

Мухтар Юсубович Беккиев

Высокогорный геофизический институт, директор, Нальчик, Россия.

Михаил Дмитриевич Докукин

Высокогорный геофизический институт, отдел стихийных явлений, ведущий научный сотрудник, Нальчик, Россия. E-mail: inrush@bk.ru

Руслан Хажбарович Калов

Высокогорный геофизический институт, заместитель директора по научной работе, Нальчик, Россия.

Людмила Михайловна Федченко

Высокогорный геофизический институт, главный научный сотрудник, Нальчик, Россия.

Формирование селевых врезов на участках береговых морен долинных ледников

Аннотация. На основе анализа разновременных космических снимков выявлены факты формирования селевых врезов на участках береговых морен долинных ледников. Приведены параметры селевых врезов на береговых моренах ледников Центрального Кавказа (Ирик, Джанкуат, Шаурту, Дых-Су, Караугом) и ледника в Индии.

Ключевые слова: ледник, береговая морена, селевой врез, прорыв озера.

Mukhtar Yu. Bekkiev

High-Mountain Geophysical Institute, Director, Nalchik, Russia.

Mikhail D. Dokukin

High-Mountain Geophysical Institute, Department of Natural Phenomena, Leading Researcher, Nalchik, Russia. E-mail: inrush@bk.ru

Ruslan Kh. Kalov

High-Mountain Geophysical Institute, Deputy Director for Research, Nalchik, Russia.

Lyudmila M. Fedchenko

High-Mountain Geophysical Institute, Chief Researcher, Nalchik, Russia.

Formation of debris flow cuts in the areas of lateral moraines of valley glaciers

Abstract. Based on the analysis of multi-temporal satellite images, the facts of the formation of debris flow cuts in the areas of lateral moraines of valley glaciers have been revealed. The parameters of debris flow cuts on the lateral moraines of the glaciers in the Central Caucasus (Irik, Dzhankuat, Shaurtu, Dykh-Su, Karaugom) and the glacier in India have been provided.

Keywords: glacier, lateral moraine, debris flow cut, lake outburst

ВВЕДЕНИЕ

В результате деградации ледников в селевые процессы вовлекаются большие площади отложенных ледниками морен. В основном это конечноморенные комплексы, на которых формируются селевые врезы (одна из форм рельефа селевого генезиса, приуроченная к фронтальным уступам конечных морен, резким перегибам склона, крутым делювиальным склонам [7]).

У долинных ледников конечноморенные валы отличаются небольшими размерами или практически не выражены. Для них характерны береговые морены – морены горных ледников, отложенные в виде гряд или ступеней вдоль склонов долины, при частичном или неполном таянии ледника [3]. Между грядами береговых морен и склонами образуются

протяженные ложбины, которые называют карманами. Нередко карманы береговых морен бывают полностью заполнены лавинно-осыпными конусами или моренами бывших боковых ледниковых притоков и парагенетическими образованиями.

В работе [4] моренные комплексы долинных ледников (продольные гряды береговых морен, замыкающиеся слабовыраженным моренным валом, возвышающиеся над плоским днищем, сложенным основной мореной) не были включены в группу селеопасных форм. Дальнейший анализ селепроявлений на различных моренных массивах позволил выявить случаи формирования в XXI веке и ранее селевых врезов на береговых моренах и сопряженных с ними участках склонов с объемами выносов до 100 тыс. м³ и более, что важно для оценки селевой опасности при освоении горных территорий.

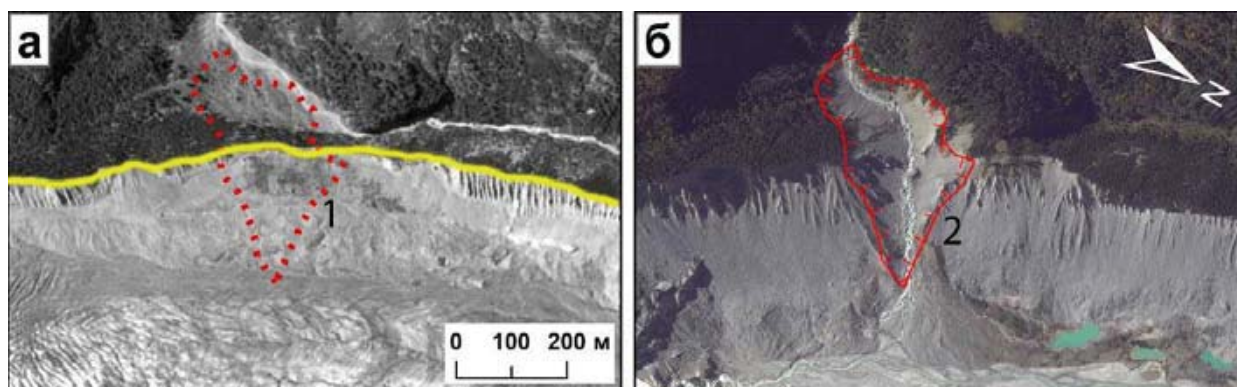


Рис. 1. Формирование вреза на левой береговой морене ледника Караугом:
а – аэрофотоснимок 04.08.1959 г., б – космоснимок Google Earth от 05.09.2011 г.; 1 – контур будущего вреза, 2 – врез

