

БАЛАНС И КИНЕМАТИКА МАССЫ ЛЕДНИКА ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ТУЙЫКСУ, СЕВЕРНЫЙ СКЛОН ИЛЕ АЛАТАУ

В.П. Капица, Н.Е. Касаткин, И.В. Северский *д.г.н., профессор*, **З.С. Усманова***, **А.Б. Егоров** *д.ест.н.*

ТОО «Центрально-Азиатский Региональный Гляциологический Центр категории 2 под эгидой ЮНЕСКО», Алматы, Казахстан

E-mail: zamira_usmanova@mail.ru

На основе прямых наблюдений на леднике Центральный Туйыксу, за период 2006...2023 гг. приведены расчеты компонентов внешнего и внутреннего массообмена и дано сравнение полученных значений за периоды 1958...1972 и 1977...1992. Для определения кинематических составляющих баланса массы использовались забуренные в лед рейки с геодезической привязкой на местности. За рассматриваемый период ледник отступил на 420 метров, баланс массы в среднем составил -0,54 м в.э. за весь период наблюдений, с 1958 г ледник отступил на 1190 м при среднем значении баланса массы за 1956...2023 гг. -0,42 м в.э. Годовой баланс массы в кинематической области питания (КОП) за период 2006...2023 составил +0,13 м, за этот же период вынос льда из этой области в кинематическую область абляции составил -1,24 м., при этом площадь КОП увеличилась на 17 %, а кинематическая область абляции (КОА) сократилась на 46,3 %. Приток льда из КОП компенсировал потери в КОА в период 1977/78...1991/92 гг. только на половину (49,5 %), а в период с 2006/07 по 2022/23 уже на 75,9 %. Максимальные скорости движения льда на леднике Центральный Туйыксу 22...24 м/год наблюдались в период 1956...65 гг., уменьшились до 16 м/г в период 1977...1992 гг., а в период 2006...2023 гг. составляли 12,8 м/г.

Ключевые слова: Северный Тянь-Шань, ледник Центральный Туйыксу, кинематика ледника, скорость движения льда, баланс массы ледника.

Поступила: 19.09.2024 г.

DOI: 10.54668/2789-6323-2024-115-4-91-110

ВВЕДЕНИЕ

Криосфера (включая снег, ледники, вечную мерзлоту, озерный и речной лед) является неотъемлемым элементом высокогорных регионов, в которых проживает около 10 % мирового населения. Широкомасштабные изменения криосферы затрагивают физические, биологические и социальные (человеческие) системы в горах и окружающих низменностях, причем последствия этих изменений очевидны даже в мировом океане.

Наблюдения показывают общее сокращение снежного покрова, ледников и вечной мерзлоты из-за изменения климата в последние десятилетия. Усредненные по региону балансы массы, вероятно, были наиболее отрицательными (менее -850 кг/м²/год) в южных Андах, на Кавказе и в европейских Альпах/Пиренеях и наименее отрицательными в высокогорной Азии

(-150 ± 110 кг/м²/год), но величины внутри регионов сильно варьируются. Уменьшение ледников, снега и вечной мерзлоты изменило частоту, масштабы и географию большинства связанных с ними стихийных бедствий (прорывы ледниковых озер, сели, лавины, оползни, т.д.). Изменения снега и ледников изменили объем и сезонность стока в речных бассейнах со снежно ледниковым питанием, что оказало региональное воздействие на водные ресурсы и сельское хозяйство (IPCC, 2019).

Оценка эволюции современного горного оледенения основывается на данных о колебаниях концов ледников, изменениях их площади и объема, изменении высоты поверхности (толщины льда), балансе массы ледников и о движении льда (Котляков В.М., 2006; Макаревич К.Г., 2004). Изменения баланса массы являются следствием влияния климатических факторов. В связи

с причинами климатического характера находится и внутренний массообмен ледников, выраженный изменениями кинематических параметров движущейся массы льда (Макаревич К.Г., 2004).

Изменения массы и объема ледников оцениваются с помощью геодезического метода баланса массы, применяемого как в региональном масштабе, так на отдельных ледниках, и измерений баланса массы отдельных ледников гляциологическим методом (Zemp et al., 2019; Kapitsa et al., 2020). Оценки геодезического баланса массы в Центральной Азии в основном сосредоточены на сравнении разновременных цифровых моделей рельефа (Kapitsa et al., 2020; Brun et al., 2017; Barandun et al., 2018). Однако, несмотря на преимущество этого метода, заключающееся в широком региональном охвате и относительно длительных временных интервалах, погрешности оценки баланса массы ледников этим методом высоки: во многих регионах Тянь-Шаня они сопоставимы с расчетными значениями баланса массы (Kapitsa et al., 2020; Hoelzle et al. 2020).

В 1950-х годах под эгидой Комитета Международного гидрологического десятилетия СССР была запущена система криосферного мониторинга в Центральной Азии. Мониторинг включал обширные измерения баланса массы на нескольких ледниках (например - Центральный Туйыксу, ледники Голубина, Карабаткак, Абрамова в Советском Союзе и ледник Урумчи № 1 в Китае). Однако на большинстве ледников прямые измерения были прерваны в 1990-х годах, что привело к более чем 20-летнему пробелу в данных. Пробелы в длиннорядных данных баланса массы нескольких ледников были заполнены с помощью комбинации моделирования баланса массы и анализа спутниковых данных. Регулярные измерения баланса массы продолжались только на ледниках Центральном Туйыксу и Урумчи № 1. На нескольких ледниках в Узбекистане и Кыргызстане программы мониторинга баланса массы были возобновлены в 2010-х годах в рамках интенсивных проектов международного и национального сотрудничества. В настоящее время баланс массы исследуется более чем на десяти

ледниках с помощью длительных серий измерений. (Hoelzle et al., 2020; Kapitsa et al., 2020; M. Barandun et al., 2020).

Ледник Центральный Туйюксу (Туйыксу, Туйюксу), открытый в С.Е. Дмитриевым в 1902 г., более ста лет находится под пристальным вниманием исследователей. До 1956 г. на нем велись периодические наблюдения, а с 1957 и до настоящего времени проводятся непрерывные гляциогидроклиматические исследования (Макаревич К.Г., 2008; Северский И.В. и др, 2008). Благодаря выполнению широкого комплекса исследований ледник Туйыксу входит в десятку самых изученных ледников мира (Макаревич К.Г., 2008).

Развитие гляциологических программ было сосредоточено на гидрологических программах и программах баланса массы, в то время как наблюдения за скоростями потока льда стало уделяться меньше внимания. Цель данного исследования на основе многолетних наблюдений оценить скорость движения ледника в течении года, показатели внутреннего массообмена, взаимосвязь областей аккумуляции и абляции.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Ледник Центральный Туйыксу, расположен в бассейне реки Киши Алматы (рисунок 1) $43^{\circ} 02' 44''$ с.ш. $77^{\circ} 04' 46''$ в.д., является одним из наиболее изученных ледников Казахстана и ЦА и занимает одно из ведущих мест среди ледников мира, по которым ведутся долговременные исследования баланса массы. Ледник долинного типа имел в 1956 г. площадь $3,27 \text{ км}^2$, а в 2023 г. – $2,19 \text{ км}^2$. Средняя высота ледника равняется 3830 м , на которой в среднем за шестьдесят семь лет проходит граница питания (или снеговая линия) и область аккумуляции при указанной высоте составляет 40% по отношению к площади всего ледника (Вилесов Е.Н. и Уваров В.Н., 2001; Макаревич К.Г. и Касаткин Н.Е., 2008). Ледник Центральный Туйыксу обладает близкими к средним для хребта морфометрическими, гипсометрическими, экспозиционными и др. показателями и является достаточно типичным для ледниковой системы северного склона хребта.

В настоящее время ледник Центральный Туйыксу демонстрирует отрицательную тенденцию динамики, что характерно для всего хребта, хотя ее количественные показатели различны и отличаются друг от друга,

что обусловлено названными особенностями расположения ледников (Вилесов Е.Н. и Уваров В.Н., 2001; Вилесов Е.Н., 2016; Severskiy, et al., 2016; Kapitsa et al., 2020).

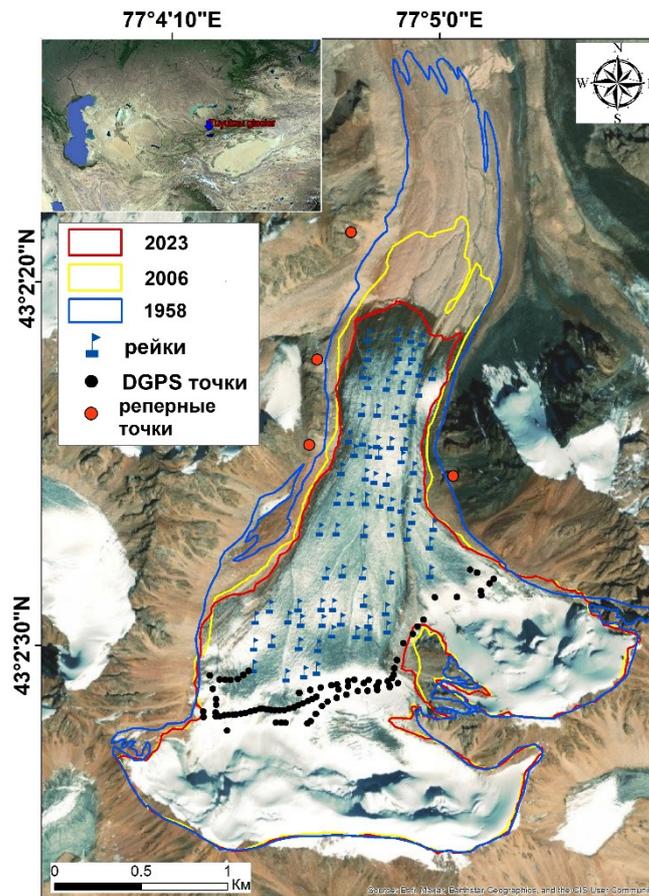


Рис. 1. Район исследования

Скорости ледникового потока можно получить на основе прямых измерений и данных дистанционного зондирования. Они являются важным параметром, предоставляющим информацию о динамической реакции ледника, которая обусловлена эволюцией его баланса массы (M. Stocker-Waldhuber et al., 2019; Roger LeB. Hooke, 2019).

Для полного описания поля течения льда нужны горизонтальная и вертикальная составляющие скорости в каждой точке. Также общее движение можно разделить на две составляющие - внутреннюю деформацию и базальное скольжение. Еще один важный аспект скорости движения ледников – вследствие накопления в верхней части ледника, точка (рассматривается траектория движения элементарной частички льда), которая находится на поверхности ледника в данный момент времени, в более позднее время оказывается на некоторой глубине под поверхностью

ледника. Скорость, с которой точка движется вниз от поверхности, называется скоростью «погружения» («submergence velocity»). Скорость движения точки вверх к поверхности ледника в зоне абляции называется скоростью «всплытия» («emergence velocity») (Roger LeB. Hooke, 2019; Cuffey, KM., and Paterson, WSB., 2010). Описываемая характеристика отражает влияние движения льда на геометрию поверхности ледника и является одной из важнейших при изучении его изменений. Н.Н. Пальгов, П.А. Черкасов повышение поверхности ледника или увеличение объема льда в области языка, вызванное движением назвали «привносом»; К.Г. Макаревич – «выносом» массы льда из области питания в область абляции (Пальгов Н.Н., 1958; Черкасов П.А., 1961; Михалев В.И. и др, 1972; Макаревич К.Г., 2007).

Поскольку эволюция поверхности ледников связана с изменениями накопления снега и скоростями погружения/всплытия,

которые могут быть одного и того же порядка (Vincent et al., 2007), а также из-за сложности учета ледникового потока и метаморфизации (уплотнения) снега/фирна (Cuffey, K.M., and Paterson, W.S.B., 2010) таких исследований на ледниках было выполнено немного (Réveillet et al., 2020). В некоторых исследованиях использовались эмпирические методы для оценки вертикальных изменений топографии поверхности ледника вследствие потока льда или использовались рейки для непосредственного измерения скорости погружения/всплытия в некоторых точках на ледниках напр. Jourdain et al. 2023; C. Vincent et al., 2021; Pelto, B.M., and Menounos, B., 2021; Réveillet et al., 2020; Belart et al., 2017; Schöber et al., 2014; Sold et al., 2013; Vincent et al., 2007; Vincent et al., 1997; Meier, M.F., and Tangborn, W.V., 1965.

Скорость всплытия, может быть рассчитана по горизонтальным и вертикальным скоростям и наклону поверхности. В зоне аккумуляции скорости всплытия отрицательны (поэтому они называются скоростью погружения), что соответствует течению массы вниз относительно поверхности ледника. Скорость погружения позволяет связать поверхностный баланс массы с изменениями толщины (Cuffey, K.M., and Paterson, W.S.B., 2010), но это является предметом немногочисленных исследований напр. Réveillet et al., 2020; Vincent et al., 2007; Vincent et al., 1997.

