

Ледники и ледниковые покровы

УДК 551.321

doi: 10.15356/2076-6734-2018-4-437-447

Об обратной связи доли лавинного питания с аккумуляцией ледника

© 2018 г. В.В. Поповнин, Я.Е. Сергиевская

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
begemotina@hotmail.com

On a feedback of the share of avalanche alimentation with a glacier accumulation

V.V. Popovnin, Ya. Ye. Sergiyevskaya

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
begemotina@hotmail.com

Received January 20, 2018

Accepted July 15, 2018

Keywords: *accumulation, avalanche alimentation, glacier, snow avalanche, snow depth survey.*

Summary

Releases of avalanches are an important factor of snow accumulation for many mountain glaciers. However, the quantitative estimate of the share of avalanche snow in the incoming part of the mass balance has not yet been standardized due to the lack of a universal methodological scheme for the calculation and collection of actual material. In rare cases, e.g. for the Djankuat Glacier in the Caucasus, this problem is partly solved. Here, the conceptual basis of the required calculations is created, and the input information has been supplied for many years by the route snow-measuring profiling performed in the spring close to the date of the maximum of seasonal snow reserves and accompanied by direct field mapping. Annually, avalanche deposits attributed to additional snow income from outside the glacier are recorded in all high-altitude morphological zones, with the exception of the lowest (< 2850 m) hypsometric belt, although in the half-century history of monitoring there were cases when snow avalanches reached it. The volume of avalanche deposits was calculated for 15 years after 1991/92, and each time it correlated with the gross snow accumulation of the corresponding balance year. The contribution of snow avalanches to the income of substances on the glacier varies from 1.8 to 10.0% and averages 4.7%. Paradoxical (but only at first glance) conclusion based on the analysis of data on volumes of avalanche and total accumulation is the feedback of these indicators ($r = -0.58$). It should be noted that the share of avalanche contribution to alimentation of the glacier has a more convincing feedback with accumulation and background snow content of winter ($r = -0.72$). Probably, the revealed tendency of increasing role of the additional avalanche alimentation in low-snow years (and vice versa) is not limited by the only reference object, and it is true for any glacier prone to the avalanche influence.

Citation: Popovnin V.V., Sergiyevskaya Ya. Ye. On a feedback of the share of avalanche alimentation with a glacier accumulation. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2018. 58 (4): 437–447. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2018-4-437-447.

Поступила 20 января 2018 г.

Принята к печати 15 июля 2018 г.

Ключевые слова: *аккумуляция, лавинное питание, ледник, снегомерная съёмка, снежная лавина.*

На основе полевых измерений и вычислений по оригинальной методике рассчитана доля лавинного питания ледника Джанкуат за 15 сезонов. Вклад снежных лавин в приход вещества варьирует от 1,8 до 10,0% и в среднем составляет 4,7%. Установлено, что доля лавинной подпитки и абсолютные объёмы лавинной аккумуляции связаны обратной зависимостью с фоновой снежностью зимы и общим объёмом накопившегося на леднике зимнего снега.

Введение

Для большого числа ледников, расположенных в отрицательных формах рельефа (каровые, долинные и т.д.), вклад в общую аккумуляцию вносят снежные лавины. Поступление вещества

на ледник в форме седиментации твёрдых осадков чаще всего оказывается основным источником питания, поэтому оно хорошо изучено и измеряется на всех ледниках, где ведутся балансовые наблюдения. Проблеме же лавинного питания посвящено мало работ [1–3]. В миро-

вой гляциологии нет единой универсальной методики оценки доли лавинного питания ледников v , поэтому количественные данные об этом показателе на основе полевого материала практически отсутствуют. Помимо авторского метода, результаты применения которого будут изложены далее, к числу единичных попыток распознавания лавинных отложений в общей массе снега, отложенного за сезон аккумуляции, следует отнести эксперимент, предпринятый на леднике Роллстон [4] в Новой Зеландии при радиолокационном профилировании: признаком идентификации лавинных масс служил видоизменённый сигнал отражения радарных лучей, обусловленный аномальной насыщенностью снежной свиты литогенным лавинным мусором.

Установить роль лавинного питания в балансе массы конкретного горного ледника — задача нетривиальная, и не так давно она была решена на примере ледника Джанкуат [5], когда была предложена оригинальная методика количественной оценки значения v , реализованная на выбранном леднике для сезона 1998/99 г., наиболее приближенного к норме аккумуляции за весь период инструментального мониторинга, начатого в 1967/68 г. Следующий этап изучения роли лавин в состоянии ледника — выяснение зависимости v от фоновой снежности прошедшей зимы. Именно этому и посвящена настоящая работа. Основой послужил статистический анализ архивного материала ледникового отряда МГУ имени М.В. Ломоносова за 15 сезонов после 1991/92 г., для каждого из которых по упомянутой здесь методике удалось рассчитать валовую аккумуляцию V лавинного снега на всём леднике и её долю $v = V/b_w$ в общей величине прихода вещества b_w соответствующего балансового года.

К понятию лавинного питания

Аккумуляция включает в себя все параметры, которые увеличивают массу ледника, поэтому, кроме выпадающего снега, к ней следует относить и образование изморози, и замерзание дождевой воды в снежном покрове, и метелевый привнос, и в том числе — снежные лавины [6]. Однако далеко не все снеголавинные процессы на леднике вносят свою лепту в пополнение его массы. К категории лавинного питания следует относить только

те объёмы снега, которые принесены на поверхность ледника лавинами, сходящими из-за его пределов, тогда как лавины, зарождающиеся и сходящие в пределах ледника, должны рассматриваться как лавинное перераспределение, не влияющее на изменение массы ледника.

