



---

ИНСТИТУТ ГЕОГРАФИИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
ГЛЯЦИОЛОГИЧЕСКАЯ АССОЦИАЦИЯ

---

INSTITUTE OF GEOGRAPHY OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES  
GLACIOLOGICAL ASSOCIATION

---

**МАТЕРИАЛЫ  
ГЛЯЦИОЛОГИЧЕСКИХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ**

98

---

---

МОСКВА 2005

Редакционная коллегия "Материалов гляциологических исследований" поздравляет главного редактора академика В.М. Котлякова с высокими наградами, полученными им в 2004 году:

Российской независимой премией "Триумф" в области наук о Земле;

Большой Золотой (бывшей Константиновской) медалью Русского географического общества за основополагающий вклад в развитие географической науки и работу Географического общества.

**Главный редактор академик В.М.КОТЛЯКОВ**

**Ответственный секретарь И.Я.ЛАПИНА**

**Редакционная коллегия:** д.г.н. **В.Р.Алексеев**, к.г.н. **С.М.Архипов**, д.г.н. **А.Н.Божинский**, к.г.н. **С.Р.Веркулич**, к.г.н. **Н.А.Володичева**, к.г.н. **А.Ф.Глазовский**, д.г.н. **В.Н.Голубев**, д.г.н. **М.Г.Гросвальд**, д.г.н. **А.Н.Диких**, к.г.н. **Н.Н.Дрейер**, д.г.н. **Ю.Ф.Книжников**, д.г.н. **В.Г.Коновалов**, д.г.н. **М.М.Корейша**, д.г.н. **Ю.Я.Мачерет**, к.г.н. **В.И.Николаев**, к.г.н. **Н.И.Осокин**, к.г.н. **О.В.Рототаева**, д.ф.-м.н. **А.Н.Саламатин**, чл.-корр. РАН **О.Н.Соломина**, академик НАН Республики Казахстан **И.В.Северский**, к.г.н. **Т.Е.Хромова**, к.г.н. **Д.Г.Цветков**

В подготовке сборника к печати принимали участие:  
А.В.Котляков, Л.В.Набокова, Т.В.Сковородина, О.М.Шляхова

Компьютерная верстка: М.Г.Кунахович

ИНСТИТУТ ГЕОГРАФИИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ГЛЯЦИОЛОГИЧЕСКАЯ АССОЦИАЦИЯ

**МАТЕРИАЛЫ  
ГЛЯЦИОЛОГИЧЕСКИХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ**

**ВЫПУСК 98**

**DATA  
OF GLACIOLOGICAL  
STUDIES**

**PUBLICATION 98**

Москва

Февраль 2005

## АННОТАЦИЯ

В статьях раздела «Тематические и региональные работы» говорится о современной динамике оледенения Северного Тянь-Шаня и Джунгарского Алатау, разрастании поверхностной морены на кавказском леднике Джанкуат, ледниках плато Путорана, каменных глетчерах северо-востока Азии, газовом извержении в цирке ледника Колка как возможной причине его подвижки, а также механике и прочности пресного льда.

Приводится вторая подборка текстов 24 докладов, прочитанных на XIII гляциологическом симпозиуме, состоявшемся в мае 2004 г. в Санкт-Петербурге.

В них содержатся результаты изучения подледного озера Восток в Антарктиде, разные аспекты глубокого бурения ледников, новые данные о режиме, колебаниях и эволюции ледников на Кавказе, Тянь-Шане, Урале и в Сибири, приводятся исторические сведения о подвижках пульсирующих ледников на Северном Кавказе, подробно рассматривается Кармадонская катастрофа 2002 г.

В специальном разделе публикуется информация о начале подготовки к Международному полярному году 2007–2008.

## ANNOTATION

«Paper» section discusses modern glacier dynamics in the Northern Tien Shan and Dzhungarskiy Alatau, increase of surficial debris cover on Djankuat Glacier in the Caucasus, the glaciers of Putorana Plateau, the rock glaciers in the north-eastern Asia, gas outburst in the Kolka Glacier cirque as a possible cause of its surge, and the mechanics and strength of freshwater ice.

This issue contains the second set of papers presented on XIII Glaciological Symposium which was held in

May 2004, Saint-Petersburg. These papers discuss the results of Lake Vostok studies in Antarctica, the different aspects of deep ice drilling, the new data on glacier regime, fluctuations and development in the Caucasus, Tien Shan, the Urals and Siberia. It gives historical information on glacier surges in the Northern Caucasus, and details of the Karmadon catastrophe, 2002.

Special section informs on the beginning of preparation for the International Polar Year 2007–2008.