В Казахстане сток льда ледников Иле Алатау и Жетысу Алатау (Пальгов Н.Н. перенос льда в результате его движения из области накопления в область расхода называл натуральным стоком) исследовали Н.Н. Пальгов, П.А. Черкасов, К.Г. Макаревич и другие (Пальгов Н.Н., 1962; Макаревич К.Г. и др., 1969; Черкасов П.А., 1961; Cherkasov et al., 1996; Ahmetova et al., 1998).

С.Е. Дмитриев в 1903...1907 гг. впервые наблюдал за движением ледников Иле (Заилийского) Алатау на леднике Туйыксу, спустя много лет Н.Н. Пальгов измерял скорости движения этого и некоторых других ледников хребта. Аналогичные наблюдения на ледниках Талга-

ра в 1939...1940 гг. провел Г.А. Авсюк и позднее К.Г. Макаревич (Макаревич К.Г. и др., 1969) в период Международного Геофизического Года (МГГ) и в последующие годы наблюдения за движением ледников были значительно расширены. В основном применялся метод поперечных профилей. В ряде случаев скорости движения определяли путем тахеометрической съемки как разность между предыдущим и последующим положением точки наблюдений (Макаревич К.Г. и др., 1969).

Из-за ограничений полевых наблюдений (труднодоступности ледников, трудоемкости получения прямых измерений, рисками для безопасности) наблюдаемые прямые (измеренные) данные (сведения) о скорости ледникового потока весьма ограничены, вследствие чего, определение характеристик динамики ледников в регионе Высоких Гор Азии (ВГА) (the High Mountain Asia (HMA)) является сложным (Zhang Zhen et al., 2023).

Широкомасштабное измерение скоростей движения поверхности ледников стало возможным только с появлением спутникового дистанционного зондирования и увеличением разновидностей и доступности данных дистанционного зондирования (Van Wyk de Vries, M. and Wickert, A.D., 2021). Существует ряд техник (инструментов) для оценки скоростей потоков льда, основанных на отслеживании характеристик (Van Wyk de Vries, M. and Wickert, A. D., 2021; Millan et al., 2019). Тем не менее, эти методы имеют свои достоинства и ограничения применения.

Дистанционные методы (например, радиолокационная дифференциальная интерферометрия с синтезированной апертурой (DInSAR), методы отслеживания характеристик по оптическим спутниковым изображениям, метод отслеживания смещения на основе радара с синтезированной апертурой (SAR)) позволяют определять поверхностные скорости ледников в больших регионах и соответствуют требованиям гляциологии (Yang et al., 2022; Zhang Zhen et al., 2023).

Дистанционное зондирование имеет важное значение в изучении скорости

движения ледников в регионе ВГА, включая как отдельные ледники, ледниковые регионы, так и весь регион ВГА (Dehecq et al., 2019; Zhang Zhen et al., 2023).

Для измерения кинематических составляющих баланса массы Центральный Туйыксу – скорость движения льда V_r , изменение высоты поверхности за счет движения V_h , суммарное изменение высоты поверхности в результате аккумуляции, абляции и движения льда V_s , использовались забуренные в тело ледника деревянные рейки. Специфика поверхности ледников, характерная для длинных ледников альпийского типа, не позволяет устанавливать реечные пункты в области питания ледника и вести там прямые геодезические измерения. Область питания ледника представляет собой однокамерный цирк, крутизна склонов которого достигает 35...40° и создает определенные трудности и опасность для наблюдений. (Макаревич К.Г., 2004; Макаревич К.Г. и Касаткин Н.Е., 2008).

Наблюдения за балансом массы ледника b_n , как одного из компонентов для расчета кинематики, проводились по методике, рекомендованной WGMS (Østrem, G., and Brugman, M., 1991) и адаптированной для ледника Центральный Туюксу (Макаревич К.Г., 2007). При определении поверхностных скоростей горизонтального движения льда V_r применялся способ «координат поверхностей» (Михалев В.И. и др., 1972), основанный на сопоставлении координат основания рек, геодезическая привязка которых, проводилась ежегодно с 2006 г. с реперных точек, схема которых показана на рисунке 1. На начальном этапе (2006 – 2009 гг.) использовался способ прямой засечки одновременно с двух реперных точек оптическими теодолитами ТНЕО 010. С 2009/10 балансового года для этих целей применялся лазерный тахеометр Leica TC 407. Параллельно с ним, с 2021 г. по реечному полю проводится съемка с помощью DGPS с функцией RTX (поправки со спутника в реальном времени) (Кокарев А.Л. и др., 2022) с применением которой погрешность определения плановых координат и абсолютной высоты составляет не более 3...4 см. Использование DGPS, как для измерения скорости, так и для оценки геодезического баланса массы (Li et al., 2022; Cao, et al., 2020; Shahgedanova,

et al. 2012) значительно ускоряет процесс проведения геодезической съемки и повышает точность измерений плановых координат местности и абсолютной высоты на леднике. Применение DGPS позволило расширить область прямых наблюдений (прямых измерений за изменениями физической поверхности ледника) на поверхности ледника, где отсутствуют забуренные рейки. Измерения с помощью DGPS, несмотря на непродолжительный период измерений (2021...2023 гг.), позволили нам сопоставить и упростить измерения скорости V_r и изменения высоты поверхности ледника V_h , которую можно рассчитать по формуле 1:

$$V_h = H_n - H_{n-1} \quad (1)$$

при этом угловые координаты $X_n = X_{n-1}$, $Y_n = Y_{n-1}$, H – абсолютная высота в точке наблюдения на поверхности ледника, n – год.

В предыдущих исследованиях (Макаревич А.К., 1979; Макаревич К.Г. и Макаревич А.К., 1979; Макаревич К.Г., 2004) для определения значений V_h применялись оптические теодолиты и геодезические рейки. Суть метода заключалась в том, чтобы при производстве геодезической привязки измерить высоту точки в координатах прошлого года. Изменение физической высоты поверхности V_h в данной точке в результате внешнего и внутреннего массообмена определяется при сопоставлении высот двух смежных измерений.

В рамках данного исследования, при наличии DGPS, задача выхода на угловые координаты точки предыдущего года и как следствие получения величин V_r и V_h значительно упростилась, при этом увеличилась точность измерений. Кроме того, значения V_h по вышеуказанной формуле возможно получить, применяя современные ГИС программы. В нашем случае мы использовали инструмент RESIDUALS в ПО Surfer позволяющий при наличии качественных геодезических данных проводить расчёт V_h в камеральных условиях без выхода в поле на координаты прошлого года. Мы сравнили величины V_h , полученные на основе двух методов: прямые измерения с DGPS и расчетный метод в ПО Surfer. Согласно результатам, средняя разница не превышает 2 см.

Имея значение изменения высоты

поверхности и абляции льда (A_z) в точке (пункте наблюдения) можно рассчитать величины выноса V_v по формуле 2:

$$V_v = V_h - A_z \quad (2)$$

Объемы величин выноса льда и абляции льда были рассчитаны в ПО Surfer методом кригинг (kriging). Используя полученные значения V_h и годовой баланс массы b_n рассчитывается значения величин V_s по формуле 3:

$$V_s = V_h + b_n \quad (3)$$

Кинематика ледника и взаимосвязь областей аккумуляции и абляции, как результат перемещения льда и состояние баланса массы ледника рассматривались за следующие периоды – 1937...1964 гг., 1958...1972 гг. и 1977...1992 (Макаревич К.Г., 2004) и 2006...2023 гг. С 2006 года были возобновлены исследования по изучению внутреннего массоэнергообмена ледника Ц. Туйыксу и продолжают по настоящее время. Таким образом, общий период мониторинга динамики ледника Ц. Туйыксу составил 87 лет (с 1937...2023 гг.) с промежутками – с 1973 по 1977 гг. и с 1993 по 2006 гг. Площади кинематических области питания (КОП) и области абляции (КОА) и соответственно балансы массы этих областей рассчитывали согласно методике, рекомендованной (Макаревич К.Г., 2007; Макаревич К.Г., 2004).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В 1958 г. ледник оканчивался на высоте 3373 м, а еще раньше, в 1937 г. – 3369 м, (Макаревич К.Г., 2004) в настоящее время (2023 г.) нижняя точка ледника расположена на высоте 3496 м. Длина открытой части ледника в 1958 г. достигала 3,4 км, в 2000 г. 2,84 км (Макаревич К.Г., 2004), а в 2023 г. – 2,4 км. За период 1958...2023 гг. ледник отступил на 1190 метров, а в период с 2006 по 2023 гг. на 420 метров (рисунок 1). Среднее годовое отступление фронта языка за весь исследуемый период составило 18 метров.

За последние 160 лет отмечено преобладание отступления фронтов горных ледников в Северном и Южном полушариях, на фоне

которого наблюдалось наступание ледников, в периоды замедлений потепления климата, причем в эти периоды наступали одни и те же ледники (Котляков В.М. и др., 2017; WGMS 2023).

С уменьшением длины также сокращается и площадь ледника. В 1953 г. она равнялась 3,47 км², в 1958 г. – 3,14 км², в 2000 г. – 2,54 км² (Макаревич К.Г., 2004), а к 2023 г. уменьшилась до 2,19 км², или на 37 % (0,52 %/год). Оледенение северного склона Иле Алатау сокращается, в период 1955...2022 гг. ледники по площади сократились на 140,4 км², или на 49 %, теряя в год по 2,1 км² или по 0,73 % своей площади (Северский И.В. и др, 2024; Severskiy et al., 2016). Эта тенденция во многом обусловлена повышением температуры воздуха, а также отрицательной аномалией количества осадков, наблюдавшейся в 1970...1980-е годы, вызванной изменениями атмосферной циркуляции и затронувшей большую часть Тянь-Шаня (Shahgedanova et al., 2018; Kapitsa et al.2020; Макаревич К.Г., 2004). В исследованиях посвященных оценке изменений площадей ледников сообщается о неоднородном изменении площади ледников, однако ледники отступают и сокращаются по площади по всему Тянь-Шаню и Памиру, но темпы отступления различаются (Hoelzle et al., 2020; Barandun et al. 2020).

Сокращение площади сопровождается понижением поверхности ледника и уменьшением объема, заключенного в нем льда: от 0,173 км³ в 1958 г., до 0,137 км³ в 1998 г. (Макаревич К.Г., 2004) и до 0,100 км³ в 2023 г. Общая потеря льда за период с 1958 до 2023 года составила 73,4 млн м³ (1,1 млн м³/год) (таблица 1). Измерение толщины льда и исследование ее изменений выполнено для отдельных ледников Центральной Азии, напр. Van Tricht L et al., 2021; Lambrecht et al. 2020; Носенко Г.А., и др, 2016. Однако данные инструментальных наблюдений о распределении толщины ледников, внутреннем строении льда и фирна и их изменении остаются редкими из-за высокой стоимости и трудоемкости прямых измерений толщины льда, особенно в отдаленных ледниковых районах Центральной Азии (I. Lavrentiev et al., 2018; Barandun et al., 2020). Согласно прогнозным оценкам, ледники будут продолжать терять объем и массу (Farinotti et al. 2019).

Баланс массы ледника непрерывно изучается с 1956 г. по настоящее время, и по продолжительности ряда входит в число первых десяти ледников мира. Баланс массы ледника Туйыксу в исследуемый период имеет негативную тенденцию, сначала довольно умеренную, затем весьма активную (рисунок 2) (Макаревич К.Г., 2004; Kapitsa et al., 2020). До 1972/73 балансового года ледник в течении 8 из 16 лет имел положительный баланс, после и по настоящее время положительный баланс наблюдался лишь 7 раз за 51 год (1972/73...2022/23 балансовые годы).

В период с 1956/57 до 1971/72 гг. средняя величина положительного баланса за 8 лет равнялась 0,25 м в.э., отрицательного баланса за остальные годы -0,39 м в.э., а в среднем за 16 лет баланс составил -0,07 м в.э.; в период с 1972/73 по 2022/23 гг. средняя величина положительного баланса за 7 лет составила 0,28 м в.э., отрицательного баланса за остальные годы (44 года) равняется -0,66 м в.э., а

в среднем за 51 год – -0,53 м в.э. В целом за весь период наблюдений 1956...2023 гг. баланс массы составил -0,42 м в.э., при этом положительный баланс массы наблюдался 15 лет. Самые высокие величины отрицательного баланса наблюдались: -1,48 м в.э. (1978), -1,25 м в.э. (1984), -1,1 м в.э. (1991), -1,47 м в.э. (1997), -1,36 м в.э. (2008), -1,02 м в.э. (2012), -1,09 м в.э. (2014), -1,11 м в.э. (2017) и -1,13 м в.э. (2022); отрицательный баланс массы преимущественно наблюдается после 1973 г., тогда как до 1972 г. значения баланса массы ледника не опускались ниже -0,78 м в.э. (1968).

