

Реконструкция баланса массы ледника Сары-Тор по метеорологическим данным© 2021 г. В.В. Поповнин^{1*}, А.С. Губанов¹, Р.А. Сатылканов^{2,3}, Б.О. Эрменбаев²¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; ²Тянь-Шанский высокогорный научный центр при Институте водных проблем и гидроэнергетики НАН Кыргызской Республики, Бишкек, Республика Кыргызстан;³Научно-исследовательский центр экологии и окружающей среды Центральной Азии, Бишкек, Республика Кыргызстан
*begemotina@hotmail.com**Mass balance of the Sary-Tor Glacier reproduced from meteorological data**V.V. Popovnin^{1*}, A.S. Gubanov¹, R.A. Satylkanov^{2,3}, B.O. Ermenbayev²¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; ²Tien Shan alpine research centre, Institute of Water Problems and Hydropower, National Academy of Sciences, Bishkek, Kyrgyz Republic; ³Research Center for Ecology and Environment of Central Asia, Bishkek, Kyrgyz Republic

*begemotina@hotmail.com

Received December 30, 2019 / Revised October 13, 2020 / Accepted December 22, 2020

Keywords: glacier, Ak-Shiyrak, mass balance, reconstruction, monitoring, ablation, accumulation, air temperature, precipitation sum.**Summary**

Mass balance b_n is the most important indicator of a glacier evolution. However, after the decay of the USSR direct measurements of b_n performed in 1985–1989 in the Inner Tien Shan, including the Sary-Tor Glacier in Ak-Shiyrak Massif, had been desisted. As a result the available series of the data were limited 1989. Measurements in this area were renewed only in 2015. This paper is devoted to restoring the continuity of the mass-balance series over the period of the gap in measurements and extending this series down to 1929, i.e. to the beginning of regular meteorological observations on the reference HMS Tien Shan (3660 m a.m.s.l.). Accumulation was reconstructed using a linear relationship of b_n with the air temperature and precipitation sum. Reconstruction of ablation was based on its cubic relationship with the temperature (modified Krenke-Khodakov formula) or on two-parameter linear approximation using the air temperature and wind velocity. Thereby, the decade of direct instrumental measurements (1984/85–1988/89 and 2014/15–2018/19) resulted in deriving and analyzing continuous 90-year-long series of annual values of b_n and its constituents, analytical type of referent glacio-meteorological equations being assumed unchanged in time. Reconstruction for the Sary-Tor Glacier reveals a dominant trend towards the mass loss with rare and short-time episodes of retarding the negative tendencies. The comparison made with the long series of mass balance of other glaciers in Asia indicates a certain degree of synchronicity, which is slightly disturbed in recent years: the degradation of Sary Tor Glacier tends to progress more intensively. Conclusions about its evolution are particularly relevant in connection with the assumption about the impact of the Kyrgyz-Canadian gold mining company «Kumtor Gold Company» on local ecosystems against the background of its interest in expanding the mining zone to the bowels of the Earth under the tongue of this glaciological object.

Citation: Popovnin V.V., Gubanov A.S., Satylkanov R.A., Ermenbayev B.O. Mass balance of the Sary-Tor Glacier reproduced from meteorological data. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2021. 61 (1): 58–74. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673421010071.

Поступила 30 декабря 2019 г. / После доработки 13 октября 2020 г. / Принята к печати 22 декабря 2020 г.

Ключевые слова: ледник, Ак-Шийрак, баланс массы, реконструкция, мониторинг, абляция, аккумуляция, температура воздуха, сумма осадков.

По длинным рядам метеоданных ГМС Тянь-Шань восстановлены годовые значения аккумуляции, абляции и баланса массы долинного ледника Сары-Тор в массиве Ак-Шийрак. В основе поиска зависимостей – прямые гляциологические измерения в 1980-е и 2010-е годы. Реконструкция позволила заполнить пробел между этими периодами и продлить ряд до 1930 г. Результаты сравниваются с более ранними реконструкциями, а также с длинными балансовыми рядами опорных ледников Азии.

Введение

Пресная вода – важный ресурс для человечества, но большая её часть (95%) находится в твёрдом состоянии в ледниках. Страны, имеющие оледенение на своей территории, не могут

не заботиться о том, чтобы рационально распоряжаться тем богатством, которая дала им природа. Эволюцию ледниковых систем характеризует важнейший гляциологический параметр – баланс массы b_n . В советское время мониторинг баланса массы проводился на многих ледниках

Средней Азии, но после распада СССР в Киргизии он был прекращён повсеместно. Однако в последнее время внимание к ледникам здесь существенно возросло из-за вовлечения их в самые разные социально-экономические сферы. В стране проходят горячие дебаты по поводу проекта Закона «О ледниках Кыргызской Республики», нацеленного на создание законодательной основы для защиты оледенения от хозяйственной деятельности и рационального управления водно-ледовыми ресурсами. После более чем 20-летнего перерыва возобновлены инструментальные масс-балансовые программы. В итоге Кыргызская Республика в настоящее время стоит, пожалуй, на первом месте в постсоветском пространстве по интересу к гляциологии: ледников с регулярными измерениями баланса массы здесь в несколько раз больше, чем в России.

Один из опорных объектов, история исследования которого была заложена ещё в советское время, – ледник Сары-Тор. Воссоздать непрерывность его балансового ряда, ликвидировав пробел в наблюдениях косвенными расчётами, а также пролонгировать эту серию на несколько десятилетий в прошлое – задачи настоящей работы.

Проблема косвенного удлинения в прошлое временной серии b_n стоит перед каждым гляциологическим объектом, исследования на котором предполагается использовать для долгосрочного прогнозирования. Обычно это связано либо с практическими запросами хозяйственной деятельности в окрестностях ледника, либо с научными целями там, где планируется проводить и в дальнейшем поддерживать длительный мониторинг для облегчения выявления причинно-следственных связей и закономерностей эволюции местного оледенения. Необходимость выведения длинной и непрерывной серии баланса массы для ледника Сары-Тор обусловлена двумя этими мотивами, суть которых будет подробно рассмотрена далее.

Ранее неоднократно предлагались разные версии восстановления годовых значений баланса массы ледников в прошлом. При постановке подобных задач выбор методов для ретроспективного пролонгирования серий балансовых наблюдений чаще всего сводится к привлечению длинных рядов наблюдений на ближайших сетевых метеостанциях (ГМС), пока

в изменение режима ледника не вмешиваются факторы катастрофического преобразования рельефа. Вопросами масс-балансовых реконструкций именно для этого участка Тянь-Шаня ранее занимались многие учёные, среди которых – В.Н. Михаленко, С.Н. Ушнурцев, С.С. Кутузов и др., поэтому сравнение их выводов с результатами настоящего исследования будет непременно сделано в соответствующем разделе статьи.

Смысл составления нового варианта серии реконструированных значений баланса массы b_n состоит в естественном стремлении к уточнению косвенных оценок за счёт использования исходных данных более длинного референтного ряда (с учётом последних лет прямых наблюдений) и обновления базовых гляциометеорологических соотношений. Отметим, что появление новых версий балансовых реконструкций для одного и того же объекта по мере увеличения массива входных данных в процессе продолжающегося мониторинга следует воспринимать как естественное приближение к научной истине, поэтому такую процедуру следует не только одобрять, но и всячески рекомендовать.

Объект и история исследований

Ледник Сары-Тор находится в западном секторе массива Ак-Шийрак (рис. 1, а, б), во Внутреннем Тянь-Шане между хребтами Терскей Ала-Тоо и Какшаал-Тоо. Ак-Шийрак представляет собой три субмеридиональных хребта, возвышающиеся на 1200–1500 м над высокогорными сыртами и более чем на 5000 м над ур. моря. Массив служит водоразделом крупнейших рек региона – Сары-Джаз и Нарын. По мнению Л.Г. Бондарева [1], в 1963 г. оледенение Ак-Шийрака относилось к горно-покровному типу, однако, по нашему мнению, более правильная формулировка М.Б. Дюргерова [2], который характеризовал его как компактный массив, слабо расчленённый в области питания, где ледники контактируют между собой. Они существуют в условиях низких температур и небольшого количества атмосферных осадков. Выше 4000 м более 92% годовых осадков выпадает в твёрдом виде [3], что отражается на процессах льдообразования и на режиме составляющих баланса массы – аккумуляции и абляции.

