

Лавинное питание ледника Джанкуат© 2015 г. В.В. Поповнин¹, Т.В. Пылаева²¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; ²Монастырь Марии Магдалены, Иерусалим
*begemotina@hotmail.com***Avalanche feeding of the Djankuat Glacier**V.V. Popovnin¹, T.V. Pylayeva²¹Lomonosov Moscow State University; ²Convent of St. Mary Magdalene, Jerusalem*Статья принята к печати 16 декабря 2014 г.**Аккумуляция, лавинное питание, ледник, снегомерная съёмка, снежная лавина.**Accumulation, avalanche feeding, glacier, snow avalanche, snow depth survey.*

Лавинное питание относится к основным компонентам приходной статьи вещественного баланса ледника. Для ледников, на которых возможны прямые наземные масс-балансовые измерения, предлагается расчётная схема, позволяющая выделить из всей массы накопившегося сезонного снега объём лавинного питания, поступающего из-за пределов ледника. Методика основана на результатах построения поля аккумуляции по итогам проведения снегомерной съёмки на дату максимума сезонного снегонакопления. Одновременно картографируются зоны транзита и конусы выноса лавин (раздельно — зарождающиеся на леднике и приходящие извне). Распознавать точки со снеголавинными отложениями можно на ощупь зондами непосредственно при снегомерном профилировании. Превышение снегозапаса в лавинных точках против норм аккумуляции в морфологических аналогах ледниковой поверхности, находящихся вне зон лавинного воздействия, трактуется и численно параметризуется как привнос лавинного снега. Отмечены недостатки и неоднозначности предлагаемой схемы, а также возможные погрешности количественной оценки доли лавинного питания. Экспериментальный алгоритм был получен на леднике Джанкуат в сезон 1998/99 г., когда аккумуляция минимально отличалась от своего медианного значения за весь 46-летний ряд наблюдений. Доля лавинного питания составила 2,8%, что почти на порядок меньше значений, которые предполагались ранее.

In order to evaluate the contribution of snow avalanches, coming from outside the glacier limits, into the seasonal accumulation, an original algorithm is proposed for glaciers with ongoing terrestrial mass balance programme. It was tested on the Djankuat Glacier, Caucasus. A case study was realized for 1998/99 balance year when accumulation value was the closest to its long-term mean over the 46-year-long monitoring period. Snow avalanche feeding turned out to be only 2.8 per cent of total accumulation that is about an order of magnitude smaller than assumed hitherto.

Постановка задачи

В общеизвестном выражении [4] для приходной составляющей баланса массы ледника b_w (обозначения наши)

$$b_w = X_m \pm P \pm M \pm V \quad (1)$$

лавинное питание V стоит на последнем месте после суммы метелевого переноса M , нарастающих P и твёрдых X_m осадков. Означает ли это, что роль лавинного питания уступает другим компонентам аккумуляции? Разумеется, для каждого ледника характерны индивидуальные пропорции, определяемые, прежде всего, его геоморфологическими и климатологическими особенностями. Более того, эти пропорции ежегодно меняются, отражая естественную нестационарность условий зимнего снегонакопления. Вместе с тем для характеристики процессов внешнего массообмена наиболее изученных ледников количественная оценка доли лавинного питания — задача весьма важная. Она может рассматриваться в двух плоскостях: 1) оценить некую модальную (осреднённую за период мониторинга) величину

лавинной подпитки; 2) установить вариацию этой величины за период мониторинга, уделив особое внимание экстремумам.

Обзор гляциологической литературы показывает, что попыток численно рассчитать объёмы лавинного снега на ледниках крайне мало. В основном преобладают качественные умозаключения: от констатации полного отсутствия лавинного питания на ледниках с положительными формами рельефа (вулканические конусы, плато, купола) и на некоторых малых формах оледенения (ледники на бровках уступов, карнизные ледники) до утверждения о господстве этого источника снега на ледниках туркестанского типа и на многих каровых, присклоновых, лощинных, пещерных и некоторых других типах ледников.

Чаще всего в работах, затрагивающих проблему аккумуляции снега на ледниках, авторы вообще объединяют метелевое и лавинное перераспределение снега без перевода его в какие-либо количественные категории [1, 3]. Так, на Алтае, особенно на леднике Родзевича, лавины *a priori* считаются основным фактором пере-



Рис. 1. Вид на область питания ледника Джанкуат с седловины горы Эльбрус (фото В.Н. Михаленко)
Fig. 1. Djankuat Glacier accumulation area as viewed from Mt. Elbrus saddle (courtesy of V.N. Mikhaleenko)

распределения снега [8]. На леднике Шумского (Джунгарский Алатау) аномалии максимальных снегозапасов у подножия тыловых стен цирков, по П.А. Черкасову [12], обязаны отложениям снежных лавин. Цифровой же формат обычно касается лишь фоновых показателей. Например, Г.Н. Кравченко [5] оценила колоссальное влияние лавин на перераспределение снега в Заилийском Алатау, где для ряда условий до 60% снегозапасов вовлекается в лавинную деятельность. В.Д. Панов [9] разделил ледники Кавказа на две группы по условиям лавинного питания: 1) у висячих, карово-висячих, висячих долинных и ледников конических вершин лавинное питание незначительно и обычно не превышает 5% средней аккумуляции; 2) у сложных долинных, присклоновых, каровых и висячих каровых эта доля составляет 10–30%, а в особо благоприятных условиях может достигать 50–60%. Отдельные индивидуальные количественные оценки доли лавинного питания [7, 11 и др.] часто даются лишь ориентировочно и несколько умозрительно или основаны на косвенных посылах.

Основная причина недостатка достоверных экспериментальных данных состоит в том, что при стандартном определении b_w в ходе весенних снегомерных работ на ледниках (на дату максимума сезонных снегозапасов) не существует универсальной методики вычленения из

измеренной величины параметра V . В данной статье предлагается подход, использование которого позволило нам определить долю лавинного питания на кавказском леднике Джанкуат.