Наблюдаемая динамика баланса массы ледника Центральный Туйыксу согласуется с оценками изменений ледников, полученными в региональных исследованиях для Тянь-Шаня и Памира (Hoelzle et al., 2020; Barandun et al., 2021). Близкие потери массы - 0.4 м в.э. получены для Ледника №1 Урумчи в Восточном Тянь-Шане, для периода с 1957 по 2017 гг (Barandun et al., 2020).

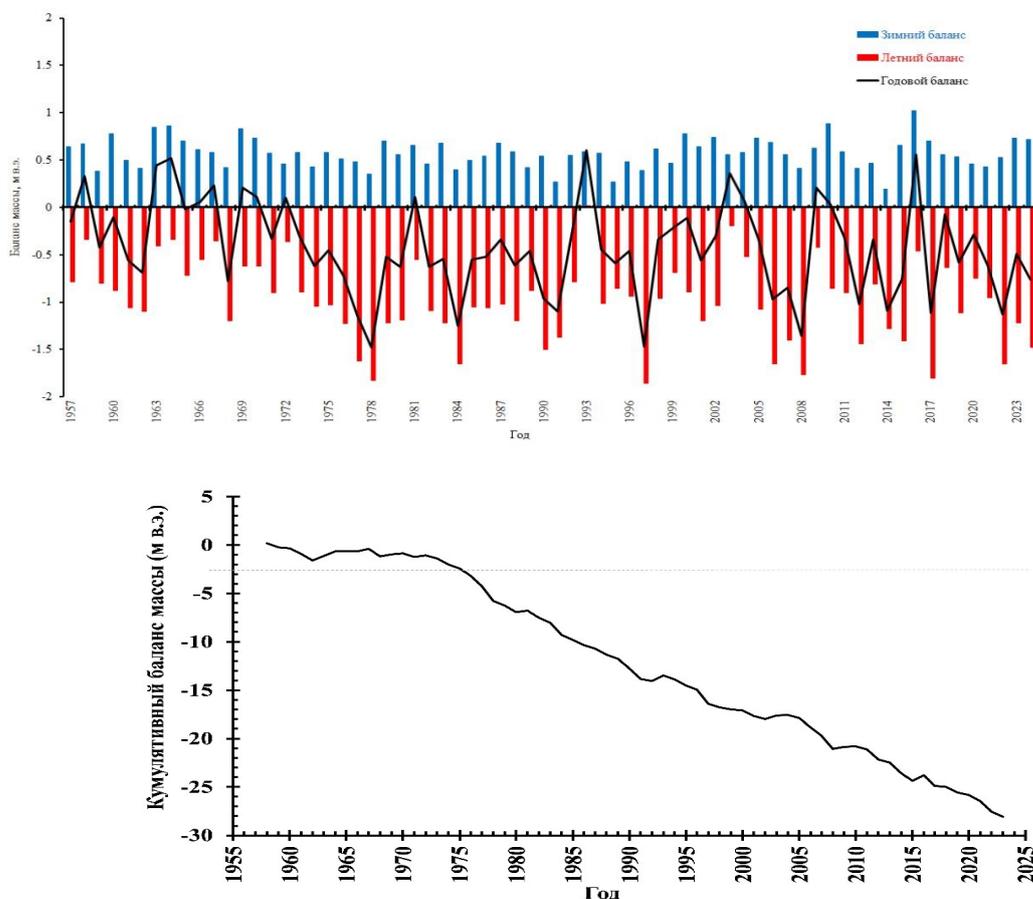


Рис. 2. Многолетний ход баланса и кумулятивный баланс массы ледника Центральный Туйыксу в период 1958...2023 гг.

Баланс массы -0.30 м в.э со значимым отрицательным трендом в период с 1999/2000 по 2017/2018 отмечен для Северного и Западного Тянь-Шаня (Barandun et al., 2021); негативный тренд баланса массы также отмечен для ледника Голубина (Северный Тянь-Шань) -0.18 ± 0.17 м в.э в год в период с 2010/2011 по 2020/2021 (Azisov et al., 2022); средняя величина потери массы ледника Сары-Тор в массиве Ак Шийрак (Внутренний Тянь-Шань) составила -0.53 м в.э в год в период 1985–2019 гг (Popovnin et al., 2021); и для ледника Батыш Соок Batysh, (Внутренний Тянь-Шань) составила -0.39 ± 26 м в.э в год с 2003/04 по 2015/16 гг. (Kenzhebaev et al., 2017); оценки изменение массы ледников для Западного и Восточного Памира составили -0.37 ± 0.42 м в.э. и $+0.19 \pm 1.47$ м в.э. соответственно (Hoelzle et al., 2020). Результаты региональных исследований свидетельствуют о негативных изменениях морфометрических характеристик практически всех ледников региона (за исключением пульсирующих ледников), отличаясь лишь по количественным параметрам колебаний по отдельным ледникам (Barandun et al., 2021; Barandun et al., 2020).

Наблюдения за аккумуляцией, абляцией и движением границы питания позволяют получать данные о внешнем массообмене ледника. Зная баланс массы ледника в целом, остается неизвестным, как изменяется масса вследствие ее перемещения сверху вниз, достаточна ли компенсация вынесенного из области аккумуляции льда атмосферными осадками (единственным источником пополнения ледниковых запасов) и насколько приток льда на язык может восстановить потерянные при абляции массы. Разделом кинематических областей оттока и притока льда служит кинематическая граница питания (КГП). В отличие от внешней границы питания КГП более устойчива, и кинематические области питания (КОП) и области абляции (КОА) год от года изменяются незначительно. Разделенные же границей питания ELA (Equilibrium Line Altitude - по терминологии Мировой службы мониторинга ледников) области аккумуляции и абляции значительно варьируют по площади вплоть до «катастро-

фического» состояния, когда весь ледник становится областью абляции для ранее накопленных запасов (Макаревич К.Г., 2004).

Высоты границы питания, отождествляемые с фирновой линией (ELA), в исследуемый период эволюции ледника существенно отличались (Макаревич К.Г., 2004). Средняя высота в период с 1957...1972 гг. равнялась 3760 м; в 1973...2023 гг. составила 3855 м, а за весь период с 1957 по 2023 г – 3830 м, с экстремальными величинами 4210 м (1978), 4050 м (1984), 3950 м (1991), 4230 м (1997), 3980 м (2008), 3900 м (2012), 3920 м (2014), 3950 м (2017), 3980 (2022) (таблица 1 и 2 (Макаревич К.Г., 2004).

С подъемом границы питания значительно увеличивается область абляции ледника и растет расход льда, которому принадлежит главная роль в формировании баланса массы. Баланс массы определяется климатическими факторами, главным образом атмосферной циркуляцией, от которой зависит приток тепла и влаги в тянь-шаньский регион (Макаревич К.Г., 2004).

В период наблюдений за кинематикой ледника 1977...1992 гг. колебания высоты КГП не превосходили 90 м, в этот же период размах колебаний ELA составил 450 м (Макаревич К.Г., 2004); в период 2006...2023 гг. колебания КГП составили 240 м, размах колебаний ELA – 270 м; в 1977/78, 1996/97, 2007/08 и 2021/22 балансовые годы ледник практически полностью освобождался от снега, баланс массы в эти годы был экстремально отрицательным.

Отсутствие необходимой компенсации потерь льда в КОП, и как следствие, в КОА сказывается на изменении массы всего ледника и его деградации, что уже известно из стандартных оценок баланса массы гляциологическим методом (Макаревич К.Г., 2004). Изменение массы в кинематическом понимании практически тождественно балансу массы ледника в гляциологическом понимании. Как описано в разделе материалы и методы в области питания ледника речные пункты не устанавливались и прямые геодезические измерения не проводились. Поэтому масса льда, вынесенная из КОП, оценивается по ее притоку в КОА ниже кинематической границы питания.

В таблице 1 даны высоты границ ЕЛА и КГП и отношение определяемых ими площадей аккумуляции к площади всего ледника (AAR - Accumulation Area Ratio). Из данных наблюдений следует, что поверхность ледника повышалась (м в.э.) 1957/58 г. +0,33 м, 1962/63 г. +0,44 м, 1963/64 г. +0,52 м, 1965/66 г. +0,06 м, 1966/67 г. +0,23 м, 1968/69 г. +0,21 м, 1969/70 г. +0,11 м, 1971/72 г. +0,10 м, 1980/81 г. +0,11 м, 1992/93 г. +0,60 м, 2002/03 г. +0,36 м, 2003/04 г. +0,06 м, 2008/09 г. +0,20 м, 2009/10 г. +0,03 м, 2015/16 г. +0,56 м (Макаревич К.Г., 2004; Макаревич К.Г. и Касаткин Н.Е., 2011). В остальные годы поверхность ледника понижалась с амплитудой от 0,08 м (2017/18 г) до -1,48 м (1977/78 г).

Чистый годовой баланс массы в КОП в период 1977...1992 гг. составил +0,18 м, вынос льда в КОА достиг в среднем -0,95 м; в период 2006/07...2022/23 гг. – +0,13 м, а вынос льда в КОА составил -1,24 м, что недостаточно для компенсации выноса льда в кинематическую область абляции ледника.

При этом значительно изменились и площади кинематических зон аккумуляции и абляции. Средние величины площадей аккумуляции и абляции за рассматриваемые периоды изменились с 1,15 км² до 1,35 км² и с 1,78 км² до 0,96 км² соответственно, т.е. КОП увеличилась на 17,0 %, а КОА сократилась на 46,3 %. Ухудшился и годовой баланс в обеих областях с +0,18 м/г до +0,13 м/г в КОП и с -1,23 м/г до -1,44 м/г в КОА (таблица 1).

Выделяется 2016 г., в мае которого выпало аномально большое количество осадков, в результате чего величина зимнего баланса массы за 2015/16 балансовый год составила +1,024 м в.э.

В результате КГП в 2016 году опустилась до 3 610 м н.у.м., тогда, как в следующем 2016/17 балансовом году при значении зимнего баланса +0,699 м в.э. (при среднем значении зимнего баланса за период 1957...2023 гг. +0,572 м в.э.), и резко отрицательном годовом балансе массы - 1,130 м в.э., КГП поднялась на высоту 3 850 м н.у.м., максимальную за оба рассматриваемых периода. Площади КОП за 2015/16 и 2016/17 балансовые годы составили 2,033 км² и 0, 864 км², площади КОА

0,233 км² и 1,391 км² соответственно. В итоге поверхность ледника в КОП за период 1977...1992 гг. в результате аккумуляции, абляции и движения льда понизилась на -11,6 м или 0,77 м/год (Макаревич К.Г., 2004)., в период 2006...2023 гг. на -18,9 м (1,1 м/год); приток льда в КОА за эти периоды составил в сумме 9,15 м и 18,5 м соответственно.

В период 2006...2023 гг. слой Vsi в КОА уменьшился и составил -0,35 м/г (таблица 2) в сравнении с периодом 1977...1992 гг. – -0,62 м/г (Макаревич К.Г., 2004).; средние за периоды объемы стаявшего льда в КОА сократились с 1 103,6 тыс. м³ до 482,4 тыс. м³ (т.е. на 230 %), а вынесенного из КОП объемы льда увеличились с -874,0 тыс. м³ до -1 495,9 тыс. м³ (т.е. на 60 %) соответственно.

Приток льда из КОП компенсировал потери в КОА в период 1977/78...1991/92 гг. только на половину (49,5 %), а в период с 2006/07 по 2022/23 уже на 75,9 %. Среднее за период 1977/78...1991/92 гг. отношение площади КОП к площади всего ледника (AAR по КГП в %) составило 39 %, а за период 2006/07...2022/23 – 58 % соответственно. То же отношение площади КОП к площади всего ледника по снеговой линии, обозначаемой ЕЛА, (AAR по ЕЛА в %) был 30 % и 38 % соответственно. Понижение поверхности в области абляции (Vsi) с 1958 по 1972 гг. составило -0,26 м/г, с 1977 по 1992 гг. уже – 0,62 м/г, а с 2007 по 2023 гг. сократилось до -0,35 м/г, в области аккумуляции +0,08 м/г, -0,77 м/г и -1,11 м/г соответственно.

Из данных наблюдений следует, что величины таяния превышают величины понижения поверхности ледника. Эта разница обусловлена тем, что на место стаявших масс привносятся новые массы льда из области питания, тем самым частично компенсируя потери льда от таяния и повышая снижающуюся поверхность ледника на величину привноса. Итоговая величина привноса на леднике Центральный Туйыксу равна 10910000 м³ в.э. или 50 % от потерь на таяние, которая составила -21826300 м³ в.э. (рисунок 3).

Процентные отношения компенсационного привноса к величине таяния на леднике показывают, что область абляции

ледника получает недостаточное питание из области аккумуляции, причем, по мере приближения к концу языка ледника, величина привноса уменьшается (рисунок 3).

Это объясняется тем, что стаивание поверхности ледников наибольшее на кон-

це языков и наименьшее в районе фирновой линии (Черкасов П.А., 1961; Макаревич К.Г., 2004). Область питания за весь период наблюдений испытала большее понижение высоты поверхности по сравнению с областью абляции (таблица 1) (Макаревич К.Г., 2004).