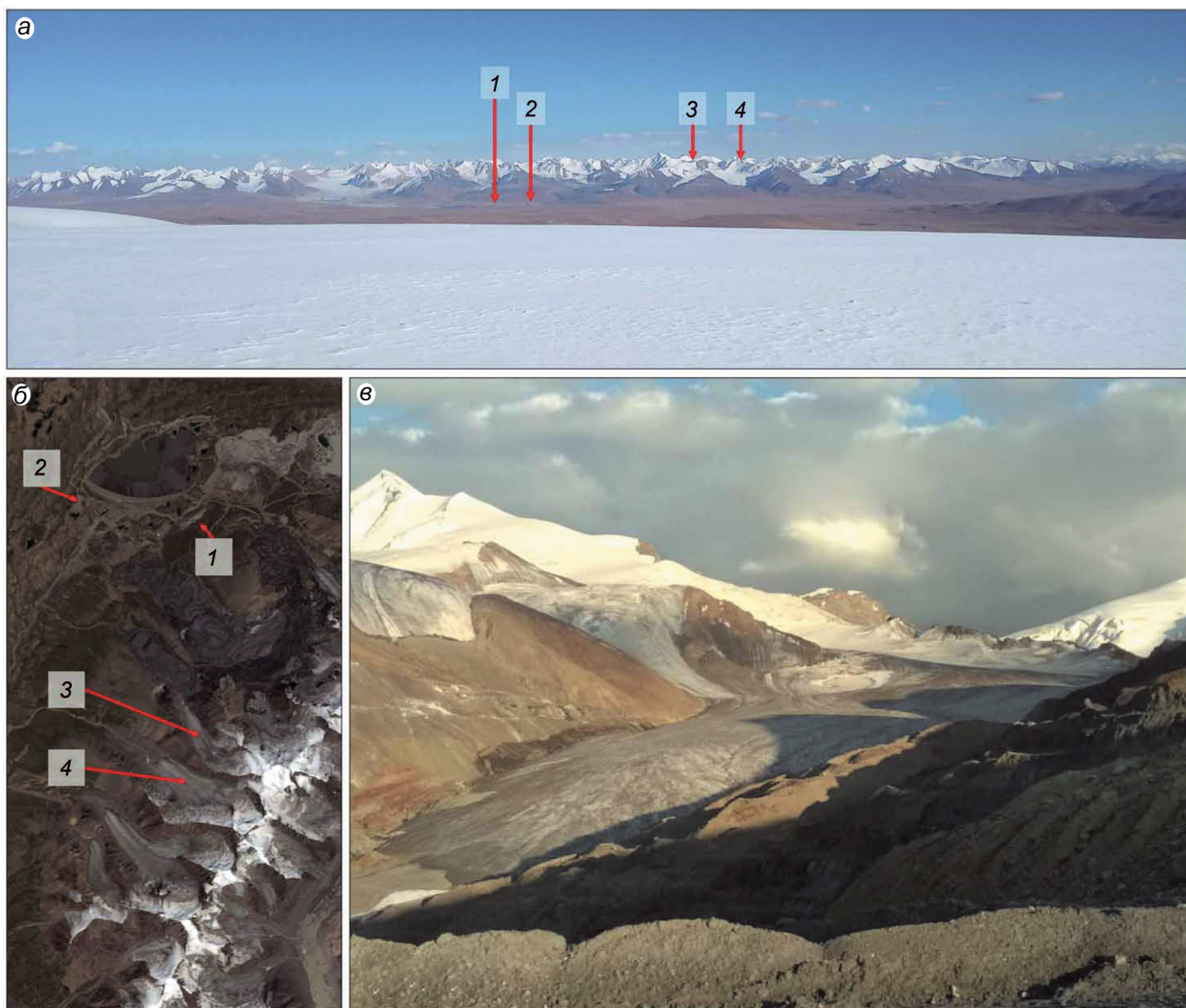


Рис. 1. Район исследований.

Общий вид массива Ак-Шийрак (1 – пос. Кумтор, 2 – ГМС Тянь-Шань, 3 – ледник Сары-Тор, 4 – ледник Борду) с ледника Григорьева (а) (фото Б.О. Эрменбаева 22.09.2019 г.) и из космоса (Sentinel-2 от 11.08.2019) (б); в – ледник Сары-Тор (фото Б. Жакеева 08.08.2019 г.)

Fig. 1. Research area.

Panoramic view of Ak-Shiyrak Massif (1 – Kumtor settlement, 2 – Tien Shan weather station, 3 – Sary-Tor Glacier, 4 – Bordu Glacier) from Grigoryev Glacier (a) (photo taken by B.O. Ermenbayev, 22.09.2019) and from outer space (Sentinel-2 from 11.08.2019) (b); в – Sary-Tor Glacier (photo taken by B. Zhakeyev, 08.08.2019)

Долинный ледник Сары-Тор (см. рис. 1, в) расположен в верховьях одноимённой реки и имеет северо-западную экспозицию. В его морфологическом строении выделяются несколько незначительных зон с трещинами и висячие притоки, а область питания представляет собой однокамерный цирк. На 2018 г., по данным с космоснимка Sentinel-2 и ЦМР High Mountain Asia, длина ледника составляла примерно 4 км, площадь в ортогональной проек-

ции – $2,64 \pm 0,01$ км² (включая висячий приток), а нижняя точка языка находилась на высотной отметке 3950 ± 10 м.

В 1980-х годах в ходе серии экспедиций Института географии АН СССР под руководством М.Б. Дюргерова был получен короткий пятилетний ряд баланса массы, тепла и воды Сары-Тора за 1984/85–1988/89 балансовые годы [2]. Однако позже, с 1990-х годов, ледник оказался на концессионной территории кыргызско-канад-

ской золотодобывающей компании Kumtor Gold Company, поэтому возобновление мониторинга произошло только через 25 лет сотрудниками Института водных проблем и гидроэнергетики НАН Кыргызской Республики при участии и научной координации со стороны Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. С тех пор было проведено пять полноценных полевых сезонов, позволивших инструментально определить значения баланса массы и его компонентов за 2014/15–2018/19 гг.

Представление данных отвечало стратиграфической отчётной системе. Зимний баланс ежегодно измерялся по итогам площадных снегосъёмов (май–июнь) по всей поверхности ледника до изогипсы 4400 м на 60–105 пунктах; пройдено также 4–5 шурфов для денсиметрии. Расходный компонент определялся по сети абляционных реек (7–12 штук), обслуживаемых для снятия отсчётов и перебуривания 3–4 раза за сезон, который заканчивался в сентябре после прекращения таяния и начала накопления порций снега новой зимы. Все эти данные отражены в глобальной базе данных Всемирной службы мониторинга ледников WGMS [4]. Тем не менее, для решения многих научных задач (определение долгосрочных трендов, отдельных эволюционных этапов, скрытых гармоник и пр.) двух не связанных между собой серий вещественного баланса 1985–1989 и 2015–2019 гг. явно недостаточно. Необходимо было восстановить непрерывность ряда его годовых значений.

Методика

При составлении реконструкции баланса массы b_n ледника Сары-Тор основывались на актуалистическом подходе, т.е. восстановлении годовых значений компонентов b_n по выявленным на современном этапе их связям с важнейшими метеодетерминантами на ближайшей ГМС при вынужденном теоретическом допущении о неизменности этих связей во времени. Это допущение – самое слабое место принятой концепции, поскольку устойчивость базовых корреляций вряд ли сохраняется при изменении геометрии ледника. Критические стрелы относительно актуалистических построений уже были выпущены [5, 6], поэтому доверительный временной

интервал реконструкции естественным образом был ограничен некоторым неопределённым, но не очень продолжительным периодом, в течение которого колебания размеров ледника не приводят к сколько-нибудь значимым изменениям локального горно-ледникового климата. Вместе с тем актуалистический подход имеет преимущество перед альтернативным – прямым аналитическим подходом – за счёт независимости от непростой логики кернового бурения и трактовки его итогов. Этим объясняется обилие как локальных [например, 7–14], так и обобщающих [15–17] работ, базирующихся на его идеологии. Простота расчётной схемы обеспечивает приемлемую аппроксимацию ключевых характеристик состояния ледника без привлечения точных, но сложных математических алгоритмов, наподобие тех, которые недавно были применены для прогнозирования эволюции ледника Сары-Тор [18]. Уязвимость же главного допущения о правомерности распространения опорных соотношений в прошлое отчасти снижается в данном конкретном случае из-за замены экстраполяции на интерполяцию, поскольку эти соотношения выводятся по общей выборке, состоящей из исходных данных, полученных за оба этапа: и 1985–1989, и 2015–2019 гг.

Для реконструкции баланса массы ледника Сары-Тор использованы данные ГМС Тянь-Шань, учреждённой в 1929 г. и удалённой от него на 6 км. Однако ряд наблюдений неоднороден: в 1996 г. ГМС была перенесена на 1 км к югу, ближе к леднику, а наблюдения были автоматизированы. С помощью корреляционных уравнений с ГМС Сары-Таш ($H = 3159$ м) ряды метеонаблюдений до и после переноса были гомогенизированы. Такая процедура обеспечивает возможность воссоздать, а затем использовать единую серию наблюдений, что позволяет не только заполнить пробел (1989/90–2013/14 гг.) в прямых наблюдениях, но и косвенно продлить ряд баланса массы ледника Сары-Тор в прошлое до 1930 г.

Выбор оптимальных метеорологических детерминантов, позволяющих установить наивысшую корреляцию с индексами баланса массы ледника, включает в себя подбор наиболее подходящих метеоэлементов и оптимального календарного отрезка для осреднения подобранных предикторов. Из-за бинарного характера b_n в природе нет ни одного элемента, который мог бы коррелировать с

ним напрямую. Косвенная оценка баланса обычно основывается на раздельном вычислении его компонентов: а) *аккумуляции* (зимнего баланса b_w) – по сумме осадков X , по среднезимним значениям температуры воздуха и атмосферного давления или по их производным и комбинациям; б) *абляции* (летнего баланса b_l) – по среднелетней температуре воздуха t (или сумме положительных температур, когда есть такая информация с суточным разрешением) и коротковолновой радиации B_k .

Статистические эксперименты с архивами ГМС Тянь-Шань показали, что самая высокая корреляция измеренных величин аккумуляции с их данными достигается в случае не одно-, а двухпараметрической аппроксимации, а именно: если, помимо традиционного использования суммы зимних (сентябрь–июнь) осадков X , вторым аргументом выводимого соотношения служит температура воздуха t за сентябрь–май. Введенное на базе таких положений уравнение

$$Ak = -1685 + 1,69 \sum_{IX}^VI X - 114 t_{IX-V}, \quad (1)$$

в котором аккумуляция Ak и X выражены в мм в.э., а t – в °C, характеризуется стандартным отклонением 89 мм и коэффициентом корреляции $R = 0,77$ ($R^2 = 0,59$); его линейность проверена и подтверждена критерием Фишера.