Объект исследования

Расположенный в верховьях долины р. Адыл-Су (бассейн р. Баксан), в Приэльбрусье (рис. 1), долинный ледник Джанкуат площадью около 3 км² [6] — один из наиболее изученных с масс-балансовых позиций не только в России, но и в мире. Непрерывный ряд вычисленных по итогам прямых измерений величин каждой из статей баланса массы начинается с 1968 г., а с 1977 г. результаты весенних снегосъёмок регулярно наносятся на топографическую основу. Как мы покажем далее, именно построение полей аккумуляции в крупном масштабе — непременное условие и ключ к решению сформулированной задачи.

Понятие лавинного питания

До изложения расчётного алгоритма необходимо чётко определить, что считать лавинным питанием. С масс-балансовой позиции под этим понятием подразумевают массу снега, дополнительно перенесённого гравитационными про-

цессами на поверхность ледника из-за его пределов после начальной седиментации твёрдых атмосферных осадков. В эту категорию попадает снег, оказавшийся на леднике в результате транспортировки как каноническими снежными лавинами, так и гораздо менее динамичными процессами, также вызванными силой тяжести, — снежными ручейками (явление это присуще главным образом сухому снегу и происходит на крутой облицовке ледникового бассейна практически одновременно с отложением снега или вскоре после отложения) и даже вязкопластическим сползанием снега в процессе его диагенеза с окружающих скал на ледник. Принципиально важно, что понятие лавинного питания, независимо от механизма транспортировки, относится исключительно к поступлению избыточного снега на ледник с неледниковых поверхностей или с поверхности иных ледников. В этом контексте происходящее весьма часто гравитационное перераспределение вещества с крутых участков на более пологие в пределах одного ледника, пусть даже в виде классических лавин, рассматриваться в качестве лавинного питания не может. Оно приводит лишь к перемещению вещества, уже отложенного на ледник, из одних зон в другие, но не увеличивает приходную статью баланса массы, понимаемую как поступление вещества исключительно извне. Кроме того, снегозапасы не на всех участках ледника, подверженных воздействию лавин (независимо, где зародившихся, — на леднике или за его пределами), следует относить к категории лавинного питания. Совершенно очевидно, что воздействие лавин на местность может иметь как аккумулятивный, так и эродирующий характер, поэтому зоны преимущественного транзита снежных лавин также следует исключить из рассмотрения.

На момент формирования зимнего баланса b_w (в идеале совпадает со временем проведения весенней снегосъёмки) всю площадь ледника можно разделить на пять типов поверхности по характеру вовлечённости в процессы снеговой лавинной деятельности: *A* — зоны транзита лавин, зарождающихся на леднике; *B* — шлейфы и конусы выноса лавин, зарождающихся на леднике; *C* — зоны транзита лавин, обрушивающихся на ледник из-за его пределов; *D* — шлейфы и конусы выноса лавин, обрушивающихся на ледник из-за его пределов; *E* — участки, не за-

трагиваемые лавинной деятельностью. Таким образом, вся масса снега, отвечающая категории лавинного питания, концентрируется исключительно на площади, представленной типом *D*. Из этого, впрочем, не следует, что итоговая аккумуляция снега на поверхности *D* тождественна лавинному питанию ледника. Снежный покров на этих участках представлен конгломератом из лавинного снега, снесённого сверху, и снега, отложенного обычным путём, т.е. выпавшим на площадь *D* во время снегопадов и представляющим собой компонент X_m выражения (1). Количественное разделение сформировавшейся на участках типа *D* снежной толщи на эти две генетические категории снега — один из ключевых моментов при оценке доли лавинного питания.

Расчётная схема

Концептуально этапность действий при решении поставленной задачи можно представить в виде отдельных этапов (рис. 2).

1. Прежде всего необходимо построить карту максимальных сезонных снегозапасов b_w , охватывающую всю площадь ледника. Основная часть карты строится по материалам стандартных весенних снегомерных съёмок, изначально выполненных в период максимума снегозапасов либо впоследствии приведённых на эту дату. Промерные пункты наносятся на карту масштаба 1:10 000 непосредственно в поле или по результатам GPS-съёмок — первоначально в форме пунсонов со сквозной нумерацией (см. рис. 2, *a*), которая позже, после ввода всех методических поправок, заменяется на значения водного эквивалента аккумуляции b_w (см. рис. 2, *б*). Доля участков, недоступных для прямых промеров, в разные годы на леднике Джанкуат варьирует, но обычно не превышает 10% площади. Значения b_w на эти участки экстраполируются на весь период абляции путём дальнейшего мониторинга покрытости ледника сезонным снегом (т.е. динамики его полного схода и внутрисезонной миграции снеговой линии), а также на основе многолетнего подобия полей b_w [10].

2. Далее необходимо картографирование зоны воздействия лавин в исследуемом зимнем сезоне. Ещё на стадии снегосъёмки в каждом промерном пункте кроме толщины снежного покрова h фиксируется тип снежной толщи — чисто

