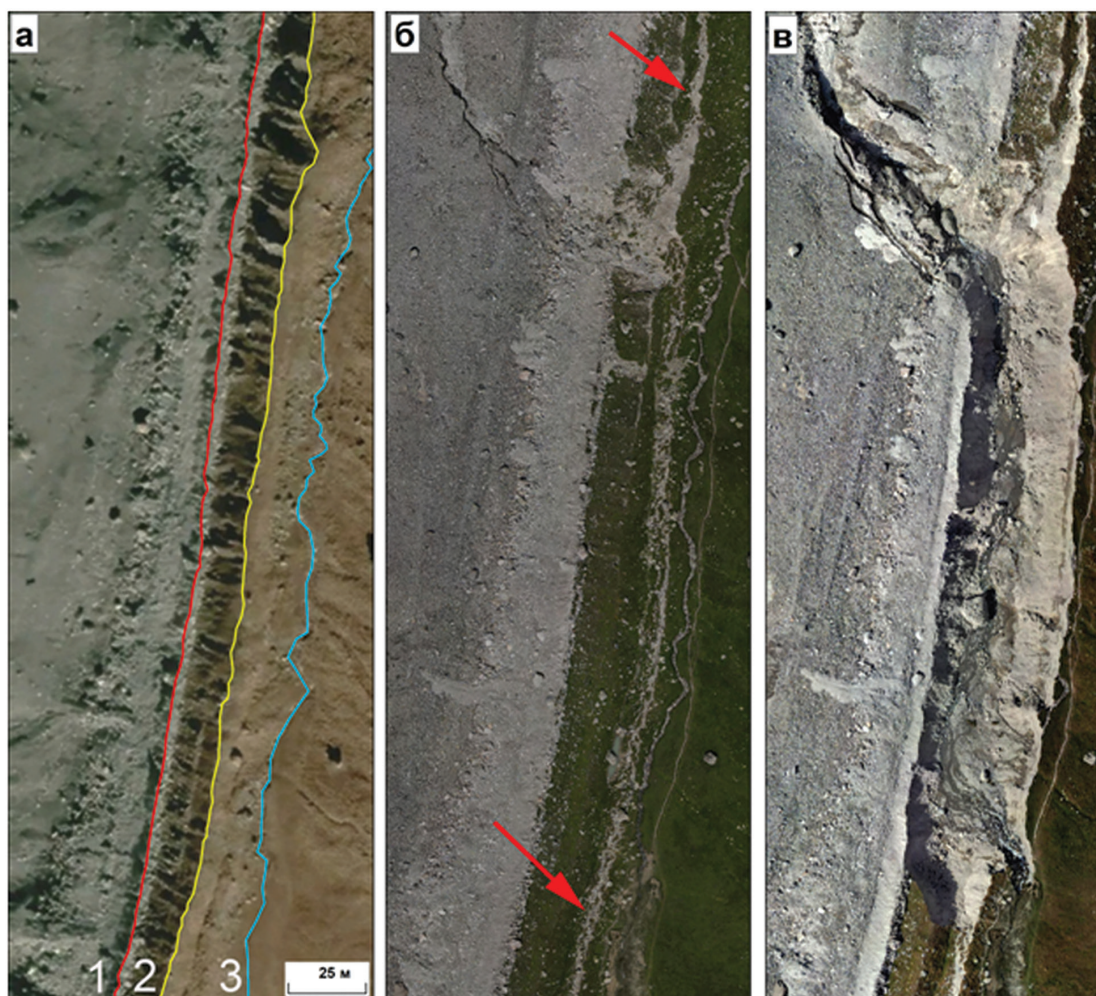


Рис. 5. Участок селевого очага на береговой морене ледника Мижирги: а — космоснимок Google Earth 28.10.2019 Pleiades-1A (1 — боковая морена от наступания ледника в начале XXI века; 2 — гребень береговой морены малого ледникового периода; 3 — водоток в кармане береговой морены; б — фото с квадрокоптера 26.07.2022 (стрелками показана линия трещины); в — фото с квадрокоптера 28.08.2022 (образовавшийся селевой врез)

процессов на других массивах морен в случаях выявления трещин и заранее предупреждать о возможном сходе селевого потока.

Выводы

Сход ледников, каменные и ледово-каменные лавины, гляциальные сели — относительно редкие явления, но в последнее время становятся чаще и охватывают территории, на которых они раньше не фиксировались. Их большой объем, быстрая эволюция, а также исключительно большие расстояния до участков отложений и высокие

скорости создают потенциал для серьезного воздействия даже вдали от очагов (от зон отрыва).

Одним из наиболее осуществимых способов реагирования на появление новых угроз в высокогорной зоне вследствие ускорения деградации ледников является выявление признаков подготовки опасных процессов на основе анализа разновременных космоснимков и аэрофотоснимков и предупреждение о грозящей катастрофе. Увеличение частоты съемок, пространственного разрешения и повышение доступности спутниковых снимков особенно полезны для оценки вероятности схода ледников, ледово-каменных и каменных лавин и гляциальных селей.

