

Методика оценки лавинного питания (на примере трёх ледников Тянь-Шаня)© 2019 г. А.С. Турчанинова^{1*}, А.В. Лазарев¹, Е.С. Марченко², Ю.Г. Селиверстов¹, С.А. Сократов¹, Д.А. Петраков¹, М. Барандун³, Р. Кенжебаев⁴, Т. Сакс³¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия;²Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия;³Университет Фрибурга, Фрибург, Швейцария;⁴Центрально-Азиатский институт прикладных исследований Земли, Бишкек, Кыргызская Республика

*alla_wave87@mail.ru

**Methods of snow avalanche nourishment assessment
(on the example of three Tian Shan glaciers)**A.S. Turchaninova^{1*}, A.V. Lazarev¹, E.S. Marchenko², Yu.G. Seliverstov¹, S.A. Sokratov¹, D.A. Petrakov¹, M. Barandun³, R. Kenzhebaev⁴, T. Saks³¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;²Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia;³University of Fribourg, Fribourg, Switzerland;⁴Central-Asian Institute for Applied Geosciences, Bishkek, Kyrgyz Republic

*alla_wave87@mail.ru

*Received March 19, 2018 / Revised June 13, 2019 / Accepted September 19, 2019***Keywords:** *avalanche nourishment, glacier, numerical modeling, RAMMS, snow avalanche.***Summary**

The contribution of snow avalanches to the seasonal snow accumulation on a glacier is among the least studied components of the glacier's mass balance. The methods for the numerical assessment of avalanche accumulation are still under development, which is related to poor avalanche data availability and difficulties in obtaining such data on most of mountain glaciers. We propose a possible methodology for the numerical assessment of snow avalanche contribution to snow accumulation at mountain glaciers based on DEM and weather data analysis using GIS and numerical modeling of snow avalanches. The developed methodology consists of the following steps: terrain analysis; weather data analysis; snow avalanche volume assessment during an analyzed balance year; numerical simulation of snow avalanches using RAMMS; evaluation of snow avalanches contribution into a glacier accumulation. The proposed methodology was tested on three glaciers located in the Inner Tien Shan: Batysh Sook, № 354 and Karabatkak during the 2015/16 balance year. To evaluate snow avalanche contribution to the seasonal accumulation, we reconstructed avalanche release zones that were most probably active during the 2015/16 balance year and corresponding snow fracture height in each of these zones. The numerical simulations of most probable released snow avalanches during the winter period 2015/16 using avalanche dynamics software RAMMS were performed and compared with the field observations and UAV orthophoto image from July 2016. The outlines of avalanches deposits were realistically reproduced by RAMMS according to the results of field observation. The estimated share of snow avalanche contribution to the accumulation on the research glaciers during the 2015/16 balance year turned out to be: Batysh Sook – $7,4 \pm 2,5\%$; № 354 – $2,2 \pm 0,7\%$; Karabatkak – $10,8 \pm 3,6\%$ of the total accumulation. The next step would be to test the proposed methodology based on the data and regional dependences from the Inner Tien Shan in other mountainous regions. This methodology is applicable in the regions where DEMs, regular meteorological observations as well as data on the regional avalanche formation factors are available.

Citation: Turchaninova A.S., Lazarev A.V., Marchenko E.S., Seliverstov Yu.G., Sokratov S.A., Petrakov D.A., Barandun M., Kenzhebaev R., Saks T. Methods of snow avalanche nourishment assessment (on the example of three Tian Shan glaciers). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2019. 59 (4): 460–474. [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-4-438>.

*Поступила 19 марта 2019 г. / После доработки 13 июня 2019 г. / Принята к печати 19 сентября 2019 г.***Ключевые слова:** *лавинное питание, ледник, математическое моделирование, снежная лавина, RAMMS.*

Предложена новая методика количественной оценки лавинного питания ледников, основанная на анализе рельефа и данных метеорологических наблюдений с использованием методов геоинформационного картографирования и математического моделирования. Рассмотрены результаты её применения на трёх ледниках Тянь-Шаня: Западный Суёк, № 354, Карабаткак.

Введение

Ледники с дополнительным питанием за счёт метелевого и лавинного снега широко распространены в горах. Доля лавинного питания представляет собой отношение количества лавинного снега к снегозапасам на теле ледника [1]. Непосредственных измерений доли лавинного питания в аккумуляции ледников выполнялось относительно немного, хотя в зависимости от геоморфологических и климатических условий доля лавинного питания может изменяться от нуля на ледниках вершин до преобладающей и даже исключительной на ледниках туркестанского типа [2]. Считается, что доля лавинного питания в общем балансе массы ледников зависит в основном от рельефа, окружающего ледник [3]. Климатические факторы определяют аккумуляцию на ледниках лавинного питания настолько, насколько объёмы и частота схода лавин зависят от климата [4]. В работах [5, 6] приведены результаты по оценке лавинного питания ледников в Гималаях, где его доля превышает 95% общей аккумуляции. Ведущая роль лавинного питания в балансе массы отмечается и для многих «малых» ледников Альп [7]. Так, в случае «Ледяной капеллы» (Eiskapelle), находящейся значительно ниже климатической снеговой линии, оно также оценивается более чем в 90% [8, 9].

Процессы, определяющие условия существования и баланс массы малых форм оледенения, в качественном отношении достаточно хорошо изучены на примере снежников [10]. Однако их количественное отражение до сих пор вызывает вопросы и при определении баланса массы ледников используется редко. Объём аккумуляции лавинного снега на ледниках, как правило, устанавливается по косвенным данным. К.С. Лосев [1] использовал сведения о величине сноса снега лавинами со склонов на дно долин и о размерах лавинных снежников. А.С. Щетинников [11] предложил для оценки доли лавинного питания применять высотный и площадной коэффициенты лавинной концентрации снега на основе картометрических работ, а Г.Г. Харитонов [12] – методику оценки лавинного питания по данным о зимних осадках и размерах лавиноопасных площадей. В работе [9] показана возможность использования прямых данных наземного лазерного сканирования для оценки аккумуляции лавин-

ного снега. В исследовании [13] изложена методика оценки лавинного питания заморенных ледников в Гималаях по «идеализированной модели течения ледника», позволившая объяснить различия в наблюдаемом балансе массы и балансе массы, рассчитываемом по метеорологическим данным для тестового ледника в Гималаях.

В.В. Поповнин и Т.В. Пылаева [14] предложили методику оценки доли лавинного питания для ледников, на которых возможны прямые наземные масс-балансовые измерения. Данная методика позволяет выделить из всей массы накопившегося сезонного снега объём лавинного питания, поступающего из-за пределов ледника. В результате построения поля аккумуляции по итогам снегомерной съёмки на дату максимума сезонного снегонакопления установлено, что вклад снежных лавин в приход вещества на репрезентативном для Центрального Кавказа долином леднике Джанкуат (по данным за 15 сезонов) варьирует от 1,8 до 10,0% [15]. Однако данную методику не всегда можно применить на практике, так как зоны лавинной аккумуляции, как правило, недоступны для прямых снегомерных наблюдений даже в летний период ввиду сохранения лавинной опасности.

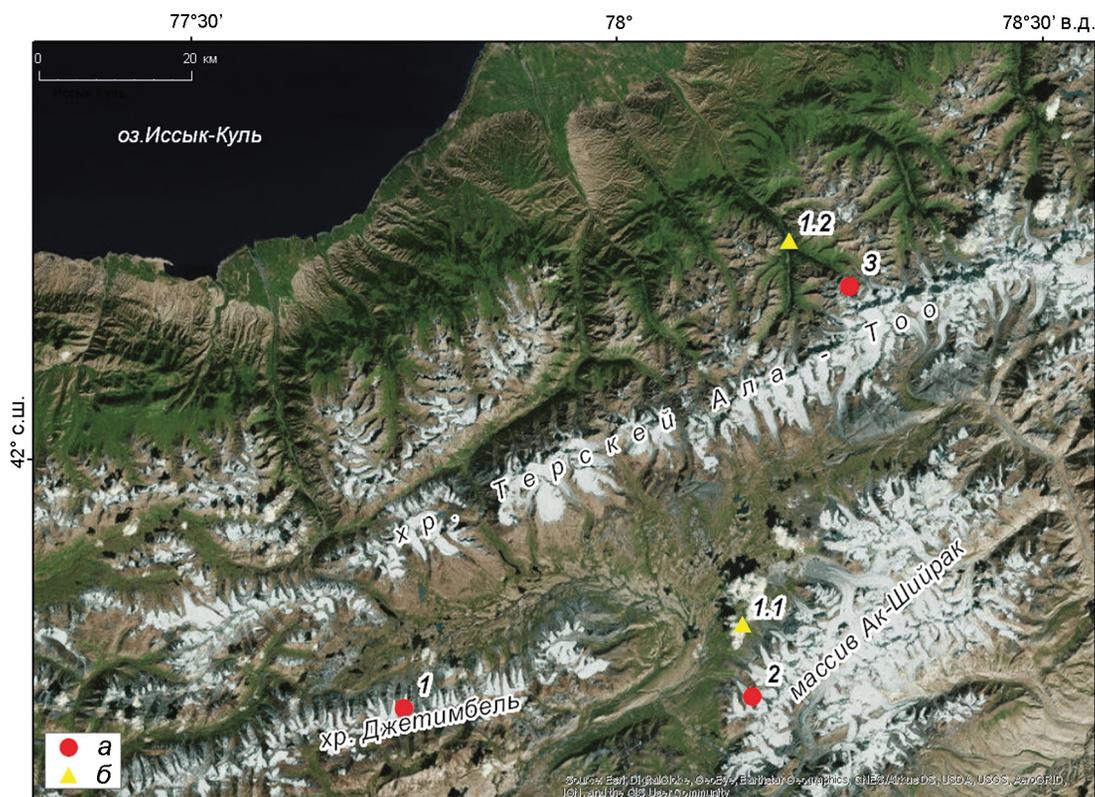
Задачи настоящего исследования – разработка автоматизированной методики количественной оценки лавинного питания ледников, основанной на анализе рельефа и данных метеорологических наблюдений с использованием методов геоинформационного картографирования и математического моделирования, а также её апробация на трёх ледниках Тянь-Шаня. Методика позволяет не только количественно оценить вклад снежных лавин в питание ледников при недостатке прямых наблюдений за снежными лавинами и данных о количестве вынесенного ими снега на поверхность ледников, но и учесть этот компонент приходной составляющей баланса массы ледников при анализе реакции ледников на климатические изменения.

