

## Результаты геодезических измерений баланса массы некоторых ледников Заилийского Алатау

© 2023 г. А.Л. Кокарев<sup>1,2\*</sup>, В.П. Капица<sup>1,2</sup>, Т. Болх<sup>3</sup>, И.В. Северский<sup>2</sup>, Н.Е. Касаткин<sup>1,2</sup>,  
М. Шахгеданова<sup>4</sup>, З.С. Усманова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт географии и водной безопасности, Алматы, Республика Казахстан; <sup>2</sup>ТОО «Центрально-Азиатский региональный гляциологический центр» категории 2 под эгидой ЮНЕСКО», Алматы, Республика Казахстан;  
<sup>3</sup>Университет Сан Андреас, Шотландия, Великобритания; <sup>4</sup>Университет Рединг, Великобритания  
\*kokarev60@mail.ru

### The results of geodetic measurements of the mass balance of some glaciers in the Zailiyskiy Alatau (Trans-Ili Alatau)

A.L. Kokarev<sup>1,2\*</sup>, V.P. Kapitsa<sup>1,2</sup>, T. Bolch<sup>3</sup>, I.V. Severskiy<sup>2</sup>, N.E. Kasatkin<sup>1,2</sup>, M. Shahgedanova<sup>4</sup>, Z.S. Usmanova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of geography and water security, Almaty, Kazakhstan; <sup>2</sup>LLP «Central Asian Regional Glaciological Centre under the auspices of UNESCO» Almaty, Kazakhstan; <sup>3</sup>University of St Andrews, Scotland, United Kingdom; <sup>4</sup>University of Reading, United Kingdom  
\*kokarev60@mail.ru

Received December 21, 2021 / Revised August 25, 2022 / Accepted October 7, 2022

**Keywords:** *Zailiyskiy Alatau, glacier mass balance, remote sensing, digital elevation model, glaciation degradation, water resources.*

#### Summary

The current state and mass balance of some glaciers of the Trans-Ili Alatau (Zailiyskiy Alatau, Tien Shan, Kazakhstan) is estimated in the paper. The remote sensing data (images of the Pléiades satellites) and detailed field geodetic measurements (differential global positioning system with the South G6 instrument) were used for the analysis. The field works were carried out in August–September 2021 on the northern slope of the Zailiyskiy Alatau ridge. A digital relief model had been built for the analysis as well. Negative trends in the area of the studied glaciers have been revealed, which generally correspond to the average rate of degradation of the glaciation of the Trans-Ili Alatau from 1955 to the present. A comparison of glaciological (contact, i.e., obtained as a result of measurements made on the glacier) and geodetic (resulted from analysis of remote sensing data) methods for estimating the annual mass balance of the Central Tuyuksu glacier for the period 2016–2021 showed that the final values calculated by these two methods are very close in values. For example, the sum of annual balances calculated by the glaciological method for this period was  $-2.9$  m w.e., or  $-0.58$  a<sup>-1</sup> m w.e. per a year, while the balance calculated by the geodetic method for the same period was  $-0.63$  a<sup>-1</sup> m w.e. Thus, the results of comparison of the above methods of the glacier mass-balance investigation confirm that the geodetic one based on satellite measurements and the ground surveys using the South G6 instrument is in a good agreement with results of glaciological methods of measurements and calculations.

**Citation:** Kokarev A.L., Kapitsa V.P., Bolch T., Severskiy I.V., Kasatkin N.E., Shahgedanova M., Usmanova Z.S. The results of geodetic measurements of the mass balance of some glaciers in the Zailiyskiy Alatau (Trans-Ili Alatau). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2023, 62 (4): 527–538 [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673422040149, edn: mhmlnu

Поступила 21 декабря 2021 г. / После доработки 25 августа 2022 г. / Принята к печати 7 октября 2022 г.

**Ключевые слова:** *Заилийский Алатау, водные ресурсы, баланс массы ледника, дистанционное зондирование, цифровая модель рельефа, деградация оледенения.*

Деградация оледенения вызывает изменения в горных экосистемах, оказывая непосредственное влияние на жизнедеятельность людей, вызывает изменения в гидрологическом режиме, биогеохимии рек и гляциальных озёр, влияя на качество и доступность водных ресурсов. Рассмотрены вопросы оценки баланса массы ледников северного склона Заилийского (Иле) Алатау посредством применения данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в сочетании с полевыми исследованиями и измерениями.

#### Введение

Во всём мире в последние десятилетия отмечено сокращение оледенения, масштабы которого особенно возросли в XXI веке (Hoelzle et al.,

2020). Республика Казахстан не считается исключением: площадь ледников на северном склоне Заилийского Алатау сократилась на 48,4% в период 1955–2017 гг. (Severskiy et al., 2016) и в Джунгарском Алатау на 53,3% в период 1956–2018 гг.

С точки зрения влияния на региональные водные ресурсы, наиболее важна оценка изменения объёма и массы ледников (Huss, Hock, 2018; Shahgedanova et al., 2020). Сравнительная оценка отклика оледенения горно-ледниковых районов мира проводится на основе данных об изменении баланса массы отдельных ледников, входящих во Всемирную службу мониторинга ледников (ВСМЛ) (Dyurgerov/Meier, 2005; Zemp et al., 2008). С учётом межбассейновых различий отклика оледенения на изменения климата такие оценки не вполне корректны, и для решения задачи необходимо применять другие методики. Для оценки этих изменений в региональном масштабе предлагается применение метода геодезического баланса массы, основанного на обработке радарных и стереоскопических спутниковых снимков. Для верификации таких данных применяются результаты измерения баланса массы на отдельных ледниках, полученные гляциологическим методом (Zemp et al., 2019).

Сравнительная характеристика горного оледенения в глобальном масштабе очень актуальна в настоящее время. Обобщение данных о балансе массы контрольных ледников Всемирной службы мониторинга ледников на межрегиональном и глобальном уровне считается не вполне надёжной основой для сравнительных оценок, так как режим каждого ледника индивидуален и не может служить основой для характеристики оледенения, всей совокупности ледников бассейна либо горной страны в целом.

Проведена оценка геодезического баланса массы ледников в Центральной Азии (Pieczonka, Bolch, 2015) на основе сравнения двух цифровых моделей рельефа (ЦМР), полученных с помощью космической радиолокационной миссии Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) в 2000 г., с более ранней ЦМР, построенной на основе изображений с искусственных спутников Земли (ИСЗ) Corona и Hexagon 1970-х годов. Преимущества данного метода — широкий охват территории и длительный рассматриваемый период времени, недостаток — высокие погрешности измерения баланса массы. Однако во многих регионах Тянь-Шаня они сопоставимы с расчётными значениями баланса массы.

