

Прикладные проблемы

УДК 551.311.21

Деградация оледенения и формирование катастрофических селей в современных ледниково-моренных комплексах Приэльбрусья

© 2012 г. Е.А. Золотарёв¹, А.А. Алейников², Е.Г. Харьковец¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; ²Инженерно-технологический центр «СканЭкс»
lakmmgu@yandex.ru

Статья принята к печати 8 апреля 2012 г.

Деградация оледенения, катастрофические сели, ледниково-моренные комплексы, ледниковые озёра, погребённый лед, Приэльбрусье, селеносный каньон.

Buried ice, catastrophic mudflows, Elbrus region, glacial degradation, glacial lakes, glacial-moraine complex, mudflow canyon.

Рассмотрен механизм формирования катастрофических селей в различных ледниковых долинах Приэльбрусья на современном этапе деградации оледенения. На примере изменений ледниково-моренного комплекса Каярты, выявленных по материалам дистанционного мониторинга, определена решающая роль погребённых льдов в формировании катастрофических селей, сошедших на г. Тырныауз в XX в. Проанализирована динамика ледниковых озёр в долине р. Адыл-Су у ледника Башкара и оценена вероятность их прорыва. По результатам дистанционного мониторинга получены количественные показатели динамики оползня в долине р. Кубасанты и установлено его влияние на формирование катастрофических селей. Приведены возможные способы борьбы с катастрофическими селями в зависимости от механизма их формирования, не прибегая при этом к строительству дорогостоящих защитных сооружений.

Верховья долины р. Баксан на протяжении более 5 км ниже конуса выноса р. Гарабаши заполнены отложениями гигантских и очень крупных селей, сформировавшихся за последние 2 тыс. лет. В отличие от общепринятых терминов «катастрофическая лавина» [5] и «катастрофический сель» [15] далее эти сели и лавины мы будем называем «катастрофическими», имея в виду исключительно их особо крупные размеры и редкую повторяемость, не принимая во внимание человеческие жертвы и разрушения [6]. Наши определения возраста конечных морен и селевых отложений в Приэльбрусье методами лихенометрии и радиоуглеродного датирования [16] позволили выделить в этом районе несколько периодов повышенной селевой активности, самый ранний из которых приходится на начало новой эры. Рассмотрим механизм формирования катастрофических селей в различных ледниковых долинах Приэльбрусья в современных условиях.

Долина р. Адыл-Су

В настоящее время потенциальная угроза формирования катастрофических селей гляциального генезиса в Приэльбрусье сохраняется в верховьях р. Адыл-Су (правый приток р. Баксан),

где при отступании правой ветви ледника Башкара в аномально тёплые годы конца 1930-х — начала 1940-х годов образовалось крупное озеро. Площадь его — около 60 тыс. м², средняя глубина — 12,5 м, максимальная — 30 м¹ (рис. 1). Напор воды сдерживает постоянно изменяющаяся ледяная плотина (сохранившийся заморененный остаток правой ветви ледника). Её прорывы в 1958 и 1959 гг. были причиной катастрофических селей в долине р. Адыл-Су. До последнего времени стабильный режим ледника препятствовал переполнению озёрной котловины талыми водами и разрушению плотины, но в последние годы ситуация изменилась.

В начале 1990-х годов у конца ледника Башкара образовались новые озёра [20] (рис. 2). По результатам фототеодолитной съёмки 1999 и 2005 гг. и наземной цифровой стереосъёмки 2010 г. мы оценили изменение озёрного комплекса «Башкара» (табл. 1). Поверхность языка ледника Башкара стала ниже в среднем на 10 м, с каждым годом увеличиваются площади и объёмы нижних приледниковых озёр. Наиболее заметно отступила левая ветвь ледника (на 134 м);

¹Глубины измерялись С.С. Черноморцем [20, 23].



Рис. 1. Космический снимок (Ikonos, 2010 г.) языка и перигляциальной зоны ледника Башкара
Fig. 1. Space image (Ikonos, 2010) of the tongue and periglacial zone of Bashkara Glacier



Рис. 2. Ледники Джанкуат и Башкара с приледниковыми озёрами (фото А.А. Алейникова, август 2005 г.)
Fig. 2. Djankuat and Bashkara glaciers with periglacial lakes (Photo by A.A. Aleinikov, August, 2005)



Рис. 3. Термокарстовый провал на языке ледника Башкара (фото А.А. Алейникова, сентябрь 2007 г.)
Fig. 3. Thermokarst sink-hole at the tongue of Bashkara Glacier lakes (Photo by A.A. Aleinikov, September, 2007)

Таблица 1. Динамика озерно-ледникового комплекса «Башкара»*

Параметры	Оз. Башкара	Нижние озёра
Площадь, тыс. м ² :		
	1999 г.	5,3
	2005 г.	20,9
	70,2	37,5
Объём, млн м ³ :		
	1999 г.	0,02
	2005 г.	0,13
	0,9	0,2

*Значения объёмов рассчитаны по результатам промеров глубин, из работ [20, 23].