Район исследования

В качестве примера выбран район Внутреннего Тянь-Шаня, где расположено более 2200 ледников [16], состояние которых влияет на хозяйственную деятельность в Средней Азии. Ос-

Таблица 1. Характеристики исследуемых ледников

Название ледника	Координаты	Высотный диапазон, м	Экспозиция	Площадь 2016 г., км ² (https://wgms.ch/)
Западный Суёк	41,786813° с.ш. 77,749273° в.д.	3900–4450	С	1,1
№ 354	41,793219° с.ш. 78,16376° в.д.	3780–4620	СЗ	6,4
Карабаткак	42,14031° с.ш. 78,272803° в.д.	3350–4780	С	2,5

**Рис. 1.** Район исследования:

а – ледники (1 – Западный Суёк, 2 – № 354, 3 – Карабаткак); *б* – метеостанции (1.1 – Кумтор-Тянь-Шань; 1.2 – Кызыл-Суу). Подложка: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, IGN, и GIS user community

Fig. 1. Research region:

a – glaciers (1 – Batysh Sook, 2 – № 354, 3 – Karabatkak); *b* – weather stations (1.1 – Kumtor Tian Shan; 1.2 – Kizil-Suu). Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, IGN, and the GIS user community

новые объекты исследования – ледники Западный Суёк, № 354 и Карабаткак (рис. 1, табл. 1). По рассматриваемым ледникам имеются данные масс-балансовых наблюдений, что позволяет рассчитать долю лавинного питания в зимней аккумуляции. Ледник Западный Суёк расположен на хр. Джетимбель, ледник № 354 – в пределах юго-западной части массива Ак-Шийрак, ледник Карабаткак – на хр. Терскей Ала-Тоо. Все ледники относятся к долинным.

Во Внутреннем Тянь-Шане средние значения абсолютной высоты составляют порядка 3000 м, а максимальные превышают 5000 м. Относитель-

ная высота хребтов не так велика – 1000–1500 м. Хребты во Внутреннем Тянь-Шане изрезаны ледниковыми формами рельефа, но иногда имеют плоские вершины и мягкие очертания склонов [17]. Климат исследуемого района характеризуется двумя особенностями: низкой температурой воздуха в течение всего года и небольшим количеством осадков, максимум которых приходится на тёплый период года (май–сентябрь) [16]. Отметим, что регулярные наблюдения за лавинами на Тянь-Шане проводились [12, 18, 19], однако они, как правило, не охватывали труднодоступные ледниковые районы, где лавины не

опасны для людей, но могут служить дополнительным источником питания ледников. Большинство лавиноборов на Тянь-Шане – денудационные воронки с углом наклона 30–40° площадью до 0,1 км². Во Внутреннем Тянь-Шане максимальные объёмы лавин достигают 1,5 млн м³, средние составляют 5–50 тыс. м³ [20].

Методика количественной оценки лавинного питания

Предлагаемая авторами настоящей статьи новая методика количественной оценки лавинного питания ледников Тянь-Шаня основана на использовании математической статистики, программирования, геоинформационного картографирования и математического моделирования. Анализ рельефа предполагает использование программы ArcGIS, расширение Spatial Analyst. Автоматизация процесса достигается с помощью языка программирования Python. Динамические характеристики лавин рассчитываются в программе моделирования лавин RAMMS (<http://gamms.slf.ch/gamms/>). Методика предусматривает составление серии рабочих карт, которые могут быть подготовлены в программе ArcGIS или в её аналогах. Источниками данных служат: а) цифровые модели рельефа (ЦМР) высокого разрешения и разновременные космические и/или аэрофотоснимки, получаемые в результате полевых исследований или из следующих источников: <https://earthexplorer.usgs.gov/>; <https://nsidc.org/data/highmountainasia>; <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/> и др.; б) региональные статистические зависимости параметров лавинной активности от климатических и геоморфологических факторов [12, 17 и др.]; в) данные метеорологических наблюдений; 4) материалы масс-балансовых наблюдений.

Методика представляет собой последовательное выполнение следующих действий: 1) *анализ рельефа*: а) выделение лавиноактивных склонов, с которых возможен вынос лавинного снега на поверхность ледника, б) выделение зон зарождения лавин различной повторяемости в зависимости от экспозиции и уклона лавиноактивных склонов; 2) *анализ данных метеорологических наблюдений*: определение максимальной толщины снежного покрова в зонах зарожде-

ния лавин в заданный балансовый год и оценка её обеспеченности; 3) *оценка объёмов снежных лавин в заданный балансовый год*: а) выделение зон зарождения лавин с учётом обеспеченности расчётной толщины снежного покрова, б) определение толщины снежного покрова в зонах зарождения лавин, участвующего в лавинообразовании, в) расчёт объёмов снежных лавин; 4) *математическое моделирование снежных лавин*: а) оценка характеристик снежных лавин (дальности выброса и толщины лавинных отложений) в пределах поверхности ледника, б) сопоставление результатов моделирования с данными фактических наблюдений (при наличии такой возможности); 5) *оценка доли лавинного питания в зимнем балансе массы ледника*.

Предложенная методика имеет ряд допущений и дискуссионных положений. Тем не менее, она может стать основой для оценки доли лавинного питания ледников без проведения традиционных наземных детальных снегомерных съёмок в районах, где нет фактических данных о снежных лавинах и о количестве перенесённого ими снега. В перспективе каждый из этапов предложенной методики может быть доработан, но их последовательность остаётся неизменной.

Применение предложенной методики

В июле 2016 г. выполнены полевые исследования на ледниках Западный Суёк и № 354, которые предусматривали работы по измерению аккумуляции и абляции, а также съёмку поверхности ледника Западный Суёк с беспилотного летательного аппарата (БПЛА). В период полевых исследований на поверхности ледников наблюдались многочисленные лавинные отложения в виде лавинных конусов, что позволило предположить участие лавин в питании исследуемых ледников, однако полученных данных недостаточно для количественной оценки их вклада. При выполнении полевых работ на исследуемых ледниках зоны лавинных отложений традиционно исключаются из рассмотрения по причине их трудной доступности. В работе рассмотрен 2015/16 балансовый год в связи с наличием данных масс-балансовых наблюдений и съёмки с БПЛА.

Анализ рельефа. Для оценки количества снега, перенесённого лавинами на рассматриваемые

ледники в заданный балансый год, в первую очередь необходимо установить лавиноактивные склоны и наиболее вероятные зоны зарождения лавин. Для анализа рельефа рассматриваемых ледников и окружающих их склонов использованы наиболее детальные из доступных данные: для ледника Западный Суёк – ЦМР с разрешением 1 м, полученная на основе стереосъёмки с БПЛА (июль 2016 г.); для ледника № 354 – ЦМР с разрешением 1 м, полученная на основе стереосъёмки GeoEye-1 от 29.07.2012 г. [21]; для ледника Карабаткак – ЦМР с разрешением 30 м, полученная в результате синтеза данных ALOS World 3D (разрешение 30 м) и High Mountain Asia DEM (разрешение 8 м).