Режим ледников с заметной ролью лавинного питания имеет свои отличительные особенности. Накопление избыточных лавинных масс в любых гипсометрических поясах ледника способно кардинально исказить конфигурацию аккумуляционных кривых и нарушить устойчивость высотного градиента аккумуляции там, где о нём можно вести речь. Помимо прямого увеличения водного эквивалента приходной статьи вещественного баланса b_w , этот процесс будет благоприятно влиять на состояние ледника и в отношении расходной статьи. В дальнейшем снежные избытки лавинных отложений могут и перелетовывать (в том числе и на языке, образуя там «островки» области питания), но даже без этого лавинные конусы будут сохраняться дольше в период абляции, чем менее мощный снежный покров, сформированный непосредственно из выпавших твёрдых атмосферных осадков. Поэтому переход типа ледниковой поверхности из категории снега к имеющим более низкие величины альбедо категориям льда или фирна будет отложен на более поздние летние сроки. В результате создадутся предпосылки к снижению итогового расхода вещества данного балансового года, что будет способствовать некоторому смещению результирующего баланса массы в сторону положительных значений.

О масштабах привноса лавинного снега можно судить по размерам лавинных снежников в горах. Мощность лавинных снежников на Кавказе и Тянь-Шане — как на ледниковых, так и на неоледенелых поверхностях — может составлять 15–25 м, но некоторые особо крупные конусы выноса лавин достигают толщины 40 и даже 50 м [2, 7]. Известны исключительные случаи, когда лавинные снежники толщиной до 100 м стаивали в долинах рек в течение нескольких лет.

Число лавин и их объёмы увеличиваются с ростом снежности, но суммарное количество аккумулярованного за зиму снега — лишь одна из характеристик сезона по интенсивности снеголавинных проявлений. Другие обстоятельства, отражающие синоптическую специфику зим-

него периода (оттепели, обильные снегопады, метелевый перенос и т.п.) через результирующие стратиграфические и диагенетические особенности накопившейся снежной толщи, могут спровоцировать сход лавин и в относительно малоснежные годы.

Всё это показывает, что лавинное питание, будучи неотъемлемым свойством большей части горных ледников и играя принципиальную роль в их режиме, подвержено значительной вариации во времени даже для одного конкретно взятого гляциологического объекта. Оценивать эту изменчивость необходимо путём совокупного анализа как морфологических особенностей горно-ледникового бассейна, так и (хотя бы косвенно) метеорологической обстановки исследуемого периода. Только количественно параметризовав диапазон флуктуаций доли лавинной подпитки ледника, можно судить о том, насколько снеgolавинные процессы способны помочь леднику противостоять неблагоприятным для него климатическим трендам современной эпохи.

Объект наблюдения и сбор входных параметров

Ледник Джанкуат на данный момент можно с уверенностью назвать самым изученным ледником России. Со времени проведения МГД (1965–1974 гг.), когда этот ледник был выбран в качестве одного из репрезентативных ледников Советского Союза, на нём ни разу не прерывался ежегодный прямой инструментальный мониторинг. К настоящему времени здесь накоплен ряд наблюдений за параметрами внешнего массоэнергообмена продолжительностью в 50 лет.

Разработанная на леднике Джанкуат методика расчёта доли лавинного питания [5] подразумевает наличие сведений о площади распространения лавинных отложений и их мощности при неперенном размежевании лавин, зародившихся на крутых участках самого ледника, и лавин, сошедших за его пределы. (Опустим здесь рассмотрение процедуры сбора полевых данных и расчётной методики, чтобы не дублировать первоисточник.) Эту исходную информацию получают непосредственно в поле при выполнении весенних снегомерных работ, приуроченных примерно к дате максимума сезонных снегозапасов. Такие снегосъёмки ведутся

на репрезентативном леднике с 1967/68 г. для расчёта приходной статьи вещественного баланса b_w . На протяжении последних 35 лет в поле картографируются лавинные отложения (рис. 1). Весь этот информационный массив позволяет оценить причины вариации доли лавинной подпитки ледника v за последние десятилетия. Для расчётов всех показателей на леднике Джанкуат традиционно используют систему высотно-морфологических зон (ВМЗ): всю поверхность ледника подразделяют на 13 частей на основе однородности морфологии и высотного диапазона.

Изменчивость доли лавинного питания

Концептуально задача определения доли лавинного питания v сводится к подсчёту валового объёма снега V , поступившего на поверхность ледника извне, т.е. с окружающих склонов, и соотношению его с объёмом общей аккумуляции (зимнего баланса) ледника b_w за рассматриваемый сезон. В свете поставленной задачи валовые объёмы V и b_w следует перевести в водный эквивалент — тогда численные пропорции объёмных мер будут тождественны пропорциям для категории массы вещества. Водный эквивалент величины b_w рассчитывается как весовое среднее, с одной стороны, водозапаса нелавинного (седиментационного) снега по снегомерным значениям, вычисленным с помощью средней по всему разрезу плотности сезонного снежного покрова (по опорным шурфам для каждого гляциоморфологического пояса ледника), а с другой, лавинного снега (т.е. V), который, очевидно, должен отличаться по плотности от седиментационного. Отметим, что проходить шурфы в нижних частях лавиносборов на даты максимума снегозапасов для денсиметрии лавинного снега нельзя по правилам безопасности.

Однако в полувековой истории работ ледникового отряда МГУ на леднике Джанкуат есть три незаслуживающих рекомендации к повторению факта проходки шурфов в лавинных конусах. Несмотря на то, что все они относятся к годам разной снежности и к разным высотным интервалам, средняя по разрезу плотность лавинных отложений всякий раз оказывалась одинаковой и равной $0,56 \text{ г/см}^3$. Из-за этого, с некоторой долей условности, плотность лавин-