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе были использованы аэрофотоснимки середины XX века (1957, 1959 гг.), космические снимки IRS-1D разрешением 5,8 м (© 2003-2007 ANTRIX»), SPOT 5 разрешением 2,5 м, (© CNES), EROS A разрешением 1,8 м (© 2007 ImageSat International N.V.), любезно предоставленные ООО ИТЦ «СканЭкс», космические снимки с Интернет-ресурсов Google Earth, Yandex Maps, Bing Maps, аэрофотоснимки НПП «InfoTERRA», а также фотографии авторов.

Разновременные аэрофотоснимки и космоснимки на участки береговых морен долинных ледников привязывались по опорным точкам в программе ArcGIS и затем сравнивались визуально с использованием инструмента «зашторить слой (Swipe Layer)» для выявления фактов селепроявлений и построения электронных слоев контуров селевых врезов и отложений, на основе которых проводились автоматические вычисления площади и определения длины. Высоты вершин селевых врезов определялись по модели SRTM (<http://srtm.csi.cgiar.org>). После обнаружения селепроявлений последовательно просматривались космоснимки и аэрофотоснимки с целью определения временных интервалов, в которые они формировались.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В результате анализа морфологии береговых морен долинных ледников выявлена их хорошая сохранность на участках склонов с отсутствием глубоковрезанных ложбин водотоков. У некоторых ледников отмечено несколько разных по времени селепроявлений на береговых моренах, в основном в XXI веке.

По литературным источникам [1, 10] были определены участки формирования селевых врезов на левой и правой береговых моренах ледника Караугом (бассейн р. Урух), на которые были подобраны аэрофотоснимки с отсутствием селепроявлений и космоснимки с наличием селепроявлений. Другими объектами исследований были береговые мо-

рены ледников Ирик (бассейн р. Баксан), Шаурту (бассейн р. Чегем), Дых-Су (бассейн р. Черек), на которых выявлены селепроявления при дешифрировании космоснимков. Селевой врез на морене ледника Джанкуат в долине р. Адылсу (бассейн р. Баксан) обнаружен в результате обследований озер у ледника Башкара. Условия его формирования охарактеризованы в работе [10].

К исследованным участкам береговых морен ледников Центрального Кавказа был добавлен случай максимального по масштабам селепроявления в результате прорыва озера в кармане правой береговой морены ледника Чорабари (бассейн р. Алакнанда, Индия) [5, 9].

Селепроявления на береговых моренах были разделены на две группы: 1) с наличием водотоков и озер в карманах береговых морен, 2) с заполненными гляциальными и гляциально-коллювиальными отложениями карманами береговых морен. На приведенных в работе рисунках бровки крутых откосов береговых морен показаны линиями желтого цвета.

Формирование селевых врезов на участках карманов береговых морен с наличием водотоков и озер

Довольно распространенным случаем является наличие водотока в кармане береговой морены. В таком состоянии участок береговой морены может находиться долгое время, пока не произойдет его сползание или обрушение вследствие переувлажнения фильтрационными водами. Примером такого процесса является формирование вреза на левой береговой морене ледника Караугом.

Как описано в работе [1], «...в 1988 г. произошел обвал крутой левобережной морены, образование прорывной долины реки Фастаг глубиной до 40–50 м и формирование нового устья с обширным конусом выноса». На рис. 1 показан этот участок до и после события.

Ширина образовавшегося вреза составила около 150 м. Были вынесены не только массы береговой морены, но и аллювиальные отложения р. Фастаг. К врезу примыкает конус выноса со следа-