В основу выделения зон зарождения лавин разной повторяемости в долинах исследуемых ледников положена двумерная матрица повторяемости лавин в зависимости от экспозиции и среднего уклона склонов [12]. Матрица составлена на основе анализа фактических наблюдений за лавинами (около 5000 лавин) на Тянь-Шане [12]. Лавины разной повторяемости на Тянь-Шане сходят с участков склонов всех экспозиций с уклоном от 25 до 60°, причём их повторяемость возрастает в интервале уклона от 25 до 40°. Кроме того, характерно монотонное увеличение частоты схода лавин от южных склонов к северным [12]. Был разработан скрипт на языке программирования Python (библиотека ArcPy), представленный в виде инструмента геообработки ArcGIS. Скрипт в автоматическом режиме выполняет анализ ЦМР на предмет соответствия значений ячеек производных от ЦМР растров (уклона и экспозиции) интервалам значений матрицы из работы [12] и присваивает ячейкам выходного растра новые значения повторяемости (вероятности образования лавин на участке склона с данными морфометрическими параметрами) лавин в соответствии со значениями матрицы [12]. Мы приняли, что значение равное единице, по Г.Г. Харитонову [12], означает ежегодный сход лавин. Повторяемость лавин в других случаях определяется пропорционально значениям предложенной им матрицы.

Разработанный скрипт – первый шаг на пути создания пакета автоматизированных инструментов для оценки лавинной активности на Тянь-Шане. Единственный входной набор данных – ЦМР исследуемой территории, выходной – растр повторяемости лавин в зонах их зарождения. Раз-

решение входного растра (ЦМР) во многом определяет характер очертаний зон зарождения лавин разной повторяемости, получаемых в результате. Влияние разрешения ЦМР на результат качественно оценивалось авторами по воспроизведению зон разной повторяемости лавин относительно морфологии склонов. Размер ячеек 5–10 м признан наиболее подходящим для данного исследования. Это согласуется с тем, что зоны зарождения лавин в основном соответствуют формам мезорельефа. ЦМР более высокого разрешения позволяет учесть черты микрорельефа, что обуславливает высокую дробность границ зон с разной повторяемостью лавин. Использование ЦМР с более низким разрешением возможно, но теоретически может привести к недоучёту небольших зон зарождения. Кроме того, для получения более целостного рисунка зон зарождения лавин разной повторяемости авторами предлагается использовать сглаженный растр уклонов (сглаживание для ЦМР с разрешением 5 м проводилось в окрестности 20 м с помощью инструмента Focal Statistics в ArcGIS).

С помощью созданного авторами инструмента геообработки появляется возможность получения представлений о повторяемости лавин в зонах их зарождения на Тянь-Шане, где никогда не проводили детальных наблюдений за лавинами. Итоговый растр повторяемости лавин использовался для выделения наиболее вероятных зон зарождения лавин и оценки объёма снега, перенесённого лавинами на ледник с окружающих его склонов в заданный балансый год. Авторами были составлены карты повторяемости лавин в зонах их зарождения на склонах исследуемых ледников (рис. 2). Результаты по леднику Западный Суёк приведены в работе [22]. Анализ полученных карт показал, что в районе исследования преобладают участки склонов с повторяемостью 30–50 лавин в 100 лет, далее идут участки с повторяемостью 50–70 лавин в 100 лет. При этом значения повторяемости выделялись пропорционально значениям матрицы Г.Г. Харитонova [12] и разбивались на интервалы. Выявлены участки склонов, где лавины предположительно сходят каждый год. Это позволяет сделать вывод, что окружающие ледники лавиноактивные склоны благоприятны для сноса лавинного снега и могут обеспечивать дополнительный источник лавинного питания ледника.

Анализ данных метеорологических наблюдений. Для оценки количества снега, вынесенного лави-

нами на рассматриваемые ледники, необходимы данные о максимальной толщине снежного покрова в заданный балансовый год в зонах зарождения снежных лавин. Для получения необходимых сведений были проанализированы данные с ближайших метеостанций (ГМС) (см. рис. 1), где проводятся систематические наблюдения: ГМС Кумтор-Тянь-Шань (3660 м над ур. моря) для ледников Западный Суёк и № 354; ГМС Кызыл-Суу (2555 м над ур. моря) для ледника Карабаткак.

В 2015/16 г. максимальная толщина снежного покрова на ГМС Кумтор-Тянь-Шань составила 28 см. По данным этой ГМС (2004–2017 гг.) построена кривая обеспеченности максимальной толщины снежного покрова. Установлено, что толщина снежного покрова 50%-й обеспеченности на ГМС Кумтор-Тянь-Шань составляет около 27 см. Таким образом, 2015/16 балансовый год по условиям снегонакопления был близок к 50%-й обеспеченности. Анализ данных ГМС Кызыл-Суу (2003–2015 гг.) осложнён отсутствием прямых наблюдением за толщиной снежного покрова. Установлено, что в холодный период (среднесуточная температура ≤ 0 °С) 2015/16 г. сумма осадков на ГМС составила 127 мм. По данным об осадках холодного периода на ГМС Кызыл-Суу построена кривая их обеспеченности, анализ которой показал, что холодный период 2015/16 г. по сумме осадков близок к 40%-й обеспеченности.

Исследуемые ледники Западный Суёк и № 354 и окружающие их склоны расположены выше ГМС Кумтор-Тянь-Шань, что делает невозможным прямой перенос данных. Установленных значений изменения снегозапасов с абсолютной высотой на исследуемую территорию нет, поэтому для определения толщины снега на склонах в районах ледников была использована номограмма изменения средних максимальных снегозапасов в долине р. Нарын в зависимости от абсолютной высоты [17]. Для пересчёта полученных значений (мм в.э.) в значение максимальной толщины снежного покрова (см) использована региональная формула, полученная для Внутреннего Тянь-Шаня [23]:

$$H_{\text{сп}} = 1,24W_{\text{max}}^{0,77},$$

где $H_{\text{сп}}$ — средняя максимальная толщина снежного покрова, см; W_{max} — средние максимальные снегозапасы, мм в.э.

На основе предложенного подхода в первую очередь была восстановлена максимальная толщина снежного покрова на абсолютной высоте ГМС Кумтор-Тянь-Шань, которая составила 26 см. Расчётное значение оказалось близким к фактическому (27 см), что позволяет применять зависимости из исследований [17, 23] в настоящей работе. Установлено, что в 2015/16 г. максимальная толщина снежного покрова в зонах зарождения лавин в окружении ледников Западный Суёк и № 354 составляла до 62 и 84 см соответственно.

Для получения данных о толщине снежного покрова на склонах в долине ледника Карабаткак использован градиент изменения осадков с абсолютной высотой, который для хр. Терскей Ала-Тоо составляет 32 мм/100 м [16]. Так как ледник Карабаткак и окружающие его лавиноактивные склоны расположены в широком высотном интервале, расчёт осадков был выполнен для трёх высотных уровней — 3600, 4100 и 4550 м. Продолжительность холодного периода восстановлена по данным о месячных температурах воздуха ГМС Кызыл-Суу с учётом их градиента по отношению к средней абсолютной высоте расположения зон зарождения лавин. Таким образом, рассчитанные по данным ГМС Кызыл-Суу значения осадков составили 490, 650 и 794 мм в.э. для трёх высотных уровней соответственно. Установлено, что в зимний период 2015/16 г. максимальная толщина снежного покрова в зонах зарождения лавин в долине ледника Карабаткак составляла от 146 до 212 см.

Оценка объёмов снежных лавин. Для расчёта объёмов лавин, как правило, используют формулы, в которых тем или иным способом связаны толщина снега и площадь зоны зарождения. Обеспеченность объёмов лавин соответствует обеспеченности принимаемых в расчёт характеристик снежности [24].

На основании вывода, что в 2015/16 балансовый год на исследуемых ледниках наблюдалась максимальная толщина снежного покрова 40–50%-й обеспеченности, в качестве зон зарождения на основе ранее полученных карт (см. рис. 2) были выделены участки лавиноактивных склонов, на которых лавины сходят чаще одного раза в два года (т.е. с повторяемостью более 50 лавин в 100 лет), установленные в результате работы инструмента-скрипта. Анализ разновременных ДДЗ (ортофото с БПЛА, Sentinel-2) показал, что в зонах выброса выделенных зон зарождения лавин в период полевых исследе-