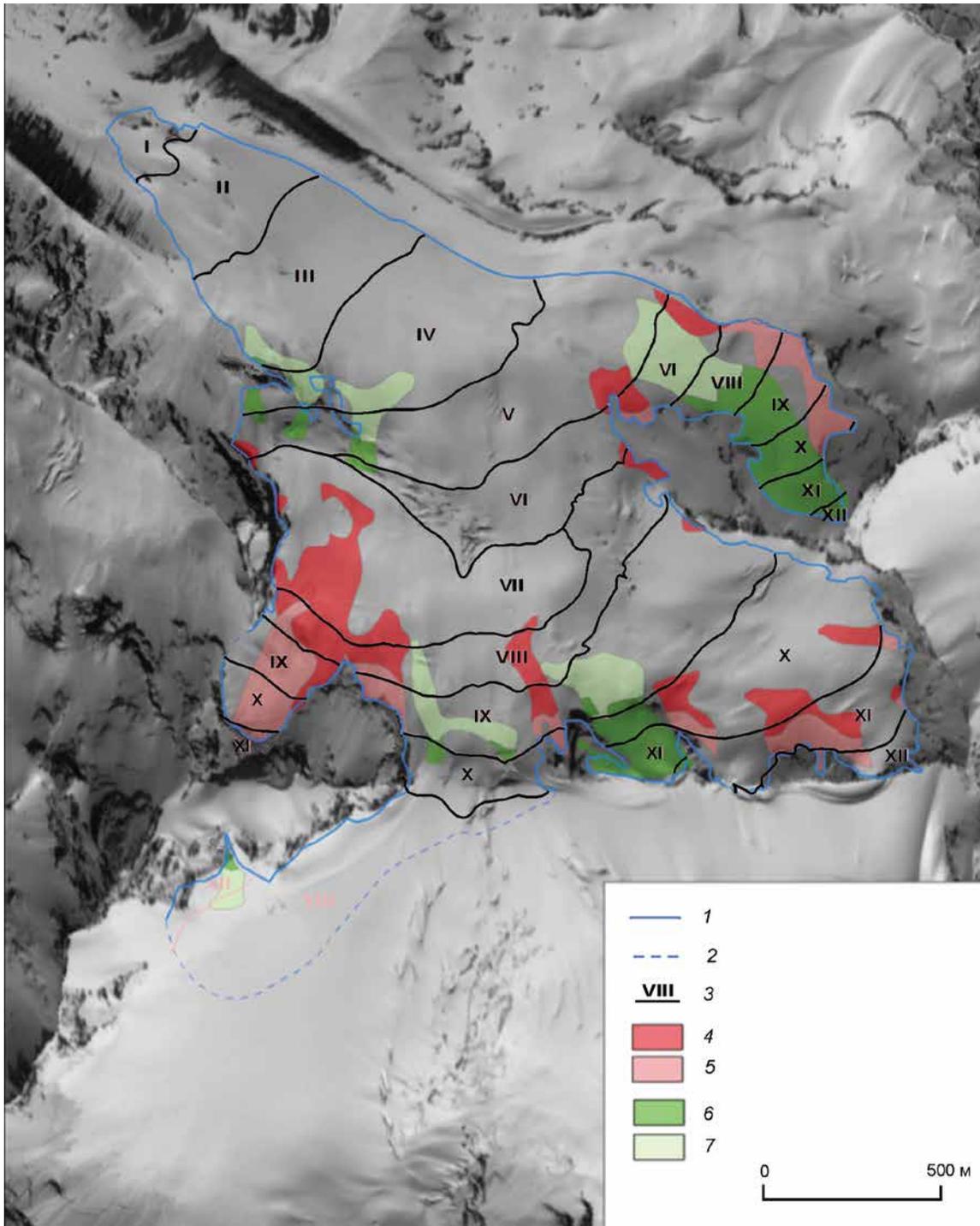


Рис. 1. Зоны воздействия лавин на поверхность ледника Джанкуат на примере 2001/02 г. Основа: космический ортофотоснимок IRS-P5 (CartoSat-1) от 21.05.2008, пространственное разрешение 2,5 м.

1 – границы ледника; 2 – ледоразделы; 3 – границы высотно-морфологических зон и их номера; 4, 5 – участки воздействия лавин, сходящих из-за пределов ледника: 4 – область аккумуляции, 5 – зона транзита; 6, 7 – участки воздействия лавин, сходящих в пределах ледника: 6 – область аккумуляции, 7 – зона транзита

Fig. 1. Areas of snow avalanche impact over the Djankuat Glacier surface (a case study of 2001/02 balance year). Plotting background: space ortho-photo image IRS-P5 (CartoSat-1), 21.05.2008, with a spatial resolution of 2,5 m.

1 – glacier boundary; 2 – ice divides; 3 – boundaries of alti-morphological zones and their numbers; 4, 5 – impact areas of avalanches from outside the glacier: 4 – accumulation area, 5 – transit zone; 6, 7 – impact areas of avalanches from inside the glacier: 6 – accumulation area, 7 – transit zone

Вклад снежных лавин в питание ледника Джанкуат

Балансовый год	Зимний баланс b_w , мм в.э.	Аномалия зимнего баланса, %	Суммарный объём аккумуляции, млн м ³ в.э.	Абсолютный объём лавинного питания V , млн м ³ в.э.	Доля лавинного питания v , %
1991/92	1950	-17	6,6763	0,4247	6,4
1992/93	3180	+33	10,7577	0,2473	2,3
1993/94	2070	-13	7,0049	0,3423	4,9
1994/95	2540	+6	8,5954	0,2636	3,1
1995/96	2270	-5	7,6817	0,4457	5,8
1998/99	2430	+1	7,6618	0,4649	6,1
1999/00	2490	+4	7,4924	0,3186	4,3
2000/01	2420	+1	7,2818	0,2330	3,2
2001/02	2900	+20	8,7261	0,3299	3,8
2002/03	2630	+8	7,9137	0,2867	3,6
2003/04	3220	+31	9,6890	0,1745	1,8
2004/05	3120	+27	9,3881	0,3104	3,3
2005/06	2290	-7	6,8906	0,6859	10,0
2006/07	1950	-20	5,7135	0,5437	9,5
2007/08	2430	-1	7,1199	0,2233	3,1

ного снега с 1980-х годов принимается в расчётах константой 0,56 г/см³.

Накопленная за полувековой период мониторинга база данных по леднику Джанкуат позволяет применить упомянутую здесь методику расчёта v для вполне представительного массива информации последних десятилетий. Подобным образом обработано уже 15 сезонов: с 1991/92 по 1995/96 г. и с 1998/99 по 2007/08 г. Данные для расчёта доли лавинного питания в этой выборке приведены в таблице.