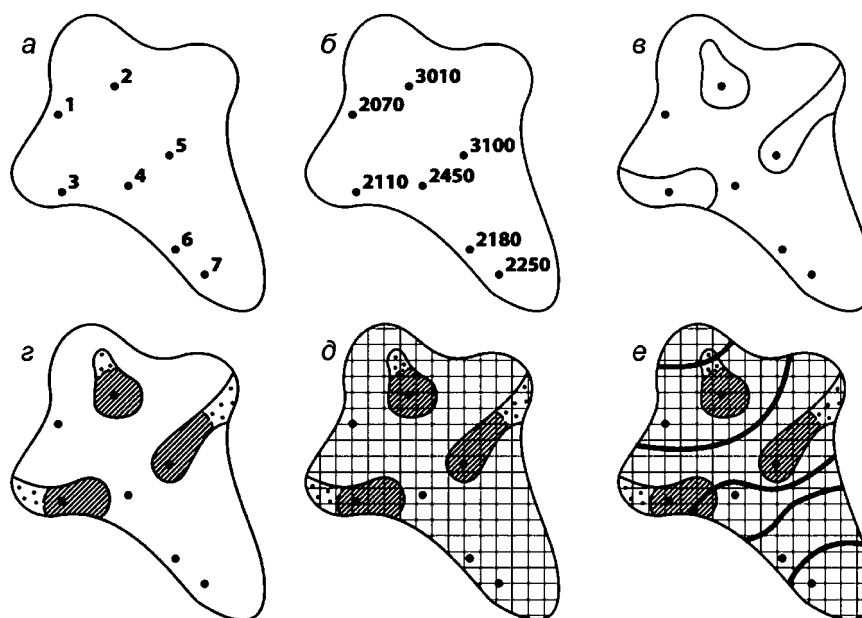


Рис. 2. Этапность схемы расчётов лавинного питания ледника.

Пояснения см. в тексте

Fig. 2. Stages of the calculation scheme for estimating avalanche feeding of a glacier.

See explanations in the text

атмосферно-седиментационный или лавинный. На практике пункт к участку воздействия лавин относится как на основе прямых, так и косвенных признаков. К прямым признакам, прежде всего, относятся характерные формы ледникового мезорельефа: скопления масс снега в виде отдельных куч, конусов, валов и шлейфов, тяготеющих к подножиям склонов и заметно возвышающихся (вплоть до нескольких метров) над окружающими заснеженными участками ледника. Если лавина сошла незадолго до снегосъёмки, то на её сход указывает и тип снежной поверхности: комковатая структура с многочисленными вкраплениями льда и литогенных отдельностей однозначно свидетельствует о лавинном генезисе толщи. Если на поверхности оказывается внешне не нарушенный снежный покров, то косвенными признаками воздействия лавинных процессов в течение прошедшей зимы служат главным образом структурные особенности снежной толщи, которые можно определить при зондировании снега металлическими шупами. Лавинную толщу протыкают шупами по-особому: в таких пунктах абсолютно не прослеживается естественная стратификация, шаблон которой даёт предварительное опытное зондирование в окрестностях шурфа. Исполнителя-

ми снегомерных работ этот шаблон ощущается тактильно: можно лишь примерно ожидать, на какой глубине (в какой части разреза) шуп наткнётся на мощный ледяной прослой или встретит горизонт разрыхления и в какой последовательности эти стратиграфические элементы будут сменять друг друга в толще h .

Лавинные точки отличаются легко определяемой на ощупь хаотичностью внутреннего строения снежной толщи, а характерные «отлипы» и толчки при протыкании дискретных глыб смёрзшегося снежно-ледяного конгломерата дополнительно указывают на снег лавинного перераспределения. Поскольку все точки снегомерной съёмки, включая идентифицированные как лавинные, наносятся на топографическую основу в процессе самого профилирования (этап 1), можно определить, какие участки ледниковой поверхности оказались в зоне воздействия лавин в данном году (см. рис. 2, в). Окончательному оконтуриванию участков воздействия лавин способствуют и фотоматериалы, которые помогают охарактеризовать лавинную деятельность на недоступных частях ледника.

3. Как отмечалось ранее, данные не по всем участкам, испытавшим воздействие снежных лавин, следует учитывать при вычислении ла-

винного питания. Вся поверхность ледника должна быть разбита на введенные выше пять типов местности $A-E$ (см. рис. 2, z). Напомним, что лавинное питание присутствует только на участках типа D . Разделение зон воздействия лавин, зародившихся на леднике ($A + B$) и пришедших из-за его пределов ($C + D$), происходит на основе тщательного геоморфологического анализа конкретных лавинных аппаратов. Неоднократные визуальные наблюдения убеждают нас, что на леднике Джанкуат преобладают лавины, формирующиеся на скальной облицовке, обрамляющей ледниковое тело. Однако его ступенеобразный продольный профиль, а также крутые участки ледника, спускающиеся непосредственно с водораздельных гребней, создают предпосылки для соскальзывания кое-где и снега, отложенного уже на площади ледника. Ещё раз отметим, что к лавинному питанию подобные лавины отношения не имеют.

4. Наложение контуров градации D (этап 3) на составленную карту b_w (этап 1) позволяет вычислить водный эквивалент аккумуляции в пределах границ конусов выноса тех лавин, которые пришли из-за пределов ледника. На современном уровне эта задача должна решаться с использованием прикладных картографических программных пакетов типа ArcGIS или MapInfo, предназначенных для автоматизированной количественной обработки изолинейных карт. Однако в более простом варианте, который применялся на леднике Джанкуат ещё до появления GIS-технологий, на данном этапе расчётной схемы составляется выборка значений b_w в пределах контуров ледниковой поверхности типа D по узлам регулярной сетки, набрасываемой на континуальное поле аккумуляции (см. рис. 2, d). Этот принцип обработки данных, введенный в методику масс-балансовых расчётов на леднике Джанкуат уже довольно давно [10] с целью объективизации результатов измерений, на практике реализуется при помощи сетки со стороной квадратов 50 м на местности, жёстко закреплённой в пространстве. Число узлов сетки может изменяться при очередном обновлении топографической основы из-за естественных колебаний границ ледника. Для иллюстрации вычислений в данной работе используется сетка 1996 г., имеющая в пределах всего ледника 1158 узлов. Доля узлов, попадающих в градацию D , разумеется, будет изменяться

из года в год в зависимости от масштабов снегоснабжения лавинных процессов в текущем сезоне.