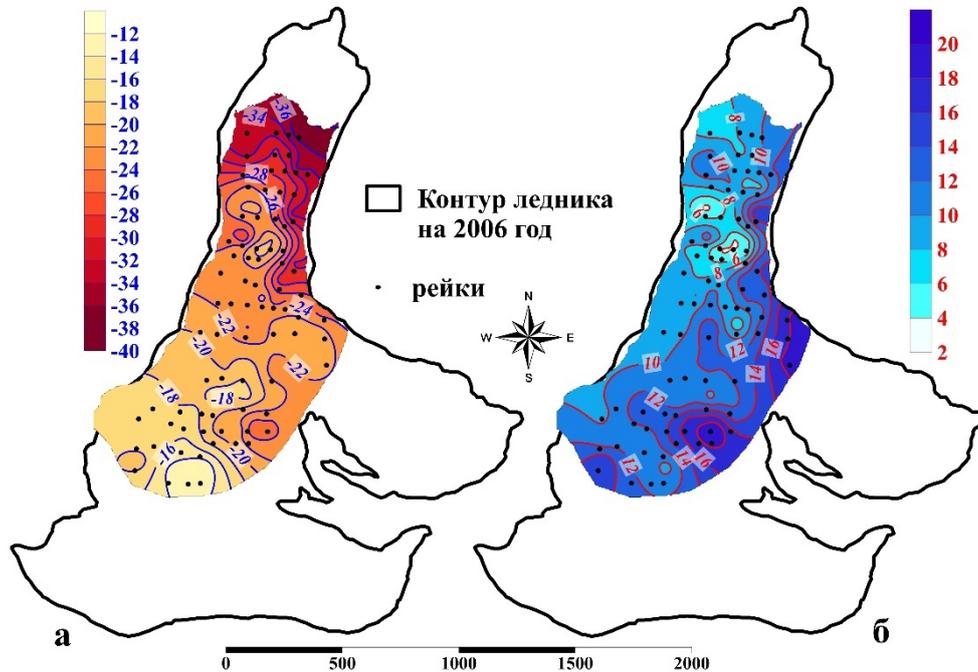


Рис. 3. Суммарная абляция льда (а) и суммарный привнос льда (б) в м в.э. за период 2006...2023 гг.

Это подтверждается появлением в приводораздельных участках КОП выходов скал, которых в течении многих предыдущих лет не наблюдалось. Большой вынос массы объясняется усилением абляции в КОП, увеличением воды в леднике, перемещением вверх зон льдообразования и даже исчезновения верхних из них в связи с повышением летних температур воздуха. Однако, указанные соотношения в изменении высот в КОП и КОА были иными в предыдущие периоды (таблица 2) (Макаревич К.Г., 2004). Сравнительный анализ внутреннего массообмена горных ледников хребта и ледника Центральный Туйыксу не представляется возможным, поскольку, к сожалению, наблюдения (измерения) на большинстве ледников, за исключением ледника Центральный Туйыксу, были прерваны в 1990-е годы.

В исследованиях (Dehecq et al., 2019; Brun et al., 2018; Sakai, A. et al., 2018) отмечено что при продолжающемся отступлении ледника и уменьшении величины коэффициента AAR - скорости всплытия будут посте-

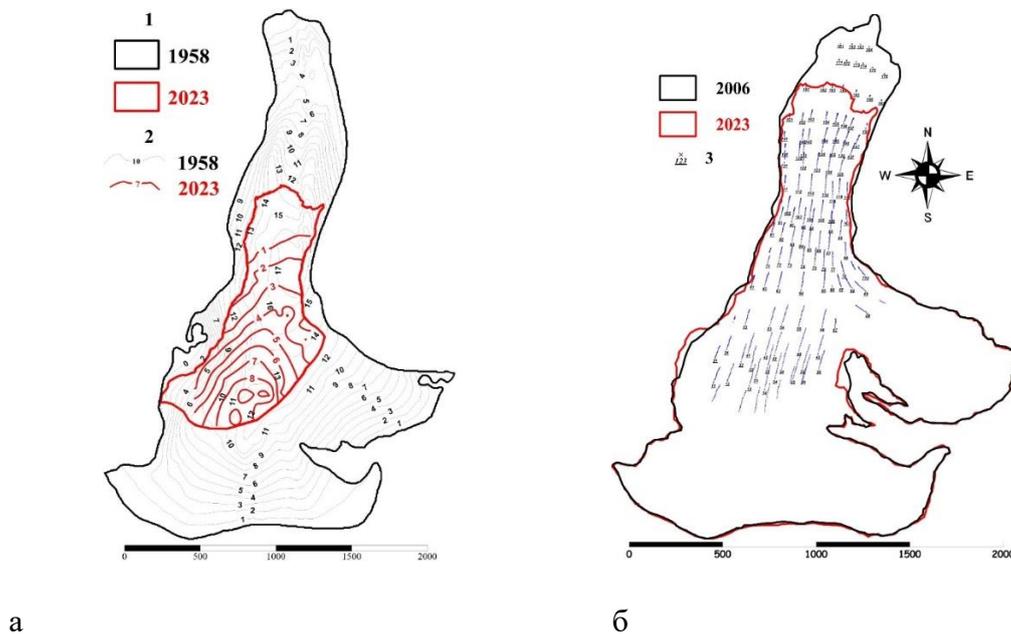
пенно уменьшаться. На леднике Центральный Туйыксу также наблюдается уменьшение значения AAR при отступлении ледника, однако значительного уменьшения привноса в область абляции не наблюдается. Амплитуда колебаний привноса составила от +1,11 м в.э до практически нуля, при среднем значении +0,621 м в.э за период 2006/07...2022/23 балансовые годы.

В целом распределение знака величин привноса в области абляции ледника не соответствует гипотезе о том, что скорости погружения в зоне аккумуляции имеют негативные (отрицательные) значения, а скорости всплытия в зоне абляции – положительные (Roger LeB. Hooke, 2019; Cuffey, KM., and Paterson, WSB., 2010). Таким образом, наблюдаемые на леднике Центральный Туйыксу отрицательные значения привноса (стока льда) в зоне, где теоретически должны быть только положительные величины, возможно объяснить зависимостью от скорости и характера движения льда, условий на ложе и бортах (Макаревич А.К., 1979, Макаревич К.Г. и др, 1969).

Связь стока льда с изменчивостью основных метеорологических параметров (осадками и температурой воздуха) очевидна, однако для ее понимания необходимы дополнительные наблюдения за режимом ледника. (Макаревич К.Г. и др, 1969).

Исследования, выполняемые на леднике Центральный Туйыксу, подтвердили полученные ранее выводы: самые высокие скорости отмечены в верхней части ледника, самые низкие на языке ледника; высокие скорости также отмечены в месте сужения ледника, где ширина ледника минимальная (рисунок 4). Та-

ким образом исследования изменений баланса массы V_{ni} как функции высоты, V_{hi} как функции кинематики, V_{si} и ΔL как результат взаимодействий внешних условий и кинематики показали, что на всем протяжении продольной оси ледника в КОА, ледник не получает полной компенсации затраченного при абляции льда. Из-за нехватки дотации льда из КОП происходит отступление ледника (сокращение его площади), уменьшение его толщины в целом и особенно нижней его части, сокращение длины ледника, которая за весь период наблюдений достигла 1190 м (рисунок 1).



1 – контур ледника; 2 – изолинии V_g ; 3 – точки речного поля на леднике

Рис. 4. Изменение скорости льда ледника Центральный Туйыксу за 1957/58 и 2022/23 балансовые годы, м/г (а) и изменение положения рек за период 2006...2023 гг (б).

В итоге средняя скорость движения льда ледника снизилась: средняя взвешенная по площади КОА скорость движения в период 1977...1992 гг. равнялась 10,5 м/год с экстремальными от 9,3 до 13,8 м/год, в период 2006...2023 гг. составила 4,8 м/год, с экстремальными значениями от 3,3 до 7,3 м/год. Максимальные скорости движения льда на леднике

Туйыксу 22...24 м/год наблюдались в период 1956...65 гг., уменьшились до 16 м/г в период 1977...1992 гг., а в период 2006...2023 гг. составляли 12,8 м/г. Среднее за два периода сокращение длины ледника увеличилось с -15 м/г до -25 м/г (таблица 1) (Макаревич К.Г. и др, 1969; Макаревич К.Г., 2004).

Таблица 1

Основные показатели кинематики массы ледника Центральный Гуйюксу в 2006...2023 гг.

Год	Кинематическая область аккумуляции, КОП				Кинематическая область абляции, КОА				Ледник в целом						
	S_f , км ²	V_{hf} , м/Г	b_{hf} , м/Г	V_{sf} , м/Г	S_i , км ²	V_{hi} , м/Г	b_{hi} , м/Г	V_{si} , м/Г	S , км ²	V_s , м/Г	КПП, м	AAR по КПП, %	ELA, м	AAR по ELA, %	ΔL , м/Г
	2007	1,566	-0,71	-0,25	-0,96	0,906	1,23	-1,87	-0,64	6,9	2,472	3 740	63	3 885	32
2008	0,904	-3,83	-0,15	-3,99	1,547	2,24	-2,06	0,18	7,3	2,451	3 850	37	3 980	22	-39
2009	2,058	0,00	0,40	0,40	0,393	0,02	-0,80	-0,78	6,5	2,451	3 650	84	3 710	66	-2
2010	1,963	-0,05	0,33	0,28	0,483	0,21	-1,20	-0,99	5,4	2,446	3 670	80	3 762	55	-26
2011	1,572	-0,34	0,13	-0,21	0,742	0,73	-1,26	-0,53	4,8	2,314	3 720	68	3 800	44	-29
2012	0,991	-1,99	0,00	-1,99	1,305	1,51	-1,80	-0,29	4,9	2,297	3 810	43	3 900	31	-31
2013	1,408	-0,48	0,24	-0,24	0,882	0,77	-1,27	-0,50	4,6	2,290	3 740	61	3 825	41	-25
2014	0,929	-2,86	-0,08	-2,94	1,347	1,97	-1,74	0,23	4,7	2,276	3 830	41	3 920	29	-28
2015	1,051	-1,52	0,03	-1,49	1,220	1,31	-1,44	-0,13	4,8	2,272	3 790	46	3 900	31	-49
2016	2,033	0,06	0,74	0,80	0,233	-0,49	-1,01	-1,50	4,1	2,266	3 610	90	3 730	48	-13
2017	0,864	-2,40	0,03	-2,37	1,391	1,49	-1,82	-0,33	4,1	2,256	3 850	38	3 950	26	-27
2018	0,989	-2,00	0,65	-1,35	1,259	1,57	-0,65	0,92	4,5	2,248	3 810	44	3 780	51	-13
2019	1,031	-1,96	0,28	-1,68	1,203	1,68	-1,32	0,36	3,9	2,235	3 800	46	3 900	32	-21
2020	1,550	-0,40	0,10	-0,31	0,678	0,92	-1,16	-0,24	3,3	2,228	3 720	70	3 800	46	-11
2021	1,552	-0,28	-0,21	-0,50	0,672	0,65	-1,52	-0,87	3,7	2,224	3 720	70	3 870	36	-21
2022	1,151	-1,32	-0,33	-1,66	1,059	1,44	-2,00	-0,56	3,7	2,210	3 780	52	3 980	24	-25
2023	1,270	-0,93	0,23	-0,70	0,924	1,28	-1,47	-0,19	4,2	2,194	3 760	58	3 850	40	-13
Средн,	1,346	-1,24	0,13	-1,11	0,956	1,09	-1,44	-0,35	4,8	2,281	3756	58	3855	38	-25
1977/92	1,15	-0,95	0,18	-0,76	1,78	0,61	-1,23	-0,62	10,5	2,93	3803	39	3880	30	-15

S – площадь; b_{hf} , b_{hi} – баланс массы соответствующих областей; f, i – индексы кинематических областей питания (КОП) и абляции (КОА), соответственно; V_h – изменение высоты поверхности за счет движения; V_s – суммарное изменение высоты поверхности в результате аккумуляции, абляции и движения льда, в соответствующих областях и в целом по леднику; V_t – горизонтальная компонента скорости движения льда; КПП – высота кинематической границы питания; AAR – отношения определяемой площадью аккумуляции к площади всего ледника; ELA – высота снеговой линии; ΔL – изменение длины ледника

Таблица 2

Скорости изменения высоты поверхности ледника Центральный Туйыксу в результате движения льда и внешнего массообмена

Период	Область питания				Область абляции				Весь ледник	
	S_f , км ²	V_{hf} , м/Г	b_{nf} , м/Г	V_{sf} , м/Г	S_i , км ²	V_{hi} , м/Г	b_{ni} , м/Г	V_{si} , м/Г	S средняя, км ²	V_s , м/Г
2007/23	1,35	-1,24	0,13	-1,11	0,96	1,09	-1,44	-0,35	2,30	-0,54
1977/92	1,15	-0,95	0,18	-0,77	1,78	0,61	-1,23	-0,62	2,93	-0,62
1958/72	-	-0,59		0,08		0,61		-0,26	2,85	-0,12
1937/64	-	-0,52		0,08		0,54		-0,35	-	-0,45

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ледник Центральный Туйыксу, как и подавляющее большинство горных ледников мира, отступая теряет массу и объем, что подтверждается трендом кумулятивного баланса массы ледника, и как следствие снижаются скорости течения льда. При относительно небольших колебаниях КГП колебания выноса массы льда из КОП и притока его в КОА небольшие и в целом достаточно устойчивы по сравнению с колебаниями высоты поверхности в обеих областях, зависящими в большей степени от внешних условий, чем от кинематики его массы.