Аккумуляция (зимний баланс) b_w каждого сезона – один из ключевых параметров, характеризующих состояние ледника в конкретном году, поэтому эти значения поставляются в глобальную базу данных Всемирной службы мониторинга ледников в Цюрихе и выкладываются для общего доступа на сайте www.wgms.ch. Аномалия каждого сезона в таблице отражает отклонение соответствующего значения b_w относительно средней многолетней величины с начала мониторинга в 1967/68 г. Поскольку эти средние величины ежегодно обновляются, одно и то же значение b_w для разных лет знаменует собой всякий раз разную аномалию в третьей графе таблицы. Например, в 1998/99 и 2007/08 гг. на леднике было зафиксировано одинаковое значение приходной составляющей баланса массы – 2430 мм. Однако к 1998/99 г. средняя многолетняя величина аккумуляции равнялась 2400 мм, тогда как

к 2007/08 г. она увеличилась до 2450 мм, поэтому в первом случае аномалия сезона оценена в таблице как +1%, а во втором – как -1%. Отметим, что тенденция неуклонного роста средних многолетних величин аккумуляции с каждым годом проявляется отчётливо в течение всего 50-летнего периода инструментальных наблюдений и даже эпизод относительной её инверсии в сторону некоторого снижения, отмечаемой на репрезентативном леднике Центрального Кавказа в начале 2010-х годов, не сильно её нарушает. Анализ выборки сезонов аккумуляции показал, что в исследуемый период преобладали годы с повышенной снежностью: таких сезонов оказалось девять из 15, тогда как в шести случаях снегонакопление было ниже многолетних норм.

Последующий пересчёт водного эквивалента b_w из общепринятых удельных единиц измерения (мм) в валовые кубические метры выполняется через значения площади ледника, которые периодически пересчитывались по материалам повторного картографирования и обновляемым примерно раз в 6–8 лет топографическим основам. Значения b_w в объёмных категориях приведены в четвёртой графе таблицы. В отличие от первого опыта подобных вычислений [5], по нашему мнению, целесообразно использовать в расчётах не площадь ортогональной проекции, а истинную (физическую) площадь, т.е. поверхность криволинейной развёртки ледника, так как

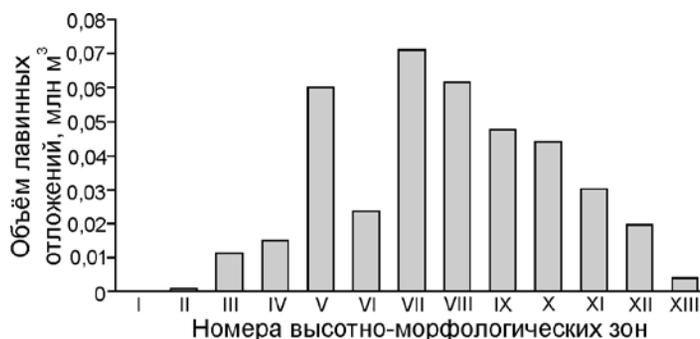


Рис. 2. Распределение среднего многолетнего объёма лавинного снега по высотно-морфологическим зонам ледника Джанкуат

Fig. 2. Long-term mean volume of snow avalanche deposits by alti-morphological zones of the Djankuat Glacier

разновременные ЦМР, составленные по итогам серии съёмок ледника в разные годы, позволяют её параметризовать, а промеры толщины накопившейся снежной толщи в процессе снегомерных работ проводятся на Джанкуате по нормали к дневной поверхности ледника. В соответствии с господствующими эволюционными трендами последнего времени физическая площадь ледника постепенно уменьшается, составляя на последний 2007/08 г. выборки 2,930 км².

Было уточнено и вычисление объёма лавинной аккумуляции по сравнению с методикой Поповнина–Пылаевой путём исключения из расчётов значений снегонакопления в тех точках лавинных аппаратов, где водный эквивалент накопившихся снежных толщ уступал осреднённому значению водозапаса нелавинного снега в соответствующей высотно-морфологической зоне. Несмотря на изначальное, ещё на полевом этапе, картографическое отнесение таких точек к категории нелавинных и исходя из текстуры снежного покрова, выявляемая при расчётах подобная отрицательная лавинная аккумуляция трактовалась как приуроченность пункта не к конусу выноса, а к зоне транзита: отсюда лавина могла увлечь за собой часть снега атмосферного происхождения и перераспределить его в пределах контура своего воздействия. Картографическое разграничение не только лавинных и нелавинных отложений, но и зон транзита и аккумуляции лавинных аппаратов на территории ледника, пример которого представлен на рис. 1, – важный элемент разработанной расчётной схемы.

По этой усовершенствованной методике были просчитаны все 15 балансовых сезонов, представленных в таблице. Установлено, что вклад лавин в питание ледника Джанкуат варьирует от 1,8% (в 2003/04 г.) до 10,0% (в 2005/06 г.) и в среднем составляет 4,7%. При этом максимум 2005/06 г. вы-

ражен особенно ярко. В том сезоне во всех высотно-морфологических зонах отмечался избыток лавинного снега, а в IX зоне лавинная аккумуляция превысила среднее многолетнее значение почти втрое. В этот сезон наблюдался сход особо крупных лавин со склона горы Джантуган.

Распределение лавинных конусов на леднике Джанкуат из года в год почти одинаково: несколько варьируют их контуры, но расположение основных очагов схода лавин и конфигурация лавиносборов кардинально не меняются. На колебания объёма лавинной подпитки большее влияние оказывает толщина лавинных отложений, чем их площадь, которая меняется год от года незначительно. На рис. 2 видно, что наибольшее воздействие лавин (т.е. общей массы лавинного снега) наблюдается в V, VII и VIII высотно-морфологических зонах, где и находятся основные места схода лавин. В основном это лавины со склонов горы Джантуган (см. рис. 1).

Лавинный привнос снега отмечается не во всех высотно-морфологических зонах: до двух самых нижних, I и II, лавины обычных размеров не доходят из-за выполаживания этой части ледника. Отметим, однако, что из-за продолжающейся деградации ледника и отступления его фронта меняется морфометрия его концевой части – язык становится всё более крутым, поэтому в самые последние годы лавинные отложения изредка регистрируются уже и в I, и II зонах (особенно ярко это проявилось весной 2018 г.). В XIII высотно-морфологической зоне крупные лавины также редки. Это связано с тем, что в пригребневом поясе ледника относительная высота окружающих скальных стенок невелика и не располагает к формированию лавин значительного объёма. Во всех остальных зонах накопление снега за счёт лавинного механизма происходит систематически (см. рис. 2).

