

DOI: 10.26104/NNTIK.2022.84.94.013

Усубалиев Р.А., Мандычев А.Н., Кенжебаев Р., Подрезова Ю.А., Азисов Э.
**АЗЫРКЫ КЛИМАТТЫН ЖЫЛУУ ШАРТЫНДА КЫРГЫЗСТАНДАГЫ
 РЕПРЕЗЕНТАТИВДИК МӨНГҮЛӨРДҮН КӨП ЖЫЛДЫК МАССА
 БАЛАНСЫНЫН ӨЗГӨРҮҮ ТЕНДЕНЦИЯСЫ**

Усубалиев Р.А., Мандычев А.Н., Кенжебаев Р., Подрезова Ю.А., Азисов Э.
**ТЕНДЕНЦИЯ МНОГОЛЕТНЕГО ИЗМЕНЕНИЯ БАЛАНСА
 МАССЫ РЕПРЕЗЕНТАТИВНЫХ ЛЕДНИКОВ КЫРГЫЗСТАНА
 В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА**

R. Usubaliev, A. Mandychhev, R. Kenjebaev, Y. Podrezova, E. Azisov
**THE TREND OF MULTI-YEAR CHANGE IN THE MASS
 BALANCE OF REPRESENTATIVE GLACIERS IN KYRGYZSTAN
 UNDER CONDITIONS OF MODERN CLIMATE WARMING**

УДК: 551.324.4

Гляциологиялык ыкманы колдонуу менен Кыргызстандын репрезентативдик мөңгүлөрүнүн массалык балансынын мониторинги жана изилдөөсү каралып, метеорологиялык жана топографиялык маалыматтардын негизинде контурдук сызык ыкмасын жана ГИС технологияларын колдонуу менен мөңгүлөрдүн бетинин масса балансынын физикалык модели колдонулат. Кыргызстандын бардык репрезентативдик мөңгүлөрүндө мөңгү массасынын терс балансы сакталып жаткандыгы аныкталды. Изилдөө мезгилинде мөңгүлөрдүн аймагындагы климаттын учурдагы уланып жаткан багытталган жылуусу жана жаан-чачындын көлөмүнүн азайышы мөңгүлөрдүн терс массалык балансынын калыптанышына жана сакталышына туртку болду, натыйжада мөңгүнүн тилнин чек араларынын чегинишине шарт түздү, жана мөңгүлөрдүн бетинин жукаруусу жана муздун көлөмүнүн азайышы алып келүүдө.

Негизги сөздөр: абляция, аккумуляция, баланс, мөңгүлөрдүн массасы, абанын температурасы, атмосфералык жаан-чачындар, мөңгүлөрдүн деградациясы.

Рассматривается мониторинг и исследование баланса массы репрезентативных ледников Кыргызстана гляциологическим методом. Для расчета годового баланса массы используется физическая модель баланса массы поверхности ледника на основе метеорологических и топографических данных с использованием метода контурной линии и GIS технологий. Выявлено, что по всем репрезентативным ледникам Кыргызстана продолжается наблюдаться отрицательный баланс массы ледников. Современное устойчивое потепление климата и уменьшение сумм осадков в районе ледников, способствовало формированию и сохранению отрицательного баланса массы ледников, и как следствие, отступанию границ языков, утонению поверхности ледников, уменьшению объема льда и соответственно запасов этой части водных ресурсов.

Ключевые слова: абляция, аккумуляция, баланс, масса ледника, температура воздуха, атмосферные осадки, деградация оледенения.

Monitoring and research of the mass balance of representative glaciers of Kyrgyzstan using the glaciological method is considered, and a physical model of the mass balance of the glacier surface based on meteorological and topographic data using the contour line method and GIS technologies is used to calculate the annual mass balance. It was revealed that a negative balance of glacier mass continues to be observed in all representative glaciers of Kyrgyzstan. The current ongoing directed climate warming and a decrease in the amount of precipitation in the region of glaciers during the study period contributed to the formation and maintenance of a negative mass balance of glaciers,

and as a result, respectively, retreat of the boundaries of tongues, thinning of the surface of glaciers and a decrease in ice volume.