# Климатический фактор катастрофической подвижки ледника Колка в 2002 году

И.М. Лебедева, О.В. Рототаева

Институт географии РАН, Москва

Рассмотрены вековые колебания ледникового климата, циркуляционные факторы его изменчивости и особенности формирования баланса массы ледника Колка за десятилетие, предшествовавшее катастрофической подвижке в 2002 г.

Выброс ледника Колка в долину р. Геналдон осенью 2002 г., повлекший за собой катастрофический водно-ледово-каменный сель, произошел внезапно. То, что ледник Колка периодически быстро выходит в долину, было известно с незапамятных времен. В XX в. таких пульсаций было две — в 1902 и 1969 гг. с промежутком почти 70 лет. Последнее катастрофическое событие произошло через 32 года, в 2002 г. [5]. Вторая подвижка ледника была подробно изучена Институтом географии АН СССР: многолетняя экспедиция работала в бассейне ледников Колка-Майли по широкой комплексной программе вплоть до конца 70-х годов. Представление о феноменально крупном масштабе, детальности и разнообразии полевых наблюдений можно получить из монографии [9]. По данным о тепловом и водном балансе ледника, балансе его массы, полученным на основе наблюдений, была построена модель многолетнего формирования подвижки ледника Колка, возможных прорывных паводков и селей и т.д. Эти исследования послужили основой для выявления климатических причин внеурочной подвижки в 2002 г.

## Прежние прогнозы

В [9] было установлено, что главная причина пульсаций ледника Колка заключается в особенностях морфологии его бассейна. Благодаря крутостенному цирку и фирновому полю выше него с нависающими снежно-фирновыми карнизами и висячими ледниками (рис. 1) обвално-лавинное питание в несколько раз превышает годовое количество твердых атмосферных осадков в области аккумуляции [10]. Вместе с обвалившимися массами фирна, льда и лавинного снега на поверхность ледника поступает много обломочного материала. Таяние на языке ледника из года в год уменьшается по мере роста толщины абляционной морены, бронирующей поверхность льда. И, наконец, свободному движению льда препятствует левая боковая морена. В итоге на леднике Колка идет многолетнее накопление массы (рис. 2) [9]. В.Г. Ходаков установил, что подвижки происходят, когда превышение аккумуляции над абляцией достигает  $45 \times 10^6$  т. Такая критическая масса формируется за период, равный примерно 70 годам при неизменных климатических условиях.

Прогноз этого периода при изменении климата также был сделан, но он исходил из уверенности, что

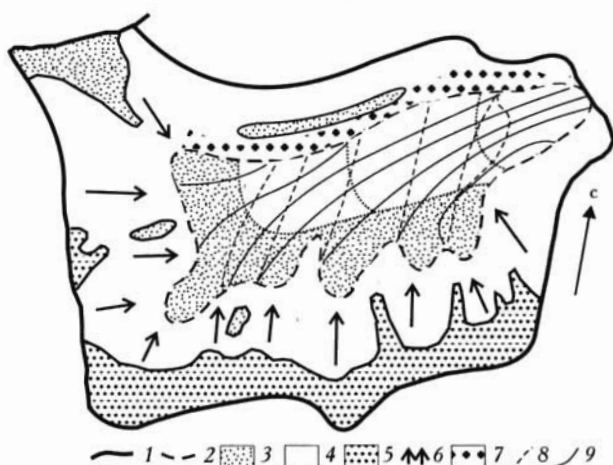


Рис. 1. Схема бассейна ледника Колка [10]: 1 — граница бассейна, 2 — контур ледника, 3 — фирновая область и снежники, 4 — язык ледника, 5 — фирновое поле, 6 — скальный лавиносбор, 7 — древняя конечная морена, в настоящее время боковая морена, 8, 9 — древние и современные линии тока льда, соответственно

Fig. 1. Scheme of Kolka Glacier basin [10]

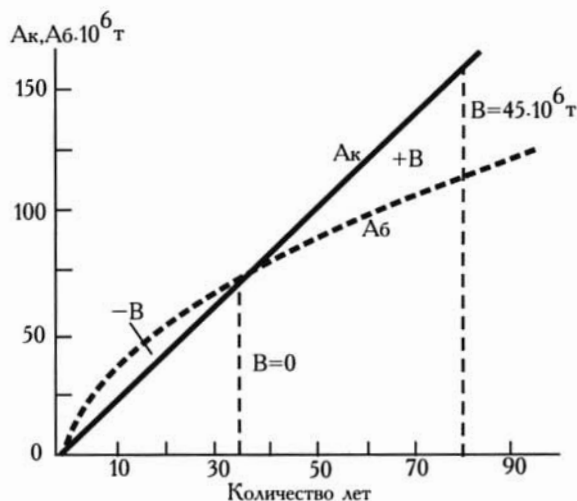


Рис. 2. Ход аккумуляции  $A_k$  и абляции  $A_b$  на леднике Колка при неизменных климатических условиях [9] ( $B$  — баланс массы)