глубина протаивания составляет примерно 25 м. Правая ветвь отступила на 20 м, но за счёт таяния ледового массива на юго-восточном берегу комплекса активно увеличивается площадь ледниковых озёр. Образовался и значительно разрастается термокарстовый провал (рис. 3), уменьшается ширина перемычки между оз. Башкара и нижними озёрами с 500 до 300 м [20] (см. рис. 1). Уровень оз. Башкара в 2005 г. повысился на 2,5 м по сравнению с 1999 г., но сезонная амплитуда колебаний уровней озера составляет 1,5–2 м. Самые высокие уровни наблюдаются в начале лета. Наиболее выраженный спад начинается после 20 августа – 1 сентября; в конце сезона наблюдений (сентябрь–октябрь) уровни минимальны.

Даты фототеодолитной съёмки (в 1999 г. – 23 августа, в 2005 г. – 27 сентября) пришлось на период наиболее нестабильного положения уровня озера, поэтому нельзя с уверенностью говорить о таком увеличении уровня. Однако есть предположение, что в 1999–2005 гг. произошёл затор систем подледного стока из оз. Башкара и именно поэтому поднялся его уровень. У этого озера нет видимого прямого стока и, по-видимому, сток происходит через внутриледниковые каналы. По изменению высоты поверхности ледника в 1999–2005 гг. можно видеть понижение, которое идёт от оз. Башкара к малым озёрам. Предположительно, это – ось систем подледного стока из оз. Башкара. Существует вероятность внезапного увеличения пропускной способности систем подледного стока. В этом случае поток воды хлынет из оз. Башкара (около 1 млн м³) и увлечёт за собой воды нижних озёр (более 200 тыс. м³ в 2010 г.), а также незакреплённые моренные отложения, что приведёт к катастрофическим последствиям. В 2008 г. уровень оз. Башкара так повысился, что

Таблица 2. Основные морфометрические параметры ледников Каярты в 1963–2003 гг.*

Параметры	1963 г.	1977 г.	2003 г.
Площадь, км ²	1,53/1,49	1,42/1,43	1,18/1,34
Длина, км	2,38/2,49	2,17/2,42	2,10/2,41
Высшая отметка области питания, м	4050		
Низшая отметка конца ледника, м	3294/3267	3340/3279	3351/3282

*В числителе – параметры для Западного ледника, в знаменателе – для Восточного.

вода стала переливаться через перемычку, однако в последующие годы он снова стабилизировался.

Площади нижних озёр увеличиваются за счёт разрушения конца ледника. Создаётся впечатление, что придонная часть языка ледника ниже оз. Башкара полностью находится в воде, что может быть обусловлено разрушением подледных каналов стока из этого озера (см. рис. 3). Подобное положение ещё опаснее, чем просто прорыв озёр, так как может вызвать обрушение конца ледника и образование ледово-водокаменного потока.

Долина р. Герхожан-Су

Здесь несколько иные условия образования катастрофических селей, в XX в. достаточно часто сходящих на г. Тырнауз. Они формируются в верховьях долины р. Герхожан-Су, в перигляциальной зоне ледника Каярты, динамику которого можно проследить по результатам повторных фототеодолитных съёмок 1963, 1977 и 2003 гг. Поскольку измеренные нами по материалам съёмок основные параметры ледника намного отличаются от опубликованных в Каталоге ледников [10], мы приводим их в табл. 2 по состоянию на 1963, 1977, 2003 гг. Ледник Каярты – двуязычный с общей областью питания. Для удобства обозначения, вслед за С.С. Черноморцем [19], мы называем языки Западный и Восточный согласно их расположению на карте (рис. 4). За 40 лет изменились оба ледника, но характер их изменений различен. Западный ледник отступил на 280 м, Восточный – на 80 м. Площадь Западного ледника на конце языка уменьшилась на 0,135 км², а Восточного – на 0,034 км², т.е. параметры различаются в 3,5–4 раза.

В 1977 г. Восточный ледник, по-видимому, наступал или был близок к наступанию, как и большинство ледников Кавказа в то время. Его толщина в среднем по всей площади по сравнению с 1963 г. увеличилась на 2,8 м. На Западном леднике вся поверхность, за исключением средней части вблизи