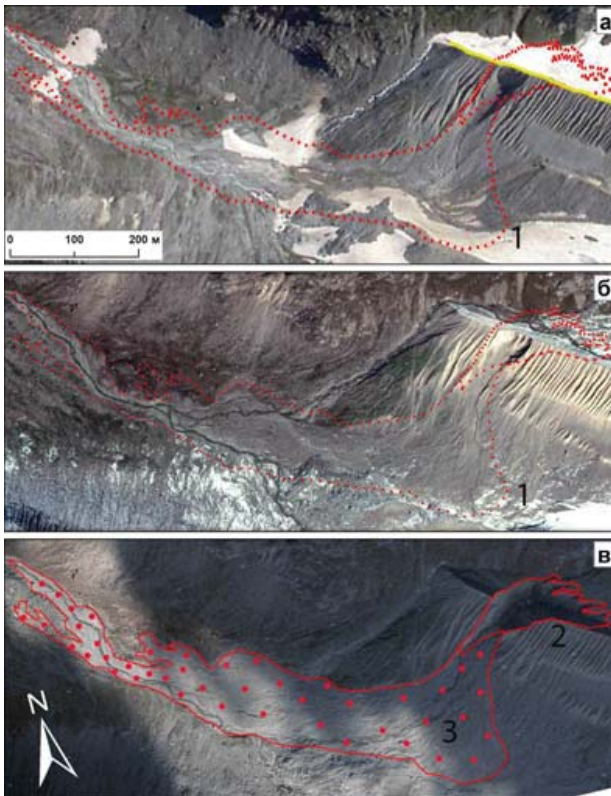


Рис. 2. Формирование вреза на правой береговой морене ледника Джанкуат:

а – аэрофотоснимок InfoTERRA от 04.07.2004 г., б – космоснимок Google Earth от 04.10.2014 г., в – космоснимок WorldView2 от 20.10.2019 г. Яндекс Maps; 1 – будущие контуры вреза и отложений, 2 – врез, 3 – селевые отложения

ми русел потоков, расходящихся веером по конусу. Угол наклона верхней половины конуса составляет более 20° , а его вершина находится на высоте половины высоты береговой морены. Выше конуса по руслу р. Караугом расположен мелкохолмистый массив – часть общего конуса обрушения. Общая ширина конуса на момент прорыва составляла около 400 м. Можно сделать предположение, что основным механизмом прорыва береговой морены был не размыв водным или селевым потоком, а

быстрое сползание (обрушение) водонасыщенных моренных масс, и уже затем произошли размывы этой массы водным потоком.

Описанный в работе [10] случай прорыва правой береговой морены ледника Джанкуат в долине р. Адылсу бассейна р. Баксан произошел 1 июля 2015 г. в условиях выпадения 227 мм осадков в течение предшествующих семи дней. На рис. 2 показано состояние участка береговой морены ледника Джанкуат в период 2004–2019 гг.

К 2004 году (рис. 2а) на склоне береговой морены существовала ниша от раннего обрушения моренной массы. Ширина ее составляла 45–50 м. Эта ниша была видна на космоснимке Landsat 7 от 12.09.2000 г. В октябре 2014 г. ширина ниши составляла около 60 м, и бровка отрыва находилась уже на поверхности внешнего склона береговой морены на расстоянии 12 м от русла ручья Койавган.

Можно сделать вывод о том, что процесс прорыва береговой морены и формирования вреза был постепенным и занимал по времени более 15 лет. Основное обрушение морены произошло после выпадения большого количества осадков. Образовавшийся в 2015 г. врез был шириной около 70 м и длиной (с несколькими отвершками) около 250 м. Площадь отложившихся на дне долины масс составила 78 тыс. м^2 , а объем, по данным [10], – 156 тыс. м^3 .

В работе [8] приведены данные о прорыве в 2002 г. озера Микелай, находившегося в кармане правой береговой морены ледника Караугом. На рис. 3 показан участок береговой морены до и после прорыва озера. Площадь озера составляла 9,3 тыс. м^2 , длина – более 200 м.

Прорыв озера произошел не на участке истока воды из него, а примерно там, где в него впадал водоток. Это свидетельствует о том, что механизм прорыва представлял собой не размыв морены, а сползание на участке шириной около 100 м, куда затем устремился водный поток из озера, ранее стекавший вниз вдоль склона по карману береговой морены. Зона отложений ниже образовавшегося вреза выражена слабо, скорее всего, из-за того, что прорывной паводок вынес их вниз по подледно-