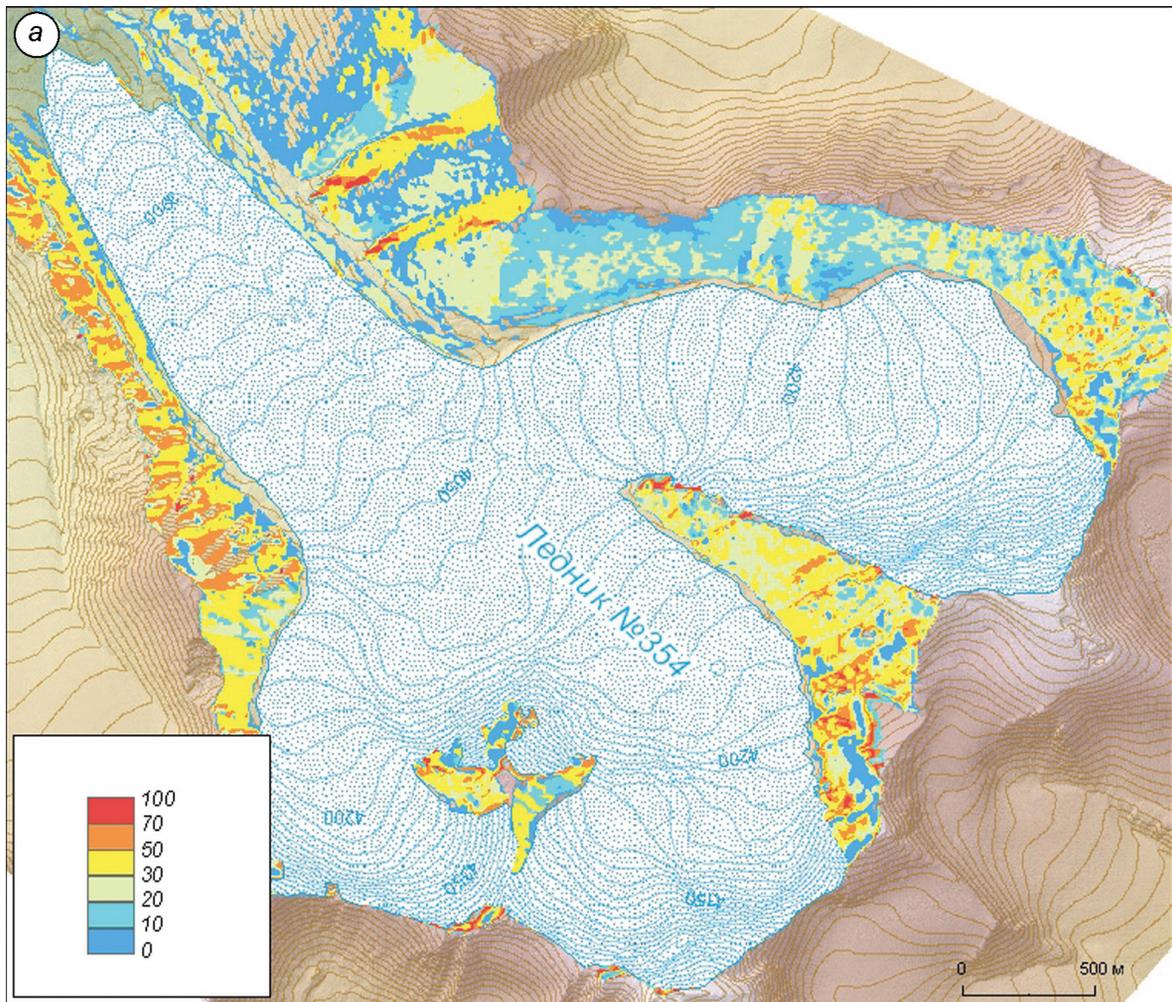


Рис. 2. Количество зарождений лавин (раз в 100 лет) в бассейнах исследуемых ледников:
a – № 354; *б* – Карататкак

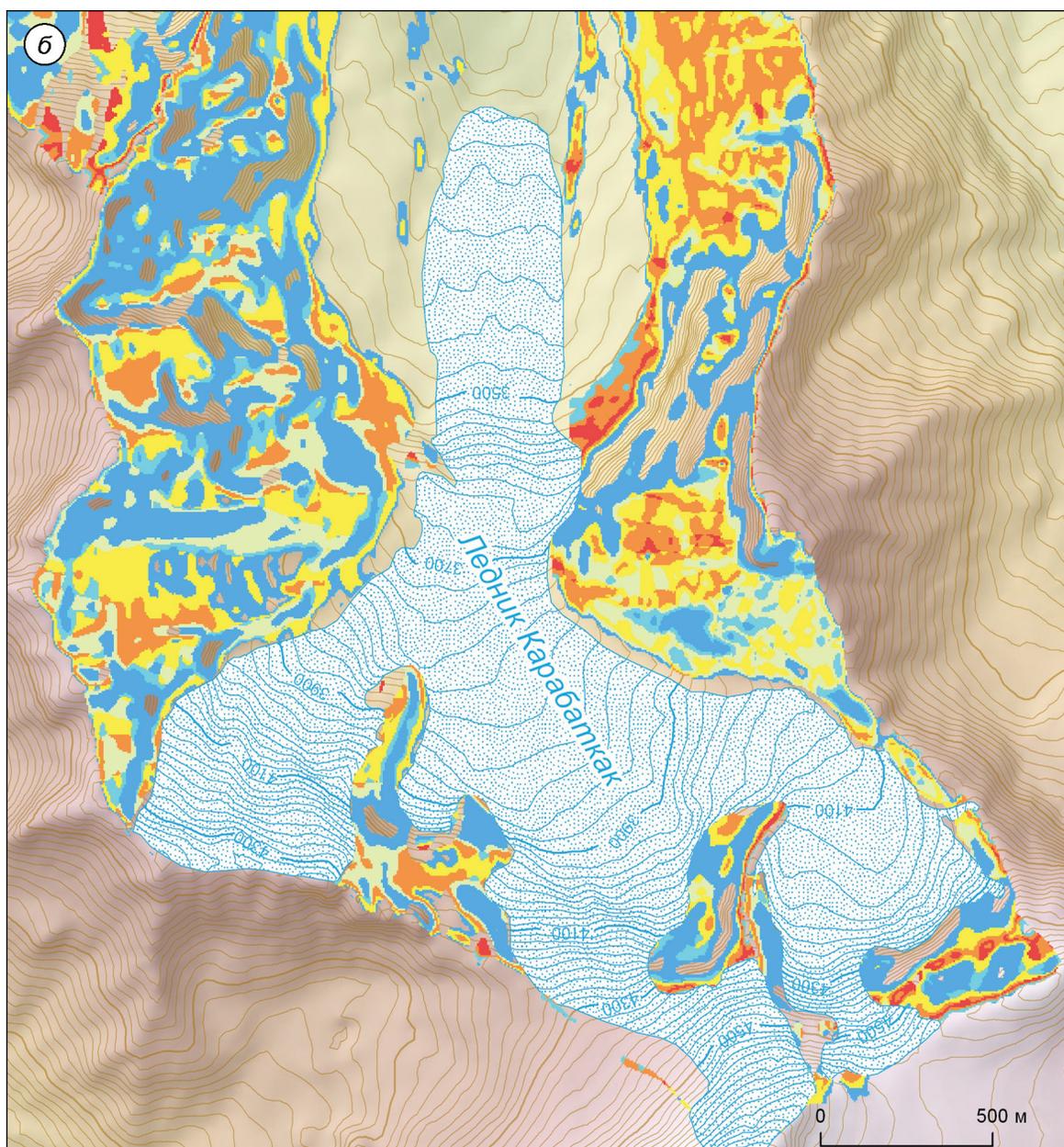
Fig. 2. Avalanches release return period in the avalanche release zones in the basins of the studied glaciers:
a – № 354; *б* – Karabatkak

дований в июле 2016 г. на ледниках Западный Суёк и № 354 наблюдались лавинные отложения, что качественно подтверждает действие выделенных в работе лавинных очагов в заданный балансый год.

Таким образом, в окружении исследуемых ледников были реконструированы зоны зарождения лавин (рис. 3), которые служили дополнительным источником питания ледников в 2015/16 балансый году: 12 зон для ледника Западный Суёк; 40 зон для ледника № 354; 26 зон для ледника Карататкак. Согласно уточнённым данным, одна из ранее [22] выделенных зон зарождения лавин (самая большая по площади и объёму) в районе ледника Западный Суёк в настоящей работе исключена из рассмотрения, так как оказалась расположена в границах ледника. Площадь

поверхности реконструированных зон зарождения лавин составила, м²: для ледника Западный Суёк – минимальная 2060, максимальная 22 570, средняя 10 520; для ледника № 354 – 1040, 21 300, и 7570 соответственно; для ледника Карататкак – 2790, 67 190 и 15 460 соответственно.

Для определения толщины снежного покрова, участвующего в лавинообразовании в районе исследования, можно использовать коэффициент захвата снежной толщи лавинами *k* из работы В.П. Благовещенского [24], значение которого определяется в зависимости от толщины снежного покрова и типа снежных лавин (сухие или мокрые). В районе исследования сухие лавины составляют до 100% [20, 23], что связано с низкими температурами воздуха весь год [16]. В связи с от-



сутствием данных фактических наблюдений за лавинами и толщиной их отрыва, а также с недоучётом воздействия метелевого переноса на характер снегонакопления в зонах зарождения лавин невозможно точно установить толщину снега, которая участвовала в формировании лавин зимой 2015/16 г. Поэтому расчёт объёмов снежных лавин выполнен по двум сценариям: с учётом ($k = 0,5$) и без учёта ($k = 1$) коэффициента захвата снежной толщи лавинами. Также, по причине отсутствия фактических данных, значение k было принято равным 0,5 для всех зон зарождения лавин независимо от расчётной толщины снега.