Данные непрерывного космического мониторинга могут дополняться проведением аэрофотосъемок участков, где будут выявлены признаки подготовки опасных процессов, а также участков со сходными геолого-геоморфологическими условиями рядом с выявленными проявлениями процессов.

Не во всех случаях можно выявить признаки подготовки опасных процессов и не всегда выявленные признаки будут реализованы. Но даже некоторые удачные предупреждения чрезвычайных ситуаций будут иметь большое значение для предотвращения гибели людей и для обеспечения безопасности объектов.

Список использованных источников

1. Докукин М. Д., Беккиев М. Ю., Калов Р. Х. и др. Активизация обвалов на Центральном Кавказе и их влияние на динамику ледников и селевые процессы // Лед и снег. 2020. Т. 60. № 3. С. 361–378.
2. Беккиев М. Ю. Об оценке опасности сходов и обвалов ледников / М. Ю. Беккиев, М. Д. Докукин, Х. М. Калов, Р. Х. Калов // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа (ГЕОКАВКАЗ 2021): Коллективная монография по материалам XI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, 18–20 ноября 2021 г., г. Ессентуки. Т. XI. М.: ИИЕТ РАН, 2021. С. 181–186.
3. Беккиев М. Ю. Пространственно-временные особенности развития разрушительных процессов в ледниковой зоне (на примере последних событий на Памире, в Тибете и Гималаях) / М. Ю. Беккиев, М. Д. Докукин, Р. Х. Калов, С. И. Шагин // Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии / Под ред. В. Б. Заалишвили. Владикавказ: ГФИ ВНЦ РАН, 2022. С. 362–369.

4. Беккиев М.Ю. О сходах ледников в 2021–2022 годах / М.Ю. Беккиев, М. Д. Докукин, Р. Х. Калов, С.И. Шагин // Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (Владикавказ, 20–21 сентября 2022 г.): Результаты 20 лет изучения катастрофы мирового масштаба в Геналдонском ущелье (сход ледника Колка). Владикавказ: Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), 2022. С. 155–163.
5. Докукин М.Д., Савернюк Е.А. О возможности оценки угрозы каменных лавин (на примере долины р. Харгабахк, Чеченская республика) // В мире научных открытий. 2010. № 3–4 (9). С. 146–151.
6. Каменная лавина в долине реки Аксаут 1 января 2022 г. и другие обвалы на Кавказе с 1957 по 2022 годы / Е. А. Савернюк, М. Д. Докукин, С. С. Черноморец и др. // Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (Владикавказ, 20–21 сентября 2022 г.): Результаты 20 лет изучения катастрофы мирового масштаба в Геналдонском ущелье (сход ледника Колка). Владикавказ: Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), 2022. С. 50–68.
7. Мониторинг обвалов, оползней и других разрушительных процессов в высокогорной зоне на основе анализа разновременных космоснимков / М. Д. Докукин, М. Ю. Беккиев, Р. Х. Калов и др. // Изучение опасных природных процессов и геотехнический мониторинг при инженерных изысканиях: Материалы Общероссийской научно-практической конференции). М.: ООО «Геомаркетинг», 2021. С. 59–68.
8. Признаки подготовки катастрофических сходов ледников (анализ разновременной космической информации) / М. Д. Докукин, М. Ю. Беккиев, Р. Х. Калов и др. // Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии: Коллективная монография / Под ред. А. В. Николаева, В. Б. Заалишвили. Владикавказ: Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук, 2019. С. 522–528.
9. Снежно-ледово-каменная лавина на леднике Башкара в ущелье Адыл-Су (Центральный Кавказ) 24 апреля 2019 года / М.Д. Докукин, Р.Х. Калов, С.С. Черноморец и др. // Криосфера Земли, 2020. Т. 24. № 1. С. 64–70.
10. Тутубалина О.В., Черноморец С.С., Петраков Д.А. Ледник Колка перед катастрофой 2002 года: новые данные // Криосфера Земли. 2005. Т. IX. № 4. С. 62–71.
11. Dematteis, N. et al. Ten-Year Monitoring of the Grandes Jorasses Glaciers Kinematics. Limits, Potentialities, and Possible Applications of Different Monitoring Systems. Remote Sens. 2021. 13. 3005. <https://doi.org/10.3390/rs13153005>.

12. Leinss, S. et al. Glacier detachments and rock-ice avalanches in the Petra Pervogo range, Tajikistan (1973–2019). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2021. Vol. 21. PP. 1409–1429. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-1409-2021>, 2021.
13. Kääb, A. et al. Sudden large-volume detachments of low-angle mountain glaciers — more frequent than thought? *Cryosphere*. 2021. Vol. 15. No. 4. PP. 1751–1785. <https://doi.org/10.5194/tc-15-1751-2021>, 2021.
14. Shugar, D.H. et al. A massive rock and ice avalanche caused the 2021 disaster at Chamoli, Indian Himalaya. *Science* 16 Jul 2021: Vol. 373. Issue 6552. PP. 300–306. DOI: 10.1126/science.abh4455.