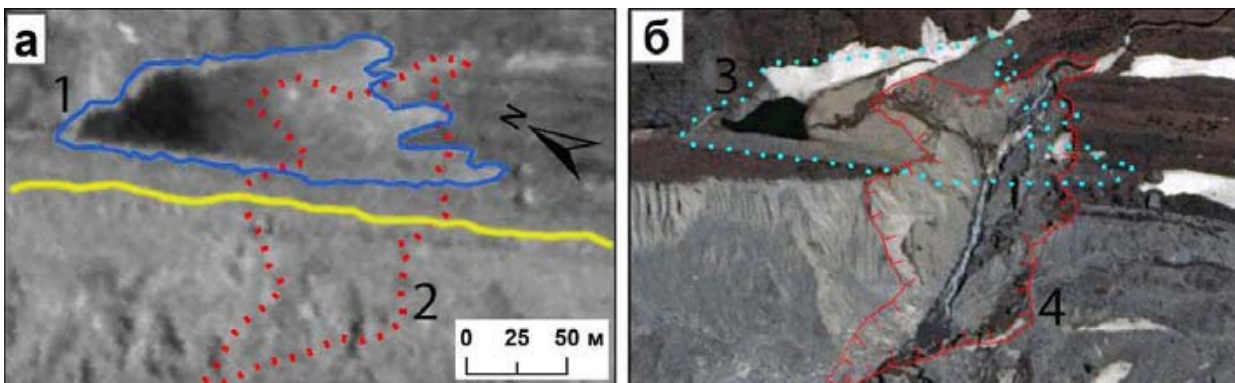


Рис. 3. Формирование вреза на правой береговой морене ледника Караугом и прорыв озера Микелай:
а – аэрофотоснимок 10.09.1957 г., б – космоснимок Google Earth от 22.05.2005 г.; 1 – контур озера Микелай, 2 – контур будущего вреза, 3 – контур бывшего озера Микелай, 4 – врез

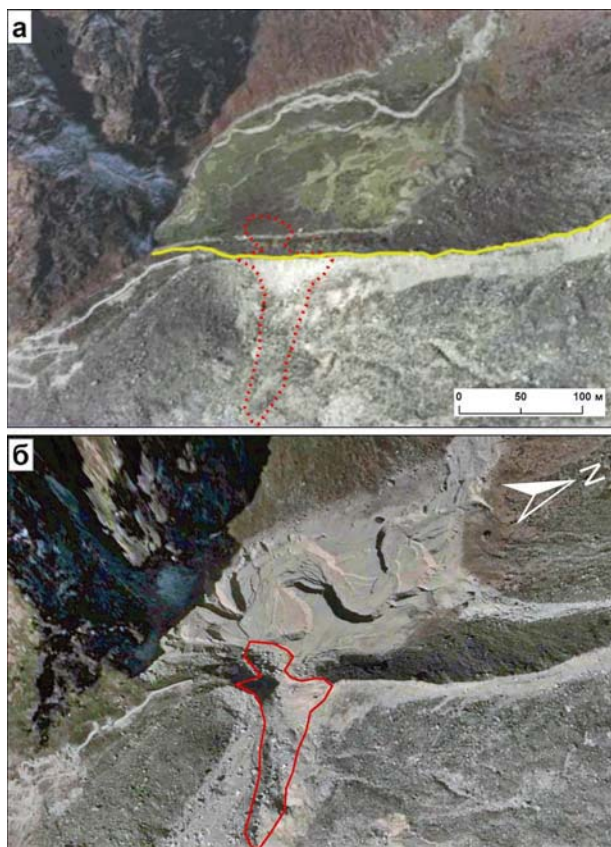


Рис. 4. Формирование вреза на правой береговой морене ледника Чорабари и прорыв озера Чорабари:

а – космоснимок WorldView2 от 09.11.2011 г. Bing Maps, космоснимок Google Earth от 14.11.2017 г.

му каналу и по трещинам в теле ледника.

Самым трагическим случаем прорыва озера, которое находилось в кармане береговой морены, является «Гималайское цунами» 17 июня 2013 г. в долине р. Мандакини (один из истоков реки Ганг) в индийском штате Уттаракханд из-за прорыва озера Чорабари (Ганди Саровар) [5, 9]. Котловина озера никогда до этого не заполнялась полностью, и в начале июня 2013 г. уровень воды в озере был не более 1–1,5 м. Но после ливней 16 и 17 июня 2013 г. слоем 325 мм уровень воды достиг высоты береговой морены (около 12–15 м), и произошло обрушение и быстрый размыв моренной гряды (рис. 4). Объем воды, сброшенной из озера, составлял около 600 тыс. м³ [5]. Образовавшийся врез в береговой морене имел ширину 75–80 м.

Ниже вреза, как и в случае озера Микелай, конуса выноса не образовалось – остались следы потока шириной маломощных отложений до 50 м. После прорыва озера водный поток от ливней и таяния снега продолжал размывать озерные отложения и образовал извилистый врез. Ниже по долине поток унес жизни около 6 000 человек [9].

5 июля 2017 г. по р. Черек Балкарский прошел селевой поток, разрушивший 300 м дороги «Урвань

– Уштулу». Анализ космоснимков до и после селя показал, что следы селя начинаются на участке кармана левой береговой морены ледника Дых-Су, по которому протекал водный поток, берущий начало с трех малых ледников и имеющий площадь водосбора 3,3 км² (рис. 5).