Косвенный расчёт абляции Ab обычно характеризуется лучшей корреляцией по сравнению с приходной составляющей баланса, так как основу этой связи составляют строгие законы теплофизики. К сожалению, для ледника Сары-Тор поиск оптимальной двухпараметрической зависимости $Ab = f(t, B_k)$ невозможен, поскольку на ГМС Тянь-Шань регулярные наблюдения за балансом коротковолновой радиации отсутствуют. Паллиативную связь Ab с единственной переменной – температурой воздуха t удаётся найти, модифицируя общеизвестную формулу Кренке–Ходакова [19] в плане подбора локальных значений коэффициента и свободного члена при неизменности аналитического вида функции (кубического):

$$Ab = 5,3(0,5 t_{V-VIII} + 6,3)^3; R = 0,92; R^2 = 0,85. \quad (2)$$

Здесь температура осреднена за май–август и приведена от абсолютной высоты 3660 м, на которой расположена ГМС Тянь-Шань (обозначим этот параметр $t_{TШ}$), к средневзвешенной высоте ледника Сары-Тор (t), снятой с гипсографической кривой по состоянию на

2016 г. и совпадающей с изогипсой 4340 м. Данное приведение базировалось: а) на вертикальном температурном градиенте для Внутреннего Тянь-Шаня $dt/dh = -0,005$ °C/м [3]; б) на вертикальном перепаде $\Delta H = 680$ м; в) на температурном скачке $\Delta t_l = -1,7$ °C [2] на границе лёд/грунт, откуда следует:

$$t = t_{TШ} - \Delta H(dt/dh) - \Delta t_l = t_{TШ} - 4,9. \quad (3)$$

Несмотря на высокие значения коэффициентов корреляции R и детерминации R^2 соотношения (2) для $Ab(t)$, точность косвенной реконструкции абляции ещё больше возрастает в случае двухпараметрической линейной регрессии, в которой вторым аргументом несколько неожиданно выступает скорость ветра V , м/с. Физическая суть влияния последнего состоит в том, что нередко возникающие здесь в летний сезон холодные кататические ветры с внутренних областей массива Ак-Шийрак перемешивают воздух над поверхностью ледника, тормозя абляцию, поэтому зависимость интенсивности таяния от этой переменной обратная: чем сильнее ветер, тем меньше абляция. Подбор оптимальных периодов осреднения (летние месяцы указаны в подстрочном индексе) приводит к итоговому эмпирическому уравнению

$$Ab = 1487 + 231,6 t_{V-VIII} - 70,3 V_{V-IX}, \quad (4)$$

где показатели тесноты связи увеличиваются до $R = 0,95$ и $R^2 = 0,90$ при стандартном отклонении 130 мм. Поэтому в реконструкции предпочтение было отдано уравнению (4). Отметим, что в 1994–2004 гг. скорость ветра наблюдениями на ГМС Тянь-Шань не фиксировалась, поэтому для расчёта абляции этой декады использовалось соотношение (2). Баланс массы b_n восстанавливался как алгебраическая сумма формул (1) и (4) в общем случае либо формул (1) и (2) для 1994–2004 гг.

Результаты

Полученная в итоге непрерывная 35-летняя (1984/85–2018/19) серия баланса массы b_n (рис. 2, а) показала значительное преобладание отрицательных значений при средней величине -530 ± 130 мм в.э. Они были положительными только дважды: в 1986/87 (+220 мм) и 1992/93 гг. (+90 мм), причём последнее было

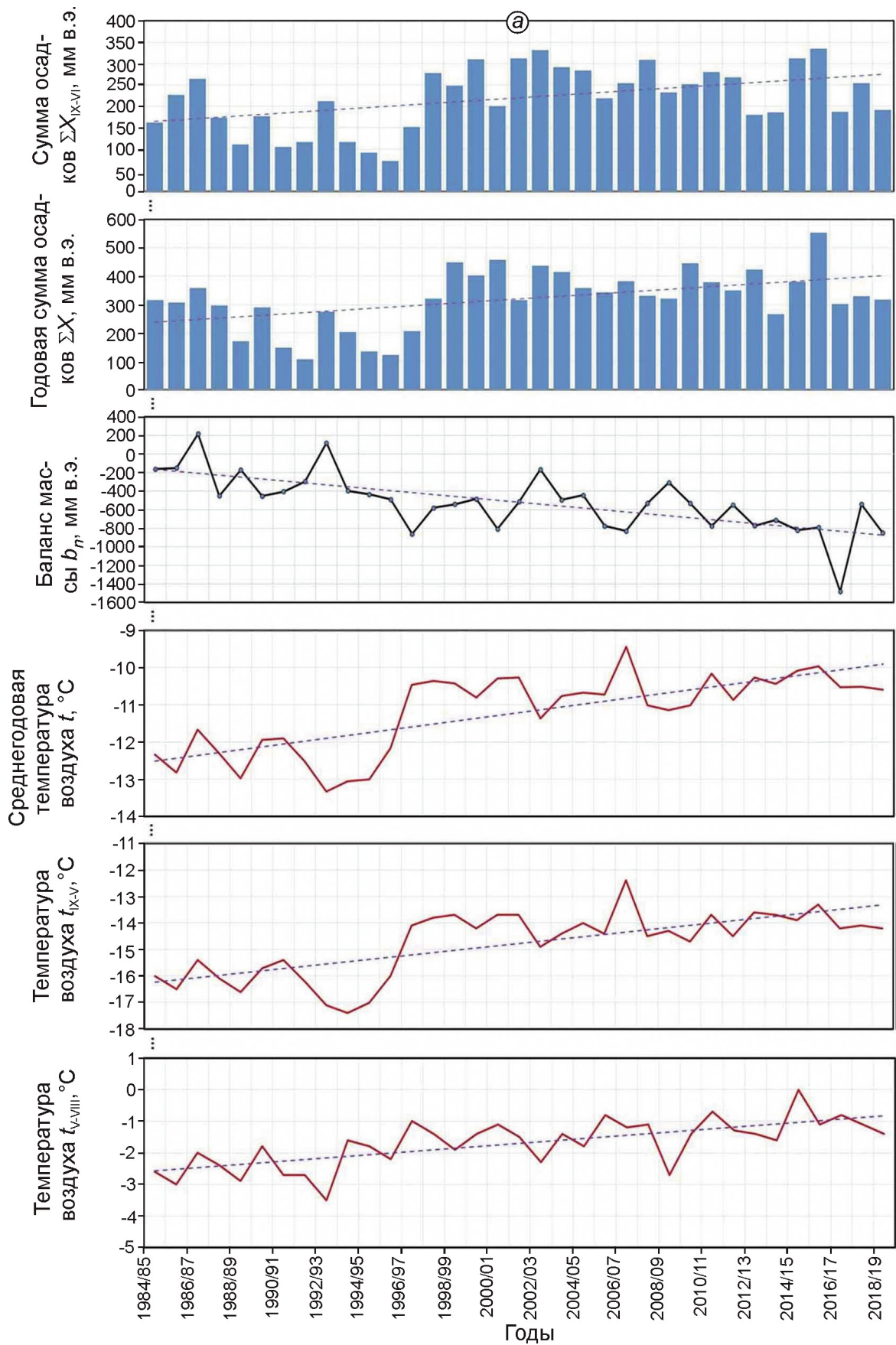
положительным чисто символически. Такие неблагоприятные особенности баланса отражают долгосрочные тенденции к росту основных климатических детерминантов — осадков и температуры воздуха как в годовом, так и в сезонном исчислении. Между двумя пятилетками прямых измерений сумма годовых осадков возросла на 30%, а зимних (сентябрь—июнь) — на 26%, или на 70 мм, т.е. с позиций прихода вещества ледникам стало лучше. Этому же способствовало, исходя из аналитического вида формулы (1), и потепление зим: средняя температура за сентябрь—май увеличилась на 2,2 °С (с -16,1 до -13,9 °С) — примерно так же, как и среднегодовая (с -12,4 до -10,3 °С). Однако в итоге весь положительный эффект превосходило (см. рис. 2, а) повышение температуры за период абляции: за май—август оно составило пусть меньшую величину по абсолютным величинам (с -2,6 до -1,0 °С), но для ледника более значимую в бюджетном смысле. Иными словами: тренды определяющих метеоэлементов оказывают противоположный балансовый эффект на состояние ледника. Господство отрицательных значений b_n при прогрессирующем увеличении со временем их модулей показывает явно бóльшую важность термического фактора для текущей эволюции ледника Сары-Тор: даже некоторое возрастание увлажнённости в массиве Ак-Шийрак не в состоянии компенсировать негативные для баланса оледенения следствия потепления.

Неплохое соответствие (см. рис. 2, б) между измеренными и расчётными величинами баланса массы (с коэффициентом их взаимной корреляции $R = 0,83$ и детерминации $R^2 = 0,69$) и выполненная реконструкция позволили объединить в единый 35-летний ряд два временных отрезка фактических наблюдений, разделённые пропуском в 25 лет. Значения баланса массы за этот период колебались в диапазоне от -1480 до +220 мм в.э. в первую очередь за счёт аккумуляции, коэффициент вариации которой ($C_v = 0,33$) превышал этот же параметр для абляции ($C_v = 0,25$). Такое соотношение необычно, поскольку для многих других ледников Тянь-Шаня (например, Туюксу [20], Голубина [21], Абрамова [22]) свойственна обратная картина, которую М.Б. Дюргеров [23] считал характерной прежде всего для ледников континентального климата, а А.Н. Кренке [24] — вообще для боль-

шинства наблюдаемых ледников в мире. В данном случае проявилась степень выраженности экстремумов аккумуляции, обеспечившая несколько нетипичный перевес коэффициента вариации приходного компонента.

Приведённая здесь схема расчёта по формулам (1)–(4) со всеми её допущениями была заимствована и для восстановления баланса массы ледника Сары-Тор с момента основания ГМС Тянь-Шань в 1929 г. Реконструкция (таблица, рис. 3) показывает устойчивую потерю массы за весь 90-летний период: восстановлено только десять случаев положительного баланса. В 1930–50-х годах баланс массы b_n колебался у нулевых значений, показывая слабую отрицательную динамику. В 1950–70-х годах он оставался по-прежнему слабо отрицательным, но вырос разброс пиковых значений. Общая однородность ряда была осложнена только кратким эпизодом относительного улучшения состояния ледника в конце 1950-х годов. Подобная смена устойчивых темпов деградации на кратковременное относительное улучшение состояния ледников согласуется с данными М.Б. Дюргерова [25], который отмечал схожие тенденции на ряде других ледников Азии в то же время. С 1970-х годов темпы деградации оледенения ускоряются, причём после 1990 г. особенно сильно. В настоящее время ледник деградирует в два раза быстрее, чем в середине прошлого века.