Fig. 2. Changes of accumulation  $A_k$  and абляции  $A_b$  on the Kolka Glacier under constant climatic conditions [9] ( $B$  — mass balance)

значительные вариации маловероятны. При максимальных отклонениях средних зимних атмосферных осадков  $X_z$  и летних температур воздуха  $t_l$  по данным метеостанции Казбег-высокогорная, а они составляют соответственно  $\pm 35\%$  и  $\pm 1^\circ\text{C}$ , В.Г. Ходаков получил период накопления критической массы от 41 до 191 года. Наиболее реальными он считал изменения зимних осадков на  $\pm 10\%$ , а летних температур на  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Тогда период накопления критической массы составил бы 55 или 95 лет, т.е. следующая пульсация ледника Колка должна была состояться в 2024 или 2064 г. Как видим, ни один из упомянутых прогнозов не оправдался. Справедливо отметить, что в 70-х годах прошлого века, когда разрабатывались эти предположения, долгопериодных климатических прогнозов не было. Феномен потепления климата, теперь уже для всех очевидного, в то время отмечал лишь М.И. Будыко, и его гипотеза тогда не имела еще всеобщего признания.

### Колебания климата региона с 1891 по 2002 г.

Рассмотрим колебания основных метеорологических показателей в Казбек-Джидарайском районе Центрального Кавказа за последние 100 лет, включая и последние 32 года после пульсации 1969 г. В основу расчетов положены средние месячные температуры воздуха  $t_m$  и месячные суммы атмосферных осадков  $X_m$  каждого года по данным метеостанции Владикавказ (668 м) с 1891 по 2002 г. Эти же показатели по данным метеостанции Кармадон (1513 м), расположенной в долине р. Геналдон, работающей с 1961 г. по настоящее время, были приведены к тому же ряду по корреляционным уравнениям. Для годовой суммы общих атмосферных осадков  $X$ , например, оно имеет вид ( $\text{г}/\text{см}^2$ ):

$$X_{\text{Карм.}} = 1,05 X_{\text{Влад.}} - 40,8 ; \\ r = 0,74 \pm 0,1; \delta = \pm 8,9; s = \pm 18\% ;$$

где  $r$  — коэффициент корреляции,  $\delta$  — среднее квадратическое отклонение,  $s$  — ошибка уравнения. Для средней летней температуры воздуха (июнь-август) это уравнение выглядит следующим образом ( $^\circ\text{C}$ ):

$$t_{l \text{ Карм.}} = 1,19 t_{l \text{ Влад.}} - 8,2 ; \\ r = 0,88 \pm 0,7; s = \pm 0,88^\circ\text{C} .$$

Между метеостанциями располагается полоса среднегорья, а, главное, Скалистый хребет. Поэтому долина р. Геналдон значительно экранируется от низкой осадкообразующей облачности, и в Кармадоне, несмотря на значительно большую высоту, годовая сумма осадков почти вдвое меньше, чем во Владикавказе.

Далее, по данным метеостанции Кармадон при вертикальном градиенте  $3,5 \text{ г}/\text{см}^2/100 \text{ м}$  (рассчитанным средним между этой станцией и метеостанцией Казбег-высокогорная, расположенная на высоте 3653 м) были вычислены годовые осадки на средних

высотах ледникового языка (3100 м), области аккумуляции (3400 м), скального лавиносбора (3700 м) и фирнового поля над ледником (4000 м). Было принято, что годовой режим циркуляционных осадкообразующих процессов одинаков во всем Казбек-Джидарайском районе, занимающем неизмеримо меньшее пространство, чем атмосферные фронты. Поэтому относительное распределение осадков по месяцам на характерных высотах бассейна ледника Колка считалось подобным наблюдаемому на метеостанции Кармадон.

Средние месячные температуры воздуха над грунтовой (внеледниковой) поверхностью  $t_{m2}$  на тех же уровнях бассейна ледника рассчитаны по вертикальным градиентам  $gt_{m2}$  между метеостанциями Владикавказ и Кармадон:

Месяцы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$gt_{m2}$ , $^\circ\text{C}/100 \text{ м}$			0,4	0,43	0,52	0,58	0,57	0,53	0,45	0,4		

Средние месячные температуры воздуха  $t_{m1}$  над фирном и льдом вычислены как разность  $t_{m2} - t_{ск}$ , где  $t_{ск}$  — скачок температуры воздуха при переходе с грунтовой на ледниковую поверхность. Он определен по эмпирической связи температуры на леднике с температурой на внеледниковой поверхности, найденной Н.В. Давидович для условий Кавказа [3]. Заметим, что в 1970-х годах считалось, что температура воздуха над ледником Колка в течение 5–6 месяцев таяния на  $1^\circ\text{C}$  ниже, чем над грунтовой поверхностью на той же высоте. В последующем оказалось, что температурный скачок имеет годовой ход. Здесь он изменяется от десятых долей до  $2^\circ\text{C}$  в зависимости от температуры воздуха вне ледника.