Водный поток растекался по плоскому дну кармана береговой морены шириной до 45–50 м, похожему на дно озера. На рис. 5а видно, что часть этой площадки поток покрывал полностью. Ниже плоской площадки водоток протекал по подземному каналу – на расстоянии 40–45 м у подножия склона береговой морены был виден выход воды из подземного канала. В русле выше озеровидной площадки изменений не выявлено, что свидетельствует о прохождении по руслу не селевого, а водного потока. Возможно, перед врезанием в поверхность склона береговой морены было накопление воды в виде неглубокого озера. Далее произошло переувлажнение моренного вала и его обрушение. Водный поток сместился вправо от обрушенных масс и подрезал продольный вал береговой морены. Тем самым врез расширился до 100 м. В процессе формирования вреза был вынесен весь материал накопленных за длительное время аллювиальных и озерных отложений, а также материал береговой морены. Ниже вреза на поверхности ледника хорошо выражен конус выноса шириной до 130 м. Селевые отложения занимали участок ледника Дых-Су протяженностью около 1 700 м до устья притока с ледника Хрумкол. Площадь отложений составила до 140 000 м².

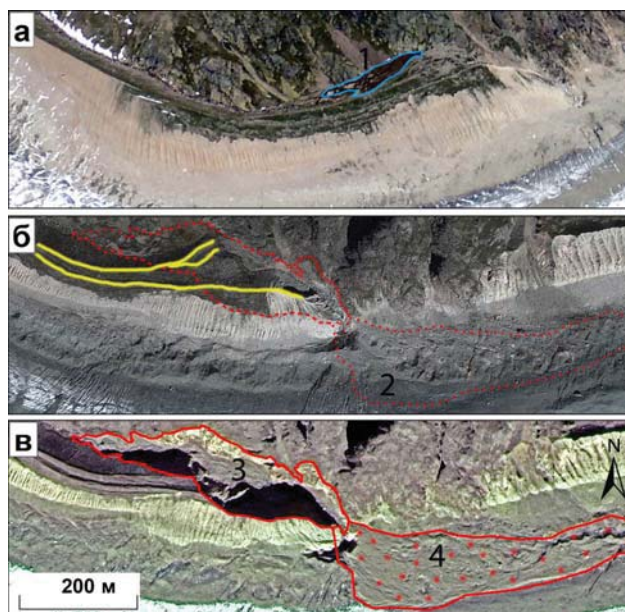


Рис. 5. Формирование вреза на левой береговой морене ледника Дых-Су:

а – фото М.Д. Докукина 10.09.2013 г., *б* – космоснимок Google Earth от 19.09.2011 г., *в* – космоснимок Google Earth от 06.10.2017 г.; 1 – озеровидная площадка, 2 – контуры будущего вреза и селевых отложений, 3 – врез, 4 – селевые отложения

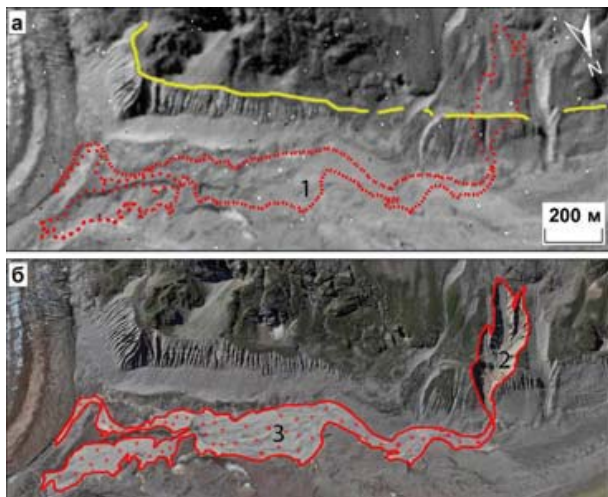


Рис. 6. Формирование вреза на участке правой береговой морены ледника Дых-Су: а – космоснимок IRS 1-D от 02.09.2003 г., б – космоснимок Google Earth от 17.08.2004 г.); 1 – контуры будущего вреза и отложений, 2 – врез, 3 – селевые отложения

Формирование селевых врезов на участках карманов береговых морен, заполненных гляциально-коллювиальными отложениями

На рис. 6 показан участок правой береговой морены ледника Дых-Су с образовавшимся предположительно в 2004 г. врезом (на снимке InfoTERRA врез был уже 31 июля 2004 г., а на космоснимке от 2 сентября 2003 г. он отсутствовал).