С помощью набора разновременных ЦМР, полученных на основе спутниковых стерео-

изображений ASTER, рассчитан баланс массы ледников Высокогорной Азии (Brunet al., 2017). Средний региональный баланс массы составил  $-16,3 \pm 3,5$  Гт в год ( $-0,18 \pm 0,04$  м в.э. в год) в период с 2000 по 2016 г.

Основанные на спутниковых данных (разновременные изображения, полученные со спутников Corona KH-4 (1960-е), Hexagon KH-9 (1970-е) и современные наборы данных с высоким разрешением ASTER, TerraSAR-X, Pléiades и др.) временные ряды баланса массы ледников для семи климатически различных регионов в высокогорной Азии с 1960 по 2020 г. (Bhattacharya et al., 2021) показывают, что темпы потери массы ледников постоянно увеличиваются в большинстве районов. Региональные оценки баланса массы ледников варьируют в диапазоне от  $-0,40 \pm 0,07$  м в.э. в год в Центральном и Северном Тянь-Шане до  $-0,06 \pm 0,07$  м в.э. в год на Восточном Памире со значительной временной и пространственной изменчивостью.

В статье (Liet al., 2021) анализируется возможность применения трёх методов (технологий) для мониторинга горных ледников на примере ледника Урумчи № 1 в Восточном Тянь-Шане: ЦМР получена при съёмках ледника посредством кинематической глобальной навигационной спутниковой системы в реальном времени (RTK-GNSS) в 2012 г., наземного лазерного сканера (TLS) в 2015 г. и беспилотного летательного аппарата (БПЛА) в 2018 г. Согласно полученным результатам, ледник Урумчи № 1 претерпел заметные негативные изменения как по толщине, так и по массе за 2012–2018 гг. Показано хорошее соответствие между гляциологическим и геодезическим удельным балансом массы, а также, что комбинация трёх методов подходит для мониторинга изменения баланса массы ледников, позволяя избежать присущих каждой методике ограничений и предоставить надёжные данные для мониторинга изменения массы горных ледников (Liet al., 2021).

Подобные методы, пока предварительные, апробированы и в Казахстане. В процессе исследований по международному проекту в сотрудничестве с учёными университета Рединга (Великобритания), появилась возможность исследовать изменения баланса массы ледника Туюксу за период с 1998 по 2016 г. по космическим снимкам Pléiades, позволяющим с высокой точ-

ностью оценить изменения высоты поверхности Туюксуйской группы ледников за указанный период (Kapitsa et al., 2020). Методические подходы измерения высоты поверхности гляциологических объектов (каменных глетчеров) Казахстана и Киргизии на основе спутниковых данных применены и в работе (Kääbetal., 2021).

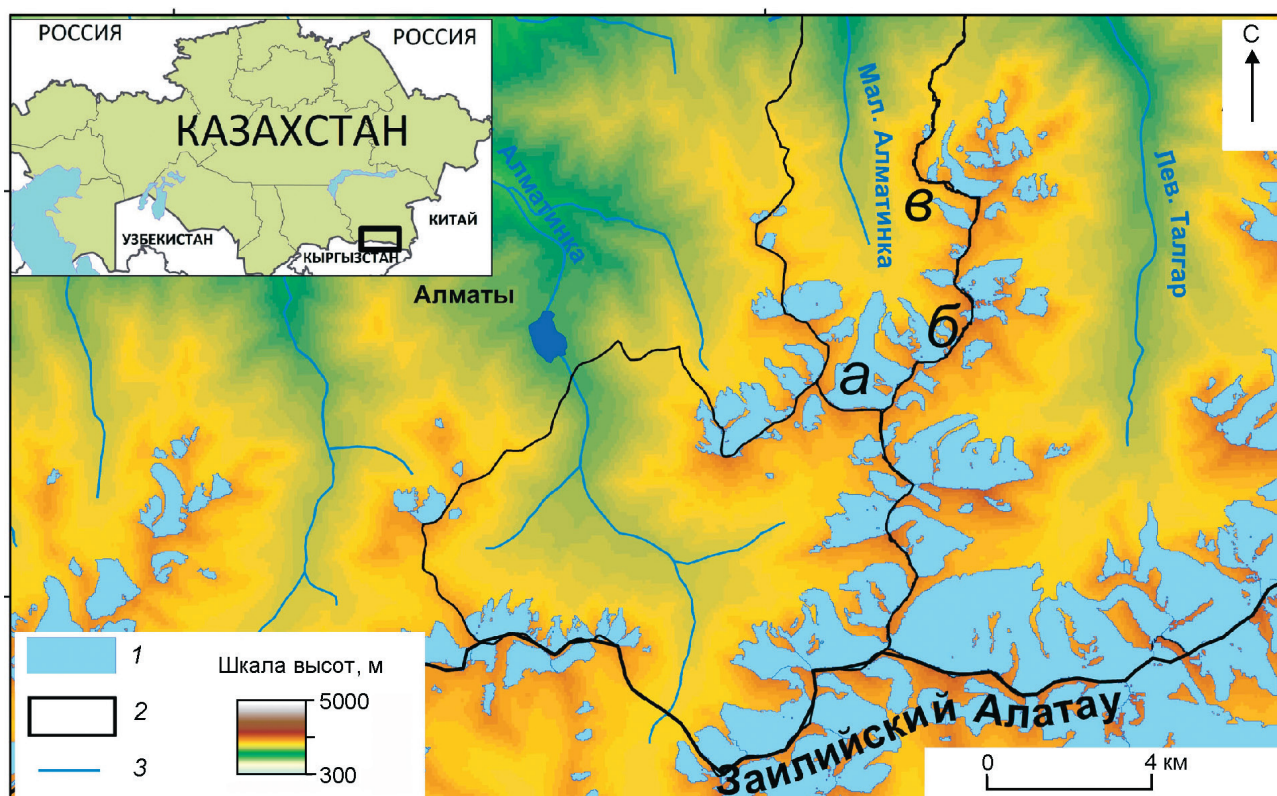
Настоящие и будущие изменения климата представляют собой серьёзную угрозу для населения и экономики Центральной Азии (Stocker et al., 2013). Орошаемые и густонаселённые районы в предгорьях региона характеризуются засушливым климатом, поэтому талые воды горных ледников и снега считаются стратегически важным возобновляемым ресурсом (Chenet al., 2016; Huss, Hock, 2018). По этой причине качественные данные для различных компонентов гидрологического цикла, в том числе прямые наблюдения за компонентами криосферы, представляются ключевыми для обеспечения точных прогнозов и адаптации.