Последовательно для всех реконструированных зон зарождения (см. рис. 3) рассчитан объём (табл. 2) снежных лавин по формуле

$$V_{\text{сл}} = k H_{\text{сл}} F, \text{ м}^3,$$

где $H_{\text{сл}}$ – средняя максимальная толщина снежного покрова, м; F – площадь поверхности зоны зарождения лавины, м²; вариация значений определяется различными подходами к расчёту: $k = 0,5$ или $k = 1$ (см. табл. 2).

Предложенный подход определения максимальной толщины снежного покрова в зонах зарождения лавин может быть усовершенствован в

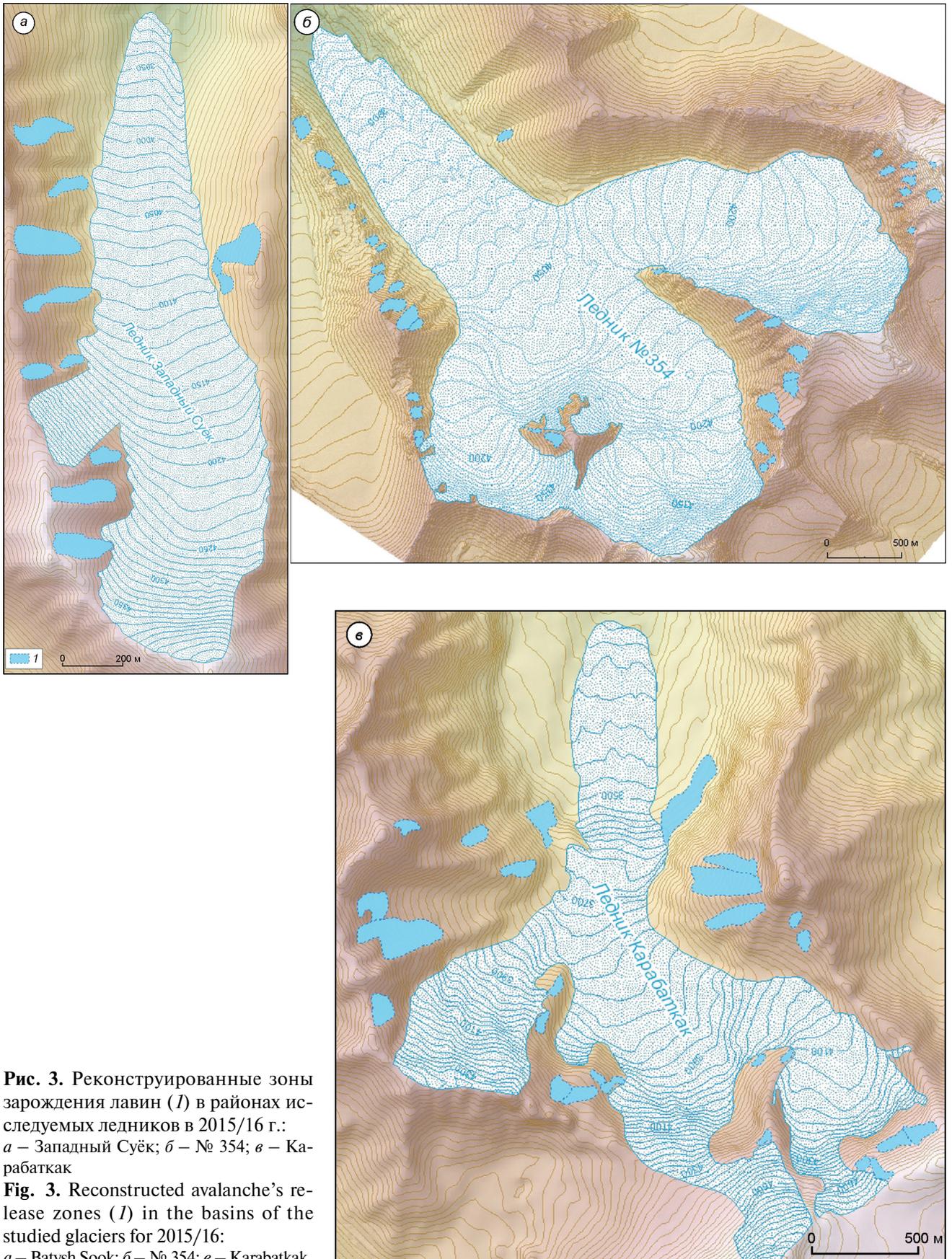


Рис. 3. Реконструированные зоны зарождения лавин (*I*) в районах исследуемых ледников в 2015/16 г.: *а* – Западный Суёк; *б* – № 354; *в* – Карабаткак

Fig. 3. Reconstructed avalanche's release zones (*I*) in the basins of the studied glaciers for 2015/16: *a* – Batysh Sook; *б* – № 354; *в* – Karabatkak

Таблица 2. Расчётный средний (числитель) и максимальный (знаменатель) объём $V_{сл}$, м³, единичных снежных лавин из реконструированных зон зарождения при разных значениях k

Ледник	$k = 0,5$	$k = 1$
Западный Суёк	3260 / 7000	6520 / 14 000
№ 354	3180 / 8950	6360 / 17 890
Карабаткак	13 150 / 60 690	26 290 / 121 380

будущем в результате учёта влияния метелевого переноса на характер снегонакопления в зонах зарождения лавин. Так, в случае ледника Карабаткак он составляет до 30% зимней аккумуляции [25].

Математическое моделирование снежных лавин. Оценить надёжность предложенной методики расчёта лавинного питания ледников можно на основе сравнения границ распространения смоделированных лавин из реконструированных зон зарождения с данными натурных наблюдений на ледниках. Для этого выполнено моделирование лавин из реконструированных зон зарождения в заданный 2015/16 балансный год в программе RAMMS [26–28]. Согласно работе [29], программу RAMMS можно применять для моделирования лавин разных объёмов на Западном Тянь-Шане без изменения предложенных в модели значений коэффициентов трения. В работе использована версия программы RAMMS (1.7.20).

На основе ранее полученных данных выполнено моделирование лавин из каждой зоны зарождения по двум сценариям. Исходными данными служили: ЦМР; зоны зарождения (см. рис. 3); толщина отрыва в зонах зарождения ($H_{сп}$; сценарий 1, $k = 0,5$; сценарий 2, $k = 1$); коэффициенты трения, рассчитанные в программе по умолчанию без изменений. По результатам моделирования реконструированы лавины, которые достигают поверхности ледников, а также воссозданы поля лавинной аккумуляции на исследуемых ледниках (рис. 4, сценарий 2) без выполнения снегомерных съёмок. Лавины, смоделированные как сходящие из части выделенных зон зарождения лавин, не достигли поверхности ледников, остановившись на склонах, и не внесли свой вклад в лавинное питание ледников.

Результаты моделирования (границы распространения лавин) были сопоставлены с данными фактических наблюдений в июле 2016 г. Установлено, что реконструированные в RAMMS лавинные отложения действительно наблюдались на исследуемых ледниках (Западный Суёк

и № 354) в период полевых работ (рис. 5). Сопоставление результатов моделирования лавин в RAMMS с данными полевых исследований показало их сходство по характеру распространения лавинных отложений, с учётом, что их границы сильно изменились в результате таяния, так как максимум снегонакопления в районе исследования наблюдается в конце мая или в начале июня.

Оценка доли лавинного питания в зимнем балансе массы ледников. В основу оценки доли лавинного питания в зимнем балансе массы исследуемых ледников в заданный балансный год положены данные о зимнем балансе массы B_w (мм в.э.) исследуемых ледников и результаты расчётов вероятных суммарных объёмов лавинного снега, вынесенного на ледники. Зимний баланс массы 2015/16 г., который по методике его определения должен включать в себя и лавинное питание, составил на леднике Западный Суёк – +214 мм в.э. [30], № 354 – +406 мм в.э., Карабаткак – +550 мм в.э. (<https://wgms.ch/>). Суммарные объёмы снежных лавин для каждого ледника пересчитаны в суммарную массу воды (средняя плотность снежного покрова принята равной 0,3 г/см³). Отношение суммарной массы воды и площади рассматриваемых ледников позволило получить значения лавинной аккумуляции V (мм в.э.) на ледниках. Заключительный этап – расчёт процентной доли лавинного питания v , %.