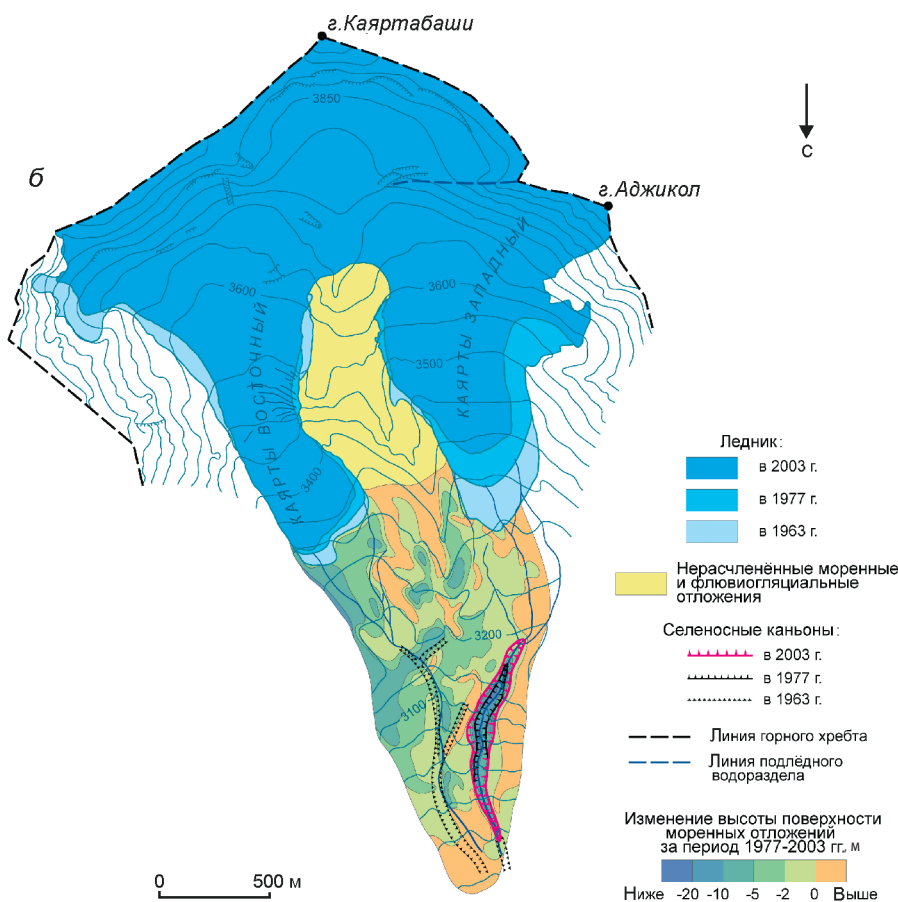


Рис. 4. Ледники Каярты: *a* – фото А.А. Алейникова, август 2001 г.; *б* – изменения ледников и их перигляциальных зон за 1963–2003 гг.

Fig. 4. Kayrta glaciers. *a* – Photo by A.A. Aleinikov, August, 2001; *b* – changes of glaciers and their periglacial zones for 1963–2003

среднего многолетнего положения фирновой линии, испытывает понижение. Особенно сильно понизился конец языка – в среднем на 12 м, а на отдельных участках – до 25 м. Примерно на 6 м снизилась область питания ледника. Немногочисленные зоны повышения поверхности в области фирновой линии характеризуются поднятиями на 2–3 м, а местами – на 6 м. В целом, Западный язык находится в стадии явно выраженной деградации.

Причины различий заключаются в следующем. Во-первых, абляция Западного ледника интенсивнее, что связано со значительной загрязнённостью поверхности материалом, сносимым с очень рыхлого, тектонически раздробленного левого борта

долины – склона г. Аджикол. Во-вторых, орография области питания обуславливает уменьшение доли льда, поступающего в западную ветвь. Это видно и из характера рисунка горизонталей ледниковой поверхности в области питания (см. рис. 4, б). Понижение поверхности фирнового бассейна, в целом связанное с общей деградацией оледенения Кавказа, привело к тому, что в последние десятилетия основная масса льда уходит в восточную ветвь. Через подлёдный гребень – пониженный участок отрога-ледораздела, отходящего от г. Аджикол, – в западную ветвь поступает всё меньше льда, количество которого не может компенсировать убыль вещества на языке. Такие случаи распространены достаточно

широко, например ледники Уллукол и Уллумалиен-дерку, Бирджалычиран и Чунгурчатчиран на Эльбурсе, ледники Джанкуат и Лекзыр.

Покрытый мореной и отступающий Западный ледник служит источником огромной массы погребённого льда, которая представляет собой основную причину селеформирования. Область распространения погребённых льдов относится к моренам современного возраста и стадии малого ледникового периода. Непрерывная линза погребённых льдов (по данным электрозондирования), как бы продолжающая современный Западный ледник, шириной от 200 до 400 м и толщиной 25 м, выклинивается на 1 км ниже конца ледника, примерно до отметки 3100 м. Мощность покрывающего её моренного чехла колеблется от 15 до 5 м, уменьшаясь на краевых участках, где погребённые льды подходят близко к поверхности. Именно здесь развиваются каньоны и очаги формирования селей (см. рис. 4, б). Ниже Восточного ледника линзы погребённого льда ограничены.

Для прогноза селевых явлений и оптимальной защиты от них в первую очередь необходимо понять механизм селеформирования. Исследователи, изучающие селевую опасность в районе г. Тырнауз, имеют различные мнения [4, 17, 18]. Так, В.А. Герасимов, например, считает, что катастрофический сели 1977 г. сформировался в результате слияния многочисленных микроселей с окружающих склонов [4]. С.М. Флейшман, признавая наличие погребённых льдов в моренном комплексе ледников Каярты, связывал причину формирования катастрофических селей с быстрым оползанием морены по погребённому льду, не объясняя при этом причину катастрофического расхода воды [18].

Наиболее полно процесс селеформирования в перигляциальной зоне ледников Каярты изучен Эльбрусской экспедицией географического факультета МГУ под научным руководством Г.К. Тушинского в 1963 г. Эта экспедиция была комплексной. Изучались геолого-геоморфологические, гидрометеорологические и гляциологические условия формирования катастрофических селей, обрушившихся на г. Тырнауз в 1960, 1961 и 1962 гг. В состав экспедиции входил и фототеодолитный отряд, который выполнил фототеодолитную съёмку района, положившую начало дистанционного мониторинга гляциальных селей бассейна р. Герхожан-Су. Итоги исследований изложены в работе [17]. Следует отметить скрупулёзность полевых исследований, которые позволили сразу же отвергнуть версию о прорыве зандровых озёр, приведших в 1960 г. к образованию катастрофических селей, поскольку эти озёра были спущены гораздо раньше. Подробно исследовались механические и минералогические свойства грунтов, лежащих моренные отложения, а также мерзлотные

процессы: систематические сезонные и суточные промерзания—оттаивания, которые влияют на структурно-механические свойства грунтов и относятся, по-видимому, к одному из главных факторов образования тиксотропных грунтов.

