ГЕОМОРФОЛОГИЯ И ПАЛЕОГЕОГРАФИЯ, 2024, том 55, №3, с. 73—89

ГЛЯЦИАЛЬНАЯ ГЕОМОРФОЛОГИЯ

УДК 551.435.174:551.435.445(23.0)

СЕЛЕВЫЕ ПРОЦЕССЫ НА БЕРЕГОВЫХ МОРЕНАХ ГОРНЫХ ЛЕДНИКОВ (АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР)[#]

© 2024 г. М. Ю. Беккиев[1], М. Д. Докукин[1,*], М. Ч. Залиханов[1], Р. Х. Калов[1], Л. М. Федченко[1], А. Р. Акаев[1]

[1] *Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Россия*
[*] *E-mail: inrush@bk.ru*

Поступила в редакцию 10.01.2024 г.
После доработки 07.04.2024 г.
Принята к публикации 19.07.2024 г.

В последние годы наблюдается ускоренная деградация горных ледников. В результате дегляциации формируются морены различных типов, сопряженные с гляциально-коллювиальными и другими отложениями. Наиболее активно в селевые процессы вовлекаются конечные морены с протяженными крутыми уступами, на которых развиваются селевые врезы. Значительно реже селевые очаги появляются на береговых моренах, но эти селевые потоки могут достигать катастрофических размеров. Приведены данные о селевых очагах, связанных с береговыми моренами горных ледников, карманами береговых морен, а также с находящимися в них озерами и водотоками. Такие очаги охарактеризованы для Центрального Кавказа, Анд, Гиндукуша, Гималаев и Тибета. Самые крупные селевые катастрофы связаны с прорывами озер Палькакоча в Перу в 1941 г. и Чорабари в Индии в 2013 г. с числом погибших до 6054, а также с прорывом озера Лхонак Южное в Сиккиме (Индия) в 2023 г. На береговых моренах, сопряженных с пьедесталами бывших ледников притоков, объемы селевых выносов могут достигать 6.5 млн м^3 (ледник Ганготри в Гималаях в 2017 г.). Селевые процессы на береговых моренах необходимо учитывать при освоении горных территорий как вблизи морен, так и на значительном от них удалении.

Ключевые слова: береговая морена, селевой очаг, прорыв озера, моренный пьедестал, селевой врез

DOI: 10.31857/S2949178924030049, **EDN:** PLUOGZ

ВВЕДЕНИЕ

В результате изменения климата в последние годы наблюдается ускоренная деградация горных ледников. От них остается обломочный материал в виде морен, который вовлекается в эрозионные и оползневые процессы. Появляются селевые очаги вследствие таяния заключенного в моренах льда, размыва потоками ледниковых вод или ливневыми осадками. Сели возможны уже в начальный период отступания ледников и быстро достигают максимальной силы, постепенно в них вовлекаются и береговые морены[1]. Для их склонов характерны равномерно распределенные эрозионные рытвины (борозды). Оценка скорости формирования таких борозд проводилась в ряде работ (Харченко и др., 2021; Dusik et al., 2019; Ash, 2020; Woerkom et al., 2019; Wang et al., 2022).

Иногда на береговых моренах образуются крупные селевые врезы глубиной от нескольких десятков до 100 м и более, приуроченные к резким перегибам профиля склона (СП 479.1325800.2019). Примеры проявления подобных селей нами изучены на Центральном Кавказе и в других районах (Беккиев и др., 2021а; Беккиев и др., 2021б). С береговыми моренами связаны крупнейшие селевые катастрофы в Перу (прорыв озера Палькакоча в 1941 г.) и в Индии (прорыв озера Чорабари в 2013 г.) (Докукин, 2014; Dobhal et al., 2013; Rao et al., 2014; Allen et al., 2015; Klimeš et al., 2016), прорыв озера Лхонак Южное в 2023 г. (Число погибших, 2023; Active deformation, 2023). В настоящей статье обобщены данные публикаций по селепроявлениям на участках береговых морен и приведены материалы анализа космо- и аэрофо-

[#] *Ссылка для цитирования*: Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Залиханов М.Ч. и др. (2024). Селевые процессы на береговых моренах горных ледников (аналитический обзор). *Геоморфология и палеогеография*. Т. 55. № 3. С. 73–89. https://doi.org/10.31857/S2949178924030049; https://elibrary.ru/PLUOGZ

[1] Береговая морена – морена горных ледников, отложенная в виде гряд или ступеней вдоль склонов долины, при частичном или неполном таянии ледника. Образуется из морены боковой, которая остается при вытаивании на склонах долины (Геологический словарь, 1978, с. 482).

тоснимков, позволяющие систематизировать и типизировать эти случаи и определить механизмы селеформирования, а в дальнейшем использовать и при оценке селеопасности территорий горно-ледниковых районов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе были использованы космоснимки Sentinel-2 и Landsat 4-9 с сайта https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/ с пространственным разрешением 10–30 м и с различными вариантами обработки, в том числе в 3D-формате, а также космоснимки сверхвысокого разрешения с сервисов Google Earth, Bing Maps (QuickBird, WorldView-2, GeoEye-1, Pleiades-1A). Кроме этого, использованы материалы аэрофотосъемки селевого очага до и после селя 13 августа 2022 г. в верховьях р. Мижирги (бассейн р. Черек-Безенгийский, Центральный Кавказ) с применением квадрокоптера DJI Mavic Air 2 (Акаев, Шидугов, 2023; Беккиев и др., 2023).

Разновременные космические снимки сравнивались визуально в программе ArcMap с использованием инструмента “зашторить слой” (Swipe Layer) для выявления селепроявлений, а также построения векторных слоев контуров селевых врезов и отложений, на основе которых проводились автоматические вычисления их площади и определения длины. В программе Agisoft Metashape Professional построены ортофотопланы и цифровые модели местности и определены объемы выноса материала из массива береговой морены ледника Мижирги.

ПРОЦЕССЫ НА БЕРЕГОВЫХ МОРЕНАХ И ПРОРЫВЫ ОЗЕР

В результате отступания ледников на дне долин образуются озера, подпруженные валами конечных морен. Нередко они располагаются между высокими склонами береговых морен. Озера образуются также в карманах береговых морен (пространство между склоном долины и береговой мореной) и возвышаются над дном долин. Такие озера могут существовать долго, пока не возникнут условия для прорыва.

Озеро Чорабари (Ганди Саровар) существовало более 100 лет на высоте 3860 м в кармане правой береговой морены ледника Чорабари (рис. 1, (а)) в верховьях долины р. Мандакини (правый приток р. Алакнанда в штате Уттаракханд, Индия). Его прорыв 17 июня 2013 г. стал крупнейшей селевой катастрофой (Докукин, 2014; Dobhal et al., 2013; Allen

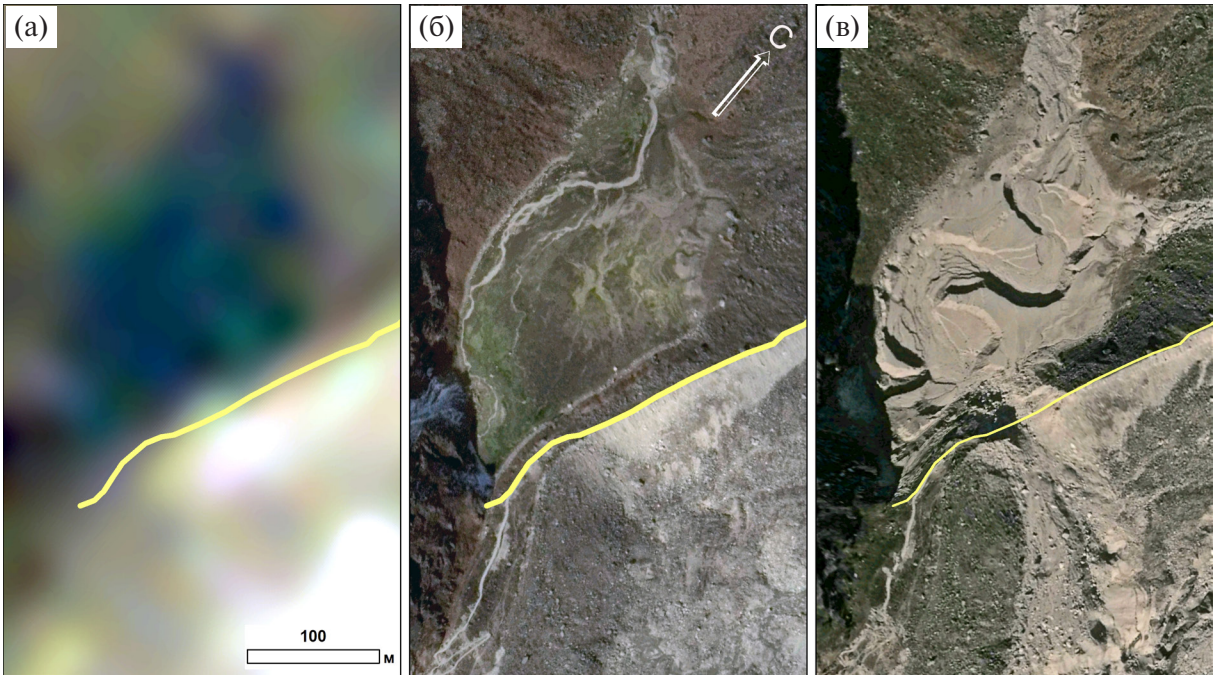

Рис. 1. Участок кармана правой береговой морены ледника Чорабари до и после прорыва озера Чорабари на космоснимках: (а) – 26.09.2010 Landsat 4-5 TM, (б) – 09.11.2011 WorldView-2, (в) – 14.12.2013 Pleiades-1A. Желтая линия – гребень береговой морены.

Fig. 1. A section of the pocket of the right lateral moraine of the Chorabari glacier before and after the Chorabari Lake outburst on satellite images: (a) –26.09.2010 Landsat 4-5 TM, (б) – 09.11.2011 WorldView-2, (в) – 14.12.2013 Pleiades-1A. The yellow line is the ridge of the lateral moraine.

et al., 2015). Сток с озера осуществлялся по фильтрационным каналам в береговой морене. Площадь водосбора озера составляла 2.2 км^2 (Беккиев и др., 2021), минимальная высота гребня береговой морены над дном котловины озера – 12–15 м. Глубина озера обычно не превышала 2–4 м. Часто озеро отсутствовало (рис. 1, (б)), так как пропускная способность фильтрационных каналов была достаточной для пропуска вод ручья, протекавшего по карману береговой морены. Питание озера осуществлялось в результате снеготаяния и дождей. Прорыв озера произошел после ливневых дождей (за двое суток выпало 325 мм) (Dobhal et al., 2013), когда по дну кармана проходил селевой поток и уровень воды достиг гребня морены. При переливе волнами от проходящего селевого потока морена быстро размылась и обрушилась на участке шириной 80 м (рис. 1, (в)). Объем озера перед прорывом достигал 400 тыс. м^3, а расход прорывного паводка – около 800 м^3/с (Rao et al., 2014). Были разрушены населенные пункты в долине р. Мандакини и погибло 6054 человека (Human ..., 2000–2019). Подобный механизм в виде селевой волны наблюдался при прорыве озера Башкара в долине р. Адылсу (Центральный Кавказ) в 2017 г. (Докукин и др., 2020).