До формирования вреза массив на склоне, который заполнил карман береговой морены, по форме напоминал моренный пьедестал (форма моренного рельефа, охарактеризованная в работах [4, 6]) с небольшой ложбиной в осевой части. Врез, в верхней части разделенный на три части продольными гребнями, сформировался за один непрерывный процесс. Разжиженные от таяния внутреннего льда моренные массы растеклись по поверхности ледника на площади 170 000 м².

Похожий процесс происходил на правой береговой морене ледника Ирик, но здесь в образовавшемся врезе на следующий год селевой процесс повторился, и при этом врез значительно расширился (рис. 7).

На космоснимке 2007 г. (рис. 7а) видны следы начального этапа формирования вреза на выпуклой поверхности моренного пьедестала – полоса шириной 20 м с изображением, характерным для оплывин, а не для эрозионных рытвин. На участке ниже бровки крутого откоса береговой морены уже видна ниша шириной 40 м от сползших масс.

На рис. 8 и 9 показан врез шириной в верхней части 50 м, образовавшийся на гляциально-коллювиальном конусообразном массиве, заполнившем карман левой береговой морены ледника Шаурту в бассейне р. Чегем. Этот врез образовался в 2012 г.

На космоснимке 2011 г. (рис. 8а) видны следы начального этапа формирования вреза – в осевой зоне гляциально-коллювиального конуса образовалась протяженная рытвина шириной до 15 м, а у бровки откоса береговой морены этот материал отложился в виде небольшого конуса шириной до 50 м. На поверхности склона береговой морены селевая масса растеклась на два потока и отложилась у подножия морены. В 2012 г. площадь селевых отложений на дне долины составляла 23 000 м².

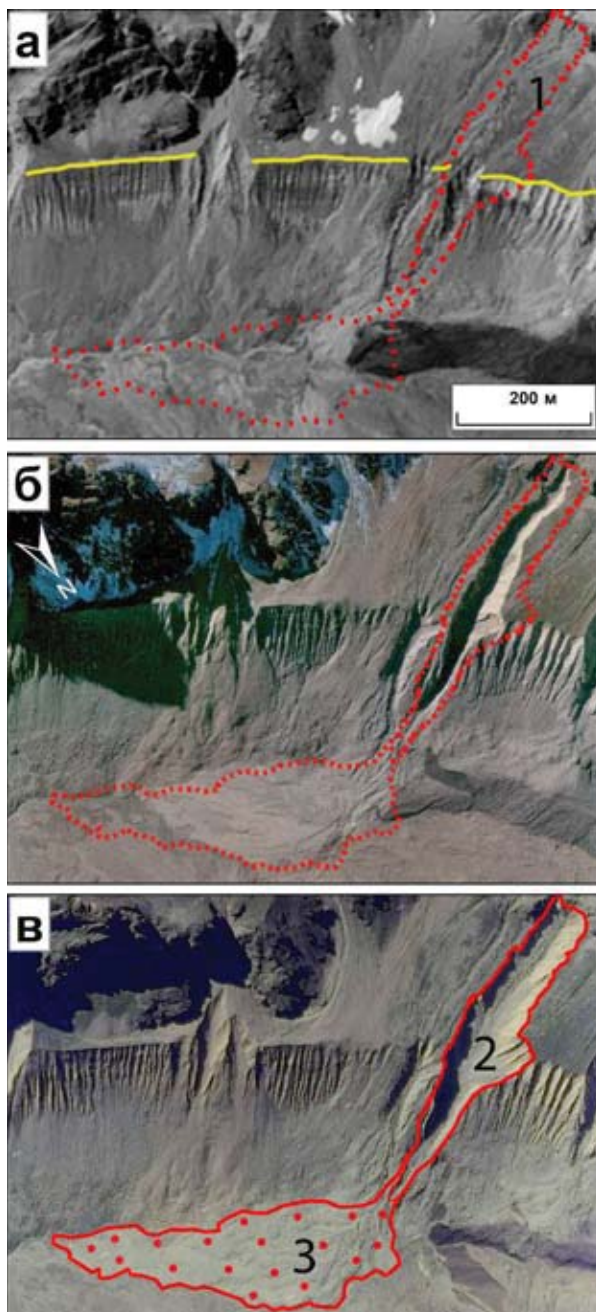


Рис. 7. Формирование вреза на участке правой береговой морены ледника Ирик: а – космоснимок EROS A от 20.07.2007 г., б – космоснимок Google Earth от 19.09.2009 г., в – космоснимок WorldView2 от 31.08.2010 г. Yandex Maps; 1 – контуры будущих вреза и отложений, 2 – врез, 3 – селевые отложения