Основной вывод исследований состоит в том, что «условием формирования селей в данном районе является разрушение тиксотропной структуры моренных отложений, переход их в разжиженное состояние одновременно в большей части селеопасного каньона, которое формирует селевые потоки грунта, «стекающие» с бортов на днище и смешивающиеся с русловыми водами, которые характеризуются в этот момент катастрофическим увеличением расхода» [17, с. 51]. Осталось объяснить, откуда берётся вода для катастрофического увеличения расхода, тем более, что сели 1961 и 1962 г. сформировались в ясную погоду. Авторы считают, что такой объём воды может накапливаться в результате таяния на поверхности ледника в отрицательных формах микрорельефа и при их переполнении одновременно сбрасываться со всей поверхности ледника. Такую вероятность исключить нельзя, однако, по нашему мнению, более вероятный способ резкого увеличения расхода воды — прорыв ёмкостей, заполненных водой и образовавшихся в результате таяния погребённого льда. Погребённый лёд обнаружен и во время экспедиции 1963 г. «Погребённый лёд удалось наблюдать в стадияльной морене Фернау, в левом цирке. Поверхность морены занята несколькими термокарстовыми понижениями блюдцеобразной формы. В одном из понижений под слоем моренных отложений мощностью до 2 м выходит горизонт погребённого льда видимой мощностью до 1 м» [17, с. 28, 29]. И там же: «Вытаивание погребённых льдов неизбежно приведёт к нарушению залегания моренных отложений и может вызвать подвижки отдельных блоков морены». Это и есть прогноз, который полностью оправдался в 2000 г. И.Б. Сейнова пишет: «По правому борту старого селевого вреза произошёл откол монолита объёмом 100 тыс. м³ (рис. 5) от погребённого в XIX в. ледника» [16, с. 190]. Далее отмечается, что монолит мёрзлой породы (а не ледника) при сдвиге раскололся на блоки, которые перегородили русло р. Каярты и таким образом вызвали формирование катастрофического во всех отношениях селя 18–25 июля 2000 г. (рис. 6).

В 1977 г. проведена повторная экспедиция географического факультета МГУ к истокам р. Каярты, основной целью которой было изучение динамики ледников и морен при помощи повторной фототеодолитной съёмки. Одновременно вели гляциологические и геоморфологические исследования. Результаты изложены в работе [7]. Отметим, что нам «почастливилось» наблюдать за формированием ката-

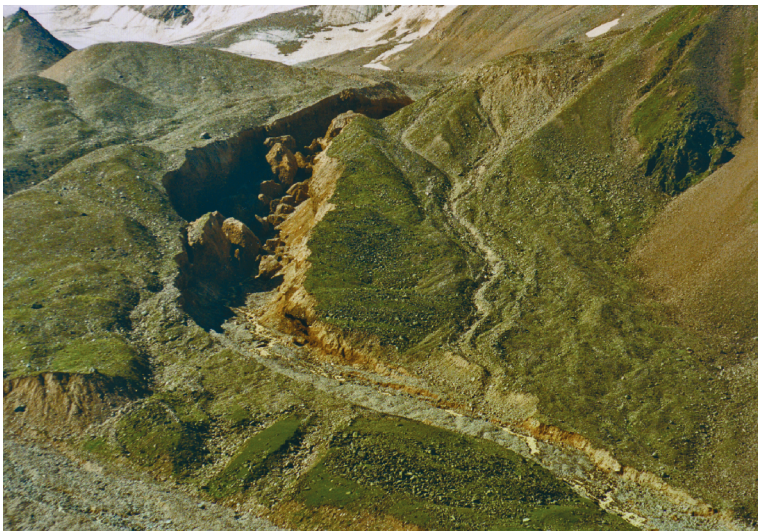


Рис. 5. Селевой врез в зоне формирования селя в ледниковом цирке Каярта Западный (фото А.А. Алейникова, 29 июля 2000 г.)

Fig. 5. Mudflow ravine in the mudflow formation zone in West Kayrta Glacial cirque (Photo by A.A. Aleinikov, July 29, 2000)



Рис. 6. Заполнение селепропускного канала селевыми отложениями и затопление части г. Тырнауз 18–25 июля 2000 г. (фото А.А. Алейникова, 25 июля 2000 г.)