Значения осреднённой лавинной аккумуляции в пределах высотно-морфологических зон варьируют от 950 м³ в зоне II до 70 906 м³ в зоне VII. Такие объёмы характеризуют суммарное к моменту максимума сезонных снегозапасов накопление лавинных отложений, т.е., скорее всего, это — итог большого числа мелких, а не отдельных крупных лавин. Воздействие крупных лавин проявляется, прежде всего, в аномалиях дальности выброса, когда лавинные массы отмечаются на участках редкой повторяемости уже в пределах языка.

Доля лавинного питания и фоновая снежность зим

Таблица показывает, что объёмы лавинных накоплений на леднике на порядок меньше суммарной аккумуляции: максимальная доля лавинной составляющей питания ледника составляет 10%. И здесь возникает вопрос: как и насколько эти параметры связаны между собой? Логично предположить, что зависимость здесь прямая: чем более многоснежна зима, тем больше лавин сходит и тем большее значение они играют в питании ледника. Однако фактические данные измерений опровергают такие предположения.

Эта кажущаяся очевидной логика нарушается уже на этапе поиска связи между абсолютными (валовыми) величинами прихода вещества на ледник — частичного за счёт лавин V и итогового зимнего баланса b_w . Сопоставление их количественных оценок за 15 лет выборки дано на рис. 3, который выглядит, на первый взгляд, парадоксально: налицо все признаки не прямой, а обратной зависимости. Разумеется, при весьма невысоком значении коэффициента корреляции ($r = -0,58$) её сложно признать значимой и строго функциональной, но качественная сторона установленной закономерности не вызывает сомнений. Она прослеживается для сезонов, экстремальных по снежности за анализируемые 15 лет. (Поясним, что под снежностью здесь следует понимать лишь измеряемое на леднике итоговое количество сезонного снега b_w , а не более сложную трактовку этого термина, которой придерживаются, например, Н.А. Володичева и А.Д. Олейников [8, 9].) Так, самая многоснежная зима исследуемых лет — сезон 1992/93 г. (которая за весь полувековой период инструмен-

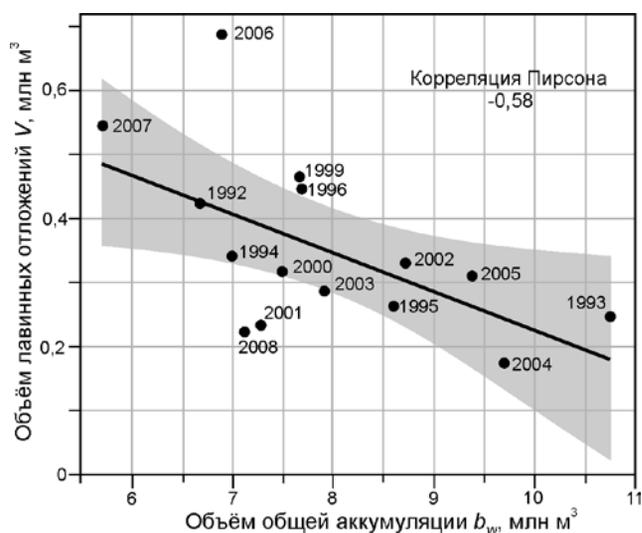


Рис. 3. Связь между абсолютными значениями объёмов аккумуляции b_w и лавинного привноса снега V (в водном эквиваленте, млн м³) за разные годы на леднике Джанкуат.

Серым цветом показан доверительный интервал

Fig. 3. Relationship between volumes of accumulation b_w and avalanche feeding V (mln m³ w.e.) of the Djankuat Glacier for different years.

Confidence interval is highlighted in grey

тального масс-балансового мониторинга на леднике Джанкуат уступала по объёму аккумуляции только уникальному 1986/87 г., отвечающему 1%-й обеспеченности b_w) — характеризовалась одной из самых небольших величин лавинного питания. Наоборот, минимум снежности среди 15 лет наблюдений пришёлся на 2006/07 г., когда на леднике были зафиксированы чрезвычайно большие объёмы лавинного снега, уступающие только предыдущему году.

Обратной выглядит и связь между объёмом лавинного снега и аккумуляцией на леднике Джанкуат, выраженной в слое воды. Эта связь отражена на рис. 4, который близок, но не тождествен рис. 3, абсциссы которого учитывают постоянно меняющуюся (сокращающуюся) площадь ледника. Тем не менее, общность облика очевидна. Рассматриваемые 15 сезонов характеризуются большим разбросом показателей зимней аккумуляции b_w — от 1950 мм в.э. (2006/07 г.) до 3220 мм в.э. (2003/04 г.). Распределив эти 15 зим в три градации по степени многоснежности, легко вывести осреднённые значения V для каждой из них: в малоснежные годы (1991/92, 1993/94, 1995/96, 2005/06, 2006/07 гг.) лавины

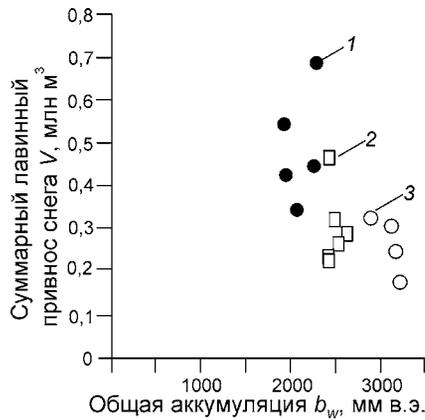


Рис. 4. Связь между зимним балансом (аккумуляцией) b_w в слое воды (мм в.э.) и объёмом лавинного привноса V (в водном эквиваленте, млн m^3) на леднике Джанкуат за мало- (1), средне- (2) и много- (3) снежные зимы

Fig. 4. Relationship between winter balance b_w (mm w.e.) and bulk avalanche feeding v (mln m^3 w.e.) of the Djankuat Glacier for low-snow (1), medium-snow (2) and high-snow (3) winter seasons

приносили на поверхность ледника в среднем по 0,4885 млн m^3 в.э. снега; в средние по снежности (1994/95, 1998/99, 1999/2000, 2000/01, 2002/03, 2007/08 гг.) – по 0,2984 млн m^3 в.э.; в многоснежные (1992/93, 2001/02, 2003/04, 2004/05 гг.) – по 0,2655 млн m^3 в.э. Налицо обратная зависимость.