5. Водозапас b_w (мм в.э.) сезонного снежного покрова в любой точке участка D в общем случае будет состоять не только из аккумуляции за счёт лавинной подпитки V : там, как и на всех прочих нелавинных участках ледника, будут накапливаться твёрдые атмосферные осадки и метелевый снег. Таким образом, для любой точки ледника будет правомерна формула

$$b_w = A_0 + V, \quad (2)$$

где под A_0 следует понимать фоновую аккумуляцию в результате не только выпадения атмосферного снега, но и всех процессов его син- и эпигенетического перераспределения нелавинного генезиса. Поэтому для параметризации искомой величины V необходим поиск путей решения уравнения с двумя неизвестными в правой части. Эта задача решается в масштабе ряда ограниченных по площади секторов ледника со сходной морфометрией, в пределах которых встречаются участки как подверженные, так и не подверженные воздействию лавин (см. рис. 2, e). Единство морфометрии (в первую очередь, абсолютной высоты, угла наклона и экспозиции) позволяет допустить, что $A_0 = const$ во всех точках такого сектора. В этом случае на участках, не затронутых лавинной деятельностью, будет соблюдаться равенство $b_w = A_0$, и, следовательно, для определения лавинного питания V в каждой точке внутри градации D следует из величины b_w вычесть фоновое значение A_0 , которое определяется по снегомерным данным для градации E из того же сектора.

На леднике Джанкуат роль таких секторов, характеризующихся единством условий седиментации снега, в первом приближении могут играть высотно-морфологические зоны, используемые с самого начала мониторинга в 1967/68 г. [2, 6] именно для систематизации масс-балансовых показателей по дробным участкам ледниковой поверхности, внутри которых параметры распределены относительно однородно, а вертикальные вариации не превышают горизонтальных. В пределах этих зон зависимость балансового параметра от высоты не будет превышать величину среднего отклонения параметра в зоне. Традиционная система насчитывает 13 высотно-морфологических зон

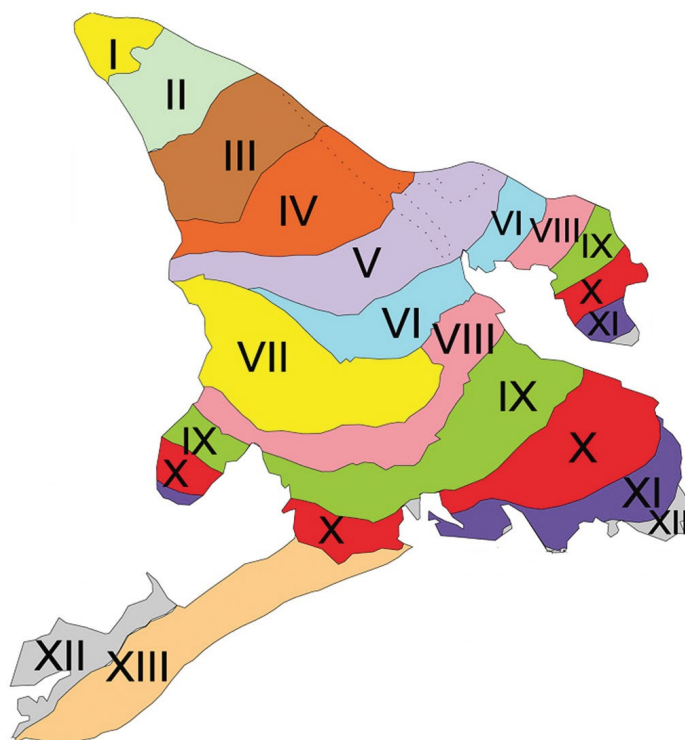


Рис. 3. Система высотно-морфологических зон ледника Джанкуат на топооснове 1999 г.

Fig. 3. The pattern of alti-morphological zones on the Djankuat Glacier status 1999

К расчёту общего объёма лавинных отложений на леднике Джанкуат в 1998/99 г.*

Высотно-морфологические зоны	Площадь, км ²	Общее число узлов сетки в ВМЗ	Число узлов сетки с лавинными отложениями	Доля лавинных участков, % площади ВМЗ	Фоновая аккумуляция, мм в.э.	Лавинное питание в слое воды, мм в.э.	Объём лавинных отложений, м ³
I	0,053	22	0	0,0	1210	0	0
II	0,128	54	0	0,0	1320	0	0
III	0,198	86	3	3,5	1519	624	4620
IV	0,231	89	4	4,4	1848	542	5349
V	0,280	115	15	13,0	2189	712	26 350
VI	0,181	75	14	18,7	2036	524	18 099
VII	0,309	124	29	23,2	2977	668	47 794
VIII	0,245	98	25	25,5	2534	229	14 125
IX	0,351	143	35	24,5	2459	291	26 564
X	0,348	140	22	15,7	2610	192	10 421
XI	0,152	56	15	26,8	3542	278	10 288
XII	0,119	51	6	11,8	1301	1774	26 261
XIII	0,262	105	1	1,0	3806	374	923
Весь ледник	2,857	1158	169	14,6	2431	458	190 794

*ВМЗ – высотно-морфологические зоны.

(I–XIII) (рис. 3), нумерация которых j в целом отвечает набору высоты (таблица). Таким образом, в итоге процедуры вычитания фоновой аккумуляции из измеренной в каждой промер-

ной точке, попадающей в градицию D , устанавливается водный эквивалент лавинного снега, т.е. локальная величина лавинного питания V в удельных единицах измерения.