Fig. 6. Mudflow-pass channel overflow and Tyrnyauz flooding in July 18–25, 2000 (Photo by A.A. Aleinikov, July 25, 2000)

строфического селя 10 и 11 августа 1977 г., находясь в начале его транзита, примерно на отметке 2900 м. 11 августа после схода селя выполнена повторная фототеодолитная съёмка, которая позволила зафиксировать точные параметры селеопасного Западного каньона² непосредственно после схода селя. Выполнить такую же съёмку после схода самого крупного в XX в. селя 2000 г. удалось только в 2003 г., когда борта каньона уже несколько изменились. Тем не менее, табл. 3 даёт некоторое представление о развитии селеопасного каньона за 40 лет (1963–2003 гг.). Как видно из табл. 3, в 1977 г. непосредственно из зоны формирования было вынесено 150 тыс. м³, а в 1999–2000 г. – 650 тыс. м³. Следует заметить, что в 1999 г. в августе на г. Тырнауз обрушился ещё один катастрофический сел, который разрушил только

что построенную выше города плотину-селеуловитель. Его отложения заполнили селепропускной канал в городе и, возможно, стали причиной катастрофы 2000 г. Отсюда цифру 650 тыс. м³ справедливо отнести к 1999–2000 гг.

При обследовании морен в 1977 г. после схода селя 11 августа обнаружены ниши в бортах каньонов, где лежали пласты погребённого льда, из-под которых вытекали потоки воды. Это показывает, что в морене находились ёмкости, заполненные водой, образовавшейся при таянии погребённого льда. Их прорыв приводит к катастрофическому увеличению расходов воды в русле и, следовательно, к формированию селя. В таком случае после схода селя уровень морены должен понизиться. Сравнивая материалы съёмки 1963 и 1977 гг, мы установили, что это пони-

²На самом деле, каньон – в данном случае, эрозионная рытвина, но вслед за Г.К. Тушинским [17], И.Б. Сейновой [16] и С.С. Черноморцем [19] мы говорим – каньон, потому что так удобнее и лучше воспринимается на слух и при чтении.

Таблица 3. Основные параметры Западного селеопасного каньона в перигляциальной зоне ледников Каярты (бассейн р. Герхожан-Су) в 1963–2003 гг.

Параметры	1963 г.	1977 г.	2003 г.
Длина, м	850	870	960
Ширина, м: средняя максимальная	28	43	70
	35	66	125
Глубина, м: средняя максимальная	6	8	16
	10,7	18,8	34,5
Верхняя отметка начала каньона, м	3220	3225	3250
Площадь, тыс. м ²	25	37	58
Объём, тыс. м ³	150	300	950

жение составило 1 м [7]. Однако эта цифра всего в 2 раза больше возможной ошибки измерений. В период наблюдений 1977–2003 гг. мы получили результат в 1,9 м и чёткое изображение термокарстовых воронок (см. рис. 4, б). Такие исследования стали возможны благодаря цифровым методам обработки снимков, а также дате съёмки – через 3 года после схода селя, когда морена успела уплотниться. За этот период объём морены уменьшился на 900 тыс. м³, что эквивалентно 810 тыс. м³ воды.

Термокарстовый рельеф характерен для всей площади морены, что позволяет предположить наличие погребённого льда и ниже Восточного ледника. Здесь погребённый лед, возможно, образует не сплошное тело, как под Западным ледником, а отдельные линзы, поэтому они и не были обнаружены при геофизических измерениях. Всё это показывает, что основной селеобразующий фактор в истоках р. Каярты – прорыв заполненных водой ёмкостей, находящихся в современных и более древних моренах, которые образуются при таянии погребённого в них льда. Этот прорыв и приводит к катастрофическому увеличению расходов воды и формированию мощного селя.

Другое мнение о причинах формирования катастрофического селя в 2000 г. у С.С. Черноморца [19]. Он считает, что отчётливое увеличение расходов воды в русле р. Каярты произошло в результате резкой разгрузки внутрiledниковых полостей. Это мнение достаточно близко к нашему. О существовании таких ёмкостей (полостей) и в моренном комплексе свидетельствуют также гидрографические данные. Ниже Западного ледника одни водотоки теряются в морене, а другие выходят на поверхность из-под земли (см. рис. 4, б). Напомним, что карта составлена по материалам фототеоодолитной съёмки 1977 г., выполненной на следующий день после схода селя.



Рис. 7. Эрозионная деятельность селя в среднем течении р. Герхожан-Су (фото А.А. Алейникова, 26 августа 2000 г.)

Fig. 7. Erosion activity of the mudflow in the middle reaches of Gerhozhan-Su river (Photo by A.A. Aleinikov, August 26, 2000)

Таким образом, в 2000 г. только непосредственно в зоне формирования образовался селё общим объёмом около 1 млн м³ (принимается во внимание и селё 1999 г.). Учитывая эрозионную деятельность на протяжении 14 км до г. Тырнауза (рис. 7), цифры общего объёма в 10 млн м³, а его твёрдой составляющей – в 5 млн м³, опубликованные в 2001 г. [14, 16], не кажутся преувеличенными. Однако, по нашему мнению, более вероятны другие цифры, которые опираются на результаты топографических съёмок как в городе, так и на участке аккумуляции выше конуса: объём выноса твёрдого материала оценён более чем в 3,1 млн м³, а общий объём селевой массы – приблизительно в 6 млн м³ [12, 19]. По мнению И.Б. Сейновой [16], в XX в. селей такого масштаба в бассейне р. Герхожан-Су не наблюдалось. Однако гигантские валуны, добытые в строительных карьерах, а также следы крупноглыбовых завалов и подпрудных озёр в долине Баксана, вскры-

тые при прокладке объездной дороги в 2000 г., свидетельствуют о неоднократном проявлении подобных экстремальных процессов в прошлом [7].