В результате всех этих расчетов была выявлена межгодовая изменчивость летней температуры (июнь-август) приледникового слоя воздуха  $t_{л1}$ , а также годовых сумм общих  $X$  и твердых  $X_t$  атмосферных осадков, выделенных по методу Э.Г. Богдановой [1], в бассейне ледника Колка за 1891–2002 гг. На рис. 3а она представлена для средней высоты области аккумуляции ледника Колка, равной 3400 м. Очевидно, что колебания температуры приледникового воздуха вокруг средней многолетней величины  $2,7^\circ\text{C}$  были меньше  $\pm 1^\circ\text{C}$  вплоть до середины 80-х годов. Лишь в 1974 г. температура была на  $1,5^\circ\text{C}$  выше нормы, а в 1986 г. настолько же ниже нее. За этот же период — с конца XIX в. до середины 1980-х годов суммы годовых осадков отклонялись от средней величины  $118 \text{ г}/\text{см}^2$  на  $\pm 35 \text{ г}/\text{см}^2$ . При этом доля жидких осадков  $X_{ж}$  составляла 20–30% и лишь в семи случаях достигала 50%, а в 1982 и 1984 гг. снижалась до 10%.

По сглаженному ходу показателей за этот период видно, что колебания температуры приледникового слоя воздуха и годовых осадков носили волнообразный, но противоположный по знаку характер. Это объясняется региональными особенностями циркуляции атмосферы — активизацией фронтов и выпа-

дением до 70% осадков в теплый период года. Главный источник тепла здесь — это солнечная радиация, а ее приток существенно зависит от количества осадкообразующих облаков, почти не прозрачных для солнечных лучей на высоте 3400 м, для которой сделаны расчеты.

Таким образом, в течение 90 лет, включая 1902 и 1969 гг., когда произошли подвижки, климатические условия, благоприятные для формирования положительного баланса массы, плавно чередовались с менее благоприятными. В целом масса ледника нарастала с ускорением в предшествующие подвижкам десятилетия (см. рис. 3а). С середины 80-х годов установилось совершенно иное соотношение колебаний летних температур и осадков: их изменения стали синхронными.

И, наконец, с середины 90-х годов устойчиво повышались как летние температуры, так и годовые суммы осадков. Впервые за 100 лет температуры лета превышали норму 7 лет подряд, вплоть до геналдонской катастрофы осенью 2002 г. Одновременно увеличивалось количество атмосферных осадков. Однако вместе с повышением температур воздуха росла доля жидких осадков. Если в предшествовавший пе-

риод она составляла 20–30%, то теперь достигла 50%. Соответственно, семилетнее потепление сопровождалось уменьшением количества твердых осадков. Таким образом, в противоположность климатическим условиям двух десятилетий, предшествовавших подвижкам 1902 и 1969 гг., в 1993–2002 гг. они не способствовали накоплению массы ледника Колка.

#### Циркуляционные причины изменчивости ледникового климата

В работах Н.К. Кононовой и соавторов, в частности, в [4], дается объяснение характера колебаний метеорологических показателей. Анализ временного режима элементарных циркуляционных механизмов показал, что в Северном полушарии до 1920 г. по числу дней в году преобладали северные меридиональные процессы, затем до 50-х годов наибольшее число дней пришлось на зональную циркуляцию. После этого снова установилась эпоха северной меридиональной циркуляции, которая продлилась до 1990 г. В последующие 12 лет наибольшим было число дней в году с выходом южных циклонов, которые приносят со Средиземного моря тепло и влагу. Как видно на рис. 3б, именно с ними связано потепление и уве-