Полученные результаты и их обсуждение

Объём снега, перенесённого лавинами на ледник Западный Суёк, в 2015/16 г. составил от 39 тыс. м³ (при $k = 0,5$) до 78 тыс. м³ (при $k = 1$), что в пересчёте на площадь ледника составляет от 11 до 21 мм в.э. Доля лавинного питания в зимнем балансе массы ледника Западный Суёк в 2015/16 г., по уточнённым данным, равна $7,4 \pm 2,5\%$ (от 4,9% при $k = 0,5$ до 9,9% при $k = 1$). Объём снега, перенесённого лавинами на ледник № 354, составил от 127 тыс. м³ (при $k = 0,5$) до 254 тыс. м³ (при $k = 1$), что в пересчёте на площадь ледника составляет от 6 до 12 мм в.э. Доля лавинного питания в зимнем балансе массы ледника № 354 в 2015/16 г. равна $2,2 \pm 0,7\%$ (от 1,5% при $k = 0,5$ до 2,9% при $k = 1$). Объём снега, перенесённого лавинами на ледник Карабаткак, составил от 329 тыс. м³ (при $k = 0,5$) до 657 тыс. м³ (при $k = 1$), что в пересчёте на пло-

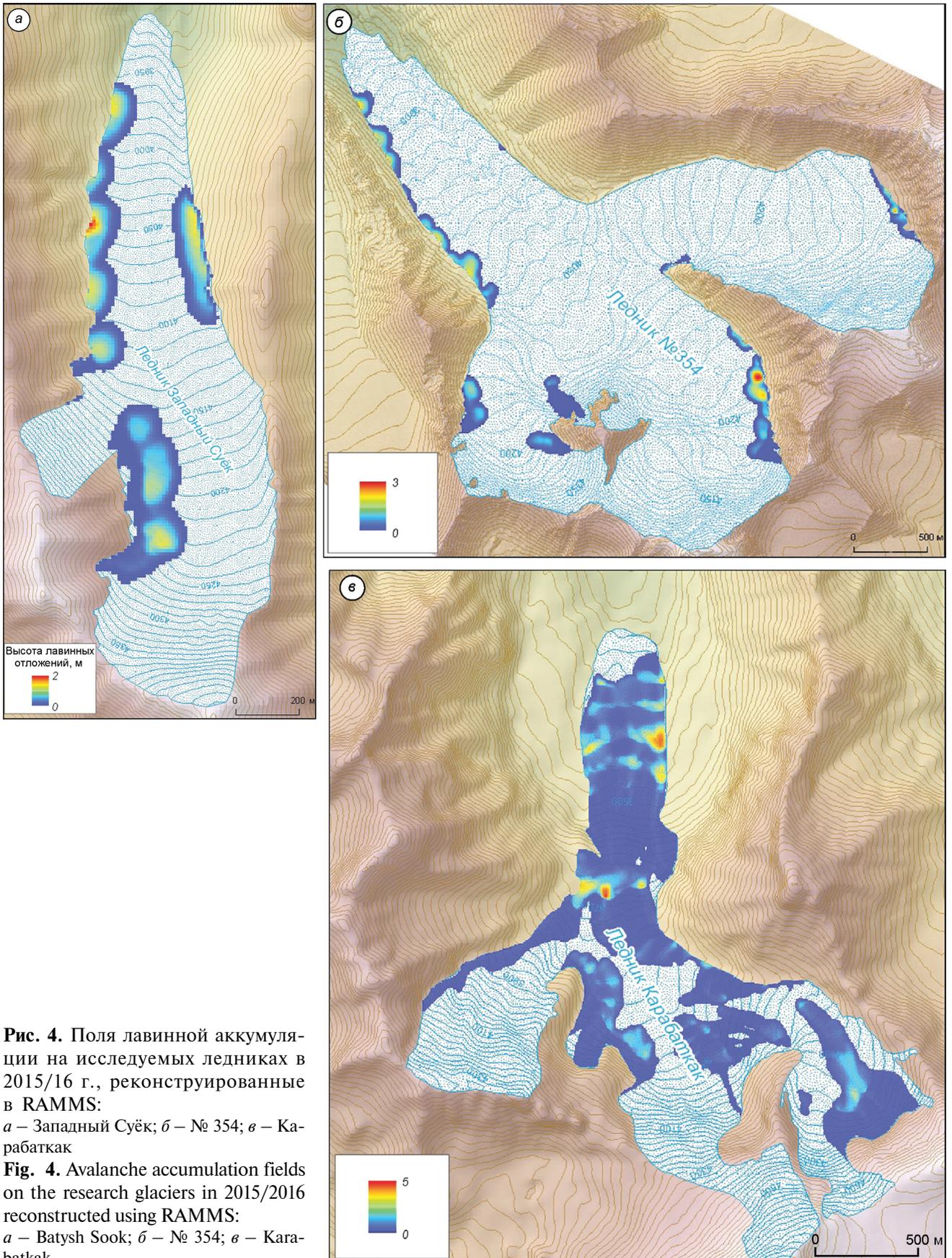


Рис. 4. Поля лавинной аккумуляции на исследуемых ледниках в 2015/16 г., реконструированные в RAMMS:

а – Западный Суёк; *б* – № 354; *в* – Карабаткак

Fig. 4. Avalanche accumulation fields on the research glaciers in 2015/2016 reconstructed using RAMMS:

a – Batysh Sook; *b* – № 354; *v* – Karabatkak

щадь ледника составляет от 39 до 79 мм. в.э. Доля лавинного питания в зимнем балансе массы ледника Карататкак в 2015/16 г. составила $10,8 \pm 3,6\%$ (от 7,2% при $k = 0,5$ до 14,6% при $k = 1$).

Точность полученных результатов можно оценить более детально при наличии данных прямых наблюдений за лавинами, однако уже сейчас отметим, что программу RAMMS можно применять для моделирования снежных лавин и оценки доли перенесённого ими снега на поверхность ледников. Расчёты показали, что лавинное питание на исследуемых долинных ледниках существенно меньше, чем естественное снегонакопление. Ледник № 354, имеющий наибольшую из всех рассматриваемых ледников площадь и наибольшее число реконструированных активных в 2015/16 г. зон зарождения лавин (при наименьшем их среднем единичном объёме), характеризуется самой низкой долей лавинного питания. Ледник Карататкак, окружённый наиболее выраженными в рельефе зонами зарождения лавин, имеет наибольшую долю лавинного питания, что хорошо согласуется с устными оценками специалистов с многолетним опытом работы в районе исследования. Рассчитанные доли лавинного питания для трёх исследуемых ледников достаточно хорошо согласуются с оценками других исследователей в разных горных районах [1, 3, 12]. Значения для трёх долинных ледников на Тянь-Шане имеют одинаковый порядок со значениями (среднее значение доли лавинного питания составляет 4,7%), полученными по результатам традиционных наземных детальных снегомерных съёмок на репрезентативном для Центрального Кавказа долинном леднике Джанкуат [15]. Отметим закономерное возрастание доли лавинного питания по мере роста отношения площади лавиноактивных склонов к площади ледника.

Для исследованных ледников Внутреннего Тянь-Шаня, окружённых склонами с небольшими перепадами высот и со значительной долей фирново-ледяной облицовки, полученные значения лавинной аккумуляции сопоставимы с погрешностями вычисления зимнего баланса массы ледников [30, 31]. Однако предложенную в работе методику можно использовать на других ледниках Тянь-Шаня, где вероятен иной вклад лавинного питания.

В перспективе намечается несколько путей развития данной темы: 1) автоматизация расчётных процессов — создание набора инструмен-

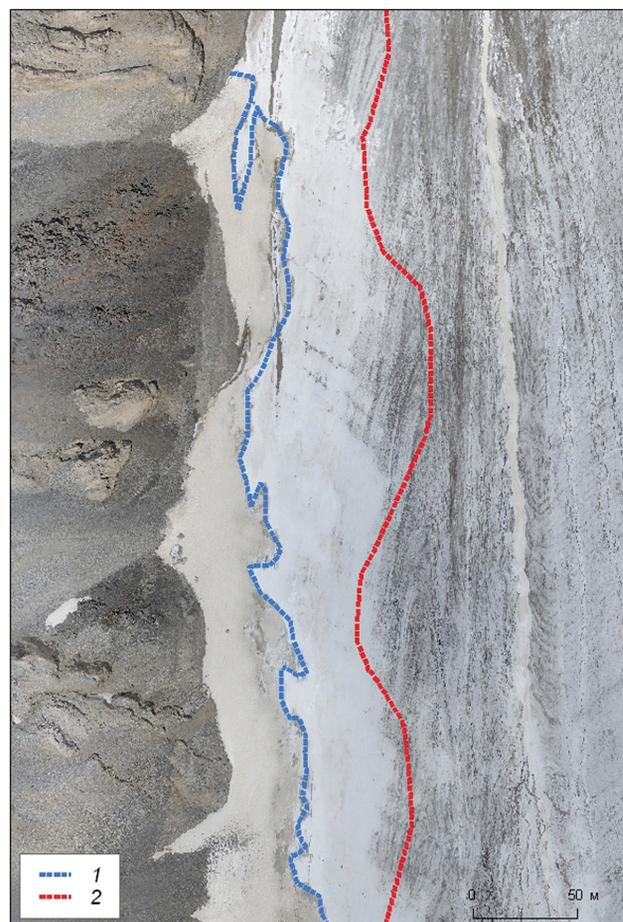


Рис. 5. Границы лавинных отложений:

1 — фактическая (июль, 2016 г.); 2 — реконструированная в RAMMS (максимум снегонакопления). Орографически левый край языка ледника Западный Суёк

Fig. 5. The outlines of avalanches depositions:

1 — actual (July 2016); 2 — reconstructed in RAMMS (maximum of snow accumulation). Left margin of the Batysh Sook glacier snout

тов геообработки для оценки лавинного питания ледников; 2) увеличение длины временного ряда, для которого рассчитаны доли лавинного питания, с целью установления закономерностей изменчивости роли снежных лавин в питании исследуемых ледников; 3) сбор полевых данных — снегомерные работы в зонах лавинной аккумуляции на ледниках для оценки точности получаемых результатов; 4) изучение дешифровочных свойств современных космических снимков для получения актуальных сведений о границах лавинных отложений на ледниках в течение лавиноактивного периода; 5) изучение влияния лавин на изменение баланса массы ледников в условиях изменяющегося климата.