Судя по прогрессирующему разрастанию селеопасного Западного каньона за 40 лет наблюдений, следует ожидать повторения катастрофических селей в бассейне р. Герхожан-Су и в будущем.

Южный склон Эльбруса

Но везде ли наличие погребённых и мёртвых льдов можно считать признаком возможного формирования катастрофических селей? Конечно, нет. На южном склоне Эльбруса, у ледников Большой и Малый Азау, Гарабаши, Терскол, погребённые и мёртвые льды сохранились в настоящее время в незначительном количестве. Огромный объём их (не менее 1,5 млн м³) растаял в 1957–1997 гг. у ледника Большой Азау и около 1 млн м³ – у ледника Ирик, что зафиксировано повторными фототеодолитными съёмками. Озеро среди морены у правого конца ледника Малый Азау также незначительно по объёму, и его прорыв в 1979 г. привёл только к селевому паводку р. Азау, которая при этом не вышла из своего русла. Общий объём последнего селя из долины р. Гарабаши, сошедшего 19 июля 1983 г., составил около 111 тыс. м³, а его твёрдая составляющая не превысила 30 тыс. м³, что не позволяет считать масштаб селя катастрофическим [16]. Таким образом, сход катастрофических селей гляциального генезиса в бассейнах рек южного склона Эльбруса в настоящее время маловероятен.

Долина р. Бирджалы-Су

Иные условия на северо-восточном склоне. Наибольшая потенциальная селевая опасность в Приэльбрусье сохраняется и в настоящее время в верховьях р. Малки, где сформировался огромный гляциальный селевой очаг. Об этом мы писали более 10 лет назад [9], и наш прогноз сбывся: 11 августа 2006 г. произошел прорыв озера у окончания ледника Бирджалычиран. Сформировался сел, который прошёл 10,5 км и достиг минеральных источников Джылысу [21]. Ледяное поле Джикиуганкез с короткими выводными языками ледников Бирджалычиран и Чунгурчатчиран – это «ледоём», образованный лавовыми запрудами при последнем извержении Эльбруса. В настоящее время эти ледники быстро сокращаются, особенно Бирджалычиран. Судя по результатам инструментальных съёмок, с 1887 по 2007 г. площадь ледников сократилась более чем на 6 км², а их линейное отступление составило свыше 1,5 км. Такое интенсивное сокращение сопровождается формированием в этой зоне большого массива мёртвых льдов, объём которых оценивается в 15 млн м³ на площади 1,5 км².

Здесь постоянно возникают и разрушаются термокарстовые озёра, внутриледниковые ёмкости и каналы стока. Эта зона в настоящее время – самый активный очаг гляциальных селей в Приэльбрусье, сход которых известен с 1909 г. [3].

Долина р. Кубасанты

В этом районе также вероятно образование катастрофических селей, связанных, например, с обрушением неустойчивых грунтовых масс в русло реки. Так, в 1987 г. началась и была нами инструментально (путём повторных фототеодолитных съёмок) зафиксирована крупная подвижка оползня, расположенного на левом склоне долины р. Кубасанты, в её среднем течении. Сход крупного селя в 1989 г., возможно, связан именно с этой подвижкой. При обработке повторных снимков было установлено следующее:

1) смещение произошло на всей поверхности оползневой зоны. Площадь смещения (в горизонтальной проекции) составляет 473 тыс. м² при средней крутизне склона в 30°. Верхняя граница оползня находится на высоте 2850 м, нижняя – на 1950 м. Средняя ширина оползневого тела составляет около 350 м. О глубине активной части оползня можно судить только по косвенным признакам: а) по обнажениям рыхлых пород, высотой до 20 м; б) на основании того, что при довольно большом смещении поверхности оползня (около 12 м) деревья, растущие на нём, не образуют так называемого «пьяного» леса (общепринятого индикатора оползневой зоны), а продолжают расти прямо. По-видимому, глубину оползня в этом случае следует определить порядка 10–20 м, а общий объём оползневого тела – 5–10 млн м³;

2) среднее смещение оползня за год составило 2–2,5 м, а отдельные блоки в зоне разгрузки сместились на 12 м;

3) зона разгрузки, где происходит соскальзывание рыхлого материала в реку, расширилась за время подвижки на 120 м, а её высота поднялась на 70 м, т.е. в 1987 г. разгрузка начиналась на высоте 2140 м против 2070 м в 1986 г.;

4) общий объём вынесенного из оползня материала за период подвижки равен приблизительно 180–200 тыс. м³, или около 10% объёма наиболее активной части оползня, которая в ближайшее время по-прежнему будет представлять собой угрозу.

Характер подвижки оползня, которая имела достаточно большие размеры за сравнительно короткий срок, а также векторов скоростей движения, резко увеличивающихся в нижней части оползня, предполагают возможность быстрой разгрузки оползня в виде обрушения рыхлых масс, которые могут перегородить узкую в этой части (150 м) долину р. Кубасанты. По-видимому, характер дви-

жения этого оползня следует назвать катастрофическим, при этом нельзя исключить возможность единовременного обрушения всей активной части оползня объёмом 1,7 млн м³. При этом расчётные значения общей длины перекрытия долины р. Кубасанты составят 215 м, а высоты плотины – 53 м. При крупных землетрясениях, которые возможны в Приэльбрусье, такое развитие событий вполне вероятно.