### Район исследования

Левые притоки нижнего течения р. Или берут начало из ледников северного склона хребта Заилийский Алатау, который представляет собой одну из крайних северных дуг Тянь-Шаня. На северном склоне Заилийского (Иле) Алатау в 2017 г. зарегистрировано 470 ледников. Общая площадь открытой части всех ледников составляет 148,15 км<sup>2</sup>, объём льда 5,285 км<sup>3</sup>. Для сравнения, в Каталоге (Каталог..., 1967) по состоянию на 1955 г. зафиксировано 307 ледников с общей площадью открытой части 271,2 км<sup>2</sup>.

В качестве объектов исследования выбраны три ледника северного склона хребта Заилийский (Иле) Алатау: Центральный Туюксу, Иглы Туюксу, Маншук Маметовой – все они расположены в бассейне р. Малая Алматинка (рис. 1).

При выборе ледников ориентировались на доступность проведения инструментальных работ, различия в морфологических параметрах



**Рис. 1.** Район исследований и исследуемые ледники Заилийского (Иле) Алатау  
Ледники: а – Центральный Туйыксу, б – Иглы Туйыксу, в – Маншук Маметовой; 1 – ледники, 2 – реки, 3 – границы водоразделов

**Fig. 1.** Research area and selected glaciers of Zailiyskiy (Ile) Alatau.

Glaciers: а – Central Tuyuksu, б – Igly Tuyuksu, в – Manshuk Mametova; 1 – glaciers, 2 – rivers, 3 – watershed boundaries

ледников и неоднородность природных (геоморфологических, климатических и других) условий расположения объектов исследований.

Ледник Центральный Туюксу, один из наиболее изученных ледников Казахстана и СНГ. Морфологический тип – долинный, экспозиция – северная, максимальная высота – 4219 м над ур. моря.

Ледник Иглы Туюксу расположен в непосредственной близости к леднику Туюксу, Морфологический тип – долинный, экспозиция – северо-западная, максимальная высота – 4170 м над ур. моря. Цирк ледника представляет собой короткое и относительно пологое ущелье, но стены цирка, несмотря на значительную крутизну, накапливают большие массы снега в холодный период.

Ледник Маншук Маметовой – карово-висячий, ориентирован на северо-запад, максимальная высота – 4130 м над ур. моря. Вследствие большой крутизны склоны прилегающих пиков заснежены слабо, сезонная снеговая граница занимает самое высокое положение среди других ледников бассейна.

## Материалы и методы

**Гляциологический метод измерения баланса массы ледников.** Особое место в гляциологии занимают гляциологические и топогеодезические измерения, позволяющие выполнить количественную оценку процессов, реализующихся на горном леднике. На северном склоне Заилийского Алатау в качестве контрольного (эталонного) ледника для изучения баланса массы в системе ВСМЛ представлен ледник Центральный Туюксу, с 65-летним периодом непрерывных наблюдений на базе стационара АО «Институт географии и водной безопасности». Расчёт годового баланса массы ледника проводится по методике Макаревича (Макаревич, 2007).

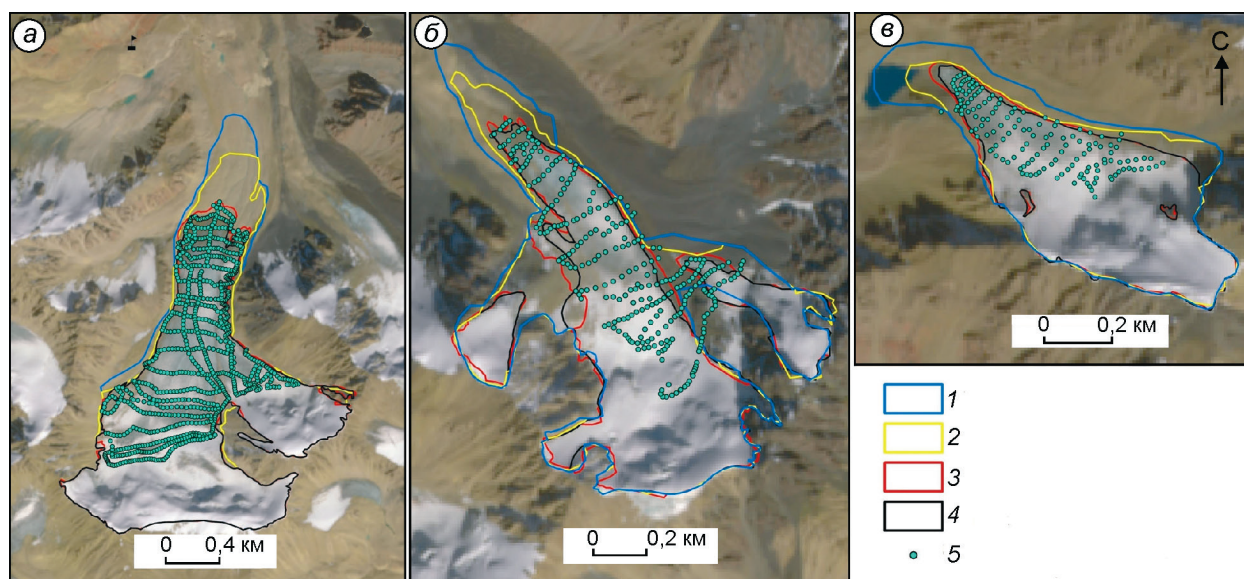
**Применение данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для оценки изменения площади и баланса массы ледников.** Для определения границ ледников, применены снимки спутников: LandsatTM/ETM+, с разрешением от 15 до 60 м/пиксель, даты съёмки 29.07.1978, 08.08.1999; Sentinel 2, с разрешением 10 м/пиксель, дата съёмки 07.09.2021; снимки сверхвысо-

кого разрешения (0,5 и 2,5 м/пиксель) Pléiades, дата съёмки 27.08.2016. Снимки Landsat и Sentinel получены с сайта EarthExplorer Геологической Службы США (<http://earthexplorer.usgs.gov>), снимки Pléiades получены в рамках проекта the Pléiades Glacier Observatory в сотрудничестве с LEGOS и WGMS (<https://wgms.ch/boost-remote-sensing-data/>).