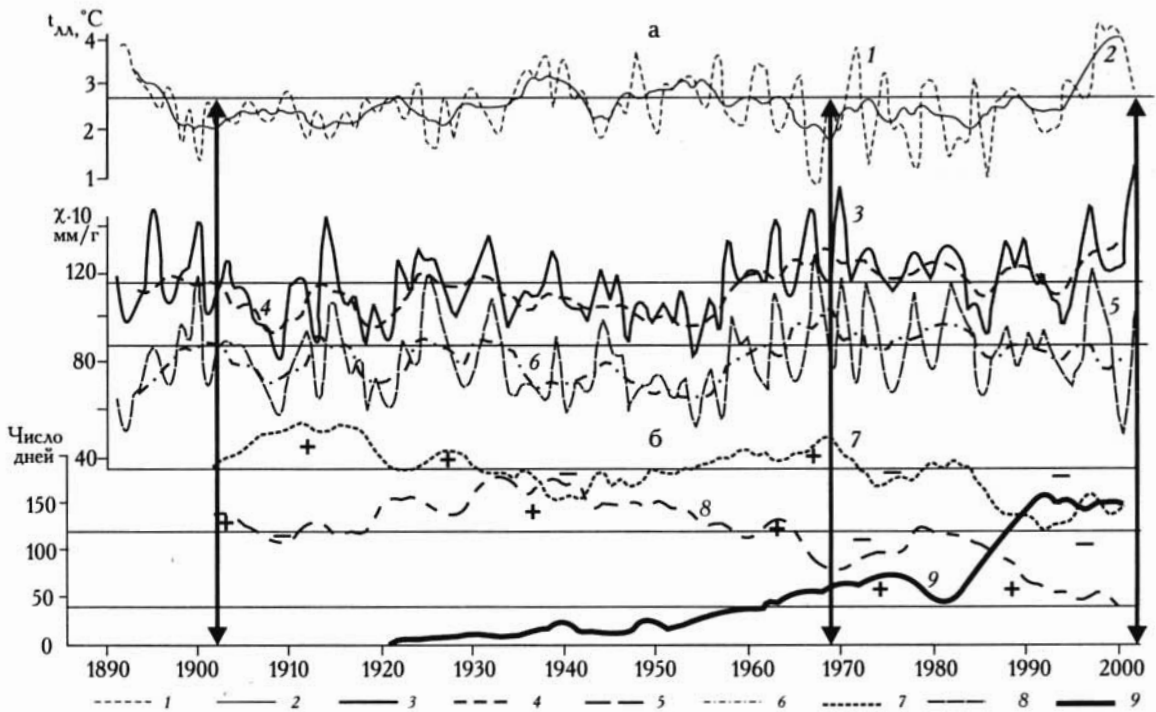


Рис. 3. Вековой режим средней летней температуры приледникового слоя воздуха  $t_{лн}$ , годовой суммы общих  $X$  и твердых  $X_t$  атмосферных осадков в области аккумуляции ледника Колка на высоте 3400 м: ход  $t_{лн}$  по ежегодным значениям (1) и сглаженный по пятилетиям (2), ход осадков  $X$  по годовым суммам (3) и сглаженный по пятилетиям (4); ход твердых осадков  $X_t$  по годовым суммам (5) и сглаженный по пятилетиям (6) (а). Вековые изменения циркуляции атмосферы по Н.К. Кононовой [4], сглаженные по пятилетиям — число дней с циркуляцией: северной меридиональной (7), зональной и некоторыми нарушениями зональности (8), южной меридиональной (9) (б); горизонтальные прямые — средние многолетние значения соответствующих показателей, вертикальные линии — годы подвижек ледника

Fig. 3. A century mode of average summer temperature of near glacier layer of air  $t_{лн}$ , °C, annual sum of total  $X$  and solid  $X_t$  atmospheric precipitation in the accumulation area of Kolka Glacier at height of 3400 m: a course of  $t_{лн}$  on annual averages (1) and smoothed on five years (2), course of  $X$  on the annual sums (3) and smoothed on five years (4); course of  $X_t$  on the annual sums (5) and smoothed on five years (6) (a); secular changes of atmospheric circulation after [4], smoothed on five years — number of days with circulation: northern meridional (7), zonal with some infringements of zonality (8), southern meridional (9) (b); horizontal straight lines — mean multi-year values of parameters, vertical lines — years of glacier advances (collapse)

личение атмосферных осадков в последние годы перед подвижкой ледника Колка на Северном Кавказе. Интересно, что до 1920-х годов южной меридиональной циркуляции не наблюдалось. Затем, медленно, но неуклонно она проявляется все больше и больше, по-прежнему по числу дней оставаясь далеко позади северной меридиональной и зональной циркуляции. «Взрыв» произошел в начале 1980-х годов, когда сформировался усиливающийся поток южных циклонов. Одновременно угасала зональная и северная меридиональная циркуляции. С этим периодом в Кавказском регионе связана смена асинхронного хода годовых осадков и летней температуры на синхронный. Наконец, в последнее десятилетие действовали преимущественно северная и южная меридиональная циркуляции. Последняя сопровождалась длительными теплыми и дождливыми периодами таяния.

Таким образом, отмеченные аналитиками ледниковой катастрофы 2002 г. необычайно высокая температура воздуха четырех лет, предшествовавших подвижке, и соответственно обилие талых вод не случайны. Яркая тенденция потепления лета обнаруживается за 10 лет до катастрофы и отражает современный этап изменения климата, связанный с перестройкой циркуляции атмосферы, явно проявившейся еще в начале 1980-х годов.