Ещё отчётливее обратный характер зависимости выражен при соотношении аккумуляции b_w на леднике с долей лавинного питания v на основании данных таблицы. Несмотря на то, что и в этом случае связь остаётся далёкой от функциональной, модуль коэффициента корреляции (рис. 5) существенно возрастает: $r = -0,72$.

Таким образом, результаты натурных изменений приводят к неожиданному заключению: в менее снежные сезоны роль лавин в питании ледника становится более заметной, достигая 10% суммарной сезонной аккумуляции. Большинство пар значений использованной генеральной совокупности попадают на рис. 3 и 5 в пределы доверительного интервала 2σ линейной регрессии, статистически подтверждая правомерность гипотезы об обратной связи рассматриваемых величин. Только точки, принадлежащие трём сезонам из 15, выходят от аппроксимирующей линии за пределы интервала 2σ . Сильнее всего отстоит точка, соответствующая 2005/06 г.: в том году лавинная под-

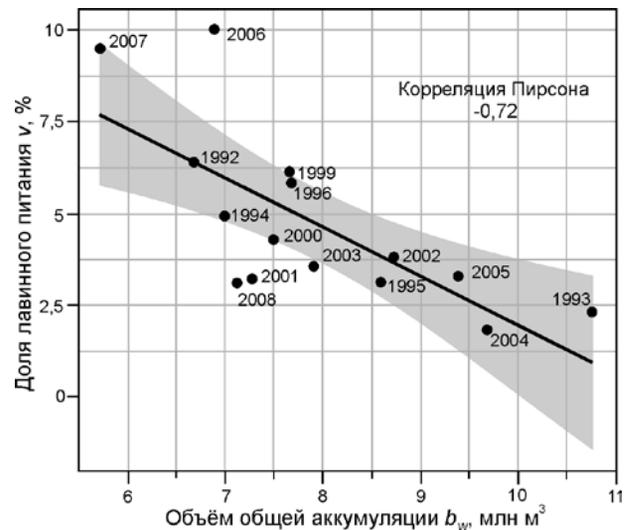


Рис. 5. Связь между абсолютными значениями объёмов аккумуляции b_w (в водном эквиваленте, млн m^3) и долей лавинного питания v (%) за разные годы на леднике Джанкуат.

Серым цветом показан доверительный интервал

Fig. 5. Relationship between volumes of accumulation b_w (mln m^3 w.e.) and share of avalanche feeding v (%) of the Djankuat Glacier for different years.

Confidence interval is highlighted in grey

питка приобрела несколько большую роль, чем ей предписывала пониженная фоновая снежность (аномалия составила -7%). Две другие точки, отражающие среднеснежные зимы 2000/01 и 2007/08 гг. ($+1\%$ и -1% аномалии соответственно), наоборот, означают ощутимо более слабую лавинную подпитку, чем можно было бы ожидать. Данные исключения указывают лишь на то, что масса выпавшего за зиму снега – не единственный фактор, определяющий лавинную прибавку. Конечно, особенности синоптических ситуаций, которые влияют на стратиграфические преобразования в снежном пласте при его диагенезе, могут отклонять закономерную скоррелированность b_w и v в ту или иную сторону. Тем не менее, зависимости стохастическими при этом всё-таки не становятся.

Дискуссия

Обратная связь между долей лавинного питания v и фоновой снежностью зимы только на первый взгляд кажется парадоксальной. Объяснить её можно на основе элементарной матема-

тической логики. Если параметр ν представляет собой отношение $\nu = V/b_w$, то очевидно обратное соотношение между ν и b_w : в более снежные годы знаменатель увеличивается и доля лавинного питания приобретает предпосылки к уменьшению и наоборот. При стремлении $V \rightarrow \text{const}$ обратная связь вообще становится однозначной. Разумеется, эта абстракция в реальных условиях не выдерживается. Но если вариабельность b_w предопределена изменчивостью зимних погодных условий, аномалии которых колеблются в очень широких пределах вслед за ежегодной спецификой глобальной циркуляционной системы, то суммарный объём лавинных отложений V несколько больше «зарегулирован» неизменным во времени фактором рельефа. Как отмечалось ранее, зоны накопления снеголавинных масс не сильно различаются по своему пространственному положению из года в год, будучи приурочены к одним и тем же элементам окружающего рельефа, способным играть роль потенциальных очагов возникновения лавин; варьируют лишь толщина накопившегося в этих очагах снега и как следствие — дальность выброса. Поэтому влияние числителя (прямая связь с ν) уступает влиянию знаменателя (обратная связь).

Интересно другое. Даже абсолютный объём лавинных масс V (см. рис. 3 и 4) неожиданно обнаруживает признаки обратной связи со снежностью зимы (т.е. с итоговым снегонакоплением на поверхности ледника b_w), что только усугубляет результирующий эффект обратной связи (ν , b_w) из-за прямой зависимости ν от V . Насколько парадоксален этот факт?

В работах К.С. Лосева [2, 10] высказываются идеи, что лавинное питание может играть бóльшую роль при меньшей снежности зимы. Но он и другие исследователи видят причину этого в том, что при общей небольшой аккумуляции в результате особенно интенсивного весеннего снеготаяния на поверхность ледника сходит избыточное число лавин, которые дополнительно и существенно подпитывают ледник.

Большой лавинный снос снега не всегда обусловлен многоснежьем. Часто причина значительного числа лавин — сильные оттепели или интенсивные снегопады при относительно малоснежной зиме.

Ещё один фактор, который может влиять на лавинную активность в сезоны разной

снежности, — ход зимних температур и характер снежной толщи, которая формируется на окружающих ледник склонах. В сезоны большей снежности на склонах накапливается большое количество снега, но на фоне высоких зимних температур (в условиях циклональной погоды) снежная толща становится более стабильной, тем самым уменьшая число лавин. Вероятно, в годы с частыми и обильными снегопадами при относительно высокой температуре создаются условия для быстрого уплотнения снежного покрова на склонах. Во время снегопадов в лавинообразовании, как правило, участвует только верхний слой рыхлого снега, доля которого снижается с увеличением толщины снежного покрова и крутизны склона. Объёмы лавин из рыхлого сухого снега обычно относительно невелики. Такие лавины могут останавливаться на склонах, не достигая поверхности ледника.