Озера в карманах береговых морен могут со временем заполняться аллювиально-пролювиальными отложениями. В кармане морены ледника Дых-Котю-Бугайсу (Дых-Су) в верховьях долины р. Черек-Балкарский (Центральный Кавказ), подобного Чорабари, но уже заполненного, сошел сель в 2017 г. (рис. 2). По плоскому дну кармана шириной 45–50 м и площадью 7.5 тыс. м^2, похожему на дно бывшего озера, до селя растекался водный поток, берущий начало с трех малых ледников и имеющий площадь водосбора 3.3 км^2. На участке замыкания гребня береговой морены водный поток протекал по подземному фильтрационному каналу длиной 40–45 м (рис. 2, (а)). После ливня 5 августа 2017 г. паводок размыл участок дна котловины и склоны береговой морены, образовал врез шириной до 120 м, площадью – 34.5 тыс. м^2 (рис. 2, (б, в)). Площадь селевых отложений составила 139 тыс. м^2 (рис. 2, (б)) (Беккиев и др., 2021б). Ниже по долине р. Черек-Балкарский на удалении 16.5 км селевым потоком было размыто 300 м участка дороги Урвань–Уштулу.

Причиной прорывов озер, расположенных на дне долин между береговыми моренами, могут быть оползни на участках, сопряженных с гляциально-коллювиальными отложениями карманов береговых морен. На рис. 3, (в, г) показано озеро Цзиньуцо (Jinwuco, Jiwenco) в долине правого притока р. Нидоу (Ниду) Цзанбо (уезд Лхари, Тибет, Китай) до и после прорыва 26 июня 2020 г. и участок оползня на левой береговой морене ледника Цзиньу (рис. 3, (а, б)). Объем сползших с береговой морены масс составил 1.2 млн м^3 (Zheng et al., 2021), а объем сброшенной воды из озера – 5.4 млн м^3 (Wang et al., 2021). Оползневой процесс захватил массив береговой морены шириной около 230 м. Он был сопряжен с конусом гляциально-коллювиальных отложений, заполнивших карман береговой морены. На соседних слева и справа конусах наблюдаются следы ниши отрыва и эрозионного вреза, что свидетельствует о развитии аналогичных процессов, но в меньших размерах. Селевым потоком был причинен значительный ущерб населенным пунктам ниже по долине Нидоу Цзанбо, разрушена дорога на протяжении 43.9 км, снесено 7 мостов, затоплены и занесены сельхозугодия на площади более 25 га, уничтожено 9 га леса.

В работе М.Д. Докукина (2014) приведены данные о прорыве Артизонских озер в Перуанских Андах в 2012 г. в результате оползня объемом около 800 тыс. м^3 с левой береговой морены ледника, спускающегося с горы Артесонраху, в верховьях левого притока р. Санта-Крус.

Оползнем на береговой морене 4 октября 2023 г. был вызван катастрофический прорыв озера Лхонак Южное на высоте 5200 м в долине р. Тиста (штат Сикким, Индия), во время которого погибло 82 человека и более 140 человек пропали без вести. В общей сложности пострадали свыше 25 тыс. человек, более 7 тыс. вывезены в безопасные места и размещены во временных лагерях. Повреждены более 1.2 тыс. домов, разрушены свыше десятка мостов и плотина ГЭС Тиста III в Чунгтханге, размыты дороги (Число погибших, 2023; Active deformation, 2023). Ранее оценивались возможные последствия прорыва этого озера от падения в него масс льда висячих ледников (Sattar, et al., 2021), а вариант воздействия оползня с береговой морены не рассматривался.

На рис. 4 показано озеро Лхонак Южное до и после прорыва. По нашим данным площадь озера до прорыва составляла 1.67 км^2, а после прорыва – 1.44 км^2. Длина озера составляла 2.87 км и уменьшилась на 250 м. Объем озера при площади 1.35 км^2 составлял 65.8 млн м^3, а глубина – до 130 м (Sattar, et al., 2021).

Левая береговая морена ледника Южный Лхонак сопряжена с массивами конечных морен бывших левых притоков ледника Южный Лхонак – Северный Лхонак и Средний Лхонак, разделенных грядой срединной морены. Водный поток с ледника Северный Лхонак ранее прорезал береговую морену и в настоящее время впадает в озеро Лхо-

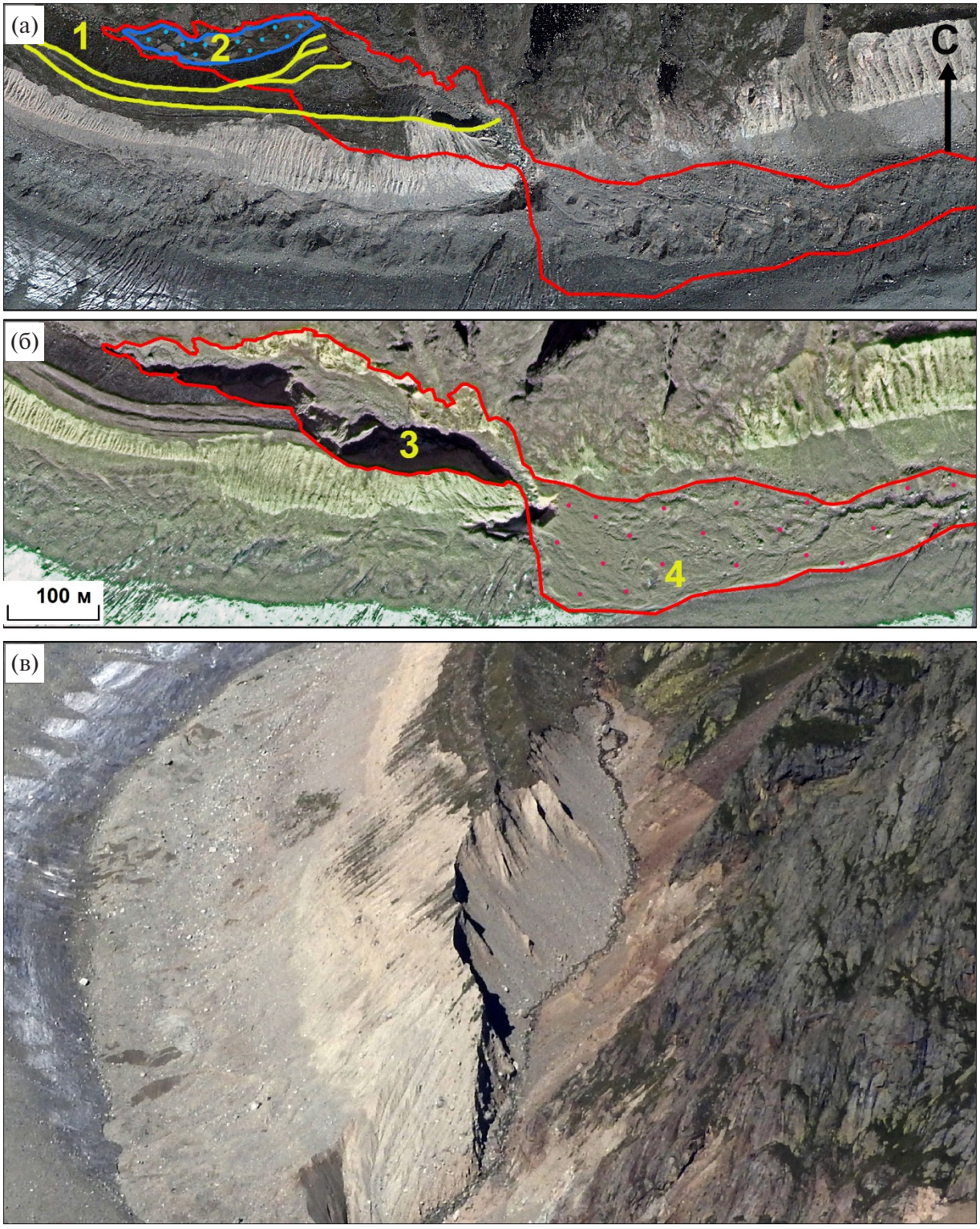

Рис. 2. Участок кармана левой береговой морены ледника Дых-Котю-Бугайсу (Дых-Су) до и после селя 5 июля 2017 г. на космоснимках: (а) – 19.09.2011 GeoEye-1, (б) – 06.10.2017 GeoEye-1, на вертолетной фотографии М.Д. Докукина: (в) – 19.09.2023.
1 – гребни береговых морен; 2 – озеровидная площадка; 3 – селевой врез; 4 – селевые отложения.

Fig. 2. The section of the pocket of the left lateral moraine of the Dykh-Kotyu-Bugaysu glacier (Dykh-Su) before and after the debris flow on July 5, 2017 on satellite images: (a) – 19.09.2011 GeoEye-1, (б) – 06.10.2017 GeoEye-1, on a helicopter photo by M.D. Dokukin: (в) – 19.09.2023.
1 – ridges of lateral moraines; 2 – lake-like area; 3 – debris flow cut; 4 – debris flow deposits.