Результаты наших исследований свидетельствуют о негативном влиянии современных климатических изменений на динамику процессов, происходящих в леднике. В текущих климатических условиях режим ледника Центральный Туйыксу по кинематическим областям показывает, что ледник не получает компенсации выносимых из области питания масс льда и не компенсирует в области абляции потери льда вследствие его стаивания.

Однако, при сохранении отмеченной с начала 2000-х гг. тенденции увеличения величины зимнего баланса массы ледника, ледник достигнет устойчивого состояния к концу 2030-х середине 2040-х гг, при котором масса льда привносящаяся из области питания будет компенсировать потери льда в области абляции.

Внешний и внутренний массообмен ледников, выраженный изменениями кинематических параметров движущейся массы льда, представляют важную информацию о динамической реакции ледников в условиях изменения климата. В дальнейшем планируется продолжить исследования внутреннего

массообмена ледника Центральный Туйыксу и расширить исследования на других ледниках северного склона Иле Алатау.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан по теме «Ледниковые системы трансграничных бассейнов Центральной Азии: состояние, современные и прогнозные изменения, роль в обеспечении водной безопасности стран региона», ИРН BR 18574176.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157964>
2. Оледенение Северной и Центральной Евразии в современную эпоху / отв. ред. В.М. Котляков; Ин-т географии РАН. – М.: Наука, 2006. – 482 с. – ISBN 5-02-035344-2
3. Макаревич К.Г. Баланс и кинематика массы ледников Тянь-Шаня на примере ледника Туюксу // Гидрометеорология и экология. – 2004. – №3. – С. 74-88.
4. Zemp, M., Huss, M., Thibert, E., Eckert, N., McNabb, R., Huber, J., Barandun, M., Machguth, H., Nussbaumer, S. U., Gärtner-Roer, I., Thomson, L., Paul, F., Maussion, F., Kutuzov, S., & Cogley, J. G. (2019). Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016. *Nature*, 568(7752), 382–386. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1071-0>
5. Kapitsa, V., Shahgedanova, M., Severskiy, I., Kasatkin, N., White, K., & Usmanova, Z. (2020). Assessment of Changes in Mass Balance of the Tuyuksu Group of Glaciers, Northern Tien Shan, Between 1958 and 2016 Using Ground-Based Observations and Pléiades Satellite Imagery. *Frontiers in Earth Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00259>
6. Brun, F., Berthier, E., Wagnon, P., Kääb, A., & Treichler, D. (2017). A spatially resolved estimate of High Mountain Asia glacier mass balances from 2000 to 2016. *Nature Geoscience*, 10(9), 668–673. <https://doi.org/10.1038/ngeo2999>

7. Barandun, M., Huss, M., Usabaliev, R., Azisov, E., Berthier, E., Kääh, A., Bolch, T., & Hoelzle, M. (2018). Multi-decadal mass balance series of three Kyrgyz glaciers inferred from modelling constrained with repeated snow line observations. *The Cryosphere*, 12(6), 1899–1919. <https://doi.org/10.5194/tc-12-1899-2018>
8. Hoelzle, M., Barandun, M., Bolch, T., Fiddes, J., Gafurov, A., Muccione, V., Saks, T., & Shahgedanova, M. (2019). The status and role of the alpine cryosphere in Central Asia. In *The Aral Sea Basin* (pp. 100–121). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780429436475-8>
9. Barandun, M., Fiddes, J., Scherler, M., Mathys, T., Saks, T., Petrakov, D., & Hoelzle, M. (2020). The state and future of the cryosphere in Central Asia. *Water Security*, 11, 100072. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2020.100072>
10. Макаревич К.Г. Ледник Центральный Туюксайский от международного геофизического года до настоящего времени // «Географические проблемы устойчивого развития: теория и практика»: Матр. междунар. науч.-практич. конференции, посвященной 70-летию Инс-та географии АО ЦНЗМО РК. – Алматы, 2008, – С.81-88
11. Северский И.В., Вилесов Е.Н., Макаревич Г.К., Диярова К.Ш. Гляциологические исследования в Казахстане: этапы развития, состояние перспективы. // «Географические проблемы устойчивого развития: теория и практика»: Матр. междунар. науч.-практич. конференции, посвященной 70-летию Инс-та географии АО ЦНЗМО РК. – Алматы, 2008, – С. 136-145.
12. Вилесов Е.Н., Уваров В.Н. Эволюция современного оледенения Заилийского Алатау в XX веке. – Алматы: Казак университети, 2001. – 252 с.
13. Макаревич К.Г., Касаткин Н.Е. Полувековые исследования баланса массы Центрального Туюксайского ледника в Заилийском Алатау. // «Географические проблемы устойчивого развития: теория и практика»: Матр. междунар. науч.-практич. конференции, посвященной 70-летию Инс-та географии АО ЦНЗМО РК. – Алматы, 2008, – С. 99-111.
14. Вилесов Е.Н. Динамика и современное состояние оледенения гор Казахстана. – Алматы, 2016. – 268 с.
15. Severskiy, I., Vilesov, E., Armstrong, R., Kokarev, A., Kogutenko, L., Usmanova, Z., Morozova, V., & Raup, B. (2016). Changes in glaciation of the Balkhash–Alakol basin, central Asia, over recent decades. *Annals of Glaciology*, 57(71), 382–394. <https://doi.org/10.3189/2016AoG71A575>
16. Stocker-Waldhuber, M., Fischer, A., Helfricht, K., & Kuhn, M. (2019). Long-term records of glacier surface velocities in the Ötztal Alps (Austria). *Earth System Science Data*, 11(2), 705–715. <https://doi.org/10.5194/essd-11-705-2019>
17. Hooke, R. LeB. (2019). *Principles of Glacier Mechanics*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108698207>
18. Cuffey, K. M., & W.S.B. Paterson. (2010). *The physics of glaciers* (Fourth edition.). Academic Press.
19. Пальгов Н.Н. Определение мощности горных ледников методом балансов // Изв. Всес.геогр. об-ва. – 1958. – Т.90, Вып.2.
20. Черкасов П.А. Динамика ледников бассейна реки Баскан Джунгарского Алатау в 1956-1957 годах // Вопросы географии Казахстана. – 1961. – Вып.8. – С. 75-97
21. Михалев В.И., Цветков Д.Г., Шумский П.А. К методике изучения механизма колебаний ледников (на примере ледника Обручева), Полярный Урал // Материалы гляциологических исследований. Хроника обсуждения. – 1972. – Вып. 19. – С. 221-236
22. Макаревич К.Г. Методические аспекты исследований баланса массы и колебаний горных ледников. Метод. рук-во. – Алматы, 2007. – 104 с.
23. Vincent, C., Le Meur, E., Six, D., Funk, M., Hoelzle, M., & Preunkert, S. (2007). Very high-elevation Mont Blanc glaciated areas not affected by the 20th century climate change. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D9). <https://doi.org/10.1029/2006JD007407>
24. Réveillet, M., Vincent, C., Six, D., Rabatel, A., Sanchez, O., Piard, L., & Laarman, O. (2021). Spatio-temporal variability of surface mass balance in the accumulation zone of the Mer de Glace, French Alps, from multitemporal terrestrial LiDAR measurements. *Journal of Glaciology*, 67(261), 137–146. <https://doi.org/10.1017/jog.2020.92>
25. Jourdain, B., Vincent, C., Réveillet, M., Rabatel, A., Brun, F., Six, D., Laarman, O., Piard, L., Ginot, P., Sanchez, O., & Berthier, E. (2023). A method to estimate surface mass-balance in glacier accumulation areas based on digital elevation models and submergence velocities. *Journal of Glaciology*, 69(277), 1403–1418. <https://doi.org/10.1017/jog.2023.29>
26. Vincent, C., Cusicanqui, D., Jourdain, B., Laarman, O., Six, D., Gilbert, A., Walpersdorf, A., Rabatel, A., Piard, L., Gimbert, F., Gagliardini, O., Peyaud, V., Arnaud, L., Thibert, E., Brun, F., & Nanni, U. (2021). Geodetic point surface mass balances: a new approach to determine point surface mass balances on glaciers from remote sensing measurements. *The Cryosphere*, 15(3), 1259–1276. <https://doi.org/10.5194/tc-15-1259-2021>
27. Pelto, B. M., & Menounos, B. (2021). Surface Mass-Balance Gradients From Elevation and Ice Flux Data in the Columbia Basin, Canada. *Frontiers in Earth Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.675681>
28. Belart, J. M. C., Berthier, E., Magnússon, E., Anderson, L. S., Pálsson, F., Thorsteinsson, T., Howat, I. M., Aðalgeirsdóttir, G., Jóhannesson, T., & Jarosch, A. H. (2017). Winter mass balance of Drangajökull ice cap (NW Iceland) derived from satellite sub-meter stereo images. *The Cryosphere*, 11(3), 1501–1517. <https://doi.org/10.5194/tc-11-1501-2017>
29. Schöber, J., Schneider, K., Helfricht, K., Schattan, P., Achleitner, S., Schöberl, F., & Kimbauer, R. (2014). Snow cover characteristics in a glacierized catchment in the Tyrolean Alps - Improved spatially distributed modelling by usage of Lidar data. *Journal of Hydrology*, 519, 3492–3510. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.12.054>
30. Sold, L., Huss, M., Hoelzle, M., Anderegg, H., Joerg, P. C., & Zemp, M. (2013). Methodological approaches to infer end-of-winter snow distribution on alpine glaciers. *Journal of Glaciology*, 59(218), 1047–1059. <https://doi.org/10.3189/2013JoG13J015>
31. Vincent, C., Vallon, M., Pinglot, J. F., Funk, M., & Reynaud, L. (1997). Snow accumulation and ice flow at Dôme du Goûter (4300 m), Mont Blanc, French Alps. *Journal of Glaciology*, 43(145), 513–521. <https://doi.org/10.3189/S0022143000035127>
32. Meier, M. F., & Tangborn, W. V. (1965). *Net Budget and Flow of South Cascade Glacier*, Washington. *Journal of Glaciology*, 5(41), 547–566. <https://doi.org/10.3189/S0022143000018608>
33. Пальгов Н.Н. Сток ледников Казахстана // Гляциологические исследования в период МПГ. Заилийский и Джунгарский Алатау. – 1962. – Вып. 2.
34. Оледенение Заилийского Алатау / Ред. К.Г. Макаревич — М.: Наука, 1969. — 286 с.