Обсуждение

Анализ распространения катастрофических селей в верховьях долины р. Баксан и времени их схода позволяет сделать следующие выводы.

1. Существует тесная связь между сходом катастрофических селей и динамикой оледенения. Выделяются два цикла крупномасштабной селевой активности, приуроченные к окончанию первой и второй исторических стадий оледенения и периодам наибольшей интенсивности отступления ледников, а именно: I–VII вв. и середина XIX – середина XX в.

2. Размеры катастрофических селей со временем снижаются. Объёмы селей, сошедших в конце XIX – середине XX в. из ущелья р. Гарабаши, оцениваются приблизительно в 1 млн м³. Судя по размерам валунов в селевых отложениях и их распространению, можно предположить, что в первом тысячелетии объём селей был на порядок больше.

На основе этих фактов можно было бы предположить единый механизм образования катастрофических селей в верховьях долины р. Баксан, тесно связанный с извержением вулкана Эльбрус и динамикой его оледенения, однако это не совсем так. Раньше мы считали, что мощные древние сели формировались непосредственно во время последнего извержения Эльбруса, которое, согласно исследованиям во время МГГ, приблизительно также датировалось началом новой эры [13]. Позднее, на основе лихенометрической съёмки конечных морен и голоценовых лав, мы определили время последнего извержения вулкана Эльбрус, которое было во время климатического оптимума голоцена, – не ранее 3–4 тыс. лет назад [8]. Следовательно, механизм формирования гигантских селей около начала новой эры был иным. Он действительно связан с последним извержением Эльбруса, но не прямо, а с его последствиями.

Существование мощных толщ озёрных отложений при входе в теснину ущелья ледника Большой Азау, кровля которых находится на 200 м выше уреза реки [11], а также между голоценовыми лавовым потоком и откосом боковой морены ледника Гарабаши на высотах 3160 и 3300 м (на южном склоне Эльбруса и в котловине ниже ледника Уллумалиендерку на северо-восточном склоне Эльбруса), однозначно свидетельствует о подпруживании ледников голоце-

новыми лавами. Об этом упоминалось ещё в работах по изучению Эльбруса во время МГГ [11, 13, 22]. Лавы перекрывали долины и способствовали образованию глубоких ёмкостей, которые заполнялись льдом во время последующих наступаний ледников в первую и вторую исторические стадии оледенения. Во время циклических потеплений климата в таких местах возникали подпружные и многочисленные термокарстовые озёра, способствующие скорейшему таянию ледников, а их прорывы и приводили к образованию катастрофических селей.

Возможные способы борьбы с катастрофическими селями

На примере селя, сошедшего в 2000 г. на г. Тырнауз, можно сделать вывод, что способов защиты объектов от селей такого масштаба не существует, но можно предложить различные способы борьбы с этим явлением. В работе [17] высказана очень правильная мысль, что борьба с селевыми потоками возможна лишь там, где энергия селей ещё невелика, т.е. в зоне их зарождения. Для этого в каждом конкретном случае необходимо изучать механизм формирования селей. Например, в долине Адыл-Су не так опасен прорыв приледниковых озёр, как возможность разрушения языка ледника ниже оз. Башкара и образования ледово-водокаменного потока большой разрушительной силы. Следовательно, нужно спустить воду из нижнего озера, расширив и углубив русло истока реки, вытекающего из озера.

Поскольку к основным источникам формирования катастрофических расходов воды в верховьях р. Каярты относятся всё-таки погребённые льды и, возможно, внутриледниковые ёмкости, то в данном случае полезно было бы дренировать морену в зоне выклинивания линзы погребённого льда, не допуская накопления воды в пустотах, образующихся при таянии погребённых льдов.

Во избежание прорыва ледниковых озёр, образующихся в мёртвых льдах на северо-восточном склоне Эльбруса, и формирования при этом селей, доходящих до минеральных источников Джылысу, целесообразна переброска стока из бассейна р. Бирджалы-Су в бассейн р. Каракая-Су, о чём пишут в своих работах А.М. Багов, М.Д. Докукин и др. [1, 2]. Сели в этом случае пройдут намного восточнее этих источников.

Наконец, о возможном срыве оползня и подпруживании р. Кубасанты. Идеальное решение здесь – заблаговременная постройка защищённого водовода у правого борта долины, напротив оползня длиной 250–300 м, который не позволил бы накапливаться воде в подпружном озере. В случае обрушения оползня при отсутствии такого водовода, по-видимому, следует предусмотреть оперативные взрывные работы для разрушения образовавшейся плотины.

Таким образом, на различных примерах мы показали, что можно значительно снизить опасность от катастрофических селей, не прибегая при этом к строительству дорогостоящих защитных сооружений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 10-05-00453).