Key words: ablation, accumulation, balance, glacier mass, air temperature, precipitation, glaciation degradation.

Введение. Кыргызстан является одним из основных в Центральной Азии районом, характеризующимся развитым современным оледенением. В пределах его территории находятся части горных систем таких, как Тянь-Шань и Памиро-Алай. Практически, во всех горных хребтах страны присутствуют очаги современного оледенения. Ледники горных хребтов Кыргызстана являются не только элементом ландшафта, но и значительными аккумуляторами влаги. Сосредоточенные в них снежно-ледовые ресурсы расходуется в теплый период года. Особенно их роль возрастает в годы с недостаточным увлажнением, а в засушливые годы для многих рек ледники становятся единственными источниками питания, обеспечивая тем самым водными ресурсами нижележащие территории. В настоящее время ледники в горах Центральной Азии, как и во всем мире, сильно деградируют с различной скоростью сокращения площади, в зависимости расположения региона в горных системах. Изучение и мониторинг роли ледниковых систем Центрально-Азиатского региона в условиях преобладающего аридного климата на большей части её территории и современного однонаправленного глобального потепления приземного слоя атмосферного воздуха, с каждым годом становятся все более актуальными.

Наиболее объективным показателем состояния ледников и их эволюции являются многолетние данные по балансу массы ледников. В настоящее время, в пределах территории Кыргызстана мониторингом охвачены ледниковые системы Северного, Внутреннего, Центрального Тянь-Шаня и Иссyk-Кульской котловины, а также ледниковые системы Гиссаро-Алая. В качестве репрезентативных объектов исследований были выбраны несколько ледников в разных регионах Кыргызстана [1,2,3,6]. Это ледники: № 354, Сары-Тор и Борду, они расположены на северо-западном склоне горного массива Ак-Шыйрак;

Западный Суек, находится на северном склоне хребта Джетим-Бель (Внутренний Тянь-Шань); Голубина (бассейн р. Ала-Арча, северный склон хребта Киргизский Ала-Тоо); Абрамова, расположен на южном склоне Алайского хребта; № 599, Кара-Баткак и Турген-Аку-Суу соответственно, находятся, первый на южном склоне хребта Кюнгей Ала-Тоо, а второй и третий на северном склоне хребта Тескей

Ала-Тоо Иссык-Кульской котловины. Так же отдельные виды гляциологических работ выполняются на стационарных пунктах наблюдения на ледниках Южный Энилчек (Центральный Тянь-Шань), Адыгене (бассейн р. Ала-Арча, северный склон хребта Киргизский Ала-Тоо) и в течение нескольких лет на леднике №182 (северный склон хребта Ат-Башы), (рис. 1).