35. Cherkasov, P. A., Ahmetova, G. S., & Hastenrath, S. (1996). Ice flow and mass continuity of Shumsky Glacier in the Djungarski Alatau Range of Kazakhstan, Central Asia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 101(D8), 12913–12920. <https://doi.org/10.1029/96JD00615>
36. Ahmetova G.S., Cherkasov P.A., & Hastenrath S. (1998). Regime of Muravlev Glacier in the Djungarskiy Alatau Range of Kazakhstan, Central Asia. *Zeitschrift Fyer Gletscherkunde Und Glazialgeologie*, 34(1), 37–46.
37. Zhang, Z., Xu, Y., Liu, S., Ding, J., & Zhao, J. (2023). Seasonal variations in glacier velocity in the High Mountain Asia region during 2015–2020. *Journal of Arid Land*, 15(6), 637–648. <https://doi.org/10.1007/s40333-023-0016-5>
38. Van Wyk de Vries, M., & Wickert, A. D. (2021). Glacier Image Velocimetry: an open-source toolbox for easy and rapid calculation of high-resolution glacier velocity fields. *The Cryosphere*, 15(4), 2115–2132. <https://doi.org/10.5194/tc-15-2115-2021>
39. Millan, R., Mouginot, J., Rabatel, A., Jeong, S., Cusicanqui, D., Derkacheva, A., & Chekki, M. (2019). Mapping Surface Flow Velocity of Glaciers at Regional Scale Using a Multiple Sensors Approach. *Remote Sensing*, 11(21), 2498. <https://doi.org/10.3390/rs11212498>
40. Yang, R., Hock, R., Kang, S., Guo, W., Shangguan, D., Jiang, Z., & Zhang, Q. (2022). Glacier Surface Speed Variations on the Kenai Peninsula, Alaska, 2014–2019. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 127(3). <https://doi.org/10.1029/2022JF006599>
41. Dehecq, A., Gourmelen, N., Gardner, A. S., Brun, F., Goldberg, D., Nienow, P. W., Berthier, E., Vincent, C., Wagnon, P., & Trouvé, E. (2019). Twenty-first century glacier slowdown driven by mass loss in High Mountain Asia. *Nature Geoscience*, 12(1), 22–27. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0271-9>
42. Østrem, G., & Brugman, M. (1991). Glacier mass-balance measurements: a manual for field and office work.
43. Kokarev A.L., Kapitsa V.P., Bolch T., Severskiy I.V., Kasatkin N.E., Shahgedanova M., & Usmanova Z.S. (2022). The results of geodetic measurements of the mass balance of some glaciers in the Zailiyskiy Alatau (Trans-Ili Alatau). *Journal “Ice and Snow,”* 62(4), 527–538. <https://doi.org/10.31857/S2076673422040149>
44. Li, H., Wang, P., Li, Z., Jin, S., Xu, C., Liu, S., Zhang, Z., & Xu, L. (2022). An application of three different field methods to monitor changes in Urumqi Glacier No. 1, Chinese Tien Shan, during 2012–18. *Journal of Glaciology*, 68(267), 41–53. <https://doi.org/10.1017/jog.2021.71>
45. Cao, B., Pan, B., Guan, W., Wang, J., & Wen, Z. (2017). Changes in ice volume of the Ningchan No.1 Glacier, China, from 1972 to 2014, as derived from in situ measurements. *Journal of Glaciology*, 63(242), 1025–1033. <https://doi.org/10.1017/jog.2017.70>
46. Shahgedanova, M., Nosenko, G., Bushueva, I., & Ivanov, M. (2012). Changes in area and geodetic mass balance of small glaciers, Polar Urals, Russia, 1950–2008. *Journal of Glaciology*, 58(211), 953–964. <https://doi.org/10.3189/2012JoG11J233>
47. Макаревич А.К. О кинематике поверхности горного долинного ледника // Режим ледников и снежных лавин Казахстана. – Алма-Ата: Изд-во «Наука» КазССР, – 1979. – С.120-124.
48. Макаревич К.Г., Макаревич А.К. Опыт прямых определений скорости поверхности ледника // Режим ледников и снежных лавин Казахстана. – Алма-Ата: Изд-во «Наука» КазССР, – 1979. – С.125-131.
49. Kotlyakov, V. M., Chernova, L. P., Muraviev, A. Ya., Khromova, T. E., & Zverkova, N. M. (2017). Changes of mountain glaciers in the Southern and Northern Hemispheres over the past 160 years. *Ice and Snow*, 57(4), 453–467. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-4-453-467>
50. Zemp, M., Gärtner-Roer, I., Nussbaumer, S. U., Welty, E. Z., Dussailant, I., & Bannwart, J. (2023). WGMS 2023. *Global Glacier Change Bulletin No. 5 (2020–2021)*. (pp. 1–134). ISC(WDS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/WMO, World Glacier Monitoring Service.
51. Северский, И., Муканова, Б., Капица, В., Татъкова, М., Кокарев, А. Шестерова, И. Изменение оледенения северного склона Иле Алатау за семидесятилетний период // Вестник КазНУ им. Аль-Фараби. Сер. географическая. №73 (2). – 2024. – С. 59–71.
52. Shahgedanova, M., Afzal, M., Severskiy, I., Usmanova, Z., Saidaliyeva, Z., Kapitsa, V., Kasatkin, N., & Dolgikh, S. (2018). Changes in the mountain river discharge in the northern Tien Shan since the mid-20th Century: Results from the analysis of a homogeneous daily streamflow data set from seven catchments. *Journal of Hydrology*, 564, 1133–1152. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.001>
53. Van Tricht, L., Huybrechts, P., Van Breedam, J., Fürst, J. J., Rybak, O., Satylkanov, R., Ermenbaiev, B., Popovnin, V., Neyns, R., Paice, C. M., & Malz, P. (2021). Measuring and inferring the ice thickness distribution of four glaciers in the Tien Shan, Kyrgyzstan. *Journal of Glaciology*, 67(262), 269–286. <https://doi.org/10.1017/jog.2020.104>
54. Lambrecht, A., Mayer, C., Bohleber, P., & Aizen, V. (2020). High altitude accumulation and preserved climate information in the western Pamir, observations from the Fedchenko Glacier accumulation basin. *Journal of Glaciology*, 66(256), 219–230. <https://doi.org/10.1017/jog.2019.97>
55. Nosenko G.A., Lavrentiev I.I., Glazovskii A.F., Kazatkin N.E., & A.L. Kokarev. (2016). The polythermal structure of Central Tuyuksu glacier. *Kriosfera Zemli*, XX(4), 105–115. [https://doi.org/10.21782/KZI560-7496-2016-4\(105-115\)](https://doi.org/10.21782/KZI560-7496-2016-4(105-115))
56. Lavrentiev, I., Machguth H., & Kronenberg M. (2018). New data on ice thickness and internal structure of glaciers in Tien-Shan and Pamir-Alay (Kyrgyzstan). *Practical Geography and XXI Century Challenges. International Geographical Union Thematic Conference Dedicated to the Centennial of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences*, 80–80.
57. Farinotti, D., Huss, M., Fürst, J. J., Landmann, J., Machguth, H., Maussion, F., & Pandit, A. (2019). A consensus estimate for the ice thickness distribution of all glaciers on Earth. *Nature Geoscience*, 12(3), 168–173. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0300-3>
58. Barandun, M., Pohl, E., Naegeli, K., McNabb, R., Huss, M., Berthier, E., Saks, T., & Hoelzle, M. (2021). Hot Spots of Glacier Mass Balance Variability in Central Asia. *Geophysical Research Letters*, 48(11). <https://doi.org/10.1029/2020GL092084>
59. Azisov, E., Hoelzle, M., Vorogushyn, S., Saks, T., Usabaliev, R., Esenaman uulu, M., & Barandun, M. (2022). Reconstructed Centennial Mass Balance Change for Golubin Glacier, Northern Tien Shan. *Atmosphere*, 13(6), 954. <https://doi.org/10.3390/atmos13060954>
60. Popovnin V.V., Gubanov A.S., Satylkanov R.A., & Ermenbayev B.O. (2021). Mass balance of the Sary-Tor Glacier reproduced from meteorological data. *Ice and Snow*, 61(1), 58–74. <https://doi.org/10.31857/S2076673421010071>
61. Kenzhebaev, R., Barandun, M., Kronenberg, M., Chen, Y., Usabaliev, R., & Hoelzle, M. (2017). Mass balance observations and reconstruction for Batysh Sook Glacier, Tien Shan, from 2004 to 2016. *Cold Regions Science and Technology*, 135, 76–89. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.12.007>

62. Макаревич К.Г., Касаткин Н.Е. Полувековые исследования баланса массы и морфологических изменений Центрального Туюксуйского ледника в Заилийском Алатау. // Лед и снег. – 2011. – №1. – С. 36–44.

63. Brun, F., Wagnon, P., Berthier, E., Shea, J. M., Immerzeel, W. W., Kraaijenbrink, P. D. A., Vincent, C., Reverchon, C., Shrestha, D., & Arnaud, Y. (2018). Ice cliff contribution to the tongue-wide ablation of Changri Nup Glacier, Nepal, central Himalaya. *The Cryosphere*, 12(11), 3439–3457. <https://doi.org/10.5194/tc-12-3439-2018>

64. Sakai, A., Fujita, K., Duan, K., Pu, J., Nakawo, M., & Yao, T. (2006). Five decades of shrinkage of July 1st glacier, Qilian Shan, China. *Journal of Glaciology*, 52(176), 11–16. <https://doi.org/10.3189/172756506781828836>

REFERENCES

1. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157964>
2. Kotlyakov, V.M. (otv. red.) (2006). *Oledenenie Severnoi i Tsentral'noi Evrazii v sovremennuyu epokhu* [Glaciation of Northern and Central Eurasia in the Modern Era]. In-t geografii RAN. – M.: Nauka. – 482 p. – ISBN 5-02-035344-2 [in Russian].
3. Makarevich K.G. (2004). *Balans i kinematika massy lednikov Tyan'-Shanya na primere lednika Tuyuksu* [Balance and kinematics of the mass of Tien-Shan glaciers on the example of Tuyuksu glacier]. *Gidrometeorologiya i ekologiya*. no 3. – pp. 74–88 [in Russian].
4. Zemp, M., Huss, M., Thibert, E., Eckert, N., McNabb, R., Huber, J., Barandun, M., Machguth, H., Nussbaumer, S. U., Gärtner-Roer, I., Thomson, L., Paul, F., Maussion, F., Kutuzov, S., & Cogley, J. G. (2019). Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016. *Nature*, 568(7752), 382–386. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1071-0>
5. Kapitsa, V., Shahgedanova, M., Severskiy, I., Kasatkin, N., White, K., & Usmanova, Z. (2020). Assessment of Changes in Mass Balance of the Tuyuksu Group of Glaciers, Northern Tien Shan, Between 1958 and 2016 Using Ground-Based Observations and Pléiades Satellite Imagery. *Frontiers in Earth Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00259>
6. Brun, F., Berthier, E., Wagnon, P., Käab, A., & Treichler, D. (2017). A spatially resolved estimate of High Mountain Asia glacier mass balances from 2000 to 2016. *Nature Geoscience*, 10(9), 668–673. <https://doi.org/10.1038/ngeo2999>
7. Barandun, M., Huss, M., Usabaliev, R., Azisov, E., Berthier, E., Käab, A., Bolch, T., & Hoelzle, M. (2018). Multi-decadal mass balance series of three Kyrgyz glaciers inferred from modelling constrained with repeated snow line observations. *The Cryosphere*, 12(6), 1899–1919. <https://doi.org/10.5194/tc-12-1899-2018>
8. Hoelzle, M., Barandun, M., Bolch, T., Fiddes, J., Gafurov, A., Muccione, V., Saks, T., & Shahgedanova, M. (2019). The status and role of the alpine cryosphere in Central Asia. In *The Aral Sea Basin* (pp. 100–121). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780429436475-8>
9. Barandun, M., Fiddes, J., Scherler, M., Mathys, T., Saks, T., Petrakov, D., & Hoelzle, M. (2020). The state and future of the cryosphere in Central Asia. *Water Security*, 11, 100072. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2020.100072>
10. Makarevich K.G. (2008). *Lednik Tsentral'nyi Tuyuksuiskii ot mezhdunarodnogo geofizicheskogo goda do nastoyashchego vremeni* [The Central Tuyuksuisky Glacier from the International Geophysical Year to the present time]. «Geograficheskie problemy ustoichivogo razvitiya: teoriya i praktika»: Matr. mezhdunar. nauch.-praktich. konferentsii, posvyashchennoi 70-letiyu Ins-ta geografii AO TsNZMO RK. – Almaty. – pp.81–88 [in Russian].
11. Severskiy I.V., Vilesov E.N., Makarevich G.K., Diyarova K.Sh. (2008). *Glyatsiologicheskie issledovaniya v Kazakhstane: etapy razvitiya, sostoyanie perspektivy* [Glaciological researches in Kazakhstan: stages of development, state, prospects]. «Geograficheskie problemy ustoichivogo razvitiya: teoriya i praktika»: Matr. mezhdunar. nauch.-praktich. konferentsii, posvyashchennoi 70-letiyu Ins-ta geografii AO TsNZMO RK. – Almaty. – pp. 136–145 [in Russian].
12. Vilesov E.N., Uvarov V.N. (2001). *Evolutsiya sovremennogo oledneniya Zailiyskogo Alatau v XX veke* [Evolution of modern glaciation of the Zailiysky Alatau in the 20th century]. – Almaty: Kazak universiteti. – 252 p [in Russian].
13. Makarevich K.G., Kasatkin N.E. (2008). *Poluvekovye issledovaniya balansa massy Tsentral'nogo Tuyuksuiskogo lednika v Zailiyskom Alatau* [Half-century mass balance researches of the Central Tuyuksuisky Glacier in the Zailiyskiy Alatau]. «Geograficheskie problemy ustoichivogo razvitiya: teoriya i praktika»: Matr. mezhdunar. nauch.-praktich. konferentsii, posvyashchennoi 70-letiyu Ins-ta geografii AO TsNZMO RK. – Almaty. – pp. 99–111 [in Russian].
14. Vilesov E.N. (2016). *Dinamika i sovremennoe sostoyanie oledneniya gor Kazakhstana* [Dynamics and current state of glaciation of mountains of Kazakhstan]. – Almaty. – 268 p [in Russian].
15. Severskiy, I., Vilesov, E., Armstrong, R., Kokarev, A., Kogutenko, L., Usmanova, Z., Morozova, V., & Raup, B. (2016). Changes in glaciation of the Balkhash–Alakol basin, central Asia, over recent decades. *Annals of Glaciology*, 57(71), 382–394. <https://doi.org/10.3189/2016AoG71A575>
16. Stocker-Waldhuber, M., Fischer, A., Helfricht, K., & Kuhn, M. (2019). Long-term records of glacier surface velocities in the Ötztal Alps (Austria). *Earth System Science Data*, 11(2), 705–715. <https://doi.org/10.5194/essd-11-705-2019>
17. Hooke, R. LeB. (2019). *Principles of Glacier Mechanics*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108698207>
18. Cuffey, K. M., & W.S.B. Paterson. (2010). *The physics of glaciers* (Fourth edition.). Academic Press.
19. Pal'gov N.N. (1958). *Opreделение moshchnosti gornyykh lednikov metodom balansov* [Determination of mountain glacier thickness by using the balance method]. *Izv. Vses.geogr. ob-va*, Vol.90, no.2 [in Russian].
20. Cherkasov P.A. (1961). *Dinamika lednikov basseina reki Baskan Dzhungarskogo Alatau v 1956-1957 godakh* [Dynamics of glaciers of the Baskan River basin of the Dzungarian Alatau in 1956-1957]. *Voprosy geografii Kazakhstana*, no.8, pp. 75–97 [in Russian].
21. Mikhalev V.I., Tsvetkov D.G., Shumskii P.A. (1972). *K metodike izucheniya mekhanizma kolebaniy lednikov (na primere lednika Obrucheve), Polyarnyi Ural* [To the methodology of studying the mechanism of glacier oscillations (using the example of the Obruchev Glacier), Polar Urals]. *Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy. Khronika obsuzhdeniya*, no. 19, pp. 221–236 [in Russian].
22. Makarevich K.G. (2007). *Metodicheskie aspekty issledovaniy balansa massy i kolebaniy gornyykh lednikov* [Methodological aspects of studies of mass balance and fluctuations of mountain glaciers]. *Metod. ruk-vo*. – Almaty, 104 p [in Russian].
23. Vincent, C., Le Meur, E., Six, D., Funk, M., Hoelzle, M., & Preunkert, S. (2007). Very high-elevation Mont Blanc glaciated areas not affected by the 20th century climate change. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D9). <https://doi.org/10.1029/2006JD007407>