#### Формирование баланса массы ледника Колка в 1993–2002 гг.

Очевидно, что климатические условия формирования критической массы ледника Колка, приведшие к подвижкам в 1902 и 1969 гг. были идентичными, а за последние 32 года и особенно за 10 лет перед 2002 г., они имели совершенно иной характер. Для этих лет мы рассчитали баланс массы в области питания ледника, площадь которой составляет 1,11 км<sup>2</sup>, а средняя высота 3400 м:

$$B = (X_t) K_k + N - M^I,$$

а также для языка ледника — его площадь равна 1,36 км<sup>2</sup>, а средняя высота 3400 м:

$$B_{я} = X_t - M^I,$$

где  $K_k$  — коэффициент концентрации твердых атмосферных осадков,  $N$  — внутреннее питание,  $M^I$  и  $M^{II}$  — таяние на языке ледника и в области его питания, соответственно.

Область питания занимает узкую полосу под скальным склоном, с которого на нее обрушиваются лавины и ледово-фирновые карнизы фирнового поля. По расчетам в [8], в общей аккумуляции на долю лавинного снега приходится 56%, обвалных масс — 28%, а твердые атмосферные осадки составляют только 16%. Таким образом, коэффициент концентрации равен шести.

Внутреннее питание определено по уравнению:

$$N/M^{II}, (\%) = 51,1 - 9,95t_{я}, r=0,87, s=12,9\%.$$

Это уравнение получено по измерениям внутреннего питания, выполненным А.Б. Бажевым и О.В. Роттаевой в фирновых областях ледников Памиро-Алая для большого диапазона климатических условий, где его доля составляет от нескольких до 100% таяния.

Мы рассчитали средние летние температуры приледникового слоя воздуха на высотах шурфов в годы измерений, а также таяние в области питания как остаточный член уравнения теплового баланса [8]. По условиям ледникового климата и основным типам таяния — адвективного и адвективно-радиационного — ледники нижнего, западного края ледниковой системы Памиро-Алая сходны с ледниками северного Кавказа, что подтверждают измерения внутреннего питания на леднике Марух [6].

Годовое таяние в области питания вычислено по суммам положительных средних суточных температур и температурным коэффициентам таяния, приведенным в [8]. Расчет этой величины на языке ледника был более сложным. Вместе с лавинным снегом, обвалившимся фирном и льдом в область аккумуляции поступает много каменного и рыхлого минерального материала. Затем он вытаивает на языке ледника, образуя абляционную морену, толщина ко-

Таблица 1

Баланс массы ледника Колка, т 10<sup>6</sup>/год

Годы	Аккумуляция	Абляция $M^{II}-N$	$M^I$	Баланс массы
1993	6,5	1,5	2,1	+2,9
1994	5,4	1,2	2,2	+2,0
1995	5,6	1,5	2,7	+1,4
1996	6,5	1,5	2,7	+2,3
1997	6,2	1,3	2,6	+2,3
1998	5,7	2,7	3,0	0,0
1999	4,1	2,2	2,3	-0,4
2000	3,8	1,9	2,0	-0,1
2001	4,5	1,8	2,5	+0,2
2002	8,0	1,6	3,1	+3,3



торой растет из года в год. По данным [8], через 30 лет после подвижек толщина морены увеличивается (с учетом движения ледника) до 30 см в его нижней части и до 25 см в средней. Верхняя треть языка остается относительно чистой.

Расчет таяния на языке ледника сделан для этих трех зон также по суммам средних суточных температур воздуха и температурным коэффициентам таяния сезонного снега и «чистой» ледниковой поверхности. В величину таяния льда затем вводилась поправка, учитывающая толщину моренного покрова. Как в итоге изменились в течение 10 лет перед подвижкой баланс массы всего ледника и его составляющие, показывает табл. 1. В таблице значения абляции даны отдельно для области питания (за вычетом внутреннего питания) и на языке ледника. Это позволяет увидеть, что благодаря бронирующей поверхностной морене, реакция на потепление в основной области таяния ледника значительно слабее, чем в его «чистой» части.

По значениям баланса массы всего ледника видно, что за рассматриваемый период он находился еще только на стадии, хотя и заключительной, 30-летнего периода восстановления своей массы после разгрузки в 1969 г. До накопления критической массы ему потребовалось бы еще несколько десятилетий.

#### Процессы аккумуляции и абляции на фирновом поле

Между тем летом и осенью 2002 г. происходили грандиозные обвалы с фирнового плато на ледник — перед прежними подвижками их не было. По нашим расчетам, за последнее десятилетие обычно отрицательные средние летние температуры здесь, на высоте 4000 м, сменились на положительные, доля жидких осадков увеличилась от нескольких процентов до 10–15%, а внутреннее питание уменьшилось от 60% до менее чем 40%. Таяние на фирновом поле  $M^{III}$  и сток  $Y$  усилились в 2–3 раза по сравнению с 1994 г., когда метеоусловия были близки к средней много-

летней норме. Часть фирнового плато включилась в стокообразование (табл. 2). Из таблицы видно, что в связи с усиленным таянием в течение почти 10 лет подряд прочность фирновых толщ ослабевала. Особенно интенсивно это происходило по нижнему краю, в полосе карнизов, насчитывающих 10–15 годовых слоев чистой аккумуляции толщиной примерно 90–120 см, судя по наблюдениям начала 1970-х годов [9]. По-видимому, значительное усиление таяния способствовало интенсивным обвалам фирна, льда и горной породы, которые, возможно, и способствовали накоплению критической массы ледника Колка за короткое время.