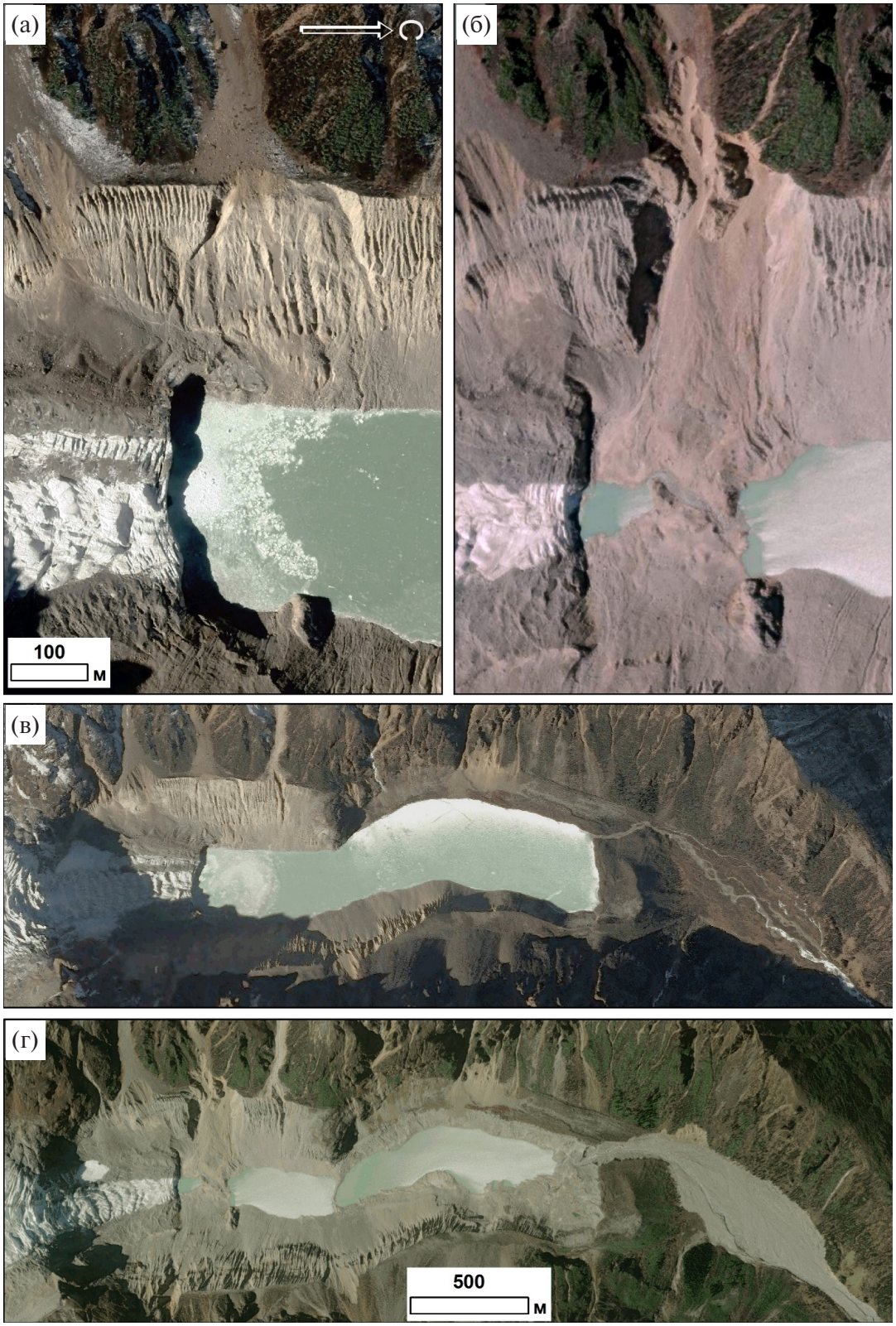

Рис. 3. Озеро Цзиньуцо в долине р. Нидоу Цзанбо в уезде Лхари (Тибет, Китай) до и после прорыва в 2020 г. на космоснимках Bing Maps и Google Earth: (а) – 24.12.2017 Pleiades-1A, (б, г) – 17.10.2021 WorldView-2, (в) – 29.11.2016 Pleiades-1A.

Fig. 3. Jinwuco Lake in the valley of the Nidou Zangbo River in Lhari County (Tibet, China) before and after the outburst in 2020 on Bing Maps and Google Earth satellite images: (a) – 24.12.2017 Pleiades-1A, (б, г) – 17.10.2021 WorldView-2, (в) – 29.11.2016 Pleiades-1A.

нак Южное. Конечные морены ледника Средний Лхонак (на рис. 4, (а) слева от гряды срединной морены) содержат массы мертвых и погребенных льдов, при таянии которых увлажнялся внутренний склон левой береговой морены ледника Южный Лхонак, что, вероятно, способствовало образованию оползня 4 октября 2023 г. Оползень в зоне отрыва имел ширину около 950 м, площадь – 0.25 км^2, а превышение гребня морены над озером составляло 150 м. Объем оползня при толщине 20–50 м, определенной по изменению береговой линии на участке оползания, мог составлять порядка 5–8 млн м^3. Анализ космоснимков показал, что в августе 2020 г. подобное оползание происходило на участке левой береговой морены выше описываемого на расстоянии 400 м. В то время массы оползня отложились на леднике. Если бы такой анализ был проведен ранее, то можно было организовать мониторинг за состоянием морены и систему предупреждения о прорыве.

Предполагается, что причиной катастрофического прорыва озера Палькакоча в 1941 г. (Перуанские Анды) и селевого потока на р. Кохуп, принесшего разрушения в г. Уарас и гибель нескольких тысяч человек, был оползень на правой береговой морене, возвышающейся над озером (Klimeš et al., 2016).

Таким образом, прорывы озер в котловинах на дне долин были вызваны оползнями со склонов береговых морен, а озер, расположенных в карманах береговых морен – размывом береговых морен, их ограничивающих. Кроме этого, происходил размыв заполненных флювиально-лимногенными отложениями котловин в карманах береговых морен. Возможен также вариант прорыва озера в результате оползания массива береговой

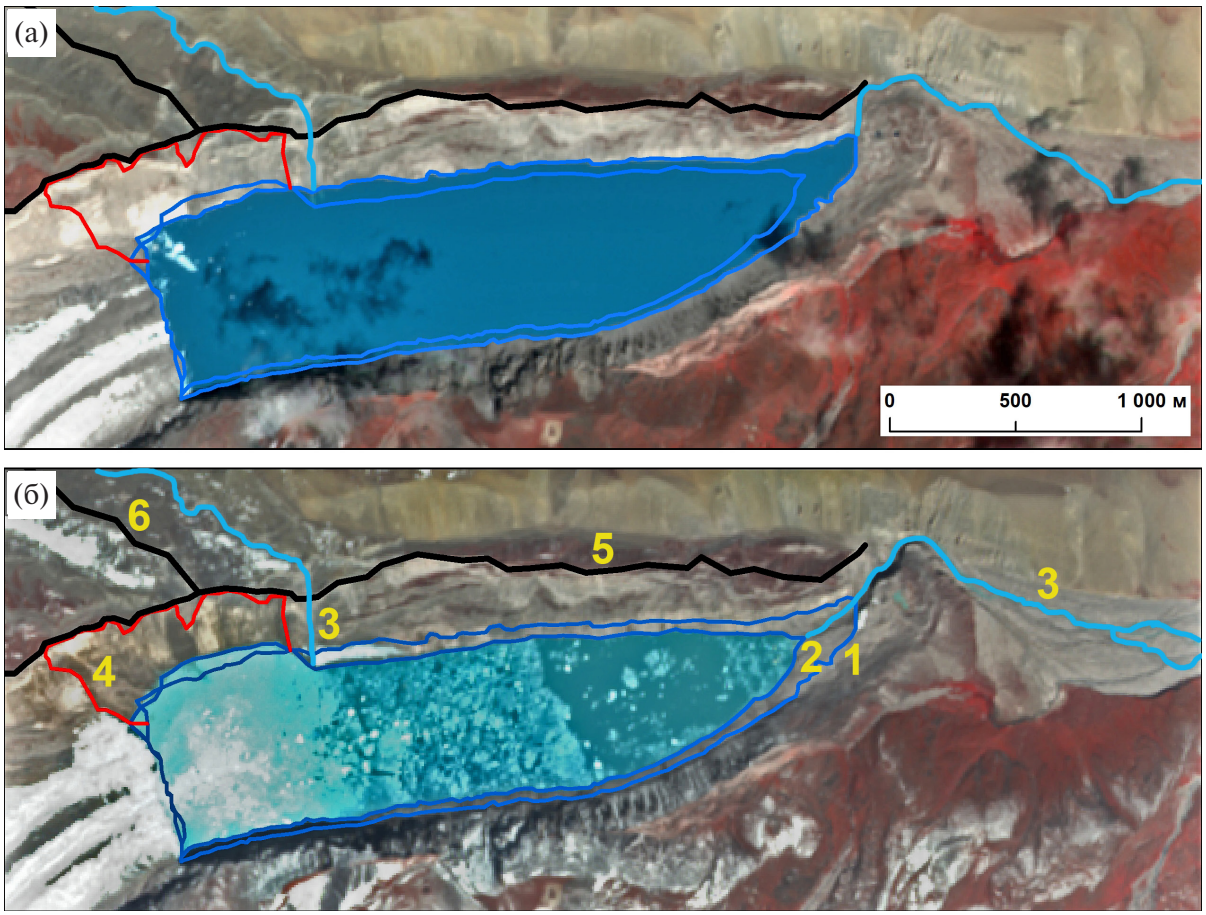

Рис. 4. Озеро Лхонак Южное в долине р. Тиста (Сикким, Индия) до и после прорыва 04.10.2023 на космоснимках Sentinel-2: (а) – 26.09.2023, (б) – 06.10.2023.
1 – граница озера 26.09.2023; 2 – граница озера 06.10.2023; 3 – водный поток, втекающий и вытекающий из озера; 4 – границы зоны оползня; 5 – гребень береговой морены; 6 – гряда срединной морены.

Fig. 4. South Lhonak Lake in the Teesta River valley (Sikkim, India) before and after the outburst in 10.04.2023 on Sentinel-2 satellite images: (a) – 26.09.2023, (б) – 06.10.2023.
1 – the boundary of the lake on 26.09.2023; 2 – the boundary of the lake on 06.10.2023; 3 – the water flow flowing in and out of the lake; 4 – the boundaries of the landslide zone; 5 – the crest of the lateral moraine, 6 – the ridge of the median moraine.

морены после длительного увлажнения существовавшим в кармане береговой морены озером. Такой случай зафиксирован в 2002 г. в долине р. Караугом (Центральный Кавказ) – прорыв озера Микелай площадью 9.3 тыс. м^2 с формированием среза площадью 11 тыс. м^2 на правой береговой морене ледника Караугом (Тавасиев, 2018; Беккиев и др., 2021б).

СЕЛЕВЫЕ ПРОЦЕССЫ НА УЧАСТКАХ БЕРЕГОВЫХ МОРЕН, СОПРЯЖЕННЫХ С МОРЕННЫМИ ПЬЕДЕСТАЛАМИ ЛЕДНИКОВ ПРИТОКОВ

Термин моренный пьедестал отсутствует в справочной литературе и словарях, в монографиях по гляциальной геоморфологии. Необычная моренная форма, напоминающая пьедестал, отмечена в работе (Репин, 1980) при описании морен пульсирующих ледников. Разнообразные морфологические типы моренных пьедесталов – языкообразных ледово-обломочных массивов, ограниченных с боков береговыми моренами и возвышающихся над днищами долин на 50–70 м, охарактеризованы в работе М.Д. Докукина (1988), но генезис этих форм был определен как гляциально-гравитационный. Предполагалось, что моренные пьедесталы образуются при выпахивании обвально-осыпных конусов ледниками, формирующимися в начальном периоде стадиального наступания. В дальнейшем был сделан вывод о том, что моренные пьедесталы – продукт многочисленных подвижек насыщенных обломками ледников, тела которых накладывались друг на друга (Докукин и др., 2019). В процессе эволюции моренных пьедесталов происходит вытаивание заключенного в них льда и разжижение моренных масс до состояния готовности к селеформированию. Моренные пьедесталы как особая форма ледниковых отложений охарактеризованы в работе П.А. Окишева (2017), но они не были отделены от каменных глетчеров. В работе И.М. Васькова (2016) рассмотрены пьедестальные ледники и показана связь моренных пьедесталов с геологическим строением, новейшей тектоникой и изменениями климатических условий. В работах М.Д. Докукина с соавт. (2016) и М.Ю. Беккиева с соавт. (2021а) приведены данные о селепроявлениях, связанных с деградацией моренных пьедесталов.