Заключение

Применение предложенной методики, основанной на использовании методов геоинформационного картографирования и математического моделирования, позволило количественно оценить долю лавинного питания в зимнем балансе массы трёх ледников, расположенных на Внутреннем Тянь-Шане, без проведения детальных снегомерных наблюдений в зонах лавинной аккумуляции. Впервые реконструированы поля лавинной аккумуляции в крупном масштабе на трёх исследуемых ледниках Тянь-Шаня с использованием двухмерной модели движения снежных лавин RAMMS.

Данную методику можно применять на ледниках разных типов. С некоторыми уточнениями она может быть апробирована на ледниках в других горных районах, где есть данные о рельефе, где проводятся стандартные метеорологические наблюдения, а также есть данные о снеголавинном режиме. Разработанную методику оценки лавинного питания можно использовать в перспективе не только для оценки вклада лавин в питание ледников, но и для оценки влияния лавин на годовой ход стока горных рек. Разработанный скрипт (на основе зависимости из работы [12])

для определения повторяемости лавин в зонах их зарождения полезен для решения широкого круга практических задач по оценке лавинной активности и при планировании противолавинных мероприятий в процессе инженерных гидрометеорологических изысканий на Тянь-Шане.

Благодарности. Авторы выражают благодарность А.Ф. Глазовскому за консультации по теме исследования, В.В. Поповнину – за консультации по леднику Карабаткак, Саскиа Гиндраукс и Кристиану Хергарден – за предоставление ЦМР. Авторы признательны рецензентам за ценные замечания. Исследование выполнено в рамках гранта РФФИ № 18-35-00419 «Исследование вклада снежных лавин в питание ледников при недостатке данных прямых наблюдений».

Acknowledgments. We would like to thank A.F. Glazovsky for valuable advices on the research topic, V.V. Popovnin for valuable advices on Karabatkak glacier, Saskia Gindraux and Christian Hergarden for providing DEM. We would like to thank reviewers for valuable remarks. The research was supported by the RFBR grant № 18-35-00419 «Evaluation of snow avalanches contribution into glacier accumulation provided a lack of direct observational data».

Литература

1. Лосев К.С. Роль лавин в бюджете массы ледников // Материалы 3-ей Закавказской науч. конф. по изучению снежного покрова, снежных лавин и горных ледников Кавказа (Тр. Закавказского науч.-исслед. гидрометеорологич. ин-та. Вып. 20) / Ред. В.Ш. Цома. Л.: Гидрометеоздат, 1966. С. 178–182.
2. Hewitt K. Glacier Mass Balance I: Snowfall and Glacier Nourishment // *Glaciers of the Karakoram Himalaya: Glacial Environments, Processes, Hazards and Resources (Advances in Asian Human-Environmental Research)*. Dordrecht: Springer, 2014. P. 87–116. doi: 10.1007/978-94-007-6311-1_4.
3. Панов В.Д. Эволюция современного оледенения Кавказа. СПб.: Гидрометеоздат, 1993. 432 с.
4. Paterson W.S.B. Heat budget and climatology // *The physics of glaciers*. Third edition. Pergamon, 1994. P. 53–57. doi: 10.1016/B978-0-08-037944-9.50010-8.
5. Laha S., Kumari R., Singh S., Mishra A., Sharma T., Banerjee A., Nainwal H.C., Shankar R. Evaluating the contribution of avalanching to the mass balance of Himalayan glaciers // *Annals of Glaciology*.

References

1. Losev K.S. The avalanches role mass budget of glaciers. *Materialy 3-ey Zakavkazskoy nauchnoy konferentsii po izucheniyu snezhnogo pokrova, snezhnykh lavin i gornyykh lednikov Kavkaza (Trudy Zakavkazskogo nauchno-issledovatel'skogo gidrometeorologicheskogo instituta. Vyp. 20)*. Proc. of the 3rd Transcaucasian conf. on study of snow cover, snow avalanches and alpine glaciers of the Caucasus (Proc. of the Transcaucasian Scientific-Research Hydrometeorological Institute. Is. 20). Ed. V.Sh. Tsomaya. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1966: 178–182. [In Russian].
2. Hewitt K. Glacier Mass Balance I: Snowfall and Glacier Nourishment. *Glaciers of the Karakoram Himalaya: Glacial Environments, Processes, Hazards and Resources (Advances in Asian Human-Environmental Research)*. Dordrecht: Springer, 2014: 87–116. doi: 10.1007/978-94-007-6311-1_4.
3. Panov V.D. *Ehvolutsiya sovremennogo oledeneniya Kavkaza*. Evolution of the Modern Glaciation of the Caucasus. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1993: 432 p. [In Russian].
4. Paterson W.S.B. Heat budget and climatology. *The physics of glaciers*. Third edition. Pergamon, 1994: 53–57. doi: 10.1016/B978-0-08-037944-9.50010-8.

2017. V. 58. № 75. Pt. 2. P. 110–118. doi: 10.1017/aog.2017.27.
6. Hewitt K. Glacier change, concentration, and elevation effects in the Karakoram Himalaya, upper Indus basin // Mountain Research and Development. 2011. V. 31. № 3. P. 188–200. doi: 10.1659/MRD-JOURNAL-D-11-00020.1.
 7. Kuhn M. The mass balance of very small glaciers // Measurement and reconstruction of glacier mass balance. Pt. 1 (Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, V. 31 (1995)) / Ed. M. Kuhn. Innsbruck: Universitätsverlag Wagner, 1996. S. 171–179.
 8. Rödder T., Braun L.N., Mayer C. Accumulation rates and snow redistribution processes at the Ice Chapel, Berchtesgaden Alps // Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie. 2008. V. 42. № 2. Innsbruck: Universitätsverlag Wagner, 2010. S. 3–20.
 9. Mott R., Wolf A., Kehl M., Kunstmann H., Warscher M., Grünewald T. Avalanches and micrometeorology driving mass and energy balance of the lowest perennial ice field of the Alps: a case study // The Cryosphere. 2019. V. 13. № 4. P. 1247–1265. doi: 10.5194/tc-13-1247-2019.
 10. Glazirin G.E., Kodama Y., Ohata T. Stability of drifting snow-type perennial snow patches // Bulletin of Glaciological Research. 2004. V. 21. P. 1–8.
 11. Шетинников А.С. Ледники бассейна реки Пскем. Л.: Гидрометеоздат, 1976. 120 с.
 12. Харитонов Г.Г. Методика расчёта лавинного питания ледника // МГИ. 1979. Вып. 36. С. 155–159.
 13. Banerjee A., Shankar R. Estimating the avalanche contribution to the mass balance of debris covered glaciers // The Cryosphere. Discussions. 2014. V. 8. P. 641–657. doi: 10.5194/tcd-8-641-2014.
 14. 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.
 15. Поповнин В.В., Сергиевская Я.Е. Об обратной связи доли лавинного питания с аккумуляцией ледника // Лёд и Снег. 2018. Т. 58. № 4. С. 437–447. doi: 10.15356/2076-6734-2018-4-437-447.
 16. Оледенение Тянь-Шаня / Ред. М.Б. Дюргеров. М.: изд. ВИНТИ, 1995. 239 с.
 17. Атлас снежно-ледовых ресурсов мира / Ред. В.М. Котляков. М.: Институт географии РАН, НПП «Картография», 1997. 392 с.
 18. Максимов Н.В., Зябкин В.В., Барбат Ю.В. Лавиноопасные районы Киргизии. Фрунзе: Кыргызстан, 1975. 92 с.
 19. Северский И.В., Благовещенский В.П. Оценка лавинной опасности горной территории. Алмата: Наука, 1983. 220 с.
 20. География лавин / Ред. С.М. Мягков, Л.А. Канаев. М.: Изд-во МГУ, 1992. 332 с.
 5. Laha S., Kumari R., Singh S., Mishra A., Sharma T., Banerjee A., Nainwal H.C., Shankar R. Evaluating the contribution of avalanching to the mass balance of Himalayan glaciers. Annals of Glaciology. 2017, 58 (75, Pt. 2): 110–118. doi: 10.1017/aog.2017.27.
 6. Hewitt K. Glacier change, concentration, and elevation effects in the Karakoram Himalaya, upper Indus basin. Mountain Research and Development. 2011, 31 (3): 188–200. doi: 10.1659/MRD-JOURNAL-D-11-00020.1.
 7. Kuhn M. The mass balance of very small glaciers. Measurement and reconstruction of glacier mass balance. Pt. 1 (Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 31 (1995)). Ed. M. Kuhn. Innsbruck: Universitätsverlag Wagner, 1996: 171–179.
 8. Rödder T., Braun L.N., Mayer C. Accumulation rates and snow redistribution processes at the Ice Chapel, Berchtesgaden Alps. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 42/2 (2008). Innsbruck: Universitätsverlag Wagner, 2010: 3–20.
 9. Mott R., Wolf A., Kehl M., Kunstmann H., Warscher M., Grünewald T. Avalanches and micrometeorology driving mass and energy balance of the lowest perennial ice field of the Alps: a case study. The Cryosphere. 2019, 13 (4): 1247–1265. doi: 10.5194/tc-13-1247-2019.
 10. Glazirin G.E., Kodama Y., Ohata T. Stability of drifting snow-type perennial snow patches. Bulletin of Glaciological Research. 2004, 21: 1–8.
 11. Shchetinnikov A.S. Ledniki basseyna reki Pskem. Glaciers of the Pskem river basin. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1976: 120 p. [In Russian].
 12. Kharitonov G.G. Calculation methods of the avalanche nourishment of glaciers. Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy. Data of Glaciological Studies. 1979, 36: 155–159. [In Russian with English abstract].
 13. Banerjee A., Shankar R. Estimating the avalanche contribution to the mass balance of debris covered glaciers. The Cryosphere. Discussions. 2014, 8: 641–657. doi: 10.5194/tcd-8-641-2014.
 14. 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 with English abstract].
 15. 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. doi: 10.15356/2076-6734-2018-4-437-447. [In Russian].
 16. Oledeneniye Tian Shanya. Glaciation of Tien Shan. Ed. M.B. Dyurgerov. Moscow: VINITI, 1995: 239 p. [In Russian].
 17. Atlas snezhno-ledovykh resursov mira. World Atlas of Snow and Ice Resources. Ed. V.M. Kotlyakov. Moscow: Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, NPP «Kartografiya», 1997: 392 p. [In Russian and English].
 18. Maksimov N.V., Zybkin V.V., Barbat Yu.V. Lavinoopasnye rayony Kirgizii. Avalanches-endangered regions of Kirgizia. Frunze: Kyrgyzstan, 1975: 92 p. [In Russian].
 19. Severskiy I.V., Blagoveshchenskiy V.P. Otsenka lavinnoy opasnosti gornoy territorii. Assessment of avalanche danger