#### Водный баланс бассейна ледника Колка в 1993–2002 гг.

Расчет был выполнен с целью определить возможность подтопления ледника и его отрыв от ложа, которое, вероятно, переуглублено. В уравнении водного баланса бассейна [2]:

$$Y = M + X_{ж} + B_0 - E - a$$

$Y$  — сток из бассейна,  $M$  — таяние льда, фирна и снега,  $B_0$  — дефицит баланса массы ледника,  $E$  — испарение,  $a$  — объем воды, задержанной в леднике, а также на небольших горизонтальных участках рыхлых отложений.

Мы рассчитали водный баланс отдельно для каждой части ледникового бассейна: для языка ледника —  $Y^I = M^I + X_{ж}$ , области питания —  $Y^{II} = M^{II} - N + X_{ж}$ , для фирнового плато —  $Y^{III} = M^{III} - N + X_{ж}$ , для скального лавиносбора —  $Y^{IV} = X_{ж}$ . Для всех перечисленных частей бассейна мы сочли уместным пренебречь испарением ввиду его малой величины. Водный баланс внеледниковой нелавиносборной части бассейна  $Y^V = XK_y$ , где  $K_y$  — коэффициент стока, который по [9] равен 0,83.

Таким образом, общий сток из бассейна ледника

$$Y = \sum Y^{I-V} + B_0 - a.$$

Таблица 2

Метеорологические характеристики и составляющие годового водного баланса фирнового поля на высоте 4000 м

Годы	Температура приледникового воздуха, °С	Жидкие осадки, г/см <sup>2</sup>	Таяние на фирновом поле, г/см <sup>2</sup>	Внутреннее питание, %	Сток, г/см <sup>2</sup>
1993	-0,7	5	63	57	29
1994	-0,8	5	60	59	28
1995	0,3	9	85	47	50
1996	0,6	12	92	44	59
1997	0,4	13	87	46	54
1998	1,5	23	117	35	93
1999	1,1	17	105	39	74
2000	1,3	20	112	37	84
2001	0,8	14	97	42	64
2002	0,1	11	80	50	46

Водный баланс разных частей ледника Колка и всего его бассейна,  $10^6 \text{ м}^3/\text{год}$ 

Годы	Сток из разных частей бассейна, $Y + a^*$					$\sum \gamma^{I-V}$	Дефицит баланса массы ледника	$Y + a$
	$\gamma^I$	$\gamma^{II}$	$\gamma^{III}$	$\gamma^{IV}$	$\gamma^V$			
1993	2,2	1,8	0,4	0,7	2,2	7,3		7,3
1994	2,4	1,5	0,4	0,6	1,9	6,8		6,8
1995	4,0	1,7	0,7	1,6	2,4	10,4		10,4
1996	2,9	1,9	0,8	0,9	2,5	9,0		9,0
1997	2,8	1,9	0,8	2,0	2,7	10,2		10,2
1998	4,2	3,2	1,3	2,4	2,6	13,7		13,7
1999	3,3	2,8	1,0	2,2	2,3	11,6	0,4	12,0
2000	3,0	2,7	1,2	2,3	2,3	11,5	0,1	11,6
2001	2,9	2,4	0,9	1,8	2,3	10,3		10,3
2002	3,5	2,4	0,6	1,9	3,0	11,4		11,4

\* Обозначения в тексте.

К сожалению, мы можем узнать только сумму  $Y + a$ , т.е. количество воды, образовавшейся в годы, предшествовавшие подвижке. Как видно из табл. 3, величина  $Y + a$ , начиная с 1995 г. и до 2002 г. была все время значительно выше, чем в 1994 г., по метеорологическим показателям близкого к среднему многолетнему. Это превышение в течение 8 лет подряд составило 50–100%.

Примечательно, что в год подвижки количество воды, образовавшейся в бассейне, на 62% превысило среднее значение. Это объясняется очень длительным периодом положительных температур воздуха — в области языка ледника с апреля по октябрь. В сентябре, а 20-го числа началась подвижка, средняя месячная температура воздуха в бассейне ледника была на  $3^\circ\text{C}$  выше нормы. Доля жидких осадков на высоте 3400 м достигла 40% годового количества общих атмосферных осадков, которые были самыми большими за более чем 100 предшествовавших лет.