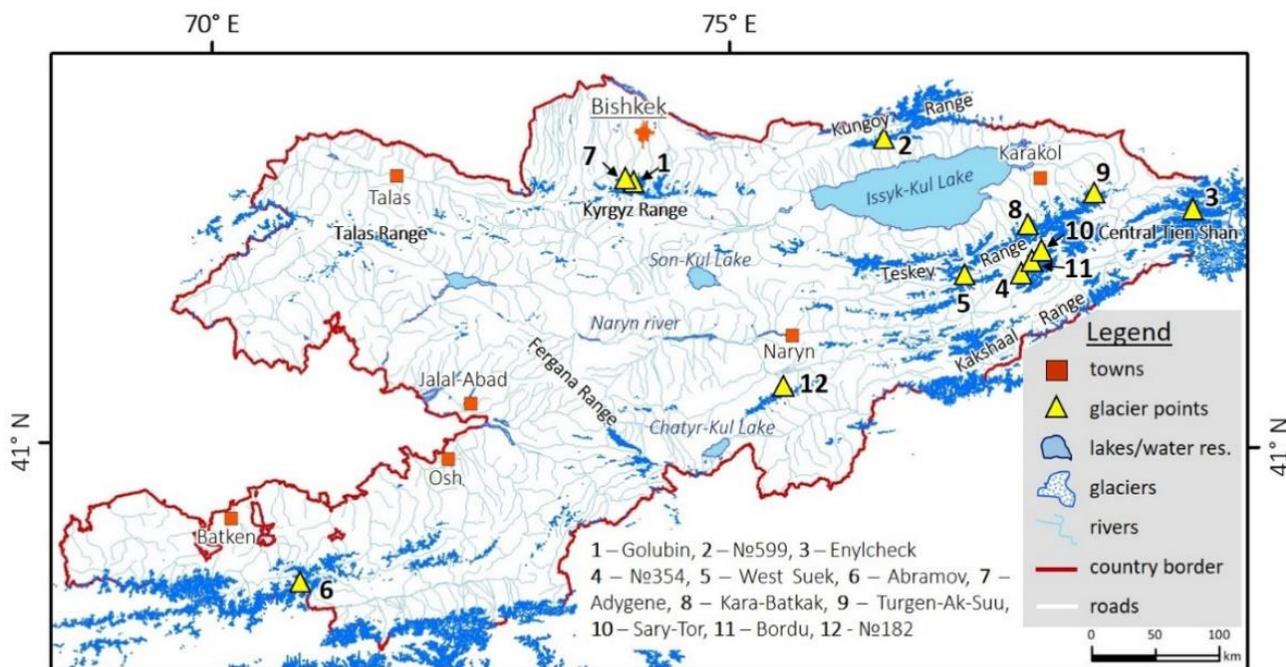


Рис. 1. Месторасположения репрезентативных ледников Кыргызстана.

Непосредственно мониторингом ледников занимаются три научно-производственные организации Кыргызской Республики – Центрально-Азиатский институт прикладных исследований Земли (ЦАИИЗ), Тянь-Шаньский высокогорный научный центр (ТШВНЦ) Института водных проблем и гидроэнергетики НАН КР (ИВП и ГЭ НАН КР) и Кыргыз Гидромет при МЧС КР. В данной работе рассматриваются результаты исследований по балансу массы репрезентативных ледников Кыргызстана, относящиеся к сфере мониторинга и исследований ЦАИИЗ: Абрамова, Голубина, Западный Суек, №354 и №599, наблюдения по которым ведутся с 2010-2011 годов. В статье были использованы материалы по договору оказания услуг №С-6928 с «Кумтор Голд компани» КГК «Мониторинг и масс-балансовые исследования на ледниках №354 (массив Ак-Шыйрак) и Западный Суек (хребет Джетим-Бель)».

Методы. Баланс массы на репрезентативных

ледниках определяется путем непосредственных полевых измерений величин абляции льда и массы аккумулированного снега на ледниках (гляциологический метод), как разница между питанием ледника атмосферными осадками в виде снега и расходом льда ледника в виде таяния для соответствующих гидрологических годов и выражен в миллиметрах водного эквивалента снега и льда.

Определение баланса массы ледников включает величину таяния, измеряемую по абляционным рейкам и величину накопления снега, определяемую путем измерения глубины, и плотности снега, аккумулированного за текущий гидрологический балансный год [7].

Для измерения таяния льда в зоне абляции устанавливаются пластиковые рейки на глубину, соответствующую ожидаемой скорости таяния льда, варьирующей на наблюдаемых ледниках от 2 до 8 м. Абляционные рейки, устанавливаются с помощью парового бура Хойке или бура Ковак (рис. 2).



Рис. 2. Установка абляционных реек и работа с буром Ковак.

В зоне аккумуляции ледника проходится несколько снежных шурфов для определения годового накопления снега, его толщины и плотности. Для измерения накопленного снега используются металлические трубы с объемами $\sim 500-700 \text{ см}^3$, а плотность снега измеряется с помощью весов Песола (рис. 3). Координаты абляционных реек, поверхностное движения льда и место расположения снежных шурфов определяется с помощью GPS «Garmin 62S», имеющего точность геопозиционирования до 10 м.



Рис. 3. Измерение плотности снега с помощью весов Pesola.

Для расчета годового баланса массы используется физическая модель баланса массы поверхности ледника на основе метеорологических и топографических данных [8,9,10] с использованием метода контурной линии и GIS технологий.