6. Для оценки общего количества снега — отдельно лавинного питания и суммарной аккумуляции — удельные единицы (мм слоя воды или г/см²) требуется перевести в валовые, т.е. в меры объёма или массы. Это делается путём их умножения на значения соответствующих площадей. Удобнее всего вести расчёт для каждой высотно-морфологической зоны. Площади участков D в них (этап 3) определяются стандартными планиметрическими приёмами, а произведение их со среднезональным водным эквивалентом V_j (этап 5) представляет собой не что иное, как массу лавинной подпитки в данной зоне. Чтобы получить массу снега, перенесённого лавинами на ледник в целом (т.е. собственно лавинное питание V в абсолютном исчислении), следует просуммировать эти значения по всем высотно-морфологическим зонам. Будучи соотнесённой с суммарной аккумуляцией по всему леднику, также выраженной в валовых единицах, эта величина будет характеризовать искомую долю лавинного питания в приходной статье вещественного баланса данного года.

Дискуссия

Разумеется, как и любой расчётный алгоритм, предлагаемая здесь схема не свободна от недостатков и допущений. Сразу отметим дискуссионные её положения. Первая неоднозначность возникает уже на начальном этапе (этап 1), когда строится карта аккумуляции ледника. Наиболее уязвимый момент этой процедуры — экстраполяция измеренных величин на недоступные участки, главным образом используя свойства подобия полей во времени. Именно к таким участкам прежде всего и относятся зоны транзита лавинных аппаратов, от правильности отнесения на которые косвенных оценок снегозапасов во многом зависит итоговое значение искомой доли лавинного питания ледника.

Необходимой предпосылкой минимизации погрешности должна стать либо представительная многолетняя статистика полей аккумуляции (удел объектов длительного и детального мониторинга), либо требование тщательного и достаточно частого картографирования динамики снеговой линии на леднике в течение всего периода абляции. На таких хорошо изученных ледниках, как Джанкуат, точность экстраполяции может быть охарактеризована хотя бы коэффи-

циентом вариации значений приведённой (относительно общеледниковой или зональной) аккумуляции c_v в узлах регулярной сетки за период построения карт [10]. По отношению к нелавинноопасным участкам ледниковой поверхности структура поля аккумуляции здесь менее устойчива во времени. Тем не менее, несмотря на то, что значения c_v тут могут достигать величин 0,8–1,0 (а в отдельных узлах даже > 1,0), они в основном лишь незначительно превышают величину c_v для точек внутри ареалов прямых измерений при снегосъёмке, тем самым не девальвируя в целом принцип подобия полей.

В процессе оконтуривания лавинных отложений (этап 2) возможны ошибки любого знака при параметризации площадей, затронутых снеголавинными процессами. Для распознавания на ощупь лавинных свит внутри снежного покрова в ходе зондирования требуется опыт. Пожалуй, именно на этой стадии вероятен самый серьёзный источник ошибок, если не уделить должного внимания и пропустить маломощную лавинную свиту в промерной точке, попадающей куда-нибудь на периферию перекрытого атмосферным снегом конуса выноса, что вполне возможно даже для опытного специалиста. В некоторой степени в этой ситуации помогает методическая рекомендация, согласно которой перед снегосъёмкой необходим обязательный тренинг зондирования рядом с ближайшим шурфом, заложенным в заведомо не лавинном снегу. Укоренившиеся ощущения о стратификации ненарушенного снежного покрова при его пенетрации шупом в дальнейшем дадут знать, если при снегомерном профилировании будет встречена толща с заметными стратиграфическими отклонениями от шаблона. Однако и в случае идеального распознавания «лавинного/нелавинного» снега может возникнуть погрешность интерполяционного оконтуривания зон воздействия лавин на карте, если система промерных точек неадекватно редка. При более или менее равномерном их расположении в пределах любой высотно-морфологической зоны ледника необходимо выполнение условия густоты промерной сети

$$\Delta = \sigma/N^{0,5}, \quad (3)$$

где Δ — точность снегомерных промеров, полагаемая обычно равной 5 см; σ — среднеквадратическое отклонение величин измеренных снегозапа-

сов в пределах конкретной высотно-морфологической зоны; N — адекватное число промерных пунктов в ней.

При выделении типов ледниковой поверхности $A-D$ (этап 3) обычно не составляет труда разделить зоны воздействия лавин, зародившихся в пределах ледника (A и B) и пришедших извне (C и D). Гораздо более проблематично выделить внутри каждого лавинного аппарата зоны транзита (A и C) и отложения (B и D). Кроме того, в зависимости от размеров лавин и дальности их выброса иногда части конуса выноса небольших лавин могут выступать в качестве зон транзита более крупных лавин. Выполняя это разграничение в полевых условиях преимущественно экспертным путём, исходя из морфологии поверхности ледника и ориентируясь в основном на некие усреднённые размеры, положение пунктов на рис. 2, z становится подверженным субъективным ошибкам. Некоторой проверкой служат соотношения между измеренными величинами снегозапасов по отношению к фоновому по высотно-морфологическим зонам: на конусах выноса значения b_w должны превышать фоновые по нелавинной части, соответствующей высотно-морфологическим зонам. Поэтому, если в пределах контура, изначально отнесённого экспертным путём в градацию D , встречается обратное соотношение, то это указывает на ошибку в разграничении зон транзита и отложения и требует корректировки при картографическом отображении пунктирной линии на рис. 2, z : такие точки переводятся в зону транзита лавин и из расчёта лавинного питания исключаются.

Расчётная схема не позволяет аргументированно обосновать правомерность такой отбраковки, поскольку соотносит измеренный снегозапас в каждой конкретной точке со средним по высотно-морфологической зоне, полагая (этап 5), что по всей высотно-морфологической зоне нелавинные участки должны характеризоваться одинаковым количеством снега A_0 . На практике это допущение не выдерживается, так как единство морфологии в пределах каждой зоны весьма относительно, и отложение снега в ней обусловлено не только морфологическими свойствами территории. Тем не менее стремление к избыточной дробности деления ледника на более мелкие, но более однородные зоны свело бы задачу к необходимости снижения размеров

элементарной пространственной ячейки (этап 4) и соответственно шага снегосъёмки, что привело бы к росту трудозатрат не только на полевом, но и на камеральном этапе. Очевидно, это — классический случай задачи научного компромисса.