Литература

1. *Багов А.М.* Возможный вариант защиты минеральных источников «Джилы-Су» от гляциальных прорывных паводков и селей // *Материалы Междун. науч. конф. «Гляциология в начале XXI века»*. М.: Университетская книга, 2009. С. 98–103.
2. *Багов А.М., Докукин М.Д., Савернюк Е.А., Толстель С.В.* О динамике ледников и приледниковых озер в верховьях реки Бирджалы-су и о возможном варианте селезащиты курорта «Джилысу» (северо-восточный склон Эльбруса) // *Тр. Междун. конф. «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита»*. Пятигорск: изд. Института «Севкавгипропроводхоз», 2008. С. 293–296.
3. *Герасимов А.П.* Северо-восточное подножие Эльбруса // *Изв. Геологич. комитета*. 1911. Т. 30. Вып. 2. С. 77–151.
4. *Герасимов В.А.* Селевые потоки 10–11 августа 1977 г. в бассейне р. Герхожансу (Северный Кавказ) и условия их образования // *Метеорология и гидрология*. 1980. № 4. С. 68–77.
5. *Гляциологический словарь* / Под ред. В.М. Котлякова. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 528 с.
6. *Дзюба В.В., Золотарев Е.А.* Катастрофические лавины Сванетии зимы 1976 г. // *МГИ*. 1979. Вып. 36. С. 228–234.
7. *Золотарев Е.А., Поповнин В.В., Сейнова И.Б.* Режим ледника Каярта – активного селевого очага // *МГИ*. 1982. Вып. 43. С. 69–76.
8. *Золотарев Е.А., Сейнова И.Б.* Оледенение Эльбруса и его извержение в голоцене // *МГИ*. 1988. Вып. 64. С. 95–101.
9. *Золотарев Е.А., Сейнова И.Б.* Катастрофические сели Приэльбрусья за два последних тысячелетия // *МГИ*. 1997. Вып. 82. С. 184–189.
10. *Каталог ледников СССР: Т. 8. Северный Кавказ. Ч. 5. Бассейн рек Малки, Баксана*. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 145 с.
11. *Костоусов В.Н.* Гляциологический очерк южного сектора оледенения Эльбруса // *Инф. сб. о работах по МГГ*. № 4. М.: изд. МГУ, 1959. С. 54–78.
12. *Крыленко И.В., Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С., Журавлева П.Г.* Динамика селевого бассейна р. Герхожан-Су (Кабардино-Балкария) после катастрофы в июле 2000 г. // *МГИ*. 2004. Вып. 96. С. 159–166.
13. *Оледенение Эльбруса* / Под ред. Г.К. Тушинского. М.: изд. МГУ, 1968. 344 с.
14. *Панов В.Д., Лурье П.М., Заруднев В.М.* Селевые потоки в бассейне р. Герхожансу (Северный Кавказ) в июле 2000 г. // *Метеорология и гидрология*. 2001. № 2. С. 89–97.
15. *Перов В.Ф.* Селевые явления: Терминологический словарь. М.: изд. МГУ, 1996. 45 с.
16. *Сейнова И.Б., Золотарев Е.А.* Ледники и сели Приэльбрусья (Эволюция оледенения и селевой активности). М.: Научный мир, 2001. 203 с.
17. *Тушинский Г.К., Попов А.И., Голубев Г.Н., Мудров Ю.В., Тумель Н.В.* Опыт изучения гляциальных селей Большого Кавказа (на примере реки Герхожансу бассейна реки Баксан) // *Инф. сб. о работах по МГГ*. № 13. М.: изд. МГУ, 1966. С. 5–106.
18. *Флейшман С.М., Сейнова И.Б., Золотарев Е.А.* Формирование гляциальных селей непрерывного генезиса в бассейне Герхожан-Су на Северном Кавказе // *МГИ*. 1979. Вып. 35. С. 195–198.
19. *Черноморец С.С.* Селевые очаги до и после катастрофы. М.: Научный мир, 2005. 182 с.
20. *Черноморец С.С., Петраков Д.А., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Тутубалина О.В., Алейников А.А., Тарбеева А.М.* Динамика ледниково-озерного комплекса Башкара и оценка селевой опасности в долине реки Адыл-су (Кавказ) // *Криосфера Земли*. 2007. Т. 11. С. 72–84.
21. *Черноморец С.С., Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Сейнова И.Б., Крыленко И.В.* Прорыв ледникового озера на северо-восточном склоне Эльбруса 11 августа 2006 г.: прогноз, события и последствия // *МГИ*. 2007. Вып. 102. С. 219–223.
22. *Щербакова Е.М.* Следы последнего оледенения в Приэльбрусье // *Инф. сб. о работах геогр. фак-та МГУ по МГГ*. № 1. М.: изд. МГУ, 1958. С. 29–101.
23. *Petrakov D.A., Tutubalina O.V., Aleinikov A.A., Chernomorets S.S., Evans S.G., Kidyayeva V.M., Krylenko I.N., Norin S.V., Shakhmina M.S., Seynova I.B.* Monitoring of Bashkara glacier lakes (Central Caucasus, Russia) and modeling of their potential outburst // *Natural Hazards*. 2011. V. 61. № 3. P. 1293–1316.

Summary

Mechanism of formation of the catastrophic mudflows in different glacial valleys of Elbrus region at the present stage of glacial degradation is described. The important role of the buried ice in the formation of catastrophic mudflows that affected Tyrnauz in the XX century was revealed as a result of remote monitoring of changes in glacial-moraine complex of Kayarta river. The dynamics of glacial lakes in the Adyl-Su valley in the Bashkara Glacier region was described and probability of their breakthrough was estimated. The quantitative indicators of the dynamics of the landslide in the Kubasanty valley were obtained as a result of remote monitoring, and its influence on the formation of catastrophic mudflows is discovered. Various possible methods of catastrophic mudflows prevention not requiring expensive protective constructions are discussed.