Малое же количество выпадающего снега и низкая температура благоприятны для интенсивной сублимационной перекристаллизации и температурно-градиентного метаморфизма, что способствует разрыхлению определённых горизонтов снежного покрова. Интенсивность процесса перекристаллизации тем сильнее, чем больше градиент температуры. Таким образом, несмотря на меньший объём снежного покрова на склонах, в результате процессов метаморфизма могут уменьшаться удерживающие его силы сцепления, что способствует его переносу на поверхность ледника в виде лавин. Заметим, что в подобных случаях это будут лавины небольших объёмов, которые останавливаются на склоне или в вершине конуса выноса.

Корреляция между исследуемыми показателями статистически достоверна, но есть сезоны, когда доля лавинного питания сильно отстоит от аппроксимирующей прямой регрессионной линии и даже выходит за пределы доверительного интервала (отмечен серым фоном на рис. 5). Здесь не исключён и субъективный фактор, вызывающий рабочие погрешности эмпирических данных. Естественно, что в зимы значительной снежности снегомерные наблюдения в пределах лавинных конусов особенно опасны, поэтому отдельные участки могут выпадать из ареала снегомерного профилирования, что вызывает необходимость косвенных расчётов для построения континуального поля аккумуляции.

В многоснежные годы сам процесс выполнения снегомерных работ становится более сложным и часть точек, попадающих под воздействие лавин, может остаться неучтённой, так как их не удаётся распознать наощупь.

Несмотря на отмеченные издержки, предположение об обратной связи доли лавинного питания ледника и фоновой снежности зим, сделанное в результате настоящего исследования, аргументировано качественно и количественно с учётом единства методики сбора фактического материала и последующего анализа за все 15 сезонов. В перспективе намечается несколько путей развития данной темы:

1) увеличение длины временного ряда, для которого рассчитаны доли лавинного питания, с целью установления временных закономерностей изменчивости роли снежных лавин в питании ледника Джанкуат;

2) совершенствование методики сбора полевых данных — более детальные снегомерные работы в пределах зон лавинного воздействия (в том числе с помощью радиолокации);

3) применение существующей методики на другом опорном объекте для проверки универсальности гипотезы об обратной связи между долей лавинного питания и фоновой аккумуляцией.

Важное следствие из затронутой проблемы — выяснить, как изменение лавинных процессов из-за прогрессирующих глобальных изменений климата отразится на балансе массы ледника в будущем. Дальнейший рост температуры воздуха в высокогорье на определённой стадии приведёт к увеличению снежности зим и, очевидно, к изменению снеголавинного режима. Мнения об эффекте грядущего потепления зим на активность лавин сильно расходятся [11–13 и др.], но, вне всякого сомнения, в итоге изменится и внешний массоэнергообмен ледников, испытывающих воздействие лавин. Заметим, что перемены в доле лавинной подпитки будут влиять не только на приходную, но и на расходную составляющую вещественного баланса. Отличия лавинных отложений от остальной части накопленного снежного покрова по плотности и альбедо должны искажать поля абляции и, как отмечалось неоднократно [4, 14, 15], влиять на сезонную убыль вещества. Таким образом, включение блока лавинного перераспределения снега в математические модели баланса массы

ледника [16] позволит существенно уточнить результаты моделирования.

Заключение

Разумеется, морфология ледника и окружающих склонов — ключевой фактор, определяющий степень значимости лавинного питания для ледникового объекта. Порядок вклада лавин в общую аккумуляцию ледника можно ориентировочно оценить, исходя из площади лавиносборов окружающих склонов, тогда как конкретные значения доли лавинного питания будут всё-таки определяться сезонными показателями снежности зимы и фоновой аккумуляции. Итоги применения оригинальной методики расчёта доли лавинного питания в аккумуляции ледника Джанкуат на Центральном Кавказе указывают на вариации этого показателя в разные годы последних десятилетий от 1,8 до 10,0%. При этом среднее значение доли лавинной подпитки составляет 4,7%, т.е. каждый 21-й м³ отложенного на леднике снега оказывается привнесённым лавинами из-за его пределов. Несколько неожиданна, но вполне объяснима выявленная обратная связь доли лавинного питания и фоновой зимней аккумуляции: чем меньше снежность зимы, тем большую роль приобретают лавины как компонент прихода вещества на ледник. При коэффициенте корреляции этой зависимости $r = -0,72$ качественный характер обнаруженного соотношения сомнений не вызывает.

Дальнейшая перспектива настоящего исследования — изучение изменчивости вклада лавин в аккумуляцию во времени. Это позволит выяснить, насколько многолетняя динамика поступления снеголавинных масс на поверхность ледника за период мониторинга связана с его эволюцией.

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке РФФИ по проектам 15-05-00599а и 18-05-00420а. Авторы выражают признательность А.С. Турчаниновой за ценные консультации.

Acknowledgements. The work was supported by Russian Foundation of Basic Research (grants 15-05-00599a, 18-05-00420a). The authors are indebted to A.S. Turchaninova for her valuable advice.