Оценка водного эквивалента аккумуляции в лавинных точках (этап 5) для корректного пересчёта в валовые величины (этап 6) исходит из стандартного соотношения $b_w = \rho h$, однако значение интегральной по вертикали плотности ρ сезонного снежного покрова из опорных шурфов здесь неприменимо — для лавинного и не лавинного снега они редко совпадают. Вместе с тем оперировать специфическим значением плотности лавинного снега ρ_V приходится постоянно, начиная с построения поля аккумуляции (этап 1). Прямые измерения интегральной по вертикали плотности лавинного снега на ледниках чрезвычайно редки, так как шурфование конусов выноса на стадии максимальных снегозапасов противоречит требованиям техники безопасности при полевых работах. За все 46 лет мониторинга ледника Джанкуат полная весенняя денсиметрия лавинных конусов выноса в шурфах выполнена лишь дважды. В обоих случаях вычисления привели к одинаковой величине $\rho_V = 0,56 \text{ г/см}^3$.

Опыт показывает, что лавинный снег к концу периода аккумуляции может быть как плотнее, так и рыхлее ненарушенной толщи: с одной стороны, перемещение вещества под давлением приводит к компрессионной метаморфизации транспортируемого снега, с другой — итоговая комковатая структура снеголавинных отложений (рис. 4) предопределяет наличие пустот внутри сезонной пачки, что уменьшает интегральную плотность. Однако в большинстве случаев значение ρ_V оказывается выше плотности нелавинного снега на леднике, обычно варьирующей на стадии максимальных снегозапасов в диапазоне $0,46-0,54 \text{ г/см}^3$. Из-за соображений безопасности приходится избегать регулярной закладки шурфов на конусах выноса в это время, поэтому величину $\rho_V = 0,56 \text{ г/см}^3$ на ледника Джанкуат вынужденно считают константой и применяют при вычислении b_w ко всем значениям h , регистрируемым в промерных точках при пересечении лавинного аппарата снегомерным профилем. Допущение о постоянстве ρ_V из года в год лишено приемлемой статистической достоверности и также увеличи-



Рис. 4. Комковатый характер лавинных отложений на VI высотно-морфологической зоне ледника Джанкуат. Фото Я.Е. Сергиевской

Fig. 4. Cloddy structure of avalanche deposits: VI alti-morphological zone of the Djankuat Glacier. Courtesy of Ya.Ye. Sergiyevskaya

ваит погрешность расчётов, количественно оценить которую пока невозможно.

Реализация метода: расчёт доли лавинного питания на леднике Джанкуат

Осознавая безусловные недостатки предлагаемой схемы, приходится признать, что в настоящее время такой подход — чуть ли не единственный для параметризации доли лавинной подпитки ледника. Далее мы остановимся на реализации этого подхода в зимний сезон, который минимально отличается от среднегодовой нормы аккумуляции. На леднике Джанкуат среднее значение аккумуляции с 1967/68 г. сейчас составляет 2450 мм при вариации от 1650 мм (1982/83 г.) до 4000 мм (1986/87 г.). Наименьшим отклонением от нормы характеризуется 1998/99 г., когда приходный компонент баланса массы был равен 2430 мм. Проиллюстрируем расчёт доли лавинного питания на примере этого сезона, типичного, по меркам внешнего массообмена ледника, за последние полвека.

Лавинные отложения в 1998/99 г., как обычно, отмечались преимущественно у подножия крутого скально-ледового обрамления фирнового бассейна под склонами гор Главного Кав-

казского хребта (Гумачи, Джантуган, скалы Аристовы), непосредственно к югу от основной части ледника, а также под горой Уя-тау, где орографически зарождается правая ветвь ледника (рис. 5). Дальность выбросов снежных лавин была здесь небольшой. На этом фоне исключением выглядит лавина с Джантугана, которая пересекла нижний цирк в высотно-морфологической зоне VII и, преодолев основной ледопад, достигла языка в зоне IV. На самих ледопадных участках, а также на крутых взлётах ледника, достигающих пригребневой зоны, зарождались лавины перераспределения вещества, не входящие в лавинное питание.

Лавинные процессы в 1998/99 балансовом году затронули на леднике Джанкуат все высотно-морфологические зоны с $j > 2$. Что же касается площадей, где были накоплены лавинные массы, то в процентном отношении эти процессы преобладали в средних и верхних зонах: в VII—IX и XI высотно-морфологических зонах примерно четверть поверхности испытала воздействие снежных лавин. Правда, масса лавинного материала, перенесённого извне и играющего роль независимого источника прихода вещества на ледник, т.е. компонента I из уравнения (1), была далеко не одинаковой в этих зонах.