Моренные пьедесталы ледников притоков в месте их впадения в главный ледник образуют комплексы, сочетающие береговую морену главного ледника с моренным пьедесталом ледника притока. Такие случаи рассмотрены в работе М.Ю. Беккиева с соавт. (2021б) на примере участков береговых морен ледников Ирик (бассейн р. Баксан) и Дых-Котю-Бугайсу (бассейн р. Черек-Балкарский) с образованными на них врезами протяженностью около 500 м, площадью 30–50 тыс. м^2.

Одним из самых крупных селепроявлений на участках береговых морен долинных ледников, сопряженных с моренными пьедесталами ледников притоков, является врез, сформировавшийся в результате селевого процесса в июле 2017 г. на моренном пьедестале ледника Меру Бамак и левой береговой морене ледника Ганготри в верховьях р. Бхагиратхи – одного из истоков р. Ганг (штат Уттаракханд, Индия). На рис. 5 показан участок левой береговой морены ледника Ганготри и прилегающего к ней моренного пьедестала ледника Меру Бамак до и после селевого процесса.

Параметры образовавшего среза и отложений на дне долины: объем вынесенного материала – около 8 млн м^3, объем отложенного на дне долины селевого материала – около 6.5 млн м^3. Площадь образовавшегося среза составила 150 тыс. м^2, длина – около 1 км, а площадь селевых отложений – 470 тыс. м^2 (Kumar et al., 2019). Длина среза могла быть больше, но он был ограничен концом ледника Меру Бамак. Большая часть среза относится к моренному пьедесталу ледника Меру Бамак, меньшая – к береговой морене ледника Ганготри. Особенностью селевых процессов на береговых моренах, сопряженных с моренными пьедесталами, является почти полная аккумуляция селевых отложений сразу у конца среза на участке дна главной долины протяженностью 1–2 км, мощностью, часто превышающей 10 м.

В тех случаях, когда боковой приток основного ледника образует с ним единый язык, вследствие нескольких произошедших подвижек он может составлять отдельную многослойную толщу в виде пьедестала, прислоненную к боковой морене. При отступании ледника эта толща, фактически являющаяся моренным пьедесталом, образует террасовидную береговую морену. Если ниже впадения такого притока со склона спускается каменный глетчер, то язык ледника оттесняет его к склону и образуется террасовидная береговая морена. Она сочетает материал моренного пьедестала и каменного глетчера, как в случае сложного моренного комплекса ледника бывшего левого притока ледника Батсват в долине р. Ишкоман (Северный Пакистан). Там в июле—августе 2018 г. в результате продолжительного селевого процесса образовался врез площадью 0.27 км^2, длиной 1.2 км (Беккиев и др., 2021а).

На рис. 6 показан этот участок до и после формирования среза. Ранее небольшой врез сформировался на участке моренного пьедестала, при-

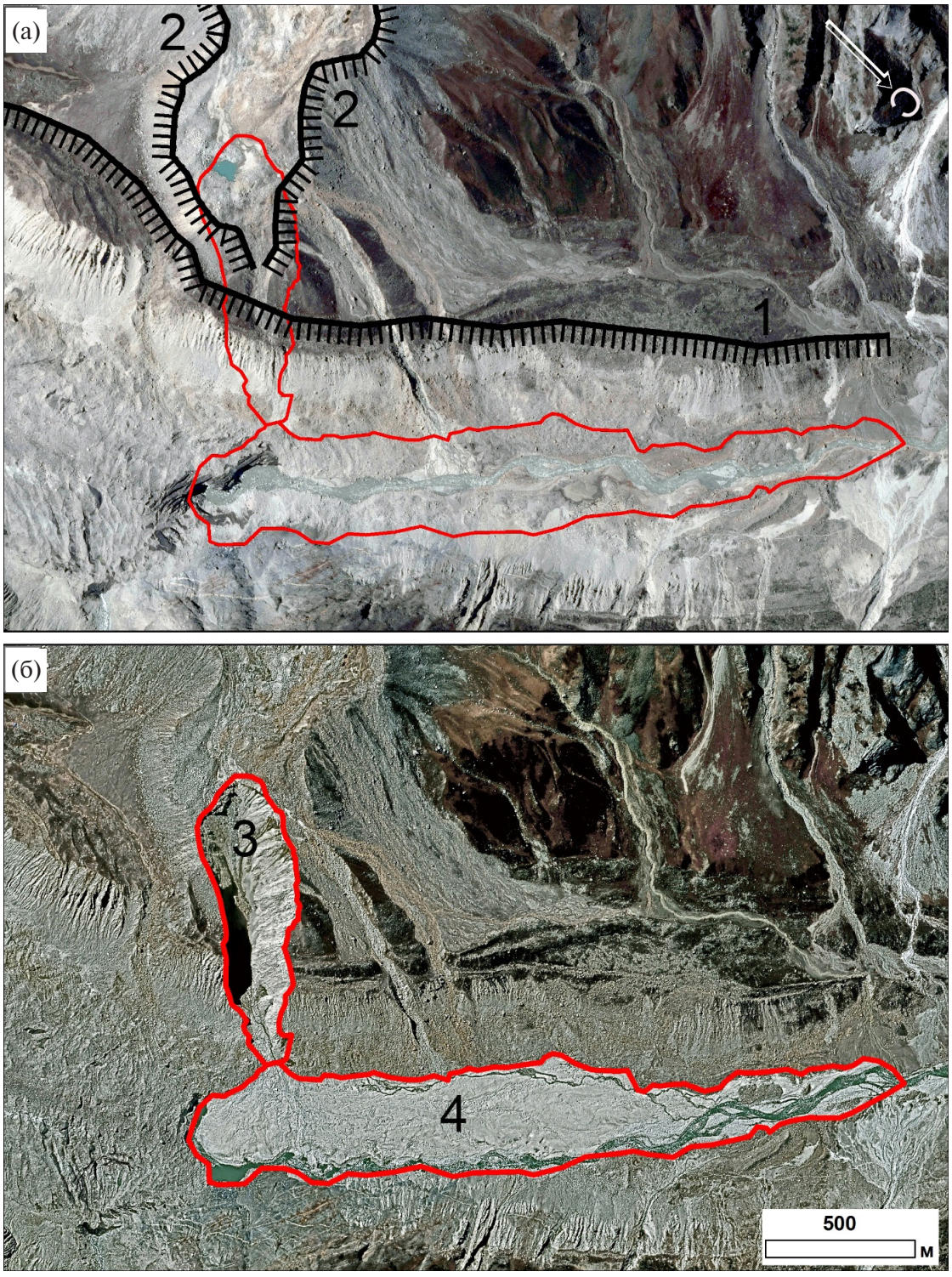

Рис. 5. Участок левой береговой морены ледника Ганготри и моренного пьедестала ледника Меру Бамак в верховьях р. Бхагиратхи (Гималаи, Индия) до и после селя в период с 16 по 19 июля 2017 г. на космоснимках Google Earth: (а) – 26.08.2014 Pleiades-1A, (б) – 07.10.2017 Pleiades-1A.
1 – гребень левой береговой морены ледника Ганготри; 2 – гребни береговых морен моренного пьедестала ледника Меру Бамак; 3 – селевой врез; 4 – селевые отложения.

Fig. 5. The section of the left lateral moraine of the Gangotri glacier and the moraine pedestal of the Meru Bamak glacier in the upper reaches of the Bhagirathi River (Himalayas, India) before and after the debris flow in the period from July 16 to 19, 2017 on Google Earth satellite images: (a) –26.08.2014 Pleiades-1A, (б) – 07.10.2017 Pleiades-1A.
1 – ridge of the left lateral moraine of the Gangotri glacier; 2 – ridges of the lateral moraines of the moraine pedestal of the Meru Bamak glacier; 3 – debris flow cut; 4 – debris flow deposits.

слоненного к левой береговой морене, а в 2018 г. произошло образование объединенного вреза с исчезновением срединной разделяющей гряды. При этом каменный глетчер, как компонент террасовидной морены, был более устойчив к селевым процессам, и поэтому почти не был ими затронут. Последствиями селя были разрушения и затопления домов в поселке Батсват на расстоянии 5 км от очага.

СЕЛЕВОЙ ПРОЦЕСС НА УЧАСТКЕ ПРАВОЙ БЕРЕГОВОЙ МОРЕНЫЛЕДНИКА МИЖИРГИ (ЦЕНТРАЛЬНЫЙ КАВКАЗ) 13 АВГУСТА 2022 г.

13 августа 2022 г. в долине р. Мижирги (бассейн р. Черек-Безенгийский) сошел необычный сель, очаг которого располагался на правой береговой морене ледника (Акаев, Шидугов, 2023;