24. Réveillet, M., Vincent, C., Six, D., Rabatel, A., Sanchez, O., Piard, L., & Laarman, O. (2021). Spatio-temporal variability of surface mass balance in the accumulation zone of the Mer de Glace, French Alps, from multitemporal terrestrial LiDAR measurements. *Journal of Glaciology*, 67(261), 137–146. <https://doi.org/10.1017/jog.2020.92>
25. Jourdain, B., Vincent, C., Réveillet, M., Rabatel, A., Brun, F., Six, D., Laarman, O., Piard, L., Ginot, P., Sanchez, O., & Berthier, E. (2023). A method to estimate surface mass-balance in glacier accumulation areas based on digital elevation models and submergence velocities. *Journal of Glaciology*, 69(277), 1403–1418. <https://doi.org/10.1017/jog.2023.29>
26. Vincent, C., Cusicanqui, D., Jourdain, B., Laarman, O., Six, D., Gilbert, A., Walpersdorf, A., Rabatel, A., Piard, L., Gimbert, F., Gagliardini, O., Peyaud, V., Arnaud, L., Thibert, E., Brun, F., & Nanni, U. (2021). Geodetic point surface mass balances: a new approach to determine point surface mass balances on glaciers from remote sensing measurements. *The Cryosphere*, 15(3), 1259–1276. <https://doi.org/10.5194/tc-15-1259-2021>
27. Pelto, B. M., & Menounos, B. (2021). Surface Mass-Balance Gradients From Elevation and Ice Flux Data in the Columbia Basin, Canada. *Frontiers in Earth Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.675681>
28. Belart, J. M. C., Berthier, E., Magnússon, E., Anderson, L. S., Pálsson, F., Thorsteinsson, T., Howat, I. M., Aðalgeirsdóttir, G., Jóhannesson, T., & Jarosch, A. H. (2017). Winter mass balance of Drangajökull ice cap (NW Iceland) derived from satellite sub-meter stereo images. *The Cryosphere*, 11(3), 1501–1517. <https://doi.org/10.5194/tc-11-1501-2017>
29. Schöberl, J., Schneider, K., Helfricht, K., Schattan, P., Achleitner, S., Schöberl, F., & Kimbauer, R. (2014). Snow cover characteristics in a glacierized catchment in the Tyrolean Alps - Improved spatially distributed modelling by usage of Lidar data. *Journal of Hydrology*, 519, 3492–3510. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.12.054>
30. Sold, L., Huss, M., Hoelzle, M., Andereggen, H., Joerg, P. C., & Zemp, M. (2013). Methodological approaches to infer end-of-winter snow distribution on alpine glaciers. *Journal of Glaciology*, 59(218), 1047–1059. <https://doi.org/10.3189/2013JoG13J015>
31. Vincent, C., Vallon, M., Pinglot, J. F., Funk, M., & Reynaud, L. (1997). Snow accumulation and ice flow at Dôme du Gouter (4300 m), Mont Blanc, French Alps. *Journal of Glaciology*, 43(145), 513–521. <https://doi.org/10.3189/S0022143000035127>
32. Meier, M. F., & Tangborn, W. V. (1965). Net Budget and Flow of South Cascade Glacier, Washington. *Journal of Glaciology*, 5(41), 547–566. <https://doi.org/10.3189/S0022143000018608>
33. Pal'gov N.N. (1962). Stok lednikov Kazakhstana [Runoff of glaciers of Kazakhstan]. *Glyatsiologicheskies issledovaniya v period MGG. Zailiiskii i Dzhungarskii Alatau*, no. 2. [in Russian].
34. Makarevich K.G. (ed.) (1969). *Olednenie Zailiiskogo Alatau* [Glaciation of the Zailiyskiy Alatau]. M.: Nauka, 286 p [in Russian].
35. Cherkasov, P. A., Ahmetova, G. S., & Hastenrath, S. (1996). Ice flow and mass continuity of Shumsky Glacier in the Djungarski Alatau Range of Kazakhstan, Central Asia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 101(D8), 12913–12920. <https://doi.org/10.1029/96JD00615>
36. Ahmetova G.S., Cherkasov P.A., & Hastenrath S. (1998). Regime of Muravlev Glacier in the Djungarskiy Alatau Range of Kazakhstan, Central Asia. *Zeitschrift Fyer Gletscherkunde Und Glazialgeologie*, 34(1), 37–46.
37. Zhang, Z., Xu, Y., Liu, S., Ding, J., & Zhao, J. (2023). Seasonal variations in glacier velocity in the High Mountain Asia region during 2015–2020. *Journal of Arid Land*, 15(6), 637–648. <https://doi.org/10.1007/s40333-023-0016-5>
38. Van Wyk de Vries, M., & Wickert, A. D. (2021). Glacier Image Velocimetry: an open-source toolbox for easy and rapid calculation of high-resolution glacier velocity fields. *The Cryosphere*, 15(4), 2115–2132. <https://doi.org/10.5194/tc-15-2115-2021>
39. Millan, R., Mouginot, J., Rabatel, A., Jeong, S., Cusicanqui, D., Derkacheva, A., & Chekki, M. (2019). Mapping Surface Flow Velocity of Glaciers at Regional Scale Using a Multiple Sensors Approach. *Remote Sensing*, 11(21), 2498. <https://doi.org/10.3390/rs11212498>
40. Yang, R., Hock, R., Kang, S., Guo, W., Shangguan, D., Jiang, Z., & Zhang, Q. (2022). Glacier Surface Speed Variations on the Kenai Peninsula, Alaska, 2014–2019. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 127(3). <https://doi.org/10.1029/2022JF006599>
41. Dehecq, A., Goumelen, N., Gardner, A. S., Brun, F., Goldberg, D., Nienow, P. W., Berthier, E., Vincent, C., Wagnon, P., & Trouvé, E. (2019). Twenty-first century glacier slowdown driven by mass loss in High Mountain Asia. *Nature Geoscience*, 12(1), 22–27. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0271-9>
42. Østrem, G., & Brugman, M. (1991). *Glacier mass-balance measurements: a manual for field and office work*.
43. Kokarev A.L., Kapitsa V.P., Bolch T., Severskiy I.V., Kasatkin N.E., Shahgedanova M., & Usmanova Z.S. (2022). The results of geodetic measurements of the mass balance of some glaciers in the Zailiyskiy Alatau (Trans-Ili Alatau). *Journal "Ice and Snow,"* 62(4), 527–538. <https://doi.org/10.31857/S2076673422040149>
44. Li, H., Wang, P., Li, Z., Jin, S., Xu, C., Liu, S., Zhang, Z., & Xu, L. (2022). An application of three different field methods to monitor changes in Urumqi Glacier No. 1, Chinese Tien Shan, during 2012–18. *Journal of Glaciology*, 68(267), 41–53. <https://doi.org/10.1017/jog.2021.71>
45. Cao, B., Pan, B., Guan, W., Wang, J., & Wen, Z. (2017). Changes in ice volume of the Ningchan No.1 Glacier, China, from 1972 to 2014, as derived from in situ measurements. *Journal of Glaciology*, 63(242), 1025–1033. <https://doi.org/10.1017/jog.2017.70>
46. Shahgedanova, M., Nosenko, G., Bushueva, I., & Ivanov, M. (2012). Changes in area and geodetic mass balance of small glaciers, Polar Urals, Russia, 1950–2008. *Journal of Glaciology*, 58(211), 953–964. <https://doi.org/10.3189/2012JoG11J233>
47. Makarevich A.K. (1979). O kinematike poverkhnosti gomogo dolinnogo lednika [On the kinematics of the surface of a mountain valley glacier]. *Rezhim lednikov i snezhnykh lavin Kazakhstana. – Alma-Ata: Izd-vo «Nauka» KazSSR*, pp.120-124 [in Russian].
48. Makarevich K.G., Makarevich A.K. (1979). Opyt pryamykh opredelenii skorosti poverkhnosti lednika [Experience of direct determination of glacier surface velocity]. *Rezhim lednikov i snezhnykh lavin Kazakhstana. – Alma-Ata: Izd-vo «Nauka» KazSSR*, pp.125-131 [in Russian].
49. Kotlyakov, V.M., Chernova, L.P., Muraviev, A. Ya., Khromova, T.E., & Zverkova, N.M. (2017). Changes of mountain glaciers in the Southern and Northern Hemispheres over the past 160 years. *Ice and Snow*, 57(4), 453–467. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-4-453-467>
50. Zemp, M., Gärtner-Roer, I., Nussbaumer, S. U., Welty, E. Z., Dussailant, I., & Bannwart, J. (2023). WGMS 2023. *Global Glacier Change Bulletin No. 5 (2020–2021)*. (pp. 1–134). *ISC(WDS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/ WMO, World Glacier Monitoring Service*.
51. Severskii, I., Mukanova, B., Kapitsa, V., Tat'kova, M., Kokarev, A. Shesterova, I. (2024). *Izmenenie oledneniya severnogo sklona Ile Alatau za semidesyatiletanii period* [Changes in the glaciation of the northern slope of Ile Alatau over the seventy-year period]. *Vestnik KazNU im. Al-Farabi, Ser. Geograficheskaya, Vol. 73, no 2*, pp. 59–71 [in Russian].