Дешифрирование границ ледников выполнено в ArcGIS 10.5. Все снимки получены преимущественно на конец сезона абляции, чтобы исключить снеговые поля, не относящиеся к леднику. Учтена только площадь ледника (без учёта морен, содержащих погребённый лёд) и контуры, по которым определялась площадь, не включавшие отделившиеся (за период исследования) от основного ледника мелкие ледники.

Для вычисления изменения высоты поверхности ледников, с последующим расчётом баланса массы, применялись ЦМР Pléiades 2016 и ЦМР, построенная на основе полевых измерений 2021 г. Сенсор и цифровые модели Pléiades – дистанционные данные получаемые со спутников-близнецов Pléiades 1A и 1B, запущенных на орбиту Земли 17 декабря 2011 г. и 2 декабря 2012 г. соответственно. Данные передаются с разрешением 0,5 м для панхроматического режима (длина волны в диапазоне 480–830 нм) и 2 м для мультиспектрального режима (Kapitsa et al., 2020). Изображения спутников Pléiades, успешно применялись в наших предыдущих работах (Kapitsa et al., 2020; Bhattacharya et al., 2021). ЦМР высокого разрешения строится на основе стереопар в модуле Leica Photogrammetry Suite и в программе ErdasImagine.

**Съёмка поверхности ключевых ледников высокоточным прибором дифференциальной системы глобального позиционирования (DGPS).** Съёмка ледников произведена в период с 11 августа по 24 сентября 2021 г. с помощью прибора, основанного на DGPS – Ровера «South G6». Высокой точности измерений координат точек и их абсолютной высоты на местности, в реальном времени, удалось достигнуть благодаря технологии RTX (Real Time eXtended). Технология RTX, разработанная компанией «Trimble Navigation», позволяет получать данные с сантиметровой точностью, как в плане так и по высоте (X, Y, Z) даже в условиях высокогорья. Для ориентации на местности, в контроллер прибора «DGPS



**Рис. 2.** Точки измерений с помощью прибора дифференциальной системы глобального позиционирования «South G6», проведённых в августе–сентябре 2021 г.

Ледники: *а* – Центральный Туйыксу, *б* – Иглы Туйыксу, *в* – Маншук Маметовой; 1 – контур 1978 г., 2 – контур 1999 г., 3 – контур 2016 г., 4 – контур 2021 г., 5 – точки измерений с помощью прибора дифференциальной системы глобального позиционирования «South G6», проведённых в августе–сентябре 2021 года

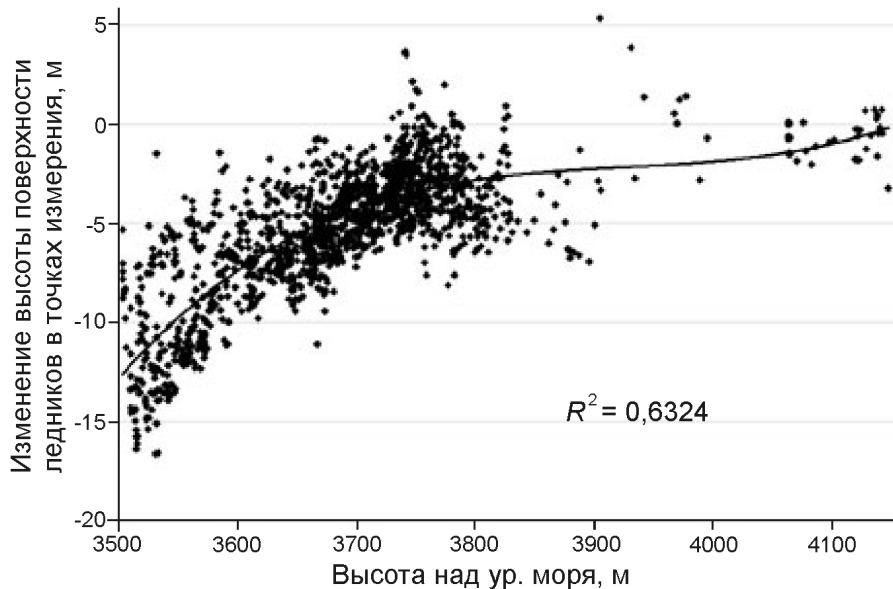
**Fig. 2.** Points of measurement made in August–September 2021 using the device of the differential global positioning system "South G6".

Glaciers: *a* – Central Tuiyксу, *б* – Igly Tuiyксу, *в* – Manshuk Mametova; 1 – contour of the year 1978, 2 – contour of the year 1999, 3 – contour of the year 2016, 4 – contour of the year 2021 г., 5 – points of measurement made in August–September 2021 using the device of the differential global positioning system "South G6"

South G6» предварительно загружены контуры всех исследуемых ледников, полученных со спутникового изображения Pléiades по состоянию на 2016 г. Во время проведения геодезической съёмки было достаточно просто определить на какой части современной морены, расположенной перед языками ледников, необходимо брать отчёты X, Y, Z для вычисления изменения поверхности с 2016 по 2021 г. (рис. 2), то есть построить ЦМР.

Всего за полевой сезон отснято 1544 точки в диапазоне высот от 3400 до 4148 м над ур. моря. Максимальная погрешность по определению абсолютной высоты составила 0,109 м, минимальная – 0,016 м, средняя – 0,029 м, по плану – 0,023, 0,009 и 0,014 м соответственно. Максимальное количество точек (1094) отснято на леднике Центральный Туюксу в интервале высот от 3410 до 3828 м над ур. моря, минимальное (158) – на леднике Маншук Маметовой, так как состояние поверхности ледника сильно ограничивало доступ. Кроме точек, находившихся на поверхности ледников или морены, отснято

130 наземных контрольных точек (НКТ) на не изменяющейся (стабильной) и свободной ото льда поверхности для определения погрешности абсолютной высоты ЦМР. Применяя модуль Spatial Analyst и метод интерполяции «Kriging» в программе ArcGis 10.5 построена ЦМР рельефа ледников по состоянию на 2021 г. с разрешением 30 м. В процессе проведения съёмки DGPS, область аккумуляции ледников (выше 3800 м над ур. моря) практически не была охвачена измерениями из-за крутых склонов, которые препятствуют получению поправок со спутника, и глубоких трещин, возникающих в результате движения льда. Чтобы восполнить этот пробел в данных, проведена съёмка области аккумуляции ледника Молодёжного, который также находится в бассейне р. Малая Алматинка и расположен на тех же абсолютных высотах. Область аккумуляции ледника Молодёжного – с открытыми и безопасными склонами, не препятствующими получению поправок со спутника. На основе DGPS измерений получена связь изменения высоты поверхности ледников в точках измерения



**Рис. 3.** Связь изменения (абляция и аккумуляция) высоты поверхности исследуемых ледников в точках измерения с высотой над ур. моря за период 2016–2021 гг. (по данным снимка Pléiades, дата съёмки 27.08.2016 г. и измерений с помощью прибора дифференциальной системы глобального позиционирования «South G6» в августе–сентябре 2021 г.)