Входные данные для модели баланса массы состоят из:

а) Данные о балансе массы. Модель рассчитывает баланс массы всего ледника на основе точечных измерений параметров абляции и аккумуляции, полученных гляциологическим методом (абляционные рейки и аккумуляционные шурфы).

б) Метеорологические данные. Баланс массы определяется по суточным метеорологическим рядам среднесуточной температуры и общему количеству осадков, измеренных на автоматических метеостанциях (АМС).

с) Цифровая модель рельефа и контуры границы ледников. Абляция и аккумуляция баланса массы ледника рассчитываются для каждой ячейки сетки и для каждого дня года с использованием цифровой модели рельефа, полученной по данным «ALOS PAISAR» с разрешением 20 м. Контуры границы ледников оцифровываются вручную с помощью про-

граммы ArcGIS по снимкам спутника «Sentinel-2» с разрешением 10м.

Расчет аккумуляции и абляции в модели. Накопление снега (аккумуляция) рассчитывается по твердым осадкам, которые образуются, когда температура воздуха опускается ниже пороговой $T_{thr} = 1,5$ °C.

$$T(x, y, t) < T_{thr}$$

Модель рассчитывает аккумуляцию снега $C(x, y, t)$ каждой ячейки сетки (ЦМР) по формулам:

$$C(x, y, t) = P_{WS}(t)C_{prec} * D_{snow}(x, y)$$

$P_{WS}(t)$ – величина осадков на метеорологической станции за каждый день (t) и на каждую ячейку сетки (x, y)

C_{prec} – поправочный коэффициент позволяет корректировать общее количество осадков, чтобы учесть систематические ошибки такие как, потери осадков в осадкомере из-за ветра или других факторов.

$D_{snow}(x, y)$ является фактором пространственного распределения снега, он выводится из топографии ЦМР (меньше снега на открытых гребнях, больше во впадинах). Еще он учитывает данные зимних

измерений снегонакопления, если они доступны (иначе 1.0 везде).

Суточные (t) скорости поверхностного таяния ледника (абляция) $M = M_{(x,y,t)}$ в день t и для ячейки сетки (x, y) рассчитываются как:

$$M = \begin{cases} (f_M + r_{snow/ice}I_{pot})T_{(x,y,t)} : T > 0^\circ C \\ 0 : T \leq 0^\circ C \end{cases}$$

f_M – коэффициент таяния, $r_{snow/ice}$ – радиационные факторы для снежных и ледовых поверхностей.

$T_{(x,y,t)}$ – среднесуточные температуры с метеостанции экстраполируются от высоты метеостанции на каждые 100 м с использованием вертикального градиента температуры, по литературным данным.

I_{pot} – функция потенциального прямого солнечного излучения в условиях ясного неба.

Калибровка модели. Основная концепция калибровки модели – минимизировать среднеквадратичное отклонение (RMS) между измеренным и смоделированным балансом массы. Смоделированный баланс массы сравнивается с измеренным балансом массы в каждой точке измерения в зависимости от высотных зон ледников.

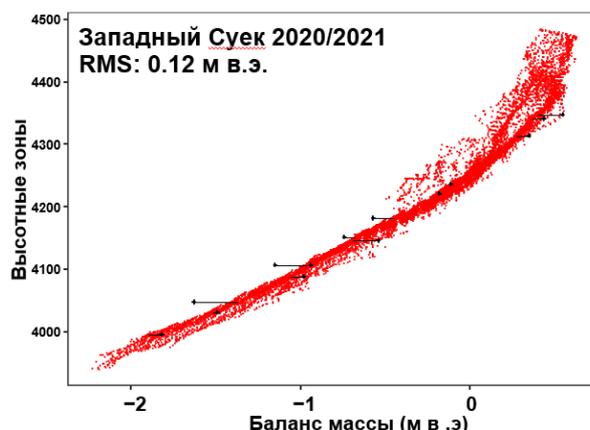
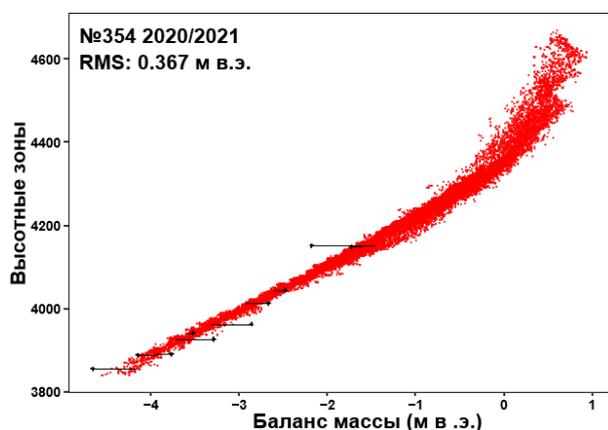