По оценкам В.Г. Ходакова [9], объем ледника Колка до подвижки 1969 г. составлял примерно 240 млн  $\text{м}^3$ , из них 24–36 млн  $\text{м}^3$  приходилось на пустоты. Ясно, что величина  $a$  в водном балансе 1993–2002 гг. была значительно меньше, чем требуется для заполнения водой такого объема пустот. Однако не известно, как изменилось строение ледника после подвижки 1969 г. в период его восстановления в течение 32 лет, поэтому вопрос о подтоплении ледника остается открытым.

#### Заключение

Климатический фактор, а именно аномальное потепление климата в последнее десятилетие, обусловленное появлением нового циркуляционного процесса — устойчивого выхода южных циклонов в Кавказский регион, очевидно, играл значительную роль в преждевременной подвижке ледника Колка, так же как и в других последних природных катастрофах на Кавказе — Герхожанском селе 2000 г., нео-

жиданных наводнениях с разрушениями и жертвами в 2002 г. и т.д.

Постепенное накопление массы льда, характерное для режима ледника Колка и приводящее в конце концов к его подвижке, в эти годы почти остановилось, так как баланс массы ледника имел очень небольшие положительные значения или даже был отрицательным. Критическая масса не могла накопиться таким путем, но не исключено, что некоторый вклад в ее увеличение мог внести другой процесс — необычный объем обрушений льда и горной породы в тыловой части ледника.

Катастрофическому выбросу ледника из своего ложа способствовало слишком большое скопление воды под ним и в его теле. На срыв ледника мог повлиять и эндогенный фактор, связанный с активизацией тектонического разлома или гидротермальных процессов в недрах вулканического массива Казбек. Это могло вызвать дополнительное донное таяние и накопление воды на ложе ледника, и даже, по предположению Я.Д. Муравьева, ледник мог быть разрушен взрывом газов, скопившихся под ним [7].

Авторы выражают благодарность В.Д. Панову за большую помощь в сборе метеоинформации и надеются на дальнейшее сотрудничество.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 04-05-65031 и программы поддержки ведущих научных школ, № НШ-698.2003.5.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Богданова Э.Г. Методика расчета доли осадков разных видов (твердых, жидких, смешанных) в горных условиях. — МГИ, вып. 30, 1977, с. 126–129.
2. Голубев Г.Н. Гидрология ледников. Л., ГИМИЗ, 1976, 246 с.
3. Давидович Н.В. Охлаждающее воздействие горных ледников умеренных широт. — Изв. АН СССР,

сер. геогр., 1983, № 5, с. 74-82.

4. Кононова Н.К. Исследования многолетних колебаний циркуляции атмосферы Северного полушария и их применение в гляциологии. — МГИ, вып. 95, 2003, с. 45-65.
5. Котляков В.М., Рототаева О.В., Десинов Л.В. и др. Катастрофическая подвижка ледника Колка на Северном Кавказе. — Изв. РАН, сер. геогр., 2003, № 1, с. 45-54.
6. Кренке А.Н., Бажев А.Б., Бажева В.Я. и др. Строе-ние фирновой толщи Марухского ледника, льдообразование и миграция воды в ней. — МГИ, вып. 17, 1970, с. 277-288.
7. Муравьев Я.Д. Газовое извержение в колкинском цирке — возможная причина развития подвижек ледника по катастрофическому сценарию. — Опубликовано в наст. выпуске.
8. Оледенение Памиро-Алая. М., «Наука», 1993, 225 с.
9. Рототаев К.П., Ходаков В.Г., Кренке А.Н. Иссле-дование пульсирующего ледника Колка. М., «Наука», 1983, 169 с.
10. Ходаков В.Г. Особенности формирования балан-са льда пульсирующего ледника Колка. — МГИ, вып. 24, 1974, с. 116-125.

## SUMMARY

The unexpected advance of a Kolka Glacier in 2002 was promoted by basic changes in climate of the Caucasian region. In the beginning of 1990<sup>th</sup> there was a sharp change of epoch of northern meridional circulation of atmosphere on southern meridional one. The unprecedented flow of the Mediterranean cyclones has brought steady warming. Summer air temperature in the glacier basin exceeded norm within seven years, preceding the advance, sometimes up to 2 °C, that was for the first time for 100 years. The account of water balance for these years has shown that water volumes in glacier basin were 2 times large than average. Under the glacier and in it too much water has accumulated. Drainage has occurred also in part of a firn field above the glacier, the strength of firn has decreased. The negative mass balance during last decade has stopped process of accumulation of superfluous weights of ice glacier body resulting to a motion. However it is possible, that it could partially be compensated in unusual volume of ice and rock falls on the glacier of ice in summer and autumn of 2002 as well as activation of endogenic process of Kazbek volcano massif.