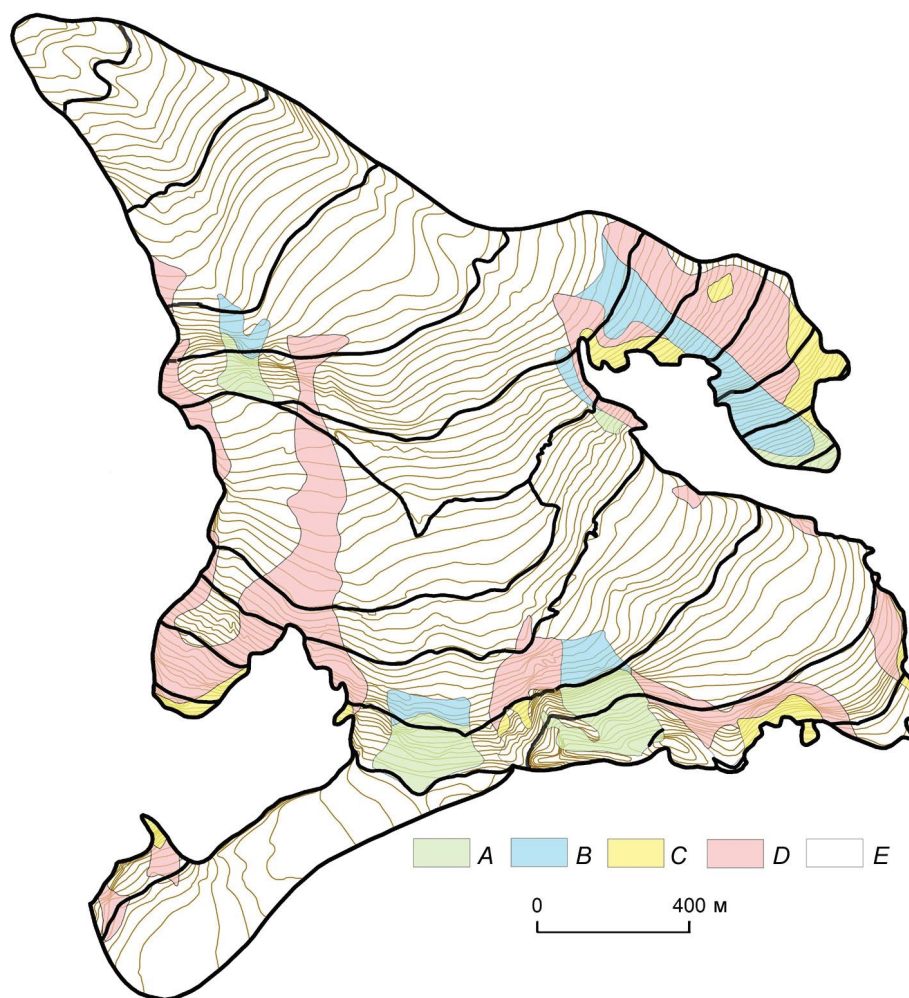


Рис. 5. Типы поверхности ледника Джанкуат применительно к снеголавинной деятельности в 1998/99 г.:

A – зоны транзита лавин, сформированных в пределах ледника; *B* – отложения лавин, сформированных в пределах ледника; *C* – зоны транзита лавин из-за пределов ледника; *D* – отложения лавин из-за пределов ледника; *E* – участки вне зон воздействия лавин

Fig. 5. Surface classes of the Djankuat Glacier in 1998/99 relevant to snow avalanche activity:

A – transit zones of snow avalanches, formed within the glacier; *B* – deposits of snow avalanches, formed within the glacier; *C* – transit zones of snow avalanches, formed outside the glacier; *D* – deposits of snow avalanches, formed outside the glacier; *E* – areas outside the zones of snow avalanche impact

Анализ показывает, что больше всего подвержена лавинному питанию VII высотно-морфологическая зона. Занимая выположенный участок ледника на высоте 3200–3250 м (нижний цирк), она находится в зоне воздействия наиболее мощных лавин со склонов горы Джантуган. Именно здесь площадь скальных выступов неледникового обрамления фирнового бассейна, приходящаяся на погонный километр поперечной границы ледника, наибольшая по всему периметру Джанкуата, что и означает локально повышенный потенциал лавинной подпитки с этого склона. Внушительные карнизы, ежегод-

но надуваемые ветрами южных румбов на гребне Джантугана, создают дополнительный ресурс лавинной угрозы, и не случайно отложения самых крупных лавин регистрируются именно у его подножия, в VII зоне. Следствие такой избыточной подпитки – приуроченность локальных максимумов итоговой аккумуляции по всей площади ледника (и по параметру b_w , и по параметру h) именно к нижнему цирку.

Другая высотно-морфологическая зона, также отличающаяся повышенным воздействием лавин, – V (рис. 6). Здесь участки сосредоточения лавинных масс тяготеют к подножию

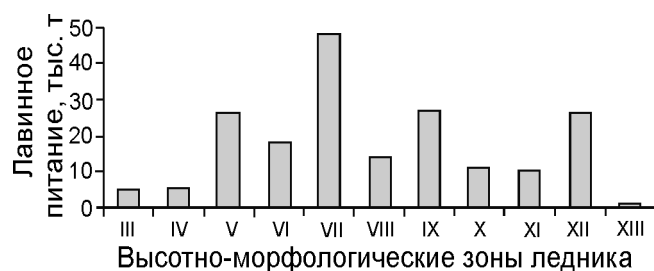


Рис. 6. Лавинное питание ледника Джанкуат в 1998/99 балансовом году по высотно-морфологическим зонам (в категориях массы снега)

Fig. 6. Avalanche feeding of the Djankuat Glacier in 1998/99 by alti-morphological zones (in snow mass categories)

горы Уя-тау. По общей массе отложенного здесь лавинного снега V высотно-морфологическая зона почти не уступает зоне VII. Отметим, однако, что в нижнем её цирке аккумулируются снежные массы из-за пределов ледника (т.е. истинно лавинное питание), а у подножия Уя-тау — конусы выноса не только таких лавин, но и тех, которые зародились на крутых верховьях собственно правой ветви горы Джанкуат, не входящие по определению в категорию лавинного питания. Максимальная же мощность лавинной подпитки в удельных единицах отмечена в районе бергшруднов (зона XII). Правда, в этой небольшой зоне участки аккумуляции лавинного снега имеют весьма ограниченную площадь. Тем не менее солидный водный эквивалент на этих участках делает зону XII сопоставимой по абсолютным запасам лавинных масс (см. рис. 6) с зонами V и VII. Именно здесь, а чаще даже в сопредельной высотно-морфологической зоне XI, регистрируются абсолютные экстремумы b_w и h , превосходящие в ряде случаев рекордные снегозапасы в нижнем цирке.