Таблица 1

Параметры селевых врезов на участках береговых морен

Ледник и участок морены	Координаты вершины вреза	Высота н.у.м. вершины вреза, м	Площадь вреза, м ²	Длина вреза, м	Площадь отложений, м ²	Площадь водосбора вреза, км ²
Ирик (правая морена)	N43°18'04,43" E42°32'40,40"	2900	32500	520	52000	0,26
Джанкуат (правая морена)	N43°12'22,69" E42°44'59,94"	2820	12 000	270	78000	3,0
Шаурту (левая морена)	N43°08'37,51" E43°01'08,17"	2700	28000	820	23000	0,65
Дых-Су (левая морена)	N42°59'21,55" E43°11'12,73"	2760	34500	500	139000	3,3
Дых-Су (правая морена)	N42°58'46,16" E43°12'30,67"	2690	50000	520	170000	0,69
Караугом (левая морена)	N42°50'26,49" E43°42'17,82"	2000	53000	460	нет данных	19,0
Караугом (правая морена)	N42°49'18,40" E43°43'30,76"	2440	11000	220	нет данных	6,1
Чорабари (правая морена)	N30°44'49,09" E79°03'42,34"	3860	4650	180	нет данных	2,2

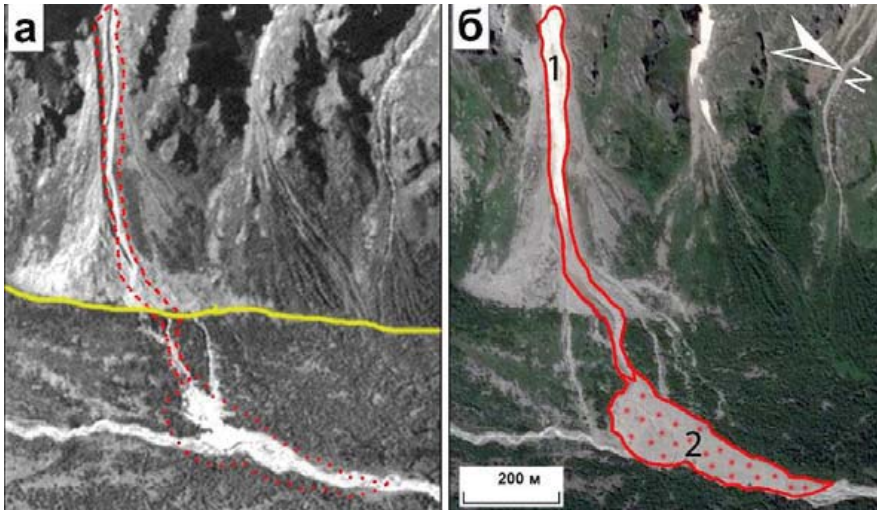


Рис. 8. Формирование вреза на участке левой береговой морены ледника Шаурту:

а – космоснимок SPOT 5 от 21.09.2011 г., б – космоснимок 17.07.2019 г. Yandex Maps

ВЫВОДЫ

В результате анализа разновременных космоснимков и других материалов были получены количественные параметры селевых врезов на участках береговых морен долинных ледников. В *таблице 1* приведены параметры восьми селевых врезов на участках береговых морен ледников: Ирик и Джанкуат в бассейне р. Баксан, Дых-Су в бассейне р. Черек Балкарский, Караугом в бассейне р. Урух и Чорабари в бассейне р. Алакнанда (Индия).

Большая часть выявленных врезов на береговых моренах находится в высотном диапазоне 2 500–3 000 м. Их формирование начиналось после отступления или значительного понижения поверхности ледника как опоры для масс береговых морен, расположенных на крутых склонах. Участки береговых морен, на которых развились врезы, представляли собой потенциальные селевые массивы (по терминологии [2]), которые стали селевыми очагами обводнения или взаимодействия, в зависимости от того, проходили или нет в карманах береговых морен ливневые паводки. Нередко карманы береговых морен заполнялись как аллювиально-пролювиальными, так и гляциально-аллювиально-пролювиальными отложениями. В этих случаях происходило обводнение массивов береговых морен фильтрационными водными потоками или водами от таяния внутреннего льда в массивах, подобных моренным пьедесталам [6].

Обводненные массивы береговых морен об-

рушивались вниз по склонам или стекали подобно селевым потокам, образуя врезы значительной ширины. В этом смысле важным условием для дальнейшего прохождения селевых потоков вниз по долинам была значительная площадь водосборов выше участков врезов. Если площади водосборов были около 0,3–0,7 км², то материал отлагался у подножия береговых морен, как у правой береговой морены ледника Дых-Су и правой береговой морены ледника Ирик (*рис. 6 и 7*). На водосборах площадью 2–3 км² при выпадении anomalously высокого количества осадков формировались паводки, переходящие в селевые потоки на участках береговых морен и проходящие затем по долинам рек на большие расстояния (случаи селевых потоков с береговой морены ледника Чорабари и левой береговой морены ледника Дых-Су).