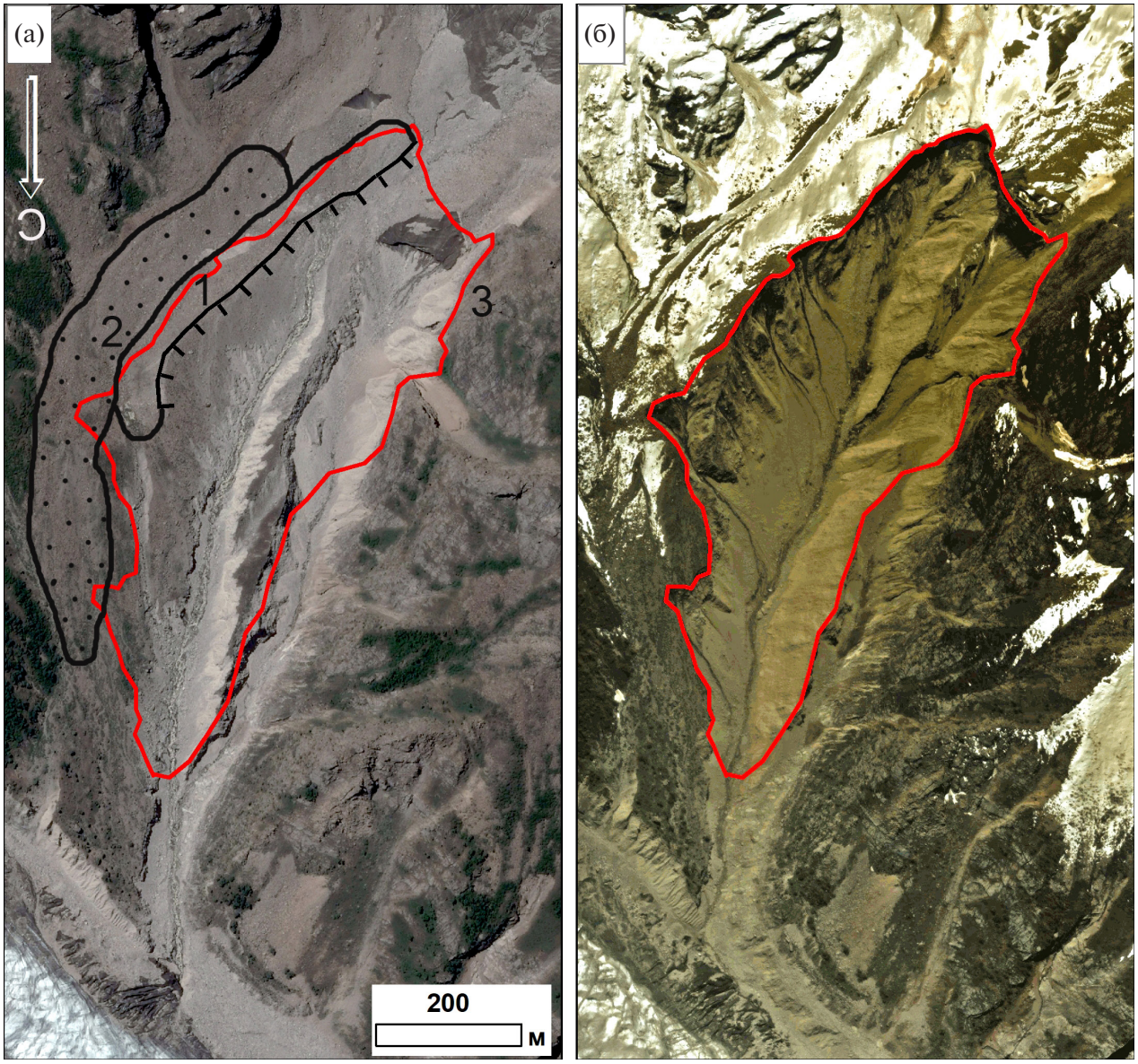

Рис. 6. Участок моренного комплекса бывшего левого притока ледника Батсват в долине левого притока р. Ишкоман (Пакистан) с террасовидным моренным пьедесталом до и после образования вреза в июле-августе 2018 г. на космоснимках Google Earth и Bing Maps: (а) – 10.07.2017 Pleiades-1A, (б) – 26.05.2020 WorldView-2.
1 – террасовидный моренный пьедестал; 2 – террасовидный каменный глетчер; 3 – селевой врез.

Fig. 6. A section of the moraine complex of the former left tributary of the Batswat glacier in the valley of the left tributary of the Ishkoman River (Pakistan) with a terraced moraine pedestal before and after the formation of the cut in July-August 2018 on Google Earth and Bing Maps satellite images: (a) – 10.07.2017 Pleiades-1A, (б) – 26.05.2020 WorldView-2.
1 – terraced moraine pedestal; 2 – terraced rock glacier; 3 – debris flow cut.

Беккиев и др., 2023). На рис. 7 показан участок селевого очага до и после селя. Врез асимметричный: левый борт возвышается над дном на 6–9 м, а правый – на 16–20 м, так как моренная гряда до селя имела склоны разной высоты (ее гребень показан красной линией на рис. 8, (а)).

Ширина среза составила 30–40 м, длина его на морене – 230 м, объем вынесенного материала – около 110 тыс. м^3 (включая возвышающуюся часть гребня береговой морены около 16 тыс. м^3). Средний угол наклона очага по дну среза составлял 6.7°.

На основе анализа разновременных аэро- и космоснимков ледника Мижирги предложен следующий механизм селеформирования.

По данным О.С. Бушуевой (2013) в период 1987–2004 гг. ледник Мижирги продвинулся вперед на 137 м. При этом произошло формирование

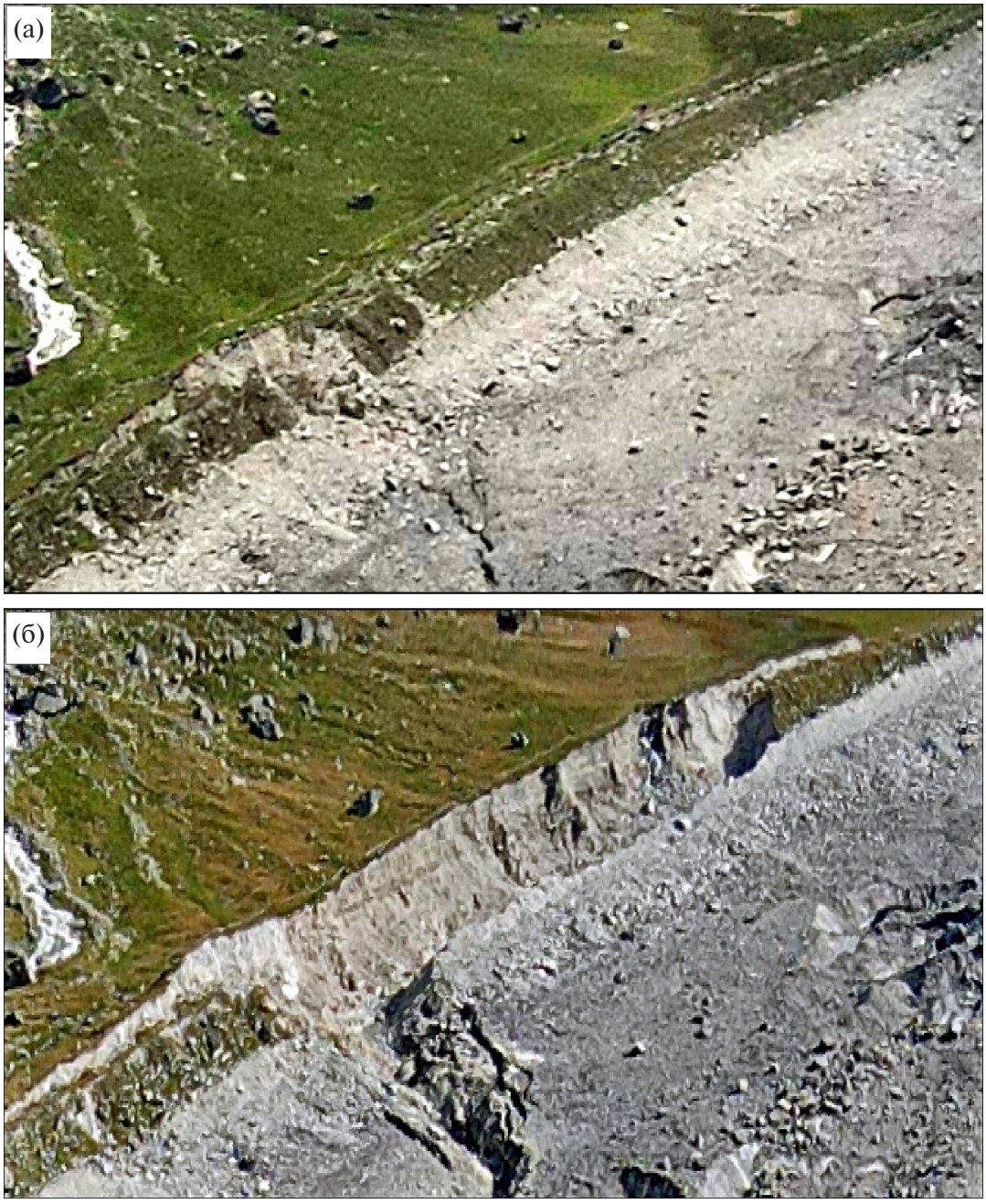

Рис. 7. Участок селевого очага на правой береговой морене ледника Мижирги до и после схода селя 13.08.2022 (фото с квадрокоптера): (а) – 26.07.2022, (б) – 28.08.2022.

Fig. 7. The site of the debris flow original site on the right lateral moraine of the Mizhirgi glacier before and after the debris flow on 13.08.2022 (photo from the quadcopter): (а) – 26.07.2022, (б) – 28.08.2022.

новой боковой морены (см. рис. 8, (а) – красная линия). Судя по космоснимкам Landsat 4-5, это движение было инициировано левым потоком льда, который оттеснил правый поток и, возможно, деформировал правую морену. В свою очередь, это способствовало проникновению потока талых вод ледника, расположенного на правом склоне долины р. Мижирги, внутрь массива береговой морены.

Можно предположить, что под основной грядой береговой морены находится массив мертвого ледникового льда. Его таяние под действием дополнительного притока воды привело к формированию полостей, которые заполнялись водой. Это сопровождалось просадкой и формированием протяженной зияющей трещины в кармане береговой морены шириной до 1.5 м и длиной около 450 м (см. рис. 8, (б) – нижний и верхний участ-