Рис. 4. Среднеквадратичное отклонение (RMS) между измеренным (обозначены черным) и смоделированным (красные точки) балансом массы в зависимости от высотных зон для ледника Западный Суек и №354, 2020/2021.

После достижения хорошего согласия, остальная часть баланса массы года моделируется, а несоответствие между измеренным и смоделированным годовым балансом минимизируется за счет корректировки некоторых параметров модели таких как градиент температуры $T_{(x,y,t)}$ и градиент осадков C_{prec} . Например, наименьшее среднеквадратичное значение рассчитано для ледников № 354 - 0,36 м. в.э., и Западный Суек - 0,11 м. в.э. на 2020-2021 гг. (рис. 4).

Результаты расчета баланса массы ледника. Рассчитанные выходные данные, на примере,

баланса массы модели ледников №354 и Западный Суек в 2020-2021 гг. состоят из карт (рис. 5) и временных рядов баланса массы за разные периоды (рис. 6). Сводные результаты приведено в таблице 1.

Здесь измеренный период – это время от даты измерения абляции и накопления снега с прошлого года по текущий год (06.08.2020 - 27.09.2021). Гидрологический период или период годового баланса — это определение баланса массы ледника в течение одного года (от 1 октября по 30 сентября). Зимний баланс определяется за период с 1 октября по 30 апреля.

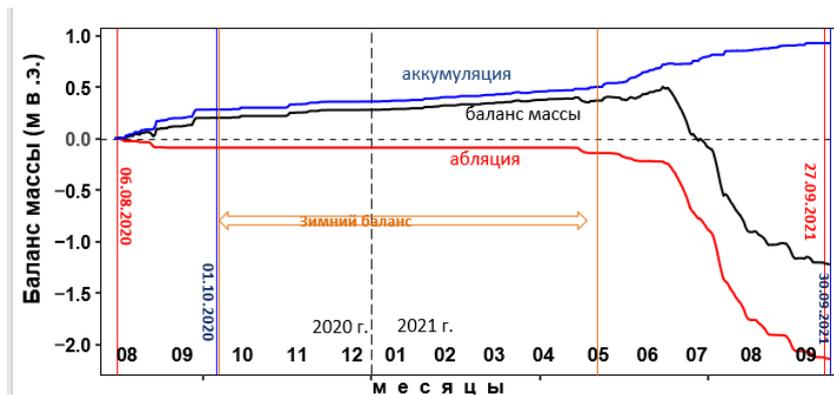


Рис. 6. Годовое изменение баланса массы для ледника №354, абляция (красная линия), аккумуляция (синяя линия) и баланс массы (черная линия) для 2020-2021 гг. Вертикальные линии указывают временные границы различных периодов оценки.