**Fig. 3.** Correlation between the change (ablation and accumulation) of the height of the surface of selected glaciers at the measurement points with the height above sea level for the period 2016–2021 (according to the Pléiades image, survey date 27.08.2016 and measurements made in August–September 2021 using the "South G6" differential global positioning system device)

от абсолютной высоты (рис. 3), которая применялась для экстраполяции данных на не охваченные DGPS съёмкой области ледников – для всех пикселей, не охваченных DGPS съёмкой, разбитых по высотным интервалам.

**Методика сравнения ЦМР и расчёт геодезического баланса массы.** Для вычисления изменения высоты поверхности ледников все ЦМР преобразованы в систему координат проекции UTM WGS 84 зоны 43N. Изменения высоты поверхности выполнено для открытой части ледников, по состоянию на 2016 г. Расчёты произведены в программе ArcGIS 10.5 с помощью модуля SpatialAnalyst и инструмента «Алгебры карт». Усреднённый по площади удельный геодезический баланс массы ( $\Delta M_{\text{геод}}$ ) рассчитан по формуле:

$$\Delta M_{\text{геод}} = (\Delta V \cdot \rho \Delta v) / (A \Delta t),$$

где  $\Delta V$  – изменение объёма ( $\text{м}^3$ );  $\rho \Delta v$  – плотность льда ( $\text{кг}/\text{м}^3$ );  $A$  – средняя площадь ледника ( $\text{км}^2$ );  $\Delta t$  – время в годах между соответствующими ЦМР (Huss, 2013; Varandun et al., 2018).

Средняя плотность  $850 \pm 60 \text{ кг м}^{-3}$  применялась для преобразования объёма в массу, для расчё-

та геодезического баланса массы в соответствии с рекомендациями (Huss, 2013) и расчёта геодезического баланса массы других ледников Тянь-Шаня (Varandun et al., 2021).

#### **Количественная оценка погрешности расчётов.**

Погрешность определения границ ледников складывалась из погрешности орторектификации каждого изображения с НКТ и погрешности определения границ ледников оператором. Погрешность орторектификации рассчитана согласно рекомендациям в исследовании (Granshaw, Fountain, 2006). Область погрешности, шириной  $\frac{1}{2}$  значения среднеквадратической ошибки ( $\frac{1}{2} \text{RSME}_{x,y}$ ), построена вокруг контура каждого ледника и погрешность рассчитана как среднее соотношение исходной площади ледников к площади с буферной зоной. Значения погрешности орторектификации космических снимков ( $\text{RSME}_{x,y}$ ) не превышали величины размера пикселя каждого изображения. Погрешность определения границ ледников оператором, согласно исследованию (Paulet al., 2013), принята равной 3,5%.

Погрешность в определении геодезического баланса массы ледников включала: вертикаль-

Таблица 1. Динамика площади ключевых (опорных) ледников

| Ледник             | Площадь ледника по годам, км <sup>2</sup> |           |           |           |
|--------------------|---|-----------|-----------|-----------|
|                    | 1978                                      | 1999      | 2016      | 2021      |
| Центральный Туюксу | 2,71±0,70                                 | 2,67±0,11 | 2,28±0,09 | 2,22±0,14 |
| Иглы Туюксу        | 0,98±0,49                                 | 0,92±0,13 | 0,80±0,04 | 0,72±0,08 |
| Маншук Маметовой   | 0,37±0,19                                 | 0,34±0,03 | 0,25±0,04 | 0,24±0,07 |

ную точность ЦМР (Pliéades 2016) – системной ошибки ( $E_1$ ), вычисленной путём сравнения абсолютной высоты ЦМР с 130 НКТ, полученными в ходе полевых измерений DGPS на не изменяющейся (стабильной) и свободной от льда поверхности. До корректировки  $\sigma = 1,5$  м, после 0,7 м; погрешность DGPS прибора ( $E_2$ ) составила 0,031, 0,026 и 0,032 м на ледниках Центральный Туюксу, Иглы Туюксу и Маншук Маметовой соответственно; случайная ошибка ( $E_3$ ), возникающая при движении антенны, прикреплённой на геодезическую вежу, положение вежи на неровной поверхности и проникновения вежи в снежную или фирновую поверхность. Принята ошибка 0,1 м, полученная в работе (Nolanetal., 2005). Общая ошибка рассчитывалась по формуле:

$$E = \pm(E_1^2 + E_2^2 + E_3^2)^{1/2}.$$

## Результаты

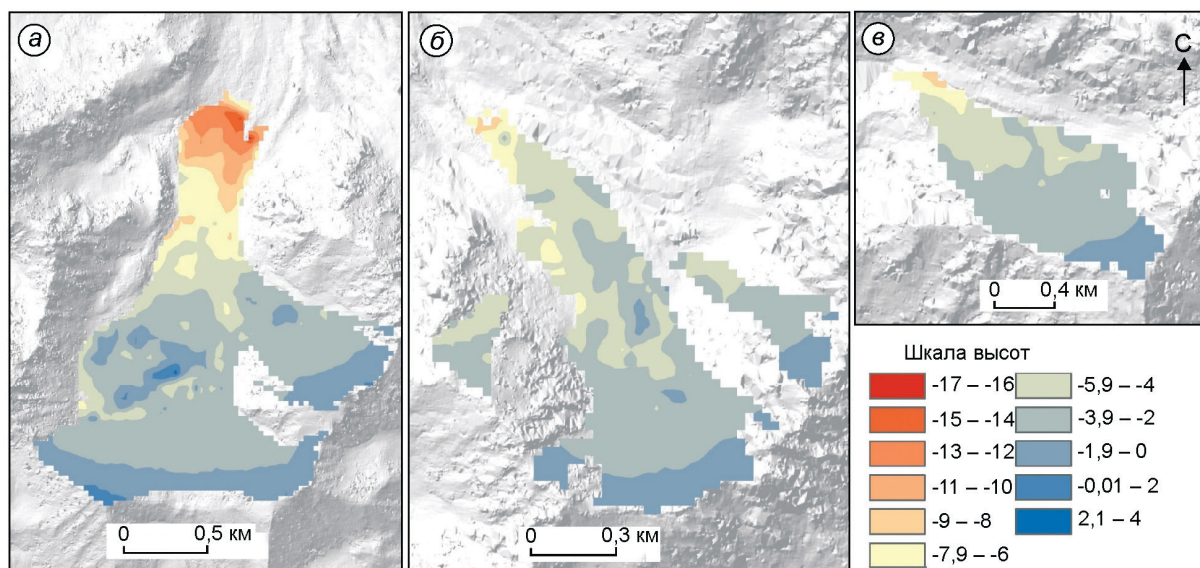
**Изменения площади опорных ледников по данным ДЗЗ.** На основе анализа космических снимков проведена работа по определению площади опорных ледников за годы съёмки. В табл. 1 приведены изменения площади ледников, измеренные по данным ДЗЗ. Отслежена подробная динамика изменения площади ледников с 1978 по 2021 г. (см. рис. 2).