По сравнению с проанализированным здесь заключительным 35-летним периодом среднее значение баланса массы за весь 90-летний срок гораздо менее отрицательно (-305 ± 155 мм в.э.), а экстремумы не изменились (+220 мм в 1986/87 г. и -1480 мм в 2016/17 г.). Совокупный баланс в слое воды составил около -27 500 мм за 90 лет. Рис. 3 показывает причину господствующей эволюционной тенденции. Для аккумуляции с 1930 г. отмечается тенденция к небольшому понижению годовых значений, несмотря на небольшой рост количества осадков за тот же период. Ход абляции демонстрирует несколько иную динамику: с 1930 по 1980 г. значения летнего баланса медленно, но неуклонно росли (т.е. становились в среднем всё более отрицательными) вместе с температурой воздуха, однако со второй половины 1980-х годов отмечается значительное ускорение роста расходной составляющей. Таким образом, отмеченные для заклю-



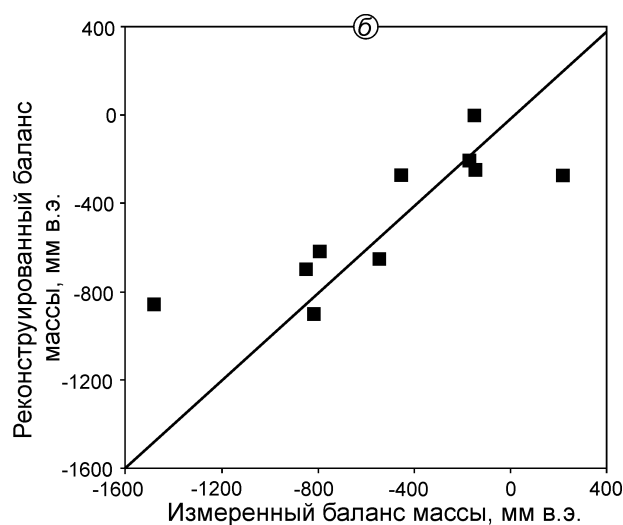


Рис. 2. Условия существования ледника Сары-Тор в 1985–2019 гг.:

a – восстановленная серия баланса массы b_n , годовые и сезонные суммы осадков ΣX и средняя за год и сезоны аккумуляции и абляции температура воздуха t на ГМС Тянь-Шань с линиями трендов; *b* – сходимость между фактически измеренными (абсциссы) и косвенно рассчитанными по метеоэлементам (ординаты) величинами баланса массы, мм в.э.

Fig. 2. Budget conditions of the Sary-Tor Glacier in 1985–2019:

a – reconstructed series of mass balance b_n , annual and seasonal precipitation sums ΣX and air temperature t at Tien Shan weather station averaged over balance years and seasons of accumulation and ablation with correspondent trendlines; *b* – compatibility between annual mass balance values, mm w.e., directly measured (absciss axis) and indirectly computed by means of meteorological elements (ordinate axis)

чительного этапа и прослеживаемые по рис. 2 черты современных изменений в состоянии ледника Сары-Тор были заложены ещё в 1960–70-е годы, но стали особенно заметно проявляться после 1990 г. в связи с устойчивым увеличением расходной составляющей баланса, реагирующей на заметный рост температуры воздуха.

Обсуждение

Возобновлённые с 2014/15 г. полевые наблюдения на леднике Сары-Тор сразу позволили установить существенные различия в масс-балансовых характеристиках по сравнению с первым периодом инструментальных измерений, предпринятых группой М.Б. Дюргерова [2] в 1980-х годах. Выведенные отклонения неравнозначны для разных статей вещественного ба-

ланса. Если приходный компонент за минувшую пятилетку уменьшился на треть относительно среднего значения исходной серии в 490 мм, то абляция возросла гораздо сильнее – более чем на 94%. В результате произошёл значительный сдвиг баланса массы ледника в сторону более отрицательных величин: –896 мм против прежнего значения –140 мм. Климатические условия для таких перемен весьма очевидны: летнее потепление на 2,3 °C за последние 25 лет.

С.Н. Ушнурцев [26] ранее уже предпринимал попытку реконструировать баланс массы ледника Сары-Тор, исходя из материалов наблюдений 1980-х годов и выведенной тогда же связи b_n с высотой границы питания, которая была косвенно рассчитана по записям ГМС Тянь-Шань. Позже, используя практически идентичную расчётную схему, но привлекая данные ГМС Каракол и потому немного видоизменив коэффициенты, эту реконструкцию продлил до 2005 г. С.С. Кутузов [27]. Сопоставление их результатов с данными таблицы показывает (рис. 4) неплохую синфазность обеих серий b_n для периода, предшествовавшего первому этапу полевых работ 1985–1989 гг. Причина редких рассогласований в отдельные отрезки времени (например, в 1937–1938 или 1978–1980 гг.) связана, по-видимому, с тем, что наша реконструкция использовала другие метеопредикторы, отсутствовавшие в расчётных схемах у С.Н. Ушнурцева и С.С. Кутузова, аномалии которых в те годы и могли вызвать различия в балансе. Обновлённый с тех пор алгоритм расчёта, представленный в настоящей статье, приводит к заметно меньшей межгодовой вариации параметра и несколько заниженным значениям. Тот же вывод следует и из сравнения нынешней реконструкции для ледника Сары-Тор и реконструкции для всей ледниковой системы массива Ак-Шийрак [11]. И в этом случае (см. рис. 4) серия ледника Сары-Тор обнаруживает систематически более негативный баланс массы, что как раз вполне логично из-за более низкого гипсометрического диапазона отдельного долинного ледника относительно всего оледенения массива, в центральную часть которого входят высокогорные и почти платообразные ледники.

Кумулятивные значения восстановленного баланса массы ледника Сары-Тор за разные отрезки времени можно сравнить с аналогичными величинами, полученными при физико-мате-

Реконструкция показателей внешнего массообмена ледника Сары-Тор для 1930–2019 гг.: метеодетерминанты для формул (1), (2), (4) и восстановленные/измеренные годовые значения баланса массы и его компонентов*

Балансовый год	Сумма осадков (сентябрь–июнь) Σ_{VI-IX} , мм		Средняя температура воздуха, °С		Средняя скорость ветра (май–сентябрь), V_{V-IX} , м/с	Аккумуляция A_k , мм в.э.	Абляция A_b , мм в.э.	Баланс массы b_p , мм в.э.
	сентябрь–май t_{IX-V}	май–август t_{V-VIII}						
1929/30	156	-16,3	-2,3			450	730	-280
1930/31	177	-15,7	-2,9			410	620	-210
1931/32	202	-15,1	-3,4			390	520	-130
1932/33	184	-16,8	-1,8			550	840	-290
1933/34	252	-17,4	-3,9			730	450	280
1934/35	221	-17,4	-3,1			680	570	110
1935/36	198	-18,4	-3,0			750	590	160
1936/37	171	-17,0	-3,1			550	570	-20
1937/38	163	-16,8	-2,9			520	620	-100
1938/39	181	-17,3	-2,6			600	680	-80
1939/40	230	-16,0	-3,1			540	580	-40
1940/41	217	-16,0	-2,4			510	730	-220
1941/42	137	-15,2	-1,8			290	840	-550
1942/43	202	-16,3	-3,0			520	610	-90
1943/44	193	-16,4	-1,9			510	830	-320
1944/45	243	-18,3	-2,4			820	720	100
1945/46	228	-15,6	-3,5			480	510	-30
1946/47	159	-15,5	-2,6			360	670	-310
1947/48	233	-17,0	-2,9			650	620	30
1948/49	217	-16,4	-2,8			560	640	-80
1949/50	228	-17,5	-2,2			700	760	-60
1950/51	175	-17,7	-3,2			630	570	60
1951/52	210	-16,2	-3,0			520	610	-90
1952/53	220	-15,6	-1,9			470	840	-370
1953/54	219	-16,8	-4,0			600	440	160
1954/55	195	-17,2	-2,8			610	640	-30
1955/56	301	-16,2	-2,1			680	780	-100
1956/57	204	-16,7	-3,7			570	480	90
1957/58	218	-16,6	-3,7			590	480	110
1958/59	235	-16,7	-3,3			620	550	70
1959/60	220	-15,9	-2,8			500	640	-140
1960/61	163	-16,3	-1,6			460	910	-450
1961/62	236	-16,4	-2,5			590	700	-110
1962/63	226	-15,6	-2,4			490	720	-230
1963/64	232	-16,8	-3,9			630	440	190
1964/65	179	-15,7	-2,5			410	690	-280
1965/66	224	-16,1	-2,6			530	680	-150
1966/67	314	-17,0	-2,8			790	630	160
1967/68	180	-16,6	-2,2			520	760	-240
1968/69	240	-15,9	-2,5			540	700	-160
1969/70	202	-16,4	-2,9			530	620	-90
1970/71	255	-15,6	-2,3			530	730	-200
1971/72	201	-15,5	-3,5			420	640	-220