Литература

References

1. Тушинский Г.К. Ледники, снежники, лавины. М.: Географгиз, 1963. 312 с.
2. Лосев К.С. Роль лавин в бюджете массы ледников // Тр. ЗакНИГМИ. 1966. Вып. 20. С. 178–182.
3. Харитонов Г.Г. Методика расчета лавинного питания ледника // МГИ. 1979. Вып. 36. С. 155–159.
4. Purdie H., Rack W., Anderson B., Kerr T., Chinn T.J., Owens I., Linton M. The impact of extreme summer melt on net accumulation of an avalanche fed glacier, as determined by ground-penetrating radar // *Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography*. 2015. V. 97. P. 779–791. doi: 10.1111/geoa.12117.
5. Поповнин В.В., Пылаева Т.В. Лавинное питание ледника Джанкуат // *Лёд и Снег*. 2015. № 2 (130). С. 21–32. doi: 10.15356/2076-6734-2015-2-21-32.
6. Paterson W.S.B. The physics of glaciers. Oxford: Pergamon, 1994. 480 p.
7. Тушинский Г.К. Лавины: возникновение и защита от них. М.: Географгиз, 1949, 215 с.
8. Володичева Н.А., Олейников А.Д. Снежность зим и лавинные процессы на Большом Кавказе в XX столетии // *География, общество, окружающая среда: Т. 1. Структура, динамика и эволюция природных экосистем* / Ред. Н.С. Касимов. М.: Городец, 2004. С. 422–434.
9. Олейников А.Д., Володичева Н.А. Экстремальные зимы XX–XXI вв. как индикаторы снежности и лавинной опасности в условиях прошлого и прогнозируемого изменений климата // *Лёд и Снег*. 2012. № 3 (119). С. 52–57. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2012-3-52-57>.
10. Лосев К.С. К вопросу о роли лавин в бюджете массы ледников // *Материалы Третьего Всес. гляциол. симпозиума. Успехи советской гляциологии*, 1968. С. 376–380.
11. Glazovskaya T.G., Seliverstov Yu.G. Longterm forecasting of changes of snowiness and avalanche activity in the world due to the global warming // *25 Years of Snow and Avalanche Research. Publ. № 203* / Ed. E. Hestnes. Oslo: Norwegian Geotechnical Institute, 1998. P. 113–116.
12. McClung D., Schaerer P. The avalanche handbook. Seattle: The Mountaineers Books, 2006. 342 p.
13. Lazar B., Williams M. Climate change in western ski areas: potential changes in the timing of wet avalanches and snow quality for the Aspen ski area in the years 2030 and 2100 // *Cold Regions Science and Technology*. 2008. V. 51. P. 219–228.
14. Martinec J., de Quervain M.R. The effect of snow displacement by avalanches on snow melt and runoff // *Snow and Ice Symposium. Moscow, August 1971, Neiges et Glaces. IAHS-AISH Publ. № 104*. 1975. P. 364–377.
15. de Scally F.A. Influence of avalanche snow transport on snowmelt and runoff // *Journ. of Hydrology*. 1992. V. 137. P. 73–97.
16. Gruber S. A mass-conserving fast algorithm to parameterize gravitational transport and deposition using digital elevation models // *Water Resources Research*. 2007. V. 43. P. 1–8.
1. Tushinskiy G.K. *Ledniki, snezhniki, laviny*. Glaciers, snow patches, snow avalanches. Moscow: Geografiz, 1963: 312 p. [In Russian].
2. Losev K.S. The role of snow avalanches in glacier mass balance. *Trudy ZakNIGMI. Proc. of ZakNIGMI*. 1966, 20: 178–182. [In Russian].
3. Kharitonov G.G. Method of calculating avalanche feeding of a glacier. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy. Data of Glaciological Studies*. 1979, 36: 155–159. [In Russian].
4. Purdie H., Rack W., Anderson B., Kerr T., Chinn T.J., Owens I., Linton M. The impact of extreme summer melt on net accumulation of an avalanche fed glacier, as determined by ground-penetrating radar. *Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography*, 2015, 97: 779–791. doi: 10.1111/geoa.12117.
5. Popovnin V.V., Pylayeva T.V. Avalanche feeding of the Djankuat Glacier. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2015, 2 (130): 21–32. doi: 10.15356/2076-6734-2015-2-21-32. [In Russian].
6. Paterson W.S.B. The physics of glaciers. Oxford: Pergamon, 1994: 480 p.
7. Tushinskiy G.K. *Laviny: vzniknoveniye i zashchita ot nikh*. Snow avalanches: origin and protection from them. Moscow: Geografiz, 1949: 215 p. [In Russian].
8. Volodicheva N.A., Oleynikov A.D. Winter snow accumulation and snow-avalanche activity in the Great Caucasus during the period of instrumental monitoring of the XX century. *Geografiya, obshchestvo, okruzhayushchaya sreda. Tom 1. Struktura, dinamika i evolyutsiya prirodnikh ekosistem. Geography, society and environment: V. 1: Structure, dynamics and evolution of natural geosystems*. Ed. N.S. Kasimov. Moscow: Gorodets, 2004: 422–434. [In Russian].
9. Oleynikov A.D., Volodicheva N.A. Extreme winters in XX–XXI centuries as indicators of snowiness and avalanche hazard in the past and expected climate change conditions. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2012, 3 (119): 52–57. [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2012-3-52-57>.
10. Losev K.S. On the role of snow avalanches in mass balance of glaciers. *Materialy 3 vsesoyuznovo glyatsiologicheskovo simpoziuma. Uspekhii sovetskoy glyatsiologii. Proc. of 3rd all-Union glaciol. symposium. Achievements of the Soviet glaciology*. 1968: 376–380. [In Russian].
11. Glazovskaya T.G., Seliverstov Yu.G. Longterm forecasting of changes of snowiness and avalanche activity in the world due to the global warming. *25 Years of Snow and Avalanche Research. Publ. № 203*. Ed.: E. Hestnes. Oslo: Norwegian Geotechnical Institute, 1998: 113–116.
12. McClung D., Schaerer P. The avalanche handbook. Seattle: The Mountaineers Books, 2006: 342 p.
13. Lazar B., Williams M. Climate change in western ski areas: potential changes in the timing of wet avalanches and snow quality for the Aspen ski area in the years 2030 and 2100. *Cold Regions Science and Technology*, 2008, 51: 219–228.
14. Martinec J., de Quervain M.R. The effect of snow displacement by avalanches on snow melt and runoff. *Snow and Ice Symposium. Moscow, August 1971, Neiges et Glaces. IAHS-AISH Publ. 104*, 1975: 364–377.
15. de Scally F.A. Influence of avalanche snow transport on snowmelt and runoff. *Journ. of Hydrology*. 1992, 137: 73–97.
16. Gruber S. A mass-conserving fast algorithm to parameterize gravitational transport and deposition using digital elevation models. *Water Resources Research*. 2007, 43: 1–8.