На основании динамики изменения площади исследуемых ледников рассчитана величина темпов деградации за весь 43-летний период исследований. Ледник Центральный Туюксу с 1978 по 2021 г. потерял более 18% своей площади, что составляет 0,42% в год, ледник Иглы Туюксу распался на три части и уменьшился на 26,5% (0,62% в год), а ледник Маншук Маметовой потерял 35,7% площади (0,83% в год). Наблюдается довольно сильный разброс величины темпов деградации. Это можно объяснить разными условиями ледниковых параметров (мощность льда, крутизна ледника, экспозиция, затенён-

ность, наличие лавинного питания, строение и форма ложа и т.п.) и отличающимися микроклиматическими условиями. В целом эти 43-летние темпы деградации вполне соответствуют общему отрицательному тренду площади оледенения Заилийского Алатау с 1955 г. по настоящее время, который составляет – 0,78% в год. Эта величина практически не изменилась в сравнении с исследованиями оледенения этого региона по состоянию на 1990 г. (Вилесов, Уваров, 2001), 2008 г. (Кокарев, Шестерова, 2011) и 2017 г.

**Изменения объёма опорных ледников по данным ДЗЗ и наземного мониторинга, расчёт баланса массы геодезическим методом.** Результаты исследований по изменению высоты поверхности и расчёту геодезического баланса массы ледников представлены на рис. 4 и табл. 2. В целом, распределение значений по абсолютной высоте показывает вполне ожидаемые результаты. Максимальные отрицательные значения отмечаются на языках ледников, в области абляции, с постепенным снижением, по мере увеличения абсолютной высоты, и переходом к нулевым или незначительным положительным значениям в области аккумуляции. Наибольшие потери льда, более 14 м за период 2016–2021 гг., отмечены на языке ледника Центральный Туюксу (см. рис. 4), при этом среднее понижение по всему леднику составило –3,72 или 0,74 м в год, усреднённый баланс массы составил –0,63 м в.э. в год. Всего за пятилетний период ледник потерял более 8,4 млн м<sup>3</sup> льда.

На ледниках Иглы Туюксу и Маншук Маметовой значения снижения высоты поверхности очень близки и в среднем составили –3,32 и –3,39 м соответственно, при этом ледники потеряли 1,58 и 0,64 млн. м<sup>3</sup> льда соответственно. Несмотря на небольшую разницу усреднённых по всей площади значений понижения поверхности этих двух ледников с ледником Центральный Туюксу в языковой части отмечена существенная разница. Меньшие значения из-



**Рис. 4.** Изменение высоты поверхности ледников (в метрах) за период 2016–2021 гг. по данным снимка Pléiades, дата съёмки 27.08.2016 г. и измерений с помощью прибора дифференциальной системы глобального позиционирования «South G6» в августе–сентябре 2021 г. Ледники: а – Центральный Туйыксу, б – Иглы Туйыксу, в – Маншук Маметовой

**Fig. 4.** Change in the height of the surface of glaciers (in meters) for the period 2016–2021 according to the data of Pléiades image (survey date is 27.08.2016) and measurement made in August–September 2021 using the device of the differential global positioning system "South G6". Glaciers: а – Central Tuiyксу, б – Igly Tuiyксу, в – Manshuk Mametova

менения высоты поверхности на языке ледника Иглы Туюксу, в сравнении с Центральным Туюксу, при почти одинаковой абсолютной высоте, возможно связаны с постепенным бронированием льда поверхностной мореной в этой области. Язык ледника Маншук Маметовой по абсолютной высоте, в среднем выше на 140–150 м, что сказывается на скорости таяния и влияет на разницу с языком ледника Центральный Туюксу. На близких абсолютных высотах (на участках с измерениями) темпы понижения поверхности практически идентичны.

**Сравнение результатов определения баланса массы ледника Центральный Туюксу геодезическим и гляциологическим методами.** Проводимые наблюдения на леднике Центральный Туюксу дают возможность провести сравнения гляциологического и геодезического методов определения баланса массы ледника.

Сеть из пунктов наблюдения – деревянных реек на леднике Центральный Туюксу, в 1990-х – начале 2000-х годах постепенно сокращалась, наблюдения так же велись нерегулярно. В 2006–2007 гг. речное поле полностью обновлено, было забурено 120 четырёхметровых

реек и восстановилась регулярность наблюдений. Деревянные рейки на поверхности ледника в основном расположены в области абляции, так как бурение выше – в области аккумуляции не имеет смысла, из-за частых обвалов ледяных масс и схода лавин. По этой причине баланс в этой области определяется расчётным методом, основанным на 20-летних прямых наблюдениях (Макаревич, 2007). На рис. 5 показаны результаты измерений баланса массы ледника Центральный Туюксу за период 2016–2021 гг., полученного гляциологическим (полевые исследования на базе стационара Туюксу) и геодезическим методами. Необходимо учитывать, что карта гляциологического баланса массы до высоты 3800 м над ур. моря построена по данным, полученным с 97 точек (забуренных реек), а для верхней части ледника, по указанным выше причинам, по методу К.Г. Макаревича (Макаревич, 2007). Сумма годовых балансов, рассчитанных гляциологическим методом за период 2016–2021 гг., составила –2,9 м в.э., или –0,58 м в.э. в год, суммарный баланс, полученный геодезическим методом за этот период, составил –3,17 м в.э. или 0,63 м в.э. в год. Разница в балансе массы, наблюдаемая в



Таблица 2. Изменение высоты поверхности, объёма и баланс массы ключевых ледников за период 2016–2021 гг.

| Ледник               | Изменение высоты поверхности, м | Изменение объёма, млн, м <sup>3</sup> | Баланс массы, а <sup>-1</sup> , м. в.э. |
|----------------------|---------------------------------|---------------------------------------|---|
| Центральный Туюксу*  | –                               | –8,36                                 | –0,58                                   |
| Центральный Туюксу** | –3,72±0,79                      | –6,25±1,8                             | –0,63±0,13                              |
| Иглы Туюксу**        | –3,32±0,8                       | –1,58±0,6                             | –0,56±0,14                              |
| Маншук Маметовой**   | –3,39±0,8                       | –0,64±0,2                             | –0,58±0,14                              |

Анализ изменений показателей выполнен гляциологическим методом\* и геодезическим методом\*\*; прочерк – показатель не определялся.