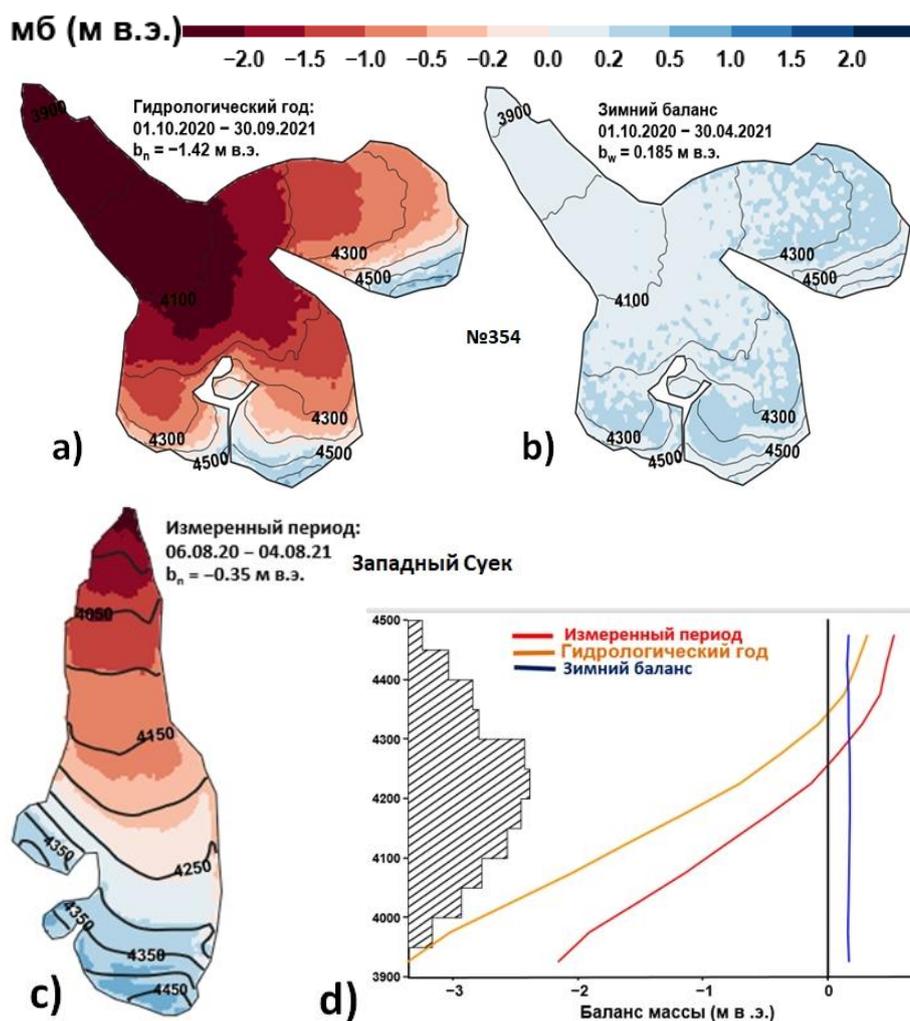


Рис. 5. Примеры схем высотного распределения баланса массы ледников № 354 и Западный Суек для разных периодов (рис. a, b, c) и рисунок d) высотные градиенты баланса массы.

Рассчитанный годовой ход баланса массы обоих ледников показывает, что с 1 октября 2020 года до конца мая 2021 года баланс массы оставался стабильным с небольшим положительным увеличением. Положительный баланс массы в эти месяцы был связан с большим количеством осадков в 2020 году, когда снежный покров оставался полностью не растаявшим.

Баланс массы для ледников №354 и Западный Суек в 2020-2021 гг.

Название ледников	Баланс массы (м.в.э). 2020-2021 гг.		
	Измеренный период 03.08.2020-27.09.2021	Гидрологический период 01.10.2020-30.09.2021	Зимний период 01.10.2020-30.04.2021
№354	-1,20	-1,42	0,18
Западный Суек	-0,35	-0,96	0,17

Большое количество осадков по метеостанции с середины июня до конца июля указывает на положительное увеличение баланса массы. В августе и сентябре из-за повышения температуры воздуха и уменьшения количества осадков баланс массы ледников стал отрицательным. Таким образом, на основе проведенных исследований и полученных результатов, подтверждено продолжение тенденции деградации изучаемых ледников по состоянию на сентябрь-октябрь 2021 года.

Для ледника №354, годовой баланс массы, рассчитанный на даты измерения 2020/21 г., составляет -1,20 м.в.э. Близкая величина баланса массы получена для гидрологического года -1,42 м.в.э. Зимний баланс ледника составляет 0,185 м. в.э. В 2021 году измерения баланса массы для ледника №354 проводились в конце сентября, это совпадает с гидрологическим периодом, поэтому оба результата баланса массы практически одинаковы.