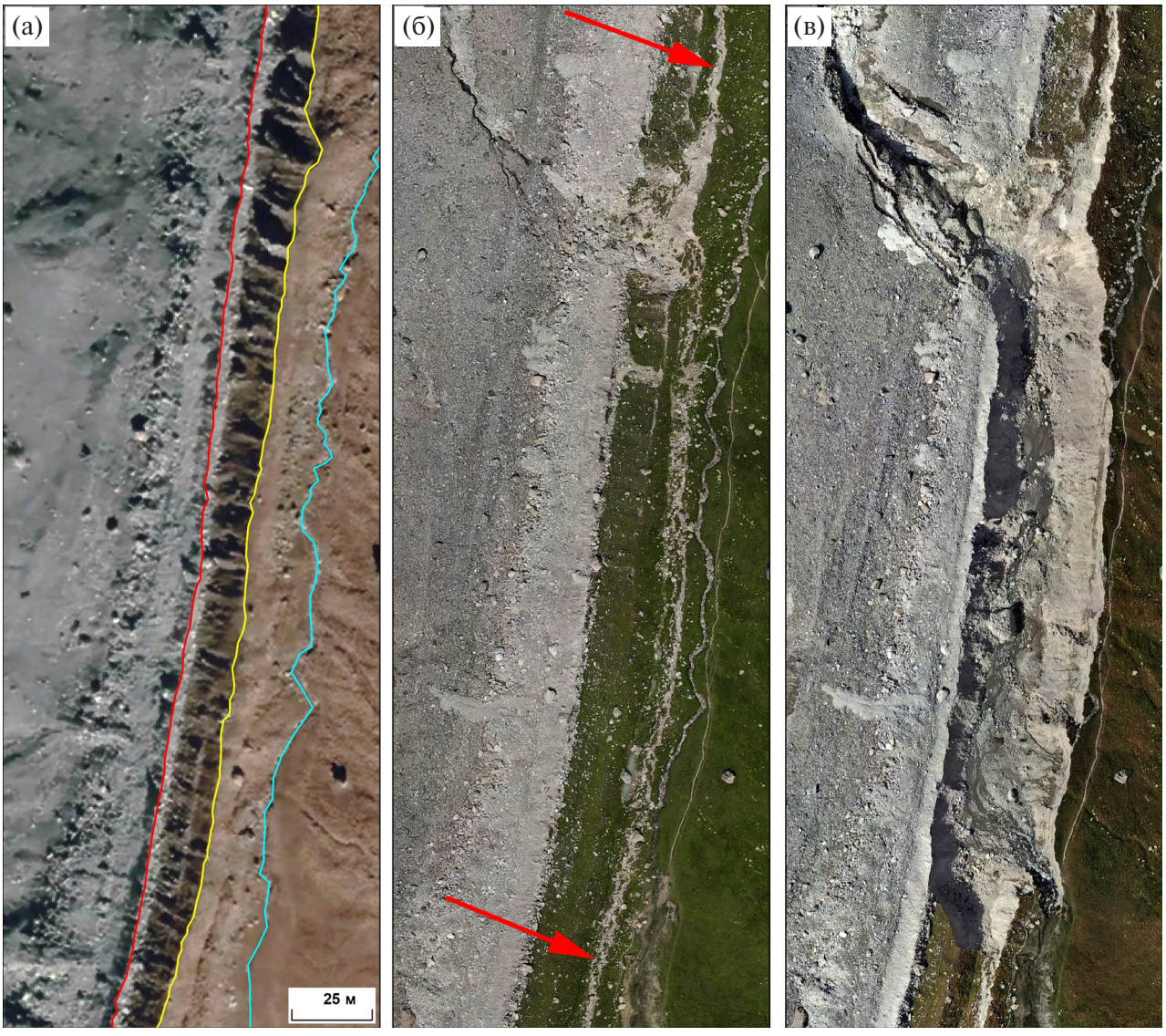

Рис. 8. Участок береговой морены ледника Мижирги: (а) – космоснимок Google Earth 28.10.2019 Pleiades-1A, (б) – фото с квадрокоптера 26.07.2022, (в) – фото с квадрокоптера 28.08.2022. Красная линия – гребень береговой морены XXI в., желтая линия – гребень береговой морены малого ледникового периода, голубая линия – русло водотока в кармане береговой морены, красные стрелки указывают на расположение трещины смещения гряды береговой морены.

Fig. 8. A section of the lateral moraine of the Mizhirgi glacier: (a) – Google Earth satellite image 28.10.2019 Pleiades-1A, (б) – photo from the quadcopter 26.07.2022, (в) – photo from the quadcopter 28.08.2022. The red line is the ridge of the lateral moraine of the XXI century, the yellow line is the ridge of the lateral moraine of the little Ice Age, the blue line is the watercourse bed in the pocket of the lateral moraine, the red arrows indicate the location of the fracture of the displacement of the ridge of the lateral moraine.

ки трещины показаны красными стрелками). На участке, отмеченном верхней красной стрелкой, произошло сползание массива морены вниз с образованием стенки отрыва. При этом образовались дугообразные трещины в зоне отрыва, и сползающий блок шириной 15–17 м был разбит и готов к обрушению. Подтверждением этому явился размыв ледника ниже очага с образованием среза шириной 15–20 м и глубиной до 4 м.

Поскольку образовавшийся селевой поток проходил по леднику, отложившиеся селевые массы мощностью до 8 м заблокировали выход талой воды из подледного канала. В результате произошло накопление воды в канале и последующий прорыв ее в виде селя по другому руслу р. Мижирги. Таким образом, селевой процесс на береговой морене вызвал прорывной водный импульс с ледника. Переносимый селем материал отлагался по бокам русел, а около альплагеря Безенги образовалось поле отложений шириной до 250 м и толщиной до 5 м. Часть территории альплагеря была занесена.

Таким образом, полученные данные о необычном селевом процессе на береговой морене ледника Мижирги показали, что потенциальные селевые массивы участков береговых морен могут иметь различную морфологию и располагаться как на склонах, так и на дне долин. Это необходимо учитывать при выборе объектов мониторинга и оценке селевой опасности.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В статье рассмотрен широкий спектр селепроявлений на участках береговых морен горных ледников. Его можно дополнить развитием селевого процесса на участке кармана береговой морены, заполненном селевым конусом выноса при сползании обводненных масс береговой морены и изменении направления русла притока, протекавшего вниз по карману – формирование среза шириной 150 м на конусе выноса р. Фастаг, сопряженном с левой береговой мореной ледника Караугом в 1988 г., и селевой процесс на правой береговой морене ледника Джанкуат в 2015 г. с развитием среза шириной 70 м (Васьков, 2006; Беккиев и др., 2021; Kharchenko et al., 2020).

Рассмотренные в статье примеры дают представление о селевых процессах на береговых моренах в период деградации ледников, когда, отступая, ледники оставляют на крутых склонах долин большие массы обломочного материала в виде протяженных береговых морен, заполняя участки ложбин притоков и способствуя аккумуляции селевых, оползневых обвально-осыпных масс и моренных масс ледников притоков в карманах береговых морен. Толщина береговых морен на этих участках становится максимальной и сопоставимой с толщиной некоторых конечноморенных комплексов, где формируются врезы. В период, когда к этому участку еще примыкает ледник, находящийся на дне долины, масса моренного материала обладает устойчивостью к сползанию и размыву вследствие наличия упора в виде тела ледника. Но когда ледник отступает, упор исчезает, и массив береговой морены подвергается воздействию оползневых и селевых процессов.

Массы береговых морен на отдельных участках сопряжены с отложениями различного генезиса – моренными пьедесталами ледников притоков, гравитационно-коллювиальными и селевыми конусами выноса. При отсутствии тела основного долинного ледника у подножия склонов эти отложения вырабатывают профиль равновесия и опираются на дно долины. Экзарационная деятельность движущегося по долине ледника приводит к выпахиванию отложенных в межстадиальный период масс у подножия склона и нарушению профиля равновесия, что впоследствии при отступании ледника вызывает активизацию склоновых и русловых процессов на участках массивов, расположенных в пригребневой зоне береговых морен, возвышающихся над дном долины.

Селевые потоки могут сходить с участков береговых морен с сопряженными с ними моренными пьедесталами без участия ливней за счет разжижения массы пьедестала в результате таяния заключенного в нем льда. Эти моренные массивы можно считать селевыми очагами обводнения. Объем селевых выносов в таких случаях определяется объемом моренного пьедестала. Плотные грязекаменные массы объемом в несколько миллионов кубометров аккумулируются на пологом дне долины в устье образовавшегося среза, и селевая опасность локализуется участками небольшой площади, как в случае процесса на береговой морене ледника Ганготри в 2017 г. в Индии. Но когда ниже врезов уклоны дна долины достаточны для продолжения селевого процесса, зона поражения может быть значительной, включая случаи, вызванные прорывами ледниковых емкостей или выпадением ливней (деградация террасовидного моренного пьедестала и селевой поток в долине левого притока р. Ишкоман в Пакистане в 2018 г.).

Когда по карману береговой морены протекает водный поток, часть водной массы попадает в береговую морену в результате фильтрации, тем самым насыщая водой массив морены. В результате происходит оползание массива морены и образование среза на склоне береговой морены, сопровождающееся сходом селевого потока, как

в случае селя в верховьях р. Джанкуат в долине р. Адылсу в 2015 г. Врезы на участках береговых морен могут образовываться и на дне долины с небольшим углом наклона на контакте с ледником, который еще не отступил и не освободил дно долины, как в случае селя в долине р. Мижирги в бассейне р. Черек-Безенгийский в 2022 г.

Наибольшую опасность представляют участки карманов береговых морен с озерами. Потенциал селевой опасности их тем выше, чем больше объем водной массы. Если озеро не имеет поверхностного стока, как было в случае озера Чорабари в Индии, динамика озера определяется пропускной способностью подземных каналов стока и притоком воды от протекавшего по карману береговой морены водного потока. В исключительных случаях при выпадении аномальных ливневых осадков происходит полное заполнение кармана береговой морены водой и ее сброс вниз в виде прорывного паводка и селевого потока в результате перелива и размыва береговой морены. Береговые морены становятся селевыми очагами взаимодействия. Зона поражения таким селевым процессом достигает по протяженности нескольких десятков километров.

В течение длительного времени котловины карманов береговых морен могут заполниться озерными и аллювиально-пролювиальными отложениями. В этом случае вследствие ливней и увеличения расхода воды водотока происходит размыв береговой морены и вынос накопленных отложений, как в случае селя с левой береговой морены ледника Дых-Котю-Бугайсу в долине р. Черек-Балкарский в 2017 г.

Прорывы озер, расположенных в котловинах между береговыми моренами, происходят в результате оползания (обрушения) массивов береговой морены и сопряженных с ними склоновых отложений и образования волны на поверхности озера, превышающей высоту его плотины, как в случае прорывов озера Джинвуко в Тибете в 2020 г. и озера Лхонак Южное в Сиккиме в 2023 г.

ВЫВОДЫ

Селепроявления выражены врезами различной длины и площади, которые определены по данным космоснимков и аэрофотоснимков. Объемы выносов определены в основном по данным публикаций.

Участки береговых морен, на которых образовались врезы, представляли собой потенциальные селевые массивы, которые стали селевыми очагами обводнения или взаимодействия, в зависимости от того, проходили или нет в карманах береговых морен ливневые паводки.

В ходе продолжающейся деградации ледников в селевые процессы будут вовлечены участки береговых морен, на которых селепроявления еще не были зафиксированы, что осложняет оценку селевой опасности. В будущем по результатам анализа космоснимков и аэрофотосъемок представляется возможным выявлять потенциальные селевые массивы на участках береговых морен различных типов и параметров, схожих с массивами, на которых селевые процессы уже реализовались в больших и катастрофических размерах. Это позволит определять зоны максимального возможного поражения селевыми процессами и проводить мероприятия по снижению селевых рисков и минимизации возможного ущерба.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Акаев А.Р., Шидугов И.Ж. (2023). Применение БПЛА для мониторинга экзогенных процессов в приледниковой зоне (на примере ледника Мижирги). В сб.: *Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа*. Т. XIII. М.: ИИЕТ РАН. С. 425–430.

Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Калов Р.Х. и др. (2021а). Экстремальные селепроявления на моренных пьедесталах в 2018–2021 гг. (по материалам дистанционного зондирования Земли). *ГеоРиск*. Т. XV. № 3. С. 40–48. https://doi.org/10.25296/1997-8669-2021-15-3-40-48.

Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Калов Р.Х. и др. (2021б). Формирование селевых врезов на участках береговых морен долинных ледников. *Вестник Владикавказского научного центра*. Т. 21. № 3. С. 48–55. https://doi.org/10.46698/m6092-4144-2648-e

Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Калов Р.Х. и др. (2023). Выявление признаков подготовки катастрофических склоновых процессов для предупреждения чрезвычайных ситуаций. В сб.: *Безопасность населения от быстроразвивающихся опасных природных явлений. XXV Международная научно-практическая конференция по проблемам защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций* (*в рамках проведения XIV Международного салона средств обеспечения безопасности "Комплексная безопасность-2023"*). М: ВНИИ ГОЧС (ФЦ). С. 7–18.

Бушуева И.С. (2013). Колебания ледников на Центральном и Западном Кавказе по картографическим, историческим и биоиндикационным данным за последние 200 лет. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: Ин-т географии РАН. 26 с.

Васьков И.М. (2006). Периодические селевые выбросы в долине р. Фастаг и их связь с современной тектоникой. *Вестник Владикавказского научного центра*. Т. 6. № 1. С. 28–32.

Васьков И.М. (2016). Катастрофические обвалы: происхождение и прогноз. Владикавказ: ООО НПКП "МАВР". 370 с.

Геологический словарь. Т. 1. (1978). Под ред. К.Н. Паффенгольц. М.: Недра. 486 с.

Докукин М.Д. (1988). К вопросу о типизации моренного рельефа (на примере Северного Кавказа). *Труды ВГИ*. Вып. 73. С. 58–67.

Докукин М.Д. (2014). Выдающиеся прорывы озер в 2012–2013 гг. (по материалам ДЗЗ). В сб.: *Сборник трудов Северо-Кавказского института по проектированию водохозяйственного и мелиоративного строительства*. Вып. 20. Пятигорск: ОАО “Севкавгипроводхоз”. С. 82–97.

Докукин М.Д., Черноморец С.С., Савернюк Е.А. (2016). Моренные пьедесталы – очаги формирования катастрофических гляциальных селей. В сб.: *Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Материалы IV Международной конференции*. Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН. С. 67–71.

Докукин М.Д., Черноморец С.С., Савернюк Е.А. и др. (2019). Барсемская селевая катастрофа на Памире в 2015 году и ее аналоги на Центральном Кавказе. *Геориск*. Т. XII. № 1. С. 26–36. https://doi.org/10.25296/1997-8669-2019-13-1-26-36

Докукин М.Д., Беккиев М.Ю., Калов Р.Х. и др. (2020). Условия и механизмы прорывов Башкаринских озер в долине р. Адыл-Су (Центральный Кавказ). В сб.: *Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Коллективная монография по материалам X Всероссийской научно-технической конференции в 2-х частях. Ч. 2*. Грозный: ООО “Формат”. С. 369–375.

Окишев П.А. (2017). Горные ледники и морфоскульптура ледниковых отложений: (научно-популярное инфографическое обозрение): учебное пособие. Томск: ИД Томск. гос. ун-та. 204 с.

Репин А.Г. (1980). Береговые и конечные морены пульсирующих ледников. *Материалы гляциологических исследований*. Вып. 39. С. 209–212.

СП 479.1325800.2019. Инженерные изыскания для строительства в районах развития селевых процессов: свод правил. Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума “Кодекс” [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/565565870 (дата обращения: 04.02.2023).

Тавасиев Р.А. (2018). Деградация ледника Караугом. Часть III. Приледниковые озера. *Вестник Владикавказского научного центра*. Т. 18. № 4. С. 62–70. https://doi.org/10.23671/vnc.2018.4.23793

Харченко С.В., Федин А.В., Голосов В.Н. (2021). Темпы денудации в перигляциальных областях высокогорий: методы и результаты исследований. *Геоморфология*. Т. 52. № 1. С. 3–18. http://dx.doi.org/10.31857/S0435428121010065

Число погибших в результате наводнения на севере Индии возросло до 82 [Электронный ресурс]. URL: https://tass.ru/proisshestviya/18946781?ysclid=lqjqhi31a8107813247 (дата обращения: 24.12.2023).

Active deformation around South Lhonak lake in Sikkim, India. By Dave Petley 12 October 2023 [Electronic data]. Access way: https://eos.org/thelandslideblog/south-lhonak-lake-2 (access date: 26.12.2023).

Allen S.K., Rastner I.P., Arora I.M. et al. (2015). Lake outburst and debris flow disaster at Kedarnath, June 2013: hydrometeorological triggering and topographic predisposition. *Landslides*. V. 13. P. 1479–1491. http://dx.doi.org/10.1007/s10346-015-0584-3

Ash K.T. (2020). Paraglacial reworking of lateral moraine slopes, sharp-crested lateral moraines and alluvial fans buttressed by lateral moraines. Halifax, N.S.: Saint Mary’s University. 135 p. http://library2.smu.ca/xmlui/handle/01/29350

Dobhal D.P., Gupta A.K., Mehta M. et al. (2013). Kedarnath disaster: facts and plausible causes. *Current Science*. V. 105. № 2. P. 171–174.

Dusik J.-M., Neugirg F., Haas F. (2019). Slope Wash, Gully Erosion and Debris Flows on Lateral Moraines in the Upper Kaunertal, Austria. In: *Geomorphology of Proglacial Systems. Geography of the Physical Environment. Springer, Cham*. Heckmann T., Morche D. (Eds.). P. 177–196. https://doi.org/10.1007/978-3-319-94184-4_11

Human cost of disasters – An overview of the last 20 years 2000–2019. UN Office for Disaster Risk Reduction; Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. [Electronic data]. Access way: https://reliefweb.int/report/world/human-cost-disasters-overview-last-20-years-2000-2019 (access date: 04.02.2023).

Kharchenko S., Tsyplenkov A., Petrakov D. et al. (2020). Causes and consequences of the streambed re-structuring of the Koiavgan Creek (North Caucasus, Russia). *E3S Web Conf*. V. 163. 02003. P. 1–6. http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/202016302003

Klimeš J., Novotný J., Novotná I. et al. (2016). Landslides in moraines as triggers of glacial lake outburst floods: example from Palcacocha Lake (Cordillera Blanca, Peru). *Landslides*. V. 13. № 6. P. 1479–1491. http://dx.doi.org/10.1007/s10346-016-0724-4

Kumar A., Bhambri R., Tiwari S.K. et al. (2019). Evolution of debris flow and moraine failure in the Gangotri Glacier region, Garhwal Himalaya: Hydro-geomorphological aspects. *Geomorphology*. V. 333. P. 152–166. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.02.015

Rao K.H.V.D., Rao V.V., Dadhwal V.K. et al. (2014). Kedarnath flash floods: a hydrological and hydraulic simulation study. *Current Science*. V. 106. № 4. P. 598–603. https://www.jstor.org/stable/24100068

Sattar A., Goswami A., Kulkarni A.V. et al. (2021). Future Glacial Lake Outburst Flood (GLOF) hazard of the South Lhonak Lake, Sikkim Himalaya. *Geomorphology*. V. 388:107783. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107783

Wang S., Yang Y., Gong W. et al. (2021). Reason Analysis of the Jiwenco Glacial Lake Outburst Flood (GLOF) and Potential Hazard on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Remote Sens*. V. 13 (16). 3114. https://doi.org/10.3390/rs13163114

Wang J., Cui P., Wang H.et al. (2022). Novel Approach to Estimating Glacial Moraine Reserves in the Parlung Tsangpo Basin. *Front. Earth Sci*. V. 10. 853089. http://dx.doi.org/10.3389/feart.2022.853089

Watanabe T., Nakamura N. (2004). Active landslides on the lateral moraines in the Kanchanjunga Conservation Area, eastern Nepal Himalaya. *Himalayan J. Health Sci*. V. 2. Iss. 4 (Special Issue). P. 273. http://dx.doi.org/10.3126/hjs.v2i4.946

Woerkom T., Steiner J.F., Kraaijenbrink1 P.D.A. et al. (2019). Sediment supply from lateral moraines to a debris-covered glacier in the Himalaya. *Earth Surf. Dynam*. № 7. P. 411–427. https://doi.org/10.5194/esurf-7-411-2019

Zheng G., Mergili M., Emmer A. et al. (2021). The 2020 glacial lake outburst flood at Jinwuco, Tibet: causes, impacts, and implications for hazard and risk assessment. *The Cryosphere*. V. 15. № 7. P. 3159–3180. https://doi.org/10.5194/tc-15-3159-2021

DEBRIS FLOW PROCESSES ON LATERAL MORAINES OF MOUNTAIN GLACIERS (ANALYTICAL REVIEW)[2]

M. Yu. Bekkiev[a], M. D. Dokukin[a,#], M. Ch. Zalikhanov[a], R. Kh. Kalov[a], L. M. Fedchenko[a], and A. R. Akaev[a]

[a] *High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia*
 # E-mail: inrush@bk.ru

As a result of climate change there have been high rates of degradation of mountain glaciers in recent years. During deglaciation in the territories previously occupied by glaciers, moraines of various morphogenetic types remain deposited by them, connected with massifs of glacial-colluvial and other deposits. The most actively involved in debris flow processes are massifs of terminal moraines with extended steep ledges, on which debris flow cuts and furrows develop.

Much less often, debris flow original sites are formed on lateral moraines, but debris flows can reach catastrophic proportions. The analysis of publications and of multi-time satellite images revealed data on the formation of debris flow original sites of various types in the areas of lateral moraines of mountain glaciers, pockets of lateral moraines filled with slope and glacial deposits, as well as lakes and streams inside them. Similar debris flow original sites have been characterized for the Central Caucasus, the Andes, the Hindu Kush, the Himalayas and Tibet. The largest debris flow disasters with original sites in areas of lateral moraines were outbursts of Palcacocha lakes in Peru in 1941 and Chorabari in India in 2013 with a death toll of up to 6054, as well as the outburst of South Lhonak Lake in Sikkim (India) in 2023. In areas of lateral moraines of valley glaciers connected with moraine pedestals of former tributary glaciers, the volume of mass transport of debris flows can reach 6.5 million m^3 (lateral moraine of the Gangotri glacier in the Himalayas in 2017). The progress of debris flow processes on lateral moraines of mountain glaciers must be taken into account when developing mountain territories both in areas near lateral moraines and at a considerable distance from them.

Keywords: lateral moraine, debris flow original site, lake outburst, moraine pedestal, debris flow cut

REFERENCES

Active deformation around South Lhonak lake in Sikkim, India. By Dave Petley 12 October 2023 [Electronic data]. Access way: https://eos.org/thelandslideblog/south-lhonak-lake-2 (access date: 26.12.2023).