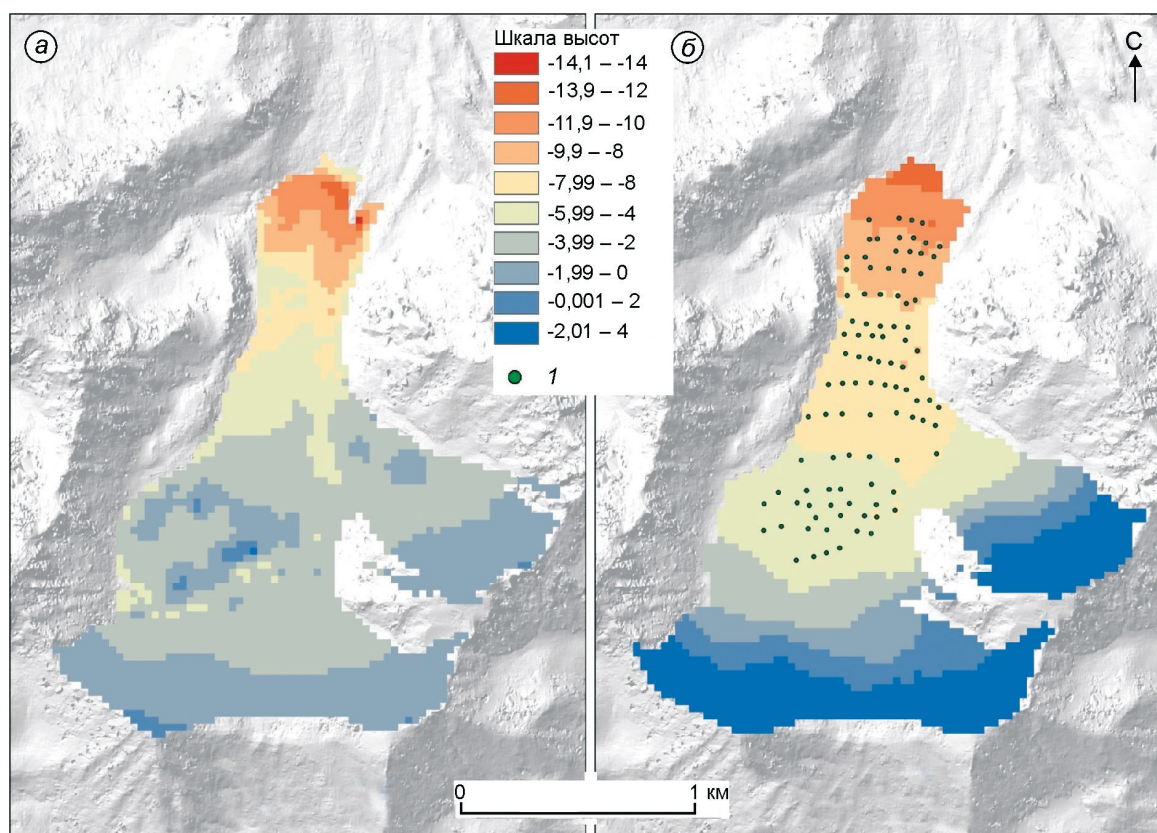


Рис. 5. Результаты изменения баланса массы ледника Центральный Туйыксу (в м.в.э.) за период 2016–2021 гг. полученных геодезическим (а) и гляциологическим (б) методами; 1 – точки (забуренные рейки).

Fig. 5. Results of changes in the mass balance of the Central Tuiyксу glacier (in m.w.e.) for the period 2016–2021 obtained by geodetic (a) and glaciological (b) methods; 1 – points (drilled rails).

области абляции (с покрытием рейками), может считаться следствием переноса массы из области аккумуляции в область абляции, которая не учитывается при расчёте баланса гляциологическим методом. Для расчёта выноса или так называемого внутреннего баланса массы требуются дополнительные исследования и расчёты на протяжении нескольких лет.

Таким образом, результаты сравнения методов масс-балансовых исследований ледников показывают, что метод геодезического балан-

са массы ледников по данным ДЗЗ и наземной съёмки DGPS вполне сопоставим с результатами гляциологических методов измерений и расчётов.

### Заключение

Проведена оценка современного состояния и баланс массы ключевых ледников за различные периоды. Работа выполнена на основе сочетания обработки и анализа данных ДЗЗ из космоса

и полевых измерений. Полевые измерения применялись для вычисления изменения высоты поверхности ледников в сравнении с имеющимися ЦМР, а также ЦМР высокого разрешения (Pléiades), по состоянию на 2016 г.

На основании динамики изменения площади выбранных ледников северного склона хребта Заилийский Алатау рассчитана величина темпов деградации. Ледник Центральный Туюксу с 1978 по 2021 г. потерял более 18% своей площади, что составляет 0,42% в год, ледник Иглы Туюксу уменьшился на 26,5% (0,62% в год), а ледник Маншук Маметовой потерял 35,7% площади (0,83% в год). В целом темпы деградации ключевых ледников вполне соответствуют общему темпу деградации оледенения Заилийского Алатау с 1955 г. по настоящее время.

Полученные результаты по изменению высоты поверхности и расчёту геодезического баланса массы исследуемых ледников позволяют сделать вывод, что распределение темпов стаивания льда по абсолютной высоте вполне могут применяться в горных системах Казахстана. Максимальные отрицательные значения отмечаются на языках ледников, в области абляции, с постепенным снижением, по мере увеличения абсолютной высоты, и переходом к положительным значениям в области аккумуляции. Наибольшие потери льда, более 14 м, отмечены за период 2016–2021 гг. на языке ледника Центральный Туюксу.