21. Petrakov D., Shpuntova A., Aleinikov A., Kääh A., Kutuzov S., Lavrentiev I., Stoffel M., Tutubalina O., Usabaliev R. Accelerated glacier shrinkage in the Ak-Shyirak massif, Inner Tien Shan, during 2003–2013 // Science of the Total Environment. 2016. V. 562. P. 364–378. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.03.162.
22. Lazarev A., Turchaninova A., Seliverstov Yu., Komarov A., Sokratov S. Estimation of accumulation from snow avalanches on the mountain glaciers // Proc. of the Intern. Snow Science Workshop (ISSW). Innsbruck, Austria, 2018. Innsbruck: ISSW, 2018. P. 488–492.
23. Severskiy I.V., Blagoveshchenskiy V.P., Severskiy S.I., Xie Z., Zhang Z., Hu R. Snow cover and avalanches in Tian Shan Mountains. Almaty: VAC Publishing House, 2000. 180 p.
24. Благовещенский В.П. Определение лавинных нагрузок. Алма-Ата: Гылым, 1991. 116 с.
25. Диких А.Н. Вопросы метелевого переноса снега на леднике Кара-Баткак // Гляциологические исследования на Тянь-Шане (Работы Тянь-Шаньской физико-географической станции. Вып. VI). Фрунзе: Изд-во АН Киргизской ССР, 1964. С. 41–45.
26. Bartelt P., Bühler Y., Christen M., Deubelbeiss Y., Salz M., Schneider M., Schumacher L. RAMMS::AVALANCHE User Manual. V. 1.7.0. Davos: SLF, 2017. iii+97 P.
27. Christen M., Bartelt P., Kowalski J. RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain // Cold Regions Science and Technology. 2010. V. 63. № 1–2. P. 1–14. doi: 10.1016/j.coldregions.2010.04.005.
28. Турчанинова А.С., Селиверстов Ю.Г., Глазовская Т.Г. Моделирование снежных лавин в программе RAMMS в России // ГеоРиск. 2015. № 4. С. 42–47.
29. Semakova E., Safronov V., Mamaraimov A., Nurtaev B., Semakov D., Bühler Y. Applying numerical snow avalanche simulations for hazard assessment in the Kamchik pass area, Uzbekistan // Proc. of the Intern. Snow Science Workshop (ISSW), Innsbruck, Austria, 2018. Innsbruck: ISSW, 2018. P. 701–704.
30. Kenzhebaev R., Barandun M., Kronenberg M., Chen Y., Usabaliev R., Hoelzle M. Mass balance observations and reconstruction for Batysh Sook Glacier, Tien Shan, from 2004 to 2016 // Cold Regions Science and Technology. 2017. № 135. P. 76–79. doi: 10.1016/j.coldregions.2016.12.007.
31. Kronenberg M., Barandun M., Hoelzle M., Huss M., Farinotti D., Azisov E., Usabaliev R., Gafurov A., Petrakov D., Kääh A. Mass-balance reconstruction for Glacier No. 354, Tien Shan, from 2003 to 2014 // Annals of Glaciology. 2016. № 57 (71). P. 92–101. doi: 10.3189/2016AoG71A032.
- of a mountain territory. Alma-Ata: Nauka, 1983: 220 p. [In Russian].
20. *Geografiya lavin*. Geography of avalanches. Eds.: S.M. Myagkov, L.A. Kanaev. Moscow: Moscow State University, 1992: 332 p. [In Russian].
21. Petrakov D., Shpuntova A., Aleinikov A., Kääh A., Kutuzov S., Lavrentiev I., Stoffel M., Tutubalina O., Usabaliev R. Accelerated glacier shrinkage in the Ak-Shyirak massif, Inner Tien Shan, during 2003–2013. Science of the Total Environment. 2016, 562: 364–378. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.03.162.
22. Lazarev A., Turchaninova A., Seliverstov Yu., Komarov A., Sokratov S. Estimation of accumulation from snow avalanches on the mountain glaciers. Proc. of the Intern. Snow Science Workshop (ISSW), Innsbruck, Austria, 2018. Innsbruck: ISSW, 2018: 488–492.
23. Severskiy I.V., Blagoveshchenskiy V.P., Severskiy S.I., Xie Z., Zhang Z., Hu R. Snow cover and avalanches in Tian Shan Mountains. Almaty: VAC Publishing House, 2000: 180 p.
24. Blagoveshchenskiy V.P. *Opreделение lavinnykh nagruzok*. The definition of avalanches loads. Almaty: Gylym, 1991: 116 p. [In Russian].
25. Dykikh A.N. Problems of snow storm transportation on the Kara-Batckak Glacier. *Glytsiologicheskie issledovaniya na Tyan'-Shane (Raboty Tyan'-Shan'skoY fiziko-geograficheskoy stantsii, VI)*. Glaciological Studies on Tien-Shan (The works of the Tien-Shan physical-geographical station, VI). Frunze: Izdatel'stvo Akademii Nauk Kirgizskoi SSR, 1964: 41–45. [In Russian].
26. Bartelt P., Bühler Y., Christen M., Deubelbeiss Y., Salz M., Schneider M., Schumacher L. RAMMS::AVALANCHE User Manual. V. 1.7.0. Davos: SLF, 2017: iii+97.
27. Christen M., Bartelt P., Kowalski J. RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain. *Cold Regions Science and Technology*. 2010, 63 (1–2): 1–14. doi: 10.1016/j.coldregions.2010.04.005.
28. Turchaninova A.S., Seliverstov Yu.G., Glazovskaya T.G. Modeling of snow avalanches using RAMMS in Russia. *Georisk*. Georisk. 2015, 4: 42–47. [In Russian].
29. Semakova E., Safronov V., Mamaraimov A., Nurtaev B., Semakov D., Bühler Y. Applying numerical snow avalanche simulations for hazard assessment in the Kamchik pass area, Uzbekistan. *Proceedings, International Snow Science Workshop (ISSW), Innsbruck, Austria, 2018*. Innsbruck: ISSW, 2018: 701–704.
30. Kenzhebaev R., Barandun M., Kronenberg M., Chen Y., Usabaliev R., Hoelzle M. Mass balance observations and reconstruction for Batysh Sook Glacier, Tien Shan, from 2004 to 2016. *Cold Regions Science and Technology*. 2017, 135: 76–79. doi: 10.1016/j.coldregions.2016.12.007.
31. Kronenberg M., Barandun M., Hoelzle M., Huss M., Farinotti D., Azisov E., Usabaliev R., Gafurov A., Petrakov D., Kääh A. Mass-balance reconstruction for Glacier No. 354, Tien Shan, from 2003 to 2014. *Annals of Glaciology*. 2016, 57 (71): 92–101. doi: 10.3189/2016AoG71A032.