В итоге суммарное количество снега, принесённого лавинами на ледник из-за его пределов, составило в 1998/99 г. 190 794 т. Общая масса снега, отложенного на леднике за зимний сезон 1998/99 г., рассчитывалась как произведение аккумуляции в удельных единицах $b_w = 2430$ мм в.э., площади ортогональной проекции ледника $S = 2,857$ км² и размерных множителей; она составила порядка 6,9 млн т. Отношение же этих величин означает искомую долю лавинного питания, которая для ледника Джанкуат в 1998/99 г. была выведена равной 2,8%.

Заключение

Расчёты показали, что лавинная подпитка на репрезентативном для Центрального Кавказа долинном леднике Джанкуат существенно меньше, чем седиментация твёрдых осадков. Это опровергает интуитивную оценку V , которую на стадии развёртывания регулярного мониторинга несколько десятилетий назад давали в ходе устных дебатов родоначальники наблюдений на леднике Джанкуат. Во всяком случае, значение доли лавинного питания, полученное в настоящее время для выборочного года, среднего по условиям аккумуляции, почти на порядок меньше того, которое считали ранее. Вопрос о соответствии осреднённых условий снежности зимы средним величинам доли лавинного питания неочевиден и, по-видимому, заслуживает дальнейшего исследования, прежде всего в плане получения аналогичных оценок для других лет, отличающихся по объёму выпавшего снега.

Предложенную оригинальную методику количественного определения роли лавин в питании горных ледников пока можно применять лишь там, где по-прежнему используют традиционные детальные наземные снегомерные съёмки. Поэтому вопрос о том, можно ли считать выведенную оценку лавинной подпитки, составляющую первые проценты от суммарной аккумуляции, типичной для других долинных ледников Кавказа, остаётся открытым. Безусловно, индивидуальные морфологические особенности каждого ледника способны привести к совершенно другим показателям. Вместе с тем изложенную схему методических приёмов и расчётных действий можно считать универсальной для применения на ледниках разных типов.

Благодарности. Авторы признательны Я.Е. Сергиевской за критическое осмысление предложенной методики и энтузиазм при внедрении её в практику.

Исследование выполнено в рамках проекта 12-05-00491а РФФИ.

Литература

1. Геткер М.И. Метод расчета максимальных снегозапасов в горно-ледниковых районах для построения карт в Атласе снежно-ледовых ресурсов мира // МГИ. 1981. Вып. 40. С. 133—142.

2. Дюргеров М.Б. Методика определения средней суточной поверхностной абляции ледников // МГИ. 1971. Вып. 18. С. 86–92.
3. Жидков В.А. О распределении снегозапасов в горно-ледниковых бассейнах // МГИ. 1982. Вып. 45. С. 66–70.
4. Котляков В.М. Совместные исследования балансов льда, воды и тепла в репрезентативных ледниковых бассейнах // МГИ. 1973. Вып. 21. С. 206–207.
5. Кравченко Г.Н. Основные факторы распределения снежного покрова на горных склонах // МГИ. 1991. Вып. 72. С. 43–48.
6. Ледник Джанкуат / Под ред. И.Я. Боярского. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 184 с.
7. Лосев К.С. Роль лавин в бюджете массы ледников // Тр. ЗАКНИГМИ. 1966. Вып. 20. С. 178–182.
8. Нарожный Ю.К., Никитин С.А., Бородавко П.С. Ледники горного узла Белухи (Алтай): массообмен, динамика и распределение запасов льда // МГИ. 2006. Вып. 101. С. 117–127.
9. Панов В.Д. Эволюция современного оледенения Кавказа. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 432 с.
10. Поповнин В.В. Поле аккумуляции горного ледника // МГИ. 2000. Вып. 88. С. 27–40.
11. Харитонов Г.Г. Методика расчета лавинного питания ледника // МГИ. 1979. Вып. 36. С. 155–159.
12. Черкасов П.А. Расчет годовых сумм атмосферных осадков на поверхности горных ледников в условиях аридного климата (на примере Джунгарского Алатау) // МГИ. 2003. Вып. 95. С. 28–44.

Summary

Snow avalanches, coming from outside the glacier limits, are considered to be among the main sources, composing the income item of a glacier mass balance. However, there are almost no widespread methods to determine quantitatively the role of this process anywhere in the world. An original algorithm for evaluating snow avalanche feeding of an alpine glacier is proposed for glaciers with

ongoing terrestrial mass balance programme. The method is based on mapping maximum seasonal snow accumulation as a result of snow depth survey. Transit and accumulation zones are also to be delimited separately for avalanches conceived within and outside the glacier border. Identification of sites that have been subject to avalanche processes is possible by virtue of tactile sensations in the course of manual snowpack sounding with a metal rod during profiling. Mean avalanche snow density in such points, 0.56 g/cm^3 , has been formerly estimated twice in the course of unique and direct densimetry in snow pits dug within avalanche fans; it is supposed to be constant from year to year. If the estimated water equivalent values in such sites exceed accumulation norms, determined for morphological analogues of non-avalanche glaciated areas nearby, this is treated and numerically parameterized as an avalanche import. Shortcomings and uncertainties of the presented scheme as well as probable errors of quantitative assessment of snow avalanche share are discussed. The experimental algorithm was tested on the Djankuat Glacier, Northern Caucasus, Russia. A case study was realized for 1998/99 balance year when deviation of winter balance (2430 mm w.e.) from its long-term median value (2450 mm w.e.) over the 46-year-long monitoring period was the least. The glacier surface was divided into zones differing by the extent of avalanche activity and by contribution of these processes into the income item of mass balance equation. The amount of snow transported by avalanches onto the glacier surface from surrounding slopes was estimated: it came to 190 794 tons, whereas the mass of overall accumulation in 1989/99 totalled 6,9 mln tons. Hence, snow avalanche feeding turned out to be only 2.8 per cent of total accumulation that is about an order of magnitude smaller than assumed hitherto.