В будущем при продолжающемся отступлении ледников в селевые процессы будут вовлекаться



Рис. 9. Врез на береговой морене ледника Шаурту (фото М.Д. Докукина, 25.08.2015 г.)

новые участки береговых морен долинных ледников и озера в карманах береговых морен, что необходимо учитывать при оценке селевой опасности территорий.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Васьков И.М.** Периодические селевые выбросы в долине р. Фастаг и их связь с современной тектоникой // *Вестник Владикавказского научного центра*. 2006. Т. 6. №1. С. 28–32.
2. **Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А.** Математическое моделирование в гидрологии: учеб. пособие для студ. уч-

реждений высш. проф. образования. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. 304 с.

3. **Геологический словарь. Том первый.** – М.: Недра. 1973. 486 с.

4. **Докукин М.Д.** Типы моренного рельефа и селевая опас-

ность (на примере сев. склона Центрального Кавказа). Автореферат диссертации кандидата географических наук / МГУ им. М. В. Ломоносова. – Москва, 1993. 22 с.

5. **Докукин М.Д.** Выдающиеся прорывы озер в 2012–2013 гг. (по материалам ДЗЗ) // Сборник трудов Северо-Кавказского института по проектированию водохозяйственного и мелиоративного строительства. 2014. Вып. 20. С. 82–97.

6. **Докукин М.Д., Черноморец С.С., Савернюк Е.А.** Моренные пьедесталы – очаги формирования катастрофических гляциальных селей // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Материалы IV Международной конференции. 2016. С. 67–71.

7. **Перов В.Ф.** Селевые явления. Терминологический сло-

варь. 2-е издание, дополненное. – М: Изд-во Московского университета. 2014. 72 с.

8. **Тавасиев Р.А.** Деградация ледника Караугом. Часть III. Приледниковые озера // Вестник Владикавказского научного центра. 2018. Т.18. № 4. С. 62–70.

9. **Allen S.K., Rastner I.P., Arora I.M., Huggel I.C., Stoffel I.M.** Lake outburst and debris flow disaster at Kedarnath, June 2013: hydrometeorological triggering and topographic predisposition // Landslides. 2015. DOI 10.1007/s10346-015-0584-3

10. **Kharchenko S., Tsyplenkov A., Petrakov D., Golosov V.** Causes and consequences of the streambed restructuring of the Koiavgan Creek (North Caucasus, Russia) // E3S Web of Conferences. 2020. Vol.163. 02003.

REFERENCES

1. Vaskov I.M. Periodic debris flows in the valley of the Fastag River and their relationship with modern tectonics // Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center. 2006. Vol. 6. No. 1. P. 28-32.
2. Vinogradov Yu.B., Vinogradova T.A. Mathematical modeling in hydrology: textbook. manual for stud. institutions of higher. prof. education. – М.: Publishing Center "Academy", 2010. 304 p.
3. Geological Dictionary. Volume one. – М.: Nedra. 1973. 486 p.
4. Dokukin M.D. Types of moraine relief and debris flow hazard (on the example of the northern slope of the Central Caucasus). Abstract of the dissertation of the candidate of geographical sciences / Lomonosov Moscow State University. – Moscow, 1993. 22 p.
5. Dokukin M.D. Excurrent lake outbursts in 2012 – 2013 (based on remote sensing data) // Proceedings of the North Caucasus Institute for the design of water management and land reclamation construction. 2014. Issue. 20. P. 82-97.
6. Dokukin M.D., Chernomorets S.S., Savernyuk E.A. Moraine pedestals – initiation zones of catastrophic glacial debris flows // Debris flows: disasters, risk, forecast, protection. Materials of the IV International Conference. 2016. P. 67-71.
7. Perov V.F. Debris flow phenomena. Terminological dictionary. 2nd expanded edition. – М: Moscow University Press. 2014. 72 p.
8. Tavasiev R.A. Degradation of the Karaugom glacier. Part III. Periglacial lakes // Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center. 2018. Vol. 18. No. 4. P. 62-70.
9. Allen S.K., Rastner I.P., Arora I.M., Huggel I.C., Stoffel I.M. Lake outburst and debris flow disaster at Kedarnath, June 2013: hydrometeorological triggering and topographic predisposition // Landslides. 2015. DOI 10.1007/s10346-015-0584-3
10. Kharchenko S., Tsyplenkov A., Petrakov D., Golosov V. Causes and consequences of the streambed restructuring of the Koiavgan Creek (North Caucasus, Russia) // E3S Web of Conferences. 2020. Vol.163. 02003.