1972/73	237	-16,1	-2,0			560	800	-240
1973/74	216	-16,2	-2,9			540	630	-90
1974/75	205	-17,3	-3,1			640	580	60
1975/76	161	-15,8	-2,6			400	680	-280
1976/77	152	-16,8	-2,1			490	790	-300
1977/78	154	-15,5	-1,2			350	990	-640
1978/79	188	-16,6	-3,0		-	530	610	-80
1979/80	221	-15,2	-1,6			430	900	-470
1980/81	307	-14,6	-2,2			510	770	-260
1981/82	193	-17,6	-2,7			660	650	10
1982/83	176	-17,6	-2,2			620	750	-130
1983/84	145	-16,1	-1,4			410	940	-530
1984/85	162	-16,0	-2,6		3,3	470	630	-160
1985/86	227	-16,5	-3,0		2,7	490	640	-150
1986/87	265	-15,4	-2,0		3,3	630	410	220
1987/88	173	-16,1	-2,4		3,4	470	920	-450
1988/89	111	-16,6	-2,9		3,2	400	570	-170
1989/90	177	-15,7	-1,8		2,2	410	950	-540
1990/91	105	-15,4	-2,7		1,5	250	780	-530
1991/92	116	-16,2	-2,7		2,0	370	750	-380
1992/93	212	-17,1	-3,5		2,3	630	540	90
1993/94	116	-17,4	-1,6			500	910	-410
1994/95	91	-17,0	-1,8			410	870	-460
1995/96	72	-16,0	-2,2			260	770	-510
1996/97	152	-14,1	-1,0			180	1070	-890
1997/98	278	-13,8	-1,4			360	960	-600
1998/99	248	-13,7	-1,9		-	300	860	-560
1999/00	310	-14,2	-1,4			470	970	-500
2000/01	200	-13,7	-1,1			260	1050	-790
2001/02	312	-13,7	-1,5			280	950	-670
2002/03	332	-14,9	-2,3			420	770	-350
2003/04	291	-14,4	-1,4			300	970	-670
2004/05	284	-14,0	-1,8		2,3	330	930	-600
2005/06	218	-14,4	-0,8		1,9	330	1190	-860
2006/07	254	-12,4	-1,2		1,8	100	1100	-1000
2007/08	309	-14,5	-1,1		2,4	370	1090	-720
2008/09	232	-14,3	-2,7		1,7	360	760	-400
2009/10	252	-14,7	-1,4		1,9	470	1060	-590
2010/11	280	-13,7	-0,7		2,0	370	1200	-830
2011/12	268	-14,5	-1,3		1,8	430	1080	-650
2012/13	180	-13,6	-1,4		1,9	180	1050	-870
2013/14	186	-13,7	-1,6		2,4	200	980	-780
2014/15	312	-13,9	0,0		2,3	420	1240	-820
2015/16	335	-13,3	-1,1		1,9	420	1210	-790
2016/17	186	-14,2	-0,8		2,9	180	1660	-1480
2017/18	254	-14,1	-1,1		3,0	330	870	-540
2018/19	191	-14,2	-1,4		2,9	290	1140	-850

*Годы с прямыми измерениями выделены жирным курсивом. Прочерки – отсутствие наблюдений.

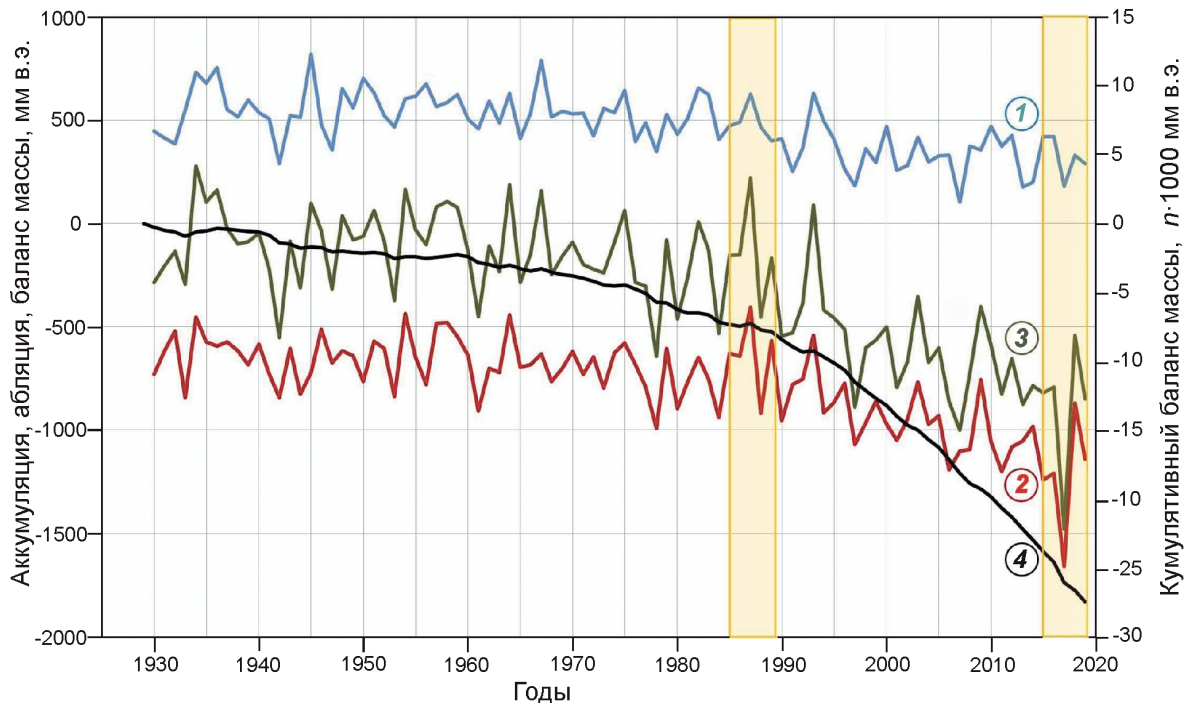


Рис. 3. Итоги масс-балансовой реконструкции ледника Сары-Тор за 1930–2019 гг., мм в.э. Левая шкала: годовые величины аккумуляции (1), абляции (2) и баланса массы (3), измеренные в 1985–1989 и 2015–2019 гг. (выделены цветом) и реконструированные значения. Правая шкала: кумулятивный баланс массы (4)

Fig. 3. Results of mass-balance reconstruction of the Sary-Tor Glacier during 1930–2019, mm w.e. Left scale: annual values of accumulation (1), ablation (2) and mass balance (3): measured in 1985–1989 and 2015–2019 (pasted time spans) and reconstructed values. Right scale: cumulative mass balance (4)

матическом моделировании или геометрически путём оцифровки ЦМР по разновременным космическим снимкам. В этом случае установлены большие расхождения. Например, модель таяния Е.П. Рец и др. [28] оценивает средний баланс за период 2004–2015 гг. в -410 мм в.э., тогда как данные таблицы за тот же интервал приводят к более отрицательному значению -790 мм. Наоборот, для 1975–2008 гг. Т. Печонка и Т. Болых [29] получили средний баланс -510 ± 250 мм в.э., тогда как по данным таблицы он не столь отрицателен (-420 ± 150 мм). Разумеется, причина расхождений может быть в погрешности реконструкции по метеоданным, однако не менее значимые ошибки возможны из-за субъективности при дешифрировании границы ледника, которая частично зависит и от разрешения снимков.

В непосредственной близости от ледника Сары-Тор расположен другой наблюдаемый с позиции баланса массы ледник № 354. Оба ледника принадлежат к одному морфологическому типу, но ледник № 354 почти в три раза круп-

нее по площади ($6,4$ против $2,6$ км²) и оканчивается почти на 200 м ниже ледника Сары-Тор. Для ледника № 354 выполнена палеорекострукция [30]. В модели использованы данные по осадкам и температуре воздуха за период с 1 октября 2003 г. по 30 сентября 2014 г. на ГМС Тянь-Шань-Кумтор (3660 м), расположенной в 14 км от ледника. Сравнимые балансовые ряды ледников содержат как реконструированные, так и измеренные значения b_n , которые показывают некоторую синфазность. Коэффициент вариации C_v этих рядов одинаков ($0,57$ у ледника Сары-Тор и $0,60$ у ледника № 354), а взаимная корреляция характеризуется коэффициентом $R = 0,54$. Явные различия наблюдаются преимущественно для аномальных сезонов (например, 2010/11, 2015/16, 2016/17 гг.). Вместе с тем различия между вектором эволюции ледников в эти года вполне можно сгладить ошибками методов (± 240 – 310 мм в.э. для ледника № 354 и ± 130 – 150 мм в.э. для ледника Сары-Тор). Сами реконструированные серии показывают единый тренд развития ледников, отличаясь пре-

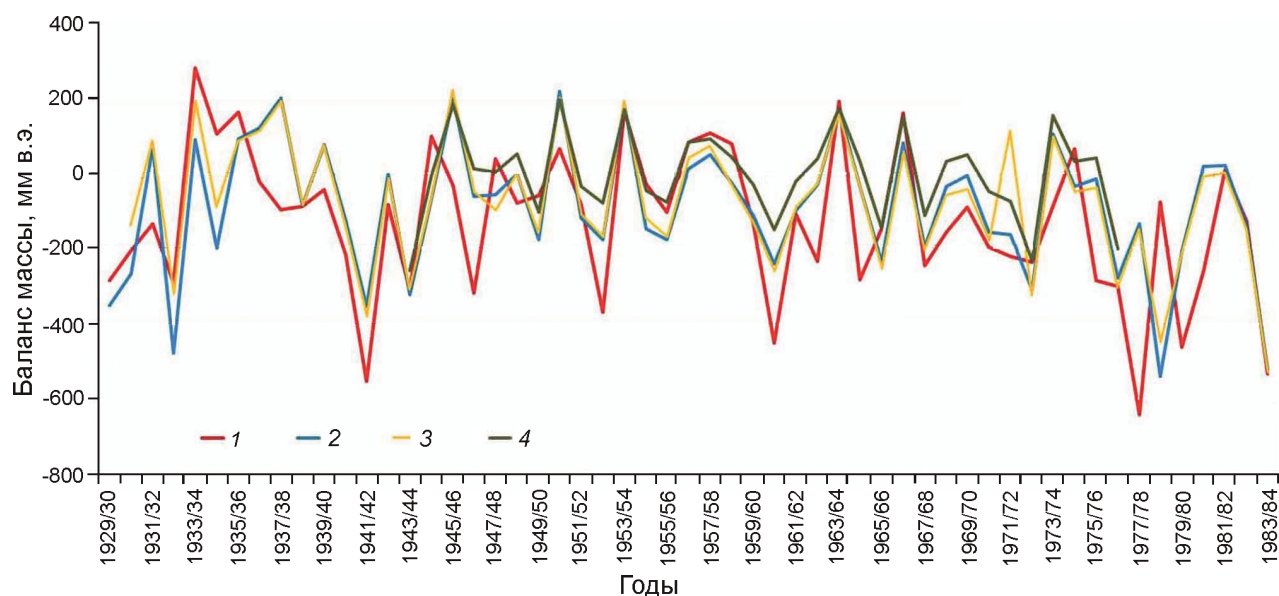


Рис. 4. Сравнение масс-балансовых реконструкций за период до начала развёртывания первых инструментальных измерений 1930–1984 гг.