52. Shahgedanova, M., Afzal, M., Severskiy, I., Usmanova, Z., Saidaliyeva, Z., Kapitsa, V., Kasatkin, N., & Dolgikh, S. (2018). Changes in the mountain river discharge in the northern Tien Shan since the mid-20th Century: Results from the analysis of a homogeneous daily streamflow data set from seven catchments. *Journal of Hydrology*, 564, 1133–1152. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.001>
53. Van Tricht, L., Huybrechts, P., Van Breedam, J., Fürst, J. J., Rybak, O., Satylkanov, R., Ermenbaiev, B., Popovnin, V., Neyns, R., Paice, C. M., & Malz, P. (2021). Measuring and inferring the ice thickness distribution of four glaciers in the Tien Shan, Kyrgyzstan. *Journal of Glaciology*, 67(262), 269–286. <https://doi.org/10.1017/jog.2020.104>
54. Lambrecht, A., Mayer, C., Bohleber, P., & Aizen, V. (2020). High altitude accumulation and preserved climate information in the western Pamir, observations from the Fedchenko Glacier accumulation basin. *Journal of Glaciology*, 66(256), 219–230. <https://doi.org/10.1017/jog.2019.97>
55. Nosenko G.A., Lavrentiev I.I., Glazovskii A.F., Kazatkin N.E., & A.L. Kokarev. (2016). The polythermal structure of Central Tuyuksu glacier. *Kriosfera Zemli*, XX(4), 105–115. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2016-4\(105-115\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2016-4(105-115))
56. Lavrentiev, I., Machguth H., & Kronenberg M. (2018). New data on ice thickness and internal structure of glaciers in Tien-Shan and Pamir-Alay (Kyrgyzstan). *Practical Geography and XXI Century Challenges. International Geographical Union Thematic Conference Dedicated to the Centennial of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences*, 80–80.
57. Farinotti, D., Huss, M., Fürst, J. J., Landmann, J., Machguth, H., Maussion, F., & Pandit, A. (2019). A consensus estimate for the ice thickness distribution of all glaciers on Earth. *Nature Geoscience*, 12(3), 168–173. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0300-3>
58. Barandun, M., Pohl, E., Naegeli, K., McNabb, R., Huss, M., Berthier, E., Saks, T., & Hoelzle, M. (2021). Hot Spots of Glacier Mass Balance Variability in Central Asia. *Geophysical Research Letters*, 48(11). <https://doi.org/10.1029/2020GL092084>
59. Azisov, E., Hoelzle, M., Vorogushyn, S., Saks, T., Usabaliev, R., Esenaman uulu, M., & Barandun, M. (2022). Reconstructed Centennial Mass Balance Change for Golubin Glacier, Northern Tien Shan. *Atmosphere*, 13(6), 954. <https://doi.org/10.3390/atmos13060954>
60. Popovnin V.V., Gubanov A.S., Satylkanov R.A., & Ermenbaiev B.O. (2021). Mass balance of the Sary-Tor Glacier reproduced from meteorological data. *Ice and Snow*, 61(1), 58–74. <https://doi.org/10.31857/S2076673421010071>
61. Kenzhebaev, R., Barandun, M., Kronenberg, M., Chen, Y., Usabaliev, R., & Hoelzle, M. (2017). Mass balance observations and reconstruction for Batysh Sook Glacier, Tien Shan, from 2004 to 2016. *Cold Regions Science and Technology*, 135, 76–89. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.12.007>
62. Makarevich K.G., Kasatkin N.E. (2011). Poluvekovyye issledovaniya balansa massy i morfologicheskikh izmenenii Tsentralnogo Tuyuksuiskogo lednika v Zailiiskom Alatau [Half-century researches of the mass balance and morphological changes of the Central Tuyuksuisky Glacier in the Zailiyskiy Alatau]. *Led i sneg*, no 1, pp. 36–44 [in Russian].
63. Brun, F., Wagnon, P., Berthier, E., Shea, J. M., Immerzeel, W. W., Kraaijenbrink, P. D. A., Vincent, C., Reverchon, C., Shrestha, D., & Arnaud, Y. (2018). Ice cliff contribution to the tongue-wide ablation of Changri Nup Glacier, Nepal, central Himalaya. *The Cryosphere*, 12(11), 3439–3457. <https://doi.org/10.5194/tc-12-3439-2018>
64. Sakai, A., Fujita, K., Duan, K., Pu, J., Nakawo, M., & Yao, T. (2006). Five decades of shrinkage of July 1st glacier, Qilian Shan, China. *Journal of Glaciology*, 52(176), 11–16. <https://doi.org/10.3189/172756506781828836>

ІЛЕ АЛАТАУЫНЫҢ СОЛТҮСТІК БАУРАЙЫНДАҒЫ ОРТАЛЫҚ ТҮЙЫҚСУ МҰЗДЫҒЫ МАССАСЫНЫҢ БАЛАНСЫ МЕН КИНЕМАТИКАСЫ

В.П. Капица, Н.Е. Касаткин, И.В. Северский г.г.д., профессор, З.С. Усманова*, А.Б. Егоров ж.г.д.

ЖШС «ЮНЕСКОның аясындағы 2-санаттағы Орталық Азия өңірлік гляциологиялық Орталығы», Алматы, Қазақстан

E-mail: zamira_usmanova@mail.ru

2006...2023 жылдар аралығында Орталық Тұйықсу мұздығында тікелей бақылаулар жүргізіліп, соның негізінде сыртқы және ішкі масса алмасу компоненттерінің есептеулері жасалынды, осы есептеулер 1958...1972 және 1977...1992 жылдардағы алынған мәндермен салыстырылды. Масса балансының кинематикалық компоненттерін анықтау үшін жергілікті жерге геодезиялық байланысы бар мұзға бұрғыланған рейкалар қолданылды. Қарастырылып отырған кезеңде мұздық 420 метрге шегінген, масса балансы орта есеппен -0,54 м. с.э., құраса, барлық бақылау кезеңінде, яғни 1958 жылдан бастап, мұздық 1190 м-ге шегінді, ал 1956...2023 жылдардағы масса балансының орташа мәні -0,42 м. с.э. 2006...2023 жылдар кезеңінде кинематикалық қоректену аймағындағы (КҚА) жылдық масса балансы + 0,13 м құрады, сол кезеңде осы аймақтағы абляцияның кинематикалық аймағындағы мұзды шығару -1,24 м құрады, ал КҚА ауданы 17 % - ға өсті, ал абляцияның кинематикалық аймағы (АКА) 46,3 % - ға қысқарды. КҚА мұздың түсуі 1977/78...1991/92 жылдар аралығында АКА-дағы шығындардың жартысының ғана (49,5 %) орнын толтырса, 2006/07...2022/23 жылдар аралығында 75,9 % - ға дейін орнын толтырды. Орталық Тұйықсу мұздығындағы мұз қозғалысының максималды жылдамдығы 1956...65 жылдарда байқалды, ол жылдары жылдамдық жылына 22...24 м/ж құрады, ал 1977...1992 жылдар аралығында 16 м/ж дейін төмендеді, ал 2006...2023 жылдар кезеңінде 12,8 м/ж құрады.

Түйін сөздер: Солтүстік Тянь-Шань, Орталық Тұйықсу мұздығы, мұздық кинематикасы, мұздың қозғалу жылдамдығы, мұздық массасының балансы.

BALANCE AND KINEMATICS OF THE MASS OF CENTRAL TUIYKSU GLACIER, NORTHERN SLOPE OF ILE ALATAU

V.P. Kapitsa, N.Ye. Kassatkin, I.V. Severskiy doctor of geographical sciences, professor, **Z.S. Usmanova***,
A.B. Yegorov doctor of natural sciences

LLP "Central-Asian regional glaciological centre of category 2 under the auspices of UNESCO", Almaty, Kazakhstan

E-mail: zamira_usmanova@mail.ru

Based on direct observations of the Central Tuiyksu glacier for the period 2006...2023, calculations of the components of external and internal mass transfer are presented and comparison of the obtained values for the periods 1958...1972 and 1977...1992 is provided. To determine the kinematic components of the mass balance, stakes drilled into the ice with geodetic reference on the ground were used. During the considered period, the glacier retreated by 420 meters, the mass balance on average was -0,54 m w.e., for the entire observation period, since 1958, the glacier retreated by 1190 m with the average mass balance value of -0,42 m w.e. for 1956...2023. The annual mass balance in the kinematic accumulation area for the period 2006...2023 was +0,13 m, for the same period the ice replacement from accumulation area to kinematic ablation area was -1,24 m, while kinematic accumulation area increased by 17 %, and kinematic ablation area decreased by 46,3 %. The inflow of ice from kinematic accumulation area compensated losses in kinematic ablation area in the period 1977/78...1991/92 only by half (49,5 %) and in the period from 2006/07 to 2022/23 already by 75,9 %. The maximum ice movement rates of the Central Tuiyksu glacier of 22...24 m/year were observed in the period 1956...65, they decreased to 16 m/year in the period 1977...1992 and in the period 2006...2023 were 12,8 m/year.

Keywords: Northern Tien Shan, Central Tuiyksu glacier, glacier kinematics, glacier surface velocity, glacier mass balance.

Сведения об авторах/ Авторлар туралы мәліметтер/ About the authors:

Капица Василий Петрович – старший научный сотрудник, Центрально-Азиатский Региональный Гляциологический Центр категории 2 под эгидой ЮНЕСКО, ул. Пушкина, 99, Алматы, Казахстан, vasil.geo@mail.ru

Касаткин Николай Евгеньевич – научный сотрудник, Центрально-Азиатский Региональный Гляциологический Центр категории 2 под эгидой ЮНЕСКО, ул. Пушкина, 99, Алматы, Казахстан, kasatkinne@mail.ru

Северский Игорь Васильевич – доктор географ. наук, профессор, главный научный сотрудник, Центрально-Азиатский Региональный Гляциологический Центр категории 2 под эгидой ЮНЕСКО, ул. Пушкина, 99, Алматы, Казахстан, iseverskiy@gmail.com

Усманова Замира Султанкуловна – научный сотрудник, Центрально-Азиатский Региональный Гляциологический Центр категории 2 под эгидой ЮНЕСКО, ул. Пушкина, 99, Алматы, Казахстан, zamira_usmanova@mail.ru

Егоров Александр Борисович – доктор естественных наук, ведущий научный сотрудник, Центрально-Азиатский Региональный Гляциологический Центр категории 2 под эгидой ЮНЕСКО, ул. Пушкина, 99, Алматы, Казахстан, yegorov.alexandr@mail.ru

Капица Василий Петрович – ғылыми қызметкер, ЮНЕСКОның аясындағы 2-санаттағы Орталық Азия өңірлік гляциологиялық Орталығы, Пушкин к-сі, 99, Алматы, Қазақстан, vasil.geo@mail.ru

Касаткин Николай Евгеньевич – ғылыми қызметкер, ЮНЕСКОның аясындағы 2-санаттағы Орталық Азия өңірлік гляциологиялық Орталығы, Пушкин к-сі, 99, Алматы, Қазақстан, kasatkinne@mail.ru

Северский Игорь Васильевич – география ғылымдарының докторы, профессор, ғылыми жетекшісі, ЮНЕСКОның аясындағы 2-санаттағы Орталық Азия өңірлік гляциологиялық Орталығы, Пушкин к-сі, 99, Алматы, Қазақстан, iseverskiy@gmail.com

Усманова Замира Султанқұловна – ғылыми қызметкер, ЮНЕСКОның аясындағы 2-санаттағы Орталық Азия өңірлік гляциологиялық Орталығы, Пушкин к-сі, 99, Алматы, Қазақстан, zamira_usmanova@mail.ru

Егоров Александр Борисович – жаратылыстану ғылымдарының докторы, ғылыми қызметкер, ЮНЕСКОның аясындағы 2-санаттағы Орталық Азия өңірлік гляциологиялық Орталығы, Пушкин к-сі, 99, Алматы, Қазақстан, yegorov.alexandr@mail.ru

Vassiliy Petrovich Kapitsa – senior researcher, Central Asian Regional Glaciological Center as a category 2 under the auspices of UNESCO, Pushkin st., 99, Almaty, Kazakhstan, vasil.geo@mail.ru

Nikolay Yevgenyevich Kassatkin – researcher, Central Asian Regional Glaciological Center as a category 2 under the auspices of UNESCO, Pushkin st., 99, Almaty, Kazakhstan, kasatkinne@mail.ru

Igor Vasilievich Severskiy – doctor of geographical sciences, professor, scientific director, Central Asian Regional Glaciological Center as a category 2 under the auspices of UNESCO, Pushkin st., 99, Almaty, Kazakhstan, iseverskiy@gmail.com

Zamira Sultankulovna Usmanova – researcher, Central Asian Regional Glaciological Center as a category 2 under the auspices of UNESCO, Pushkin st., 99, Almaty, Kazakhstan, zamira_usmanova@mail.ru

Alexandr Borisovich Yegorov – doctor of natural sciences, senior researcher, Central Asian Regional Glaciological Center as a category 2 under the auspices of UNESCO, Pushkin st., 99, Almaty, Kazakhstan, yegorov.alexandr@mail.ru

Вклад авторов/ Авторлардың қосқан үлесі/Authors' contribution:

Капица В.П. – разработка концепции, разработка методологии, проведение статистического анализа, проведение исследования, подготовка и редактирование текста, визуализация

Касаткин Н.Е. – разработка концепции, разработка методологии, проведение статистического анализа, проведение исследования, подготовка и редактирование текста, визуализация

Северский И.В. – разработка концепции, проведение статистического анализа, ресурсы, подготовка и редактирование текста, визуализация

Усманова З.С. – проведение статистического анализа, проведение исследования, Подготовка и редактирование текста, визуализация

Егоров А.Б. – проведение статистического анализа, проведение исследования

Капица В.П. – тұжырымдаманы әзірлеу, әдістемені әзірлеу, статистикалық талдау жүргізу, зерттеу жүргізу, мәтінді дайындау және өңдеу, көрнекілік

Касаткин Н.Е. – тұжырымдаманы әзірлеу, әдістемені әзірлеу, статистикалық талдау жүргізу, зерттеу жүргізу, мәтінді дайындау және өңдеу, көрнекілік

Северский И.В. – тұжырымдаманы әзірлеу, статистикалық талдау жүргізу, ресурстар, мәтінді дайындау және өңдеу, көрнекілік

Усманова З.С. – статистикалық талдау жүргізу, зерттеу жүргізу, мәтінді дайындау және өңдеу, көрнекілік

Егоров А.Б. – статистикалық талдау жүргізу, зерттеу жүргізу

Vassiliy Kapitsa – concept development, methodology development, conducting statistical analysis, conducting a research, preparing and editing the text, visualization

Nikolay Kassatkin – concept development, methodology development, conducting statistical analysis, conducting a research, preparing and editing the text, visualization

Igor Severskiy – concept development, conducting statistical analysis, resources, preparing and editing the text, visualization

Zamira Usmanova – conducting statistical analysis, conducting a research, preparing and editing the text, visualization

Alexandr Yegorov – conducting statistical analysis, conducting a research