Для ледника Западный Суек баланс массы измерен в начале августа, и результаты измеренного периода баланса массы дали результат: -0,35 м. в.э., т.е. намного меньше, чем баланс за гидрологический год: -0,9 м. в.э. Это объясняется тем, что погодные

условия для ледника в сентябре были неблагоприятными, данные метеостанции показывают повышение температуры и уменьшение количества осадков.

Отметим, что для ледников Западный Суек и №354 полевые измерения баланса массы проводились с 4 августа по конец сентября 2021 года.

Многолетние изменения баланса массы ледников. Как видно на рисунке 7, в многолетнем плане, в балансе массы репрезентативных ледников, в основном, наблюдается отрицательный баланс массы ледников, то есть расходная часть баланса массы льда превышает величину питания ледника. Но, в некоторые гидрологические годы наблюдаются и положительный баланс, что связано, прежде всего, с благоприятными погодно-климатическими условиями и расположением конкретного ледника в горной системе. Несмотря на значительную удаленность рассматриваемых ледников друг от друга на территории Кыргызстана и различия в природных условиях, в многолетнем изменении величины их баланса массы наблюдается синхронность, в частности тенденция к увеличению в 2020 году.

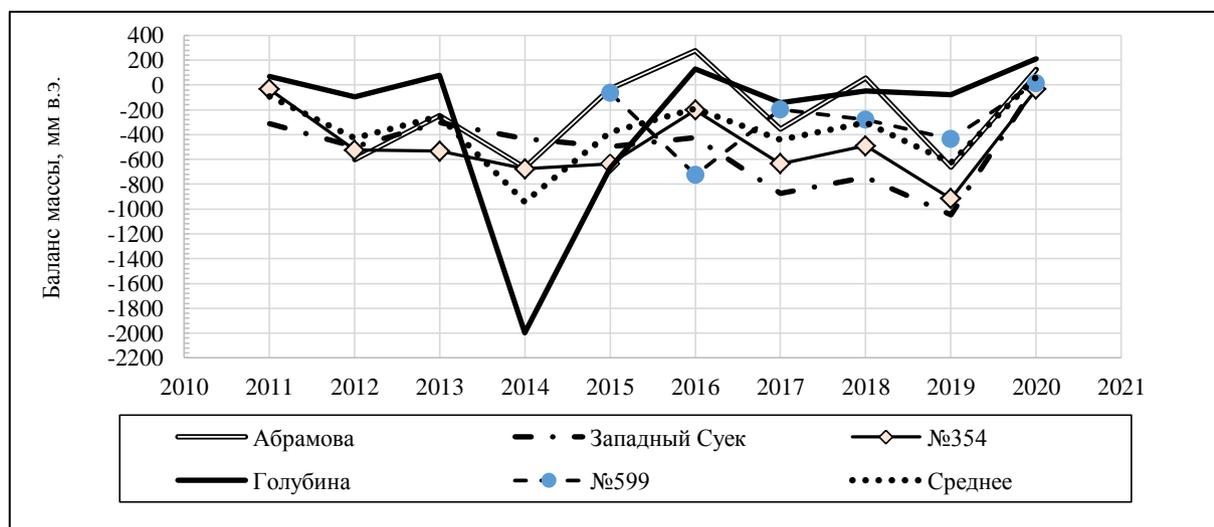


Рис. 7. Баланс массы исследованных ледников в миллиметрах водного эквивалента.

В целом, по всем репрезентативным ледникам Кыргызстана продолжает наблюдаться отрицательный баланс массы ледников, и соответственно отступление границ языков, уменьшение объема льда и уменьшение запасов воды, аккумулированной в ледниках. Однако, по отдельным ледникам, в некоторые годы наблюдается положительный баланс массы и временное уменьшение скорости деградации в виде незначительного отступления границ ледника.

Выводы:

➤ Баланс массы на репрезентативных ледниках определяется гляциологическим методом для соответствующих гидрологических годов и выражен в миллиметрах водного эквивалента снега и льда.