Ледник Сары-Тор: 1 – данная реконструкция (по таблице); 2 – по [26]; 3 – по [27]; 4 – оледенение массива Ак-Шийрак, по [11]

Fig. 4. Comparison of mass balance reconstructions over the period 1930–1984 prior to the start of instrumental measurements.

Sary-Tor Glacier: 1 – current reconstruction (see Table); 2 – after [26]; 3 – after [27]; 4 – Ak-Shiyrak glacial system, after [11]

жде всего величиной значений. Кумулятивный баланс массы за 2004–2018 гг. подтверждает разную скорость деградации двух ледников. Среднее годовое значение b_n за этот период составило $-0,69$ м в.э. у ледника Сары-Тор и $-0,45$ м у ледника № 354, т.е. ледник Сары-Тор теряет массу почти в 1,5 раза быстрее, чем ледник № 354. Суммарно за выбранный 14-летний период ледник Сары-Тор потерял 10,4 м в.э., а ледник № 354 – «всего» 6,7 м.

Соседние ледники в одинаковых климатических условиях обнаруживают разные темпы деградации в отдельно взятом году, и этому есть несколько возможных объяснений. Во-первых, ледник № 354, судя по всему, более устойчив к климатическим изменениям. Положительная разность оледенения у него выше, чем у ледника Сары-Тор, как и высота расположения бассейнов питания (и их площадь). Во-вторых, ледник № 354 отделён от ледника Борду более высоким гребнем, чем ледник Сары-Тор от ледника Давыдова, что даёт дополнительное время нахождения тени на леднике. Третья причина – дискуссионная – усиление теплового и физического воздействия на ледник Сары-Тор со стороны Кумторского рудника. Этот вопрос требует от-

дельного исследования, но пыль с предприятия вполне может служить акселератором процессов таяния. Таким образом, два ледника, расположенных в одной части массива Ак-Шийрак в 4–5 км друг от друга, показывают в целом одинаковые эволюционные тенденции. Результаты реконструкции на обоих ледниках различаются незначительно. Правда, ледник № 354 демонстрирует заметно бóльшую устойчивость, чем ледник Сары-Тор.

Сравнение реконструкции баланса массы ледника Сары-Тор с другими азиатскими ледниками, обеспеченными длинными рядами прямых инструментальных измерений (рис. 5), с целью поиска признаков синхронности колебаний обнаруживает непростую картину. Такой поиск может быть предпринят только для части периода реконструкции – с середины 1950-х годов, поскольку примерно тогда были развёрнуты первые непосредственные масс-балансовые полевые наблюдения на ледниках Тянь-Шаня (да и всего континента в целом): Туюксу и Кара-Баткак в СССР и леднике № 1 в Китае [4]. По темпам убыли массы за последние 60 лет ледник Сары-Тор не сильно отличается от остальных ледников Центральной Азии.

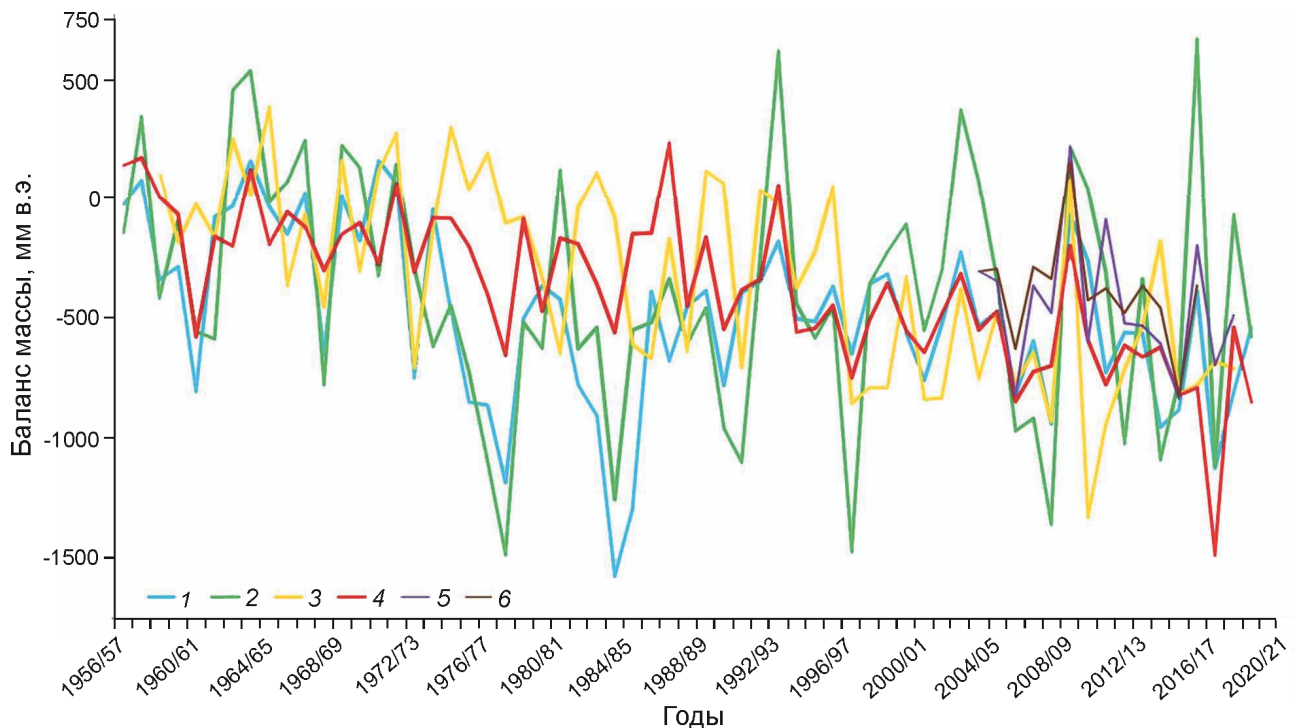


Рис. 5. Баланс массы основных опорных ледников Тянь-Шаня за 1957–2019 гг., мм в.э.:

1 – Кара-Баткак; 2 – Тууюксу; 3 – № 1; 4 – Сары-Тор; 5 – № 354; 6 – Западный Суёк

Fig. 5. Mass balance of main reference glaciers of Tien Shan in 1957–2019, mm w.e.:

1 – Kara-Batкак; 2 – Tuyuksu; 3 – № 1; 4 – Sary-Tor; 5 – № 354; 6 – West Suyok

Пожалуй, только в самые последние годы стали обозначаться признаки чуть более интенсивной потери вещества на этом леднике. Очень неплохая согласованность хода b_n ледника Сары-Тор отмечается с ледниками, расположенными на территории бывшего СССР. Наиболее заметные пики как в одну, так и в другую сторону у всех них чаще всего совпадают во времени, причём наибольшее сходство с серией ледника Сары-Тор обнаруживается у ледника Кара-Баткак, а наименьшее – у китайского ледника. Несмотря на то, что по своим морфологическим особенностям ледник Сары-Тор скорее ближе к леднику № 1, чем к леднику Кара-Баткак, на отдельных этапах баланс первых двух колеблется чуть ли не в противофазе, тогда как с ледником Кара-Баткак таких прецедентов почти нет. Похоже, фактор удалённости ледников друг от друга играет главную роль при таком сопоставлении.

В этой связи отметим интересное совпадение во времени максимумов баланса массы на таких, вроде бы, далеко разнесённых в пространстве ледниках, как Сары-Тор и Джанкуат на Центральном Кавказе. Для периода после

1967/68 г., когда был начат джанкуатский ряд прямых наблюдений, у обоих объектов два самых благополучных в балансовом отношении сезона приходятся на одни и те же годы – 1986/87 и 1992/93 гг. Особенно сильно выделяется пик 1986/87 г. Даже в более долгосрочном ракурсе, в масштабе полной глубины реконструкций – 90-летней (до 1930 г.) у ледника Сары-Тор и 148-летней (до 1872 г.) у ледника Джанкуат [9] – этот балансовый год оказывается рекордным по своим значениям b_n у обоих ледников. На леднике Джанкуат его обеспеченность не достигает и 1%-го уровня, а на леднике Сары-Тор приближается к нему. Более того, на обоих ледниках «годы-рекордсмены» по балансу обусловлены долгосрочными аномалиями одной и той же составляющей – аккумуляции: 1986/87 г. представляет собой абсолютный максимум и там, и там, а 1992/93 г. по многоснежности занимает третье место в многолетней серии Сары-Тора и четвёртое – на Джанкуате. Вряд ли следует искать в этом проявление дальних связей (teleconnections), но столь яркое совпадение состояния ледников, характеризующихся принци-

пиально разными режимами, вызывает интерес. Отметим, что экстремумы абляции для обоих объектов совершенно не совпадают. Это указывает на то, что общность аномалий термического режима между Центральной Азией и Кавказом обнаруживается гораздо реже, чем общность циркуляционных схем. При этом в первую очередь единство циркуляционного фактора проявляется при ослаблении черт континентальности в обоих регионах, что и создаёт максимумы снегонакопления; минимумы аккумуляции синхронности не обнаруживают.