Предложенная методика дистанционной оценки баланса массы ледников по материалам ДЗЗ считается продолжением исследований, проводимых в этом направлении (Kapitsaatal., 2020). Особую ценность представляют натурные

полевые измерения (с помощью дифференциального прибора DGPS South G6), которые позволяют с достаточно высокой точностью верифицировать натурные данные с ЦМР, полученными от сенсоров ДЗЗ. Ещё один немаловажный фактор улучшения имеющихся методик – многолетние исследования баланса массы ледника Центральный Туюксу, входящего в ВСМЛ.

Сравнение гляциологического (полевые исследования на базе стационара) и геодезического (анализ данных ДЗЗ) методов на основе результатов расчёта годового баланса массы ледника Центральный Туюксу за период 2016–2021 гг. показывает, что итоговые значения годового баланса, рассчитанные двумя методами, очень близки по значениям. Так, сумма годовых балансов, рассчитанных гляциологическим методом за этот период, составила –2,9 м в.э., что соответствует –0,58 м в.э. в год, баланс, рассчитанный геодезическим методом за этот период, составил –0,63 м в.э. в год.

Таким образом, результаты сравнения методов масс-балансовых исследований ледников показывают, что метод геодезического баланса массы ледников по данным ДЗЗ и наземной съёмки DGPS сопоставим с результатами гляциологических методов измерений и расчётов.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках научного проекта по грантовому финансированию AP09563261 Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан.

**Acknowledgements.** This work is completed in the frames of grant financing No AP09563261 of the Committee of Science of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan.

## Литература

- Вилесов Е.Н., Уваров В.Н. Эволюция современного оледенения Заилийского Алатау в XX веке. Алматы: Казахский университет, 2001. 252 с.
- Каталог ледников СССР. Т. 13. Вып. 2. Ч. 1. Л.: Гидрометеоздат, 1967. 78 с.
- Кокарев А.Л., Шестерова И.Н. Изменение ледниковых систем северного склона Заилийского Алатау во второй половине XX и начале XXI вв. // Лёд и Снег. 2011. № 4 (116). С. 39–46.
- Макаревиц К.Г. Методические аспекты исследований баланса массы и колебаний горных ледников. Краткое руководство по постановке и проведению

## Reference

- Vilesov Ye.N., Uvarov V.N. *Evolyuciya sovremennogo oledeneniya Zailiyskogo Alatau v XX veke* Evolution of the modern glaciation of Zailiyskiy Alatau in the 20th century. Almaty: Kazakh University, 2001: 252. [In Russian].
- Katalog lednikov SSSR. USSR Glacier Inventory. V. 13. Is. 2. Pt. 1. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1967: 78. [In Russian].
- Kokarev A.L., Shesterova I.N. Changes in the glacial systems of the northern slope of Zailiyskiy Alatau in the second half of the XX and early XXI centuries. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2011, 4 (116): 39–46. [In Russian].
- Makarevich K.G. *Metodicheskie aspekty issledovaniy balanssa massy i kolebaniy gornyh lednikov. Kratkoe rukovodstvo*

- полевых наблюдений, и камеральной обработке данных. Алматы; Гылым, 2007. 104 с.
- Barandun, M., Huss, M., Usabaliev, R., Azisov, E., Berthier, E., Kääh, A., Bolch, T., Hoelzle, M.* Multi-decadal mass balance series of three Kyrgyz glaciers inferred from modelling constrained with repeated snow line observations // *The Cryosphere*. 2018. № 12. P. 1899–1919. doi: 10.5194/tc-12-1899-2018.
- Barandun M., Pohl E., Naegeli K., McNabb R., Huss M., Berthier E., Saks T., Hoelzle M.* Hot spots of glacier mass balance variability in Central Asia // *Geophys. Research Letters*. 2021. № 48. e2020GL092084 p. doi: 10.1029/2020GL092084.
- Bhattacharya A., Bolch T., Mukherjee K., King O., Menounos B., Kapitsa V., Neckel N., Yang W.f., Yao T.* High Mountain Asian glacier response to climate revealed by multi-temporal satellite observations since the 1960 s // *Nature Communic.* 2021. № 12. 4133 p. doi: 10.1038/s41467-021-24180-y.
- Brun F., Berthier E., Wagnon P., Kääh A., Treichler D.* A spatially resolved estimate of High Mountain Asia glacier mass balances, 2000–2016 // *Nature-Geoscience*. 2017. № 10. P. 668–673. doi: 10.1038/NGEO2999.A.
- Chen Y., Li W., Deng H., Fang G., and Li Z.* Changes in Central Asia’s Water Tower: Past, Present and Future // *Scientific Reports*. 2016. № 6. 35458. doi: 10.1038/srep35458.
- Dyrgerov M.B., Meier M.F.* Glaciers and the Changing Earth System: A 2004 Snapshot. Institute of Arctic and Alpine Research University of Colorado // *ISTAAR Occasional Paper*. 2005. № 58. 117 p.
- Granshaw F.D., Fountain A.G.* Glacier change (1958–1998) in the North Cascades National Park Complex, Washington, USA. // *Journ. of Glaciology*. 2006. V. 52. № 177. P. 251–256. doi: 10.3189/172756506781828782.
- Huss M.* Density assumptions for converting geodetic glacier volume change to mass change // *The Cryosphere*. 2013. № 7. P. 877–887. doi: 10.5194/tc-7-877-2013.
- Huss M., Hock R.* Global-scale hydrological response to future glacier mass loss // *Nature Climate Change*. 2018. № 8. P. 135–140. doi: 10.1038/s41558-017-0049-x.
- Kääh A., Strozzi T., Bolch T., Caduff R., Trefall, H., Stoffel M., Kokarev A.* Inventory, motion and acceleration of rock glaciers in Ile Alatau and Kungöy Ala-Too, northern Tien Shan, since the 1950s // *The Cryosphere*. 2021. № 15. P. 927–949. doi: 10.5194/tc-15-927-2021.
- Kapitsa V., Shahgedanova M., Severskiy I., Kasatkin N., White K. and Usmanova Z.* 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 // *Front. in Earth Science*. 2020. V. 8. № 259. P. 1–14. doi: 10.3389/feart.2020.00259.
- vodstvo po postanovke i provedeniyu polevyh nablyudeniy i kameralnoy obrabotke dannyh.* Methodical aspects of investigating the mass balance and fluctuations of mountain glaciers. A brief guide to setting up and conducting field observations and office data processing. Almaty, 2007: 104. [In Russian].
- Barandun, M., Huss, M., Usabaliev, R., Azisov, E., Berthier, E., Kääh, A