Akaev A.R., Shidugov I.Zh. (2023). The use of UAVs for monitoring exogenous processes in the glacial zone (using the example of the Mizhirgi glacier). In: *Sovremennye problemy geologii, geofiziki i geoekologii Severnogo Kavkaza*. V. XIII. Moscow: IIET RAN (Publ.). P. 425–430. (in Russ.)

Allen S.K., Rastner I.P., Arora I.M. et al. (2015). Lake outburst and debris flow disaster at Kedarnath, June 2013: hydrometeorological triggering and topographic predisposition. *Landslides*. V. 13. P. 1479–1491. http://dx.doi.org/10.1007/s10346-015-0584-3

Ash K.T. (2020). Paraglacial reworking of lateral moraine slopes, sharp-crested lateral moraines and alluvial fans buttressed by lateral moraines. Halifax, N.S.: Saint Mary's University. 135 p. http://library2.smu.ca/xmlui/handle/01/29350

Bekkiev M.Yu., Dokukin M.D., Kalov R.Kh. et al. (2021). Extreme debris flow processes on moraine pedestals in 2018–2021 (based on remote sensing data). *GeoRisk World*. V. XV. № 3. P. 40–48. (in Russ.). https://doi.org/10.25296/1997-8669-2021-15-3-40-48.

[2] *For citation*: Bekkiev M.Yu., Dokukin M.D., Zalikhanov M.Ch. et al. (2024). Debris flow processes on lateral moraines of mountain glaciers (analytical review). *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. V. 55. № 3. P. 73–89. https://doi.org/10.31857/S2949178924030049; https://elibrary.ru/PLUOGZ

Bekkiev M.Yu., Dokukin M.D., Kalov R.Kh. et al. (2021б). Formation of debris flow cuts in the areas of lateral moraines of valley glaciers. *Vestnik Vladikavkazskogo nauchnogo tsentra*. V. 21. № 3. P. 48–55. (in Russ.). https://doi.org/10.46698/m6092-4144-2648-e

Bekkiev M.Yu., Dokukin M.D., Kalov R.Kh. et al. (2023). Identification of signs of preparation of catastrophic slope processes for the prevention of emergency situations. In: *Bezopasnost' naseleniya ot bystrorazvivayushchikhsya opasnykh prirodnykh yavlenii. XXV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya po problemam zashchity naseleniya i territorii ot chrezvychainykh situatsii* (*v ramkakh provedeniya XIV Mezhdunarodnogo salona sredstv obespecheniya bezopasnosti "Kompleksnaya bezopasnost'-2023"*). Moscow: VNII GOChS (FC) (Publ.). P. 7–18. (in Russ.)

Bushueva I.S. (2013). Kolebaniya lednikov na Central'nom i Zapadnom Kavkaze po kartograficheskim, istoricheskim i bioindikatsionnym dannym za poslednie 200 let (Fluctuations of glaciers in the Central and Western Caucasus according to cartographic, historical and bioindication data for the last 200 years). PhD thesis. Moscow: Institut geografii RAN. 169 p. (in Russ.)

Dobhal D.P., Gupta A.K., Mehta M. et al. (2013). Kedarnath disaster: facts and plausible causes. *Current Science*. V. 105. № 2. P. 171–174.

Dokukin M.D. (1988). On the issue of typification of moraine relief (on the example of the North Caucasus. *Trudy VGI*. V. 73. P. 58-67. (in Russ.)

Dokukin M.D. (2014). Excurrent lakes outburst in 2012–2013 (based on materials of RS). In: *Sbornik trudov Severo-Kavkazskogo instituta po proektirovaniyu vodokhozyaistvennogo i meliorativnogo stroitel'stva*. V. 20. Pyatigorsk: JSC Sevkavgiprovodkhoz (Publ.). P. 82–97. (in Russ.)

Dokukin M.D., Chernomorets S.S., Savernyuk E.A. (2016). Moraine pedestals – initiation zones of catastrophic glacial debris flows. In: *Selevye potoki: katastrofy, risk, prognoz, zashchita. Materialy IV Mezhdunarodnoi konferentsii*. Irkutsk: Sochava Institute of Geography SB RAS (Publ.). P. 67–71. (in Russ.)

Dokukin M.D., Chernomorets S.S., Savernyuk E.A. et al. (2019). Barsem debris flow disaster in the Pamirs in 2015 and its analogues in the Central Caucasus. *Georisk World*. V. XIII. № 1. P. 26–36. (in Russ.) https://doi.org/10.25296/1997-8669-2019-13-1-26-36

Dokukin M.D., Bekkiev M.Yu., Kalov R.Kh. et al. (2020). Conditions and mechanisms of the Bashkara lakes outbursts in the Adyl-Su River valley (Central Caucasus). In: *Sovremennye problemy geologii, geofiziki i geoekologii Severnogo Kavkaza. Kollektivnaya monografiya po materialam X Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii v 2-kh chastyakh. Chast' 2.* Groznyj: OOO "Format" (Publ.). P. 369–375. (in Russ.)

Dusik J.-M., Neugirg F., Haas F. (2019). Slope Wash, Gully Erosion and Debris Flows on Lateral Moraines in the Upper Kaunertal, Austria. In: *Geomorphology of Proglacial Systems. Geography of the Physical Environment. Springer, Cham*. Heckmann T., Morche D. (Eds.). P. 177–196. https://doi.org/10.1007/978-3-319-94184-4_11

Geologicheskii slovar'. Tom pervyi (Geological dictionary. Volume One). (1978). Edited by K.N. Paffengolts. Moscow: Nedra (Publ.). 486 p. (in Russ.)

Human cost of disasters – An overview of the last 20 years 2000–2019. UN Office for Disaster Risk Reduction; Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. [Electronic data]. Access way: https://reliefweb.int/report/world/human-cost-disasters-overview-last-20-years-2000-2019 (access date: 04.02.2023).

Kharchenko S., Tsyplenkov A., Petrakov D. et al. (2020). Causes and consequences of the streambed re-structuring of the Koiavgan Creek (North Caucasus, Russia). *E3S Web Conf*. V. 163. 02003. P. 1–6. http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/202016302003

Kharchenko S.V., Fedin A.V., Golosov V.N. (2021). Denudation rates in the mountain periglacial regions: research methods and result. *Geomorfologiya*. V. 52. № 1. P. 3–18. (in Russ.) http://dx.doi.org/10.31857/S0435428121010065

Klimeš J., Novotný J., Novotná I. et al. (2016). Landslides in moraines as triggers of glacial lake outburst floods: example from Palcacocha Lake (Cordillera Blanca, Peru). *Landslides*. V. 13. № 6. P. 1479–1491. http://dx.doi.org/10.1007/s10346-016-0724-4

Kumar A., Bhambri R., Tiwari S.K. et al. (2019). Evolution of debris flow and moraine failure in the Gangotri Glacier region, Garhwal Himalaya: Hydro-geomorphological aspects. *Geomorphology*. V. 333. P. 152–166. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.02.015

Okishev P.A. (2017). Gornye ledniki i morfoskul'ptura lednikovykh otlozhenii: (nauchno-populyarnoe infograficheskoe obozrenie): uchebnoe posobie (Mountain glaciers and morphosculpture of glacial deposits: textbook: [for university students in the fields of "Geography" and "Geology": (popular science infographic review)]. Tomsk: Tomsk State University (Publ.). 204 p. (in Russ.)

Rao K.H.V.D., Rao V.V., Dadhwal V.K. et al. (2014). Kedarnath flash floods: a hydrological and hydraulic simulation study. *Current Sci*. V. 106. № 4. P. 598–603. https://www.jstor.org/stable/24100068

Repin A.G. (1980). Lateral and terminal moraines of surging glaciers. *Materialy glyatsiologicheskikh issledovanii*. V. 39. P. 209–212. (in Russ.)

Sattar A., Goswami A., Kulkarni A.V. et al. (2021). Future Glacial Lake Outburst Flood (GLOF) hazard of the South Lhonak Lake, Sikkim Himalaya. *Geomorphology*. V. 388:107783. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107783

SP 479.1325800.2019. Inzhenernye izyskaniya dlya stroitel'stva v rayonakh razvitiya selevykh protsessov: svod pravil. Elektronnyi fond normativno-tekhnicheskoi i normativno-pravovoi informatsii Konsortsiuma "Kodeks" (SP 479.1325800.2019. Engineering surveys for construction in the areas of debris flow development. General requirements. Electronic fund of regulatory, technical and regulatory information of the Consortium "Codex" Docs. cntd.ru) [Electronic data]. Access way: https://docs.cntd.ru/document/565565870 (access date: 02.04.2023).

Tavasiev R.A. (2018). Degradation of the Karaugom glacier. Part III. Periglacial lakes. *Vestnik Vladikavkazskogo nauchnogo tsentra*. V. 18. № 4. P. 62–70. (in Russ.) https://doi.org/10.23671/vnc.2018.4.23793

Vaskov I.M. (2006). Periodic debris flow emissions in the Fastag River valley and their connection with modern tectonics. *Vestnik Vladikavkazskogo nauchnogo tsentra*. V. 6. № 1. P. 28–32. (in Russ.)

Vaskov I.M. (2016). Catastrophic collapses: origin and prognosis (Katastroficheskie obvaly: proiskhozhdenie i prognoz). Vladikavkaz: LLC NPKP "MAVR" (Publ.). 370 p. (in Russ.)

Wang J., Cui P., Wang H.et al. (2022). Novel Approach to Estimating Glacial Moraine Reserves in the Parlung Tsangpo Basin. *Front. Earth Sci*. V. 10. 853089. http://dx.doi.org/10.3389/feart.2022.853089

Wang S., Yang Y., Gong W. et al. (2021). Reason Analysis of the Jiwenco Glacial Lake Outburst Flood (GLOF) and Potential Hazard on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Remote Sens*. V. 13 (16). 3114. https://doi.org/10.3390/rs13163114

Watanabe T., Nakamura N. (2004). Active landslides on the lateral moraines in the Kanchanjunga Conservation Area, eastern Nepal Himalaya. *Himalayan J. Health Sci*. V. 2. Iss. 4 (Special Issue). P. 273. http://dx.doi.org/10.3126/hjs.v2i4.946

Woerkom T., Steiner J.F., Kraaijenbrink1 P.D.A. et al. (2019). Sediment supply from lateral moraines to a debris-covered glacier in the Himalaya. *Earth Surf. Dynam*. № 7. P. 411–427. https://doi.org/10.5194/esurf-7-411-2019

Zheng G., Mergili M., Emmer A. et al. (2021). The 2020 glacial lake outburst flood at Jinwuco, Tibet: causes, impacts, and implications for hazard and risk assessment. *The Cryosphere*. V. 15. № 7. P. 3159–3180. https://doi.org/10.5194/tc-15-3159-2021