Ослабление континентальности на Внутреннем Тянь-Шане в отдельные годы сказывается не только на приходном компоненте баланса массы. Абсолютный максимум аккумуляции на леднике Сары-Тор в 1986/87 г. совпадает здесь с абсолютным минимумом (по модулю) абляции; аналогично, третье место по многоснежности 1992/93 г. отвечает третьему месту с конца в рейтинге расходной составляющей. Оба масс-балансовых компонента своими аномалиями в такие годы как бы способствуют тому, чтобы сезон оставался благоприятным для состояния ледника, и оказывают однонаправленный эффект в сторону положительных значений баланса. Факт противофазы (в масс-балансовом смысле) ведущих метеодетерминантов – осадков и температуры – известен для азиатского оледенения [31], но здесь также можно усмотреть и проявление гомеостаза ледникового организма. Кроме того, на сходствах и различиях сравниваемых серий по разным ледникам должны сказываться и общегорографические показатели. Основные закономерности, проявляющиеся на рис. 5, – это относительно повышенная вариабельность баланса массы b_n ледников периферийных отрогов Тянь-Шаня (ледник Туюксу – в масштабе всей горной системы, ледник Кара-Баткак – в масштабе Внутреннего Тянь-Шаня) и существенно меньшая дисперсия у ледников в глубине горной системы, которым присуща небольшая энергия оледенения (ледник Сары-Тор). Ледник № 1 занимает в этой связи некоторое промежуточное положение: казалось бы, что его следует отнести к периферийным ледникам с относительно повышенным массообменом, однако на уменьшение межгодовой изменчивости величины b_n здесь уже влияет в противоположном ключе усиление в Богдо-Шане общей континентальности.

Завершая, можно предположить, что результаты представленной реконструкции баланса массы ледника Сары-Тор ввиду относительной непродолжительности валидационного ряда прямых наблюдений, возможно, уступают по точности известным реконструкциям для других опорных ледников (ИГАН [32], Сареннского [12], Южного Каскадного [8], Джанкуат [9], Фольгетонни [10] и т.д.), но они хотя бы ориентировочно позволяют оценить изменения ледниковой системы Ак-Шийрак за период, когда работы на ледниках массива не проводились, и охарактеризовать место современного эволюционного этапа в масштабе столетия.

Заключение

Баланс массы ледника Сары-Тор за 90-летний период 1930–2019 гг. в целом сугубо отрицателен, причём, начиная с 1990-х годов, деградация ледника заметно усилилась. Подобные новейшие эволюционные тенденции побуждают возвращаться к задаче реконструкции баланса массы опорного ледника и к попыткам в очередной раз обновлять её. Установлено, что менее чем за столетие ледник безвозвратно утратил более 28 м в слое воды. Примерно половина (47,3%) общего сокращения ледовых ресурсов этого ледника пришлась на период после наступления XXI в. Наименьшие темпы отмечались в 1950-е годы, после которых лишь в четырёх сезонах баланс принимал положительные значения; последний раз это произошло четверть века назад.

Долгосрочные колебания баланса массы ледников массива Ак-Шийрак (как и всего Внутреннего Тянь-Шаня) в основном связаны с изменчивостью летнего баланса, а именно: количества осадков (так как большая их часть выпадает в летнее время) и особенно летней температуры воздуха. Колебания зимнего баланса заметно меньше влияют на общий годовой баланс массы [33]. Поэтому главной причиной прогрессирующего ухудшения бюджетного состояния оледенения массива Ак-Шийрак следует считать наблюдаемое потепление сезонов абляции, о чём по итогам сделанной реконструкции однозначно свидетельствует тренд к постепенному нарастанию по модулю расходной составляющей вещественного баланса.

К сожалению, будущее мониторинга баланса массы ледника Сары-Тор неясно. Аппетиты Kumtor Gold Company, осваивающей золоторудное месторождение, которое непосредственно примыкает к ледниковому языку и частично уходит под него, уже проявились в начатых (см. передний план на рис. 1, в) проходках горных выработок в перигляциальном поясе опорного ледника. Перспектива масштабных промышленных экскаваций для создания открытого карьера (наподобие созданного по соседству на месте искусственно удалённого языка ледника Давыдова) и наполнения долины Сары-Тор пустой породой, безусловно, изменит естественный циркуляционный и теплофизический режим предполья ледника Сары-Тор, нарушит выявленные гляциосиноптические связи и приведёт к утрате репрезентативности его балансового ряда, что до сих пор представляло собой основную научную ценность проводимых здесь гляциологических

работ. Такое развитие событий может вскоре заставить исследователей, к сожалению, отказаться от этого эталонного гляциологического объекта. В качестве вынужденной меры, чтобы вообще не лишиться в будущем информации о дальнейшей эволюции оледенения массива Ак-Шийрак, придётся перенести систему комплексных и детальных измерений на соседний ледник Борду (см. рис. 1, а). Предвидя это, с 2015/16 г. на нём был также развёрнут масс-балансовый мониторинг [4] в целях обнаружения корреляций параллельно с пока продолжающимися исследованиями на леднике Сары-Тор.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания АААА-А16-116032810095-6.

Acknowledgements. Research has been undertaken within the framework of the State Assignment АААА-А16-116032810095-6.

Литература

1. *Бондарев Л.Г.* Очерки по оледенению массива Ак-Шийрак. Фрунзе: Изд-во АН КиргССР, 1963. 203 с.
2. *Дюргеров М.Б., Кунахович М.Г., Михаленко В.Н., Сокальская А.М., Ушнурцев С.Н., Чичагов А.В.* Баланс массы, сток и метеорологические условия ледника Сары-Тор в хребте Ак-Шийрак (Внутренний Тянь-Шань). М.: изд. ИГРАН, 1992. 69 с.
3. *Волошина А.П.* Климатические и метеорологические особенности района оледенения массива Акшийрак // МГИ. 1988. Вып. 62. С. 184–193.
4. Электронный ресурс: база данных WGMS. <https://wgms.ch/latest-glacier-mass-balance-data/>.
5. *Reynaud L., Vallon M., Martin S., Letréguilly A.* Spatio-temporal distribution of the glacial mass balance in the Alpine, Scandinavian and Tien Shan areas // *Geogr. Annals*. 1984. V. 66A. № 3. P. 239–247.
6. *Letréguilly A., Reynaud L.* Space and time distribution of glacier mass-balance in northern hemisphere // *Arctic and Alpine Research*. 1990. V. 22. № 1. P. 43–50.
7. *Кренке А.Н., Попова В.С.* Реконструкция изменений баланса массы ледников Казбека по метеорологическим данным // МГИ. 1974. Вып. 24. С. 264–273.
8. *Tangborn V.W.* Two models for estimating climate-glacier relationships in the North Cascades, Washington, U.S.A. // *Journ. of Glaciology*. 1980. V. 25. № 91. P. 3–21.
9. *Дюргеров М.Б., Поповнин В.В.* Реконструкция баланса массы, пространственного положения и

References

1. *Bondarev L.G.* *Ocherki po oledeneniyu massiva Ak-Shiyrak*. Essays on the glaciation of the Ak-Shiyrak massif. Frunze: Acad. Nauk Kirgizskoy SSR, 1963: 203 p. [In Russian].
2. *Dyurgerov M.B., Kunakhovich M.G., Mikhalenko V.N., Sokalskaya A.M., Ushnutsev S.N., Chichagov A.V.* *Balans massy, stok i meteorologicheskie usloviya lednika Sary-Tor v hrebte Ak-SHijrak (Vnutrennij Tyan'-SHan')*. Mass balance, runoff and meteorological conditions of the Sary-Tor Glacier, Akshiyrak range (Interior Tian-Shan). Moscow: IG RAS, 1992: 69 p. [In Russian].
3. *Voloshina A.P.* Climatic and meteorological peculiarities of the glacierized area of the Akshiyrak Range. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1988, 62: 184–193. [In Russian].
4. WGMS glacier mass balance data. <https://wgms.ch/latest-glacier-mass-balance-data/>.
5. *Reynaud L., Vallon M., Martin S., Letréguilly A.* Spatio-temporal distribution of the glacial mass balance in the Alpine, Scandinavian and Tien Shan areas. *Geogr. Annals*. 1984, 66A (3): 239–247.
6. *Letréguilly A., Reynaud L.* Space and time distribution of glacier mass-balance in northern hemisphere. *Arctic and Alpine Research*. 1990, 22 (1): 43–50.
7. *Krenke A.N., Popova V.S.* Reconstruction of mass-balance changes of Kazbek glaciers from meteorological data. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1974, 24: 264–273. [In Russian].
8. *Tangborn V.W.* Two models for estimating climate-glacier relationships in the North Cascades, Washington, U.S.A. *Journ. of Glaciology*. 1980, 25 (91): 3–21.