➤ Для расчета годового баланса массы используется физическая модель баланса массы поверхности ледника на основе метеорологических и топографических данных с использованием метода контурной линии и GIS технологий.

➤ По всем репрезентативным ледникам Кыргызстана продолжает наблюдаться отрицательный баланс массы ледников, и соответственно отступление границ языков, уменьшение объема льда и уменьшение запасов воды, аккумулированной в ледниках.

➤ В высокогорной зоне в районе МС Тянь-Шань за весь период наблюдений отмечается снижение количества осадков и устойчивое повышение среднегодовой температуры воздуха [5], т.е. наблюдается противоположный ход трендов двух основных метеорологических параметров, это способствует формированию и сохранению отрицательного баланса массы ледника.

➤ Анализ температур и осадков МС Сары-Таш показывает, что за весь период наблюдения отмечается устойчивое повышение температуры воздуха и небольшой рост количества атмосферных осадков, с середины 70-х годов имеется тенденция уменьшения атмосферных осадков [4], такие условия способствуют формированию отрицательного баланса массы ледника.

➤ Современное потепление климата и уменьшение сумм осадков в районе ледников за исследуе-

мый период способствовало формированию и сохранению отрицательного баланса массы ледников, что в конечном итоге приводит к деградации оледенения.

Литература:

1. Атлас Киргизской ССР. ГУГК. - М., 1987. - 86 с.
2. Каталог ледников Кыргызстана. <http://www.caiag.kg/phocadownload/projects/Catalogue%20%20of%20glaciers%20Kyrgyzstan%202018.pdf>
3. Оледенение Тянь-Шаня. / Ответст. редакторы: М.Б. Дюргеров, Лю Шаохай, Се Зичу. - М., 1995. - 234 с.
4. Отчет по НИП ЦАИИЗ за 2020 г. - Бишкек, 2021.
5. Подрезова Ю.А., Павлова.И.А. Изменение климата в районе массива Ак-Шийрак и его влияние на ледники. / Лед и Снег, 2017. - №2 (57). - С. 200-212.
6. Физическая география Кыргызстана. / География оледенения гор Кыргызстана. / Монография. - Бишкек: Турар, 2013. - 588 с. Гл. 5. - С. 135-210.
7. Kaser, G., Fountain, A., Jansson, P., (2003). A manual for monitoring the mass balance of mountain glaciers. International Hydrological Programme, 59, Paris.
8. Ostrem, G., and Brugman, M. (1991). Glacier mass balance measurements: a manual for field and office work. Sci. Rept. 4. Natl Hydrol. Res. Inst. Envir. Canada. Saskatoon.
9. Marlene Kronenberg, Martina Barandun, Martin Hoelzle, Matthias Huss, Daniel Farinotti, Erlan Azisov, Ryskul Usubaliev, Abror Gafurov, Dimitry Petrakov, Andreas Kaab. Mass balance reconstruction for Glacier No. 354, Tien Shan, from 2003-2014. // Annals of Glaciology 57(71) 2016 doi: 10.3189/201Aog71A032. - P. 92-102.
10. Ruslan Kenzhebaev, Martina Barandun, Marlene Kronenberg, Yaning Chen, Ryskul Usubaliev, Martin Hoelzle. Mass balance observations and reconstruction for Batysh Cook Glacier, Tien Shan, from 2004-2016. / Cold regions Science and Technology. 135 (2017) 78-89. www.elsevier.com/locate/coldregions.
11. Усубалиев Р.А., Мамадалиева З.Э., Осмонов А.Т. Анализ и оценка текущей ситуации в бассейнах трансграничных рек Куркуроо, Падыша-Ата, Ак-Суу, Исфана: современное состояние ледниковых систем. / Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. - 2019. - №. 4. - С. 92-98.
12. Эрменбаев Б.О., Чонтоев Д.Т., Саякбаев Д.Д., Абдраев Ж.К., Омурбеков С. Современная эволюция ледников хребта Тескей Ала-Тоо за последние 50 лет. / Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2021. №. 4. С. 39-43