- жидкого стока ледника Джанкуат со второй половины XIX в // МГИ. 1981. Вып. 40. С. 73–82.
10. *Tvede A.M.* En metode til å beregne hvordan en avløpsserie er blitt påvirket av magasineffekten i brefelter [A method to calculate the influence of runoff series from the reservoir effect of glaciers]. Nordre Vassdrags- og Elektrisitetsvesen. Glaciologiske Undersøkelser i Norge 1980. 1982. Rapport 1–82. P. 64–71.
 11. *Михаленко В.Н.* Расчет и реконструкция баланса массы ледниковой системы Акшийрак на Тянь-Шане // МГИ. 1993. Вып. 76. С. 102–107.
 12. *Torinesi O., Letréguilly A., Valla F.* A century reconstruction of the mass balance of Glacier de Sarennes, French Alps // *Journ. of Glaciology*. 2002. V. 48. № 160. P. 142–148. <https://doi.org/10.3189/172756502781831584>.
 13. *Rabatel A., Dedieu J.-P., Thibert E., Letréguilly A., Vincent Ch.* 25 years (1981–2005) of equilibrium-line altitude and mass-balance reconstruction on Glacier Blanc, French Alps, using remote-sensing methods and meteorological data // *Journ. of Glaciology*. 2008. V. 54. № 185. P. 307–314.
 14. *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 Region Science Technology*. 2017. № 135. P. 76–89.
 15. *Глазырин Г.Е.* Распределение и режим горных ледников. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 184 с.
 16. *Ohmura A.* Physical basis for the temperature-based melt-index method // *Journ. of Applied Meteorology*. 2001. V. 40. P. 753–761.
 17. *Hock R.* Glacier melt: a review of processes and their modelling // *Progress in Phys. Geography*. 2005. V. 29. № 3. P. 362–391. doi: 10.1191/0309133305pp453ra.
 18. *Рыбак О.О., Рыбак Е.А., Яицкая Н.А., Поповнин В.В., Лаврентьев И.И., Сатылканов Р., Жакеев Б.* Модельные исследования эволюции горных ледников на примере ледника Сары-Тор (Внутренний Тянь-Шань) // *Криосфера Земли*. 2019. Т. XXIII. № 3. С. 33–51.
 19. *Кренке А.Н., Ходаков В.Г.* О связи поверхностного таяния ледников с температурой воздуха // МГИ. 1966. Вып. 12. С. 153–163.
 20. *Ледники Туяксу (Северный Тянь-Шань)*. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 171 с.
 21. *Айзин В.Б.* Баланс массы ледника Голубина в 1959/60–1981/82 гг. // МГИ. 1985. Вып. 53. С. 44–55.
 22. *Камьянский Г.М., Кислов Б.В., Ноздрюхин В.К.* Баланс массы ледника Абрамова и возможность его расчёта по метеорологическим показателям // МГИ. 1985. Вып. 54. С. 52–59.
 23. *Дюргеров М.Б.* Мониторинг баланса массы горных ледников. М.: Наука, 1993. 127 с.
 9. *Dyurgerov M.B., Popovnin V.V.* Reconstruction of mass-balance, position and liquid run-oss from the Dzhankuat Glacier since the second half of the XIX c. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1981, 40: 73–82. [In Russian].
 10. *Tvede A.M.* En metode til å beregne hvordan en avløpsserie er blitt påvirket av magasineffekten i brefelter [A method to calculate the influence of runoff series from the reservoir effect of glaciers]. Nordre Vassdrags- og Elektrisvesen. Glaciologiske Undersøkelser i Norge, 1980. 1982, Rapport 1-82: 64–71.
 11. *Mikhhalenko V.N.* Computations and reconstruction of the mass balance of the Akshiyrak glacier system, Tien-Shan. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1993, 76: 102–107. [In Russian].
 12. *Torinesi O., Letréguilly A., Valla F.* A century reconstruction of the mass balance of Glacier de Sarennes, French Alps. *Journ. of Glaciology*. 2002, 48 (160): 142–148. <https://doi.org/10.3189/172756502781831584>.
 13. *Rabatel A., Dedieu J.-P., Thibert E., Letréguilly A., Vincent Ch.* 25 years (1981–2005) of equilibrium-line altitude and mass-balance reconstruction on Glacier Blanc, French Alps, using remote-sensing methods and meteorological data. *Journ. of Glaciology*. 2008, 54 (185): 307–314.
 14. *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 Region Science and Technology*. 2017, 135: 76–89.
 15. *Glazyrin G.E.* *Raspredelenie i rezhim gornyykh lednikov*. Mountain glaciers distribution and regime. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1985: 184 p. [In Russian].
 16. *Ohmura A.* Physical basis for the temperature-based melt-index method. *Journ. of Applied Meteorology*. 2001, 40: 753–761.
 17. *Hock R.* Glacier melt: a review of processes and their modelling. *Progress in Phys. Geography*. 2005, 29 (3): 362–391. doi: 10.1191/0309133305pp453ra.
 18. *Rybak O.O., Rybak E.A., Yaitskaya N.A., Popovnin V.V., Lavrentiev I.I., Satylkanov R., Zhakeyev B.* Modeling the evolution of mountain glaciers: a case study of Sary-Tor Glacier, Inner Tien Shan. *Kriosfera Zemli*. The Earth's Cryosphere. 2019, XXIII (3): 33–51. [In Russian].
 19. *Krenke A.N., Khodakov V.G.* On the relationship between the surface melting of glaciers with air temperature. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1966, 12: 153–163. [In Russian].
 20. *Ledniki Tuyuksu (Severnyj Tyan'-Shan')*. Tuyksu glaciers, Northern Tien Shan. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984: 171 p. [In Russian].
 21. *Aizin V.B.* Mass balance of the Golubin Glacier for 1959/60–1981/82. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1985, 53: 44–55. [In Russian].
 22. *Kamnyanskiy G.M., Kislov B.V., Nozdryukhin V.K.* Mass balance of Abramov Glacier and possibilities of its computations from meteorological indices. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1985, 54: 52–59. [In Russian].

24. *Кренке А.Н.* Массообмен в ледниковых системах на территории СССР. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 288 с.
25. *Dyurgerov M.B.* Glacier mass balance and regime: data of measurements and analysis. Occasional Paper. № 55. Boulder, Colorado, 2002. 268 p.
26. *Ушнурцев С.Н.* Колебания баланса массы ледника Сары-Тор во Внутреннем Тянь-Шане и его реконструкция за 1930–1988 гг. // МГИ. 1991. Вып. 71. С. 70–80.
27. *Кутузов С.С.* Изменение ледников Внутреннего Тянь-Шаня за последние 150 лет: Дис. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. М.: Ин-т географии РАН, 2009. 170 с.
28. *Рец Е.П., Петраков Д.А., Шпунтова А.М.* Физико-математическое моделирование баланса массы ледника Сары-Тор в 2003/04–2014/15 гг. // Тез. докл. XVI гляциол. симпозиума. Санкт-Петербург, 24–27 мая 2016 г. / В.М. Котляков, С.С. Кутузов (ред.) [USB flash drive], ГА-РГО-ИГРАН-ААНИИ, 2016. С. 86.
29. *Pieczonka T., Bolch T.* Region-wide glacier mass budgets and area changes for the Central Tien Shan between 1975 and 1999 using Hexagon KH-9 imagery // *Global and Planetary Change*. 2015. V. 128. P. 1–13.
30. *Kronenberg M., Barandun M., Hoelzle M., Huss M., Farinotti D., Azisov E., Usubaliev R., Gafurov A., Petrakov D., Kääh A.* Mass-balance reconstruction for Glacier. № 354. Tien Shan, from 2003 to 2014 // *Annals of Glaciology*. 2016. V. 57. № 71. P. 92–102.
31. *Kutuzov S., Shahgedanova M.* Glacier retreat and climatic variability in the eastern Terskey–Alatoo, inner Tien Shan between the middle of the 19th century and beginning of the 21st century // *Global and Planetary Change*. 2009. V. 69. P. 59–70.
32. Оледенение Урала. М.: Наука, 1966. 307 с.
33. *Дюргеров М.Б., Ольшанский Г.И., Прохорова Н.В.* Изменчивость аккумуляции и абляции горных ледников // МГИ. Вып. 65. 1989. С. 92–102.
23. *Dyurgerov M.B.* *Monitoring balansa massy gornyykh lednikov.* Monitoring the mass balance of mountain glaciers. Moscow: Nauka, 1993: 127 p. [In Russian].
24. *Krenke A.N.* *Massoobmen v lednikovyykh sistemakh na territorii SSSR.* Mass transfer in glacier systems in the USSR. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1982: 288 p. [In Russian].
25. *Dyurgerov M.B.* Glacier mass balance and regime: data of measurements and analysis. Occasional Paper № 55. Boulder, Colorado. 2002: 268 p.
26. *Ushnursev S.N.* Mass balance fluctuations of the Sary-Tor glacier, in Internal Tien Shan, and its reconstructions for 1930–1988. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy.* Data of Glaciological Studies. 1991, 71: 70–80. [In Russian].
27. *Kutuzov S.S.* Glacier changes in the Inner Tien Shan over the last 150 years. PhD. Moscow: IG RAS. 2009: 170 p. [In Russian].
28. *Rets E.P., Petrakov D.A., Shpuntova A.M.* Physico-mathematical modelling of the mass balance of the Sary-Tor glacier in 2003/04–2014/15. *Tez. dokl. XVI glyaciologicheskogo simpoziuma, St. Peterburg.* Abstracts. XVI Glaciol. Symp., St. Petersburg, May 24–27, 2016. Eds.: V.M. Kotlyakov, S.S. Kutuzov. [USB flash drive], GARGO-IGRAN-AANII. 2016: 86. [In Russian].
29. *Pieczonka T., Bolch T.* Region-wide glacier mass budgets and area changes for the Central Tien Shan between 1975 and 1999 using Hexagon KH-9 imagery. *Global and Planetary Change*. 2015, 128: 1–13.
30. *Kronenberg M., Barandun M., Hoelzle M., Huss M., Farinotti D., Azisov E., Usubaliev R., Gafurov A., Petrakov D., Kääh A.* Mass-balance reconstruction for Glacier. № 354. Tien Shan, from 2003 to 2014. *Annals of Glaciology*. 2016, 57 (71): 92–102.
31. *Kutuzov S., Shahgedanova M.* Glacier retreat and climatic variability in the eastern Terskey-Alatoo, inner Tien Shan between the middle of the 19th century and beginning of the 21st century. *Global and Planetary Change*. 2009, 69: 59–70.
32. *Oledenenie Urala.* Glaciers of the Urals. Moscow: Nauka, 1966: 307 p. [In Russian].
33. *Dyurgerov M.B., Olshanskiy G.I., Prokhorova N.B.* Variability of accumulation and ablation of mountain glaciers. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy.* Data of Glaciological Studies. 1989, 65: 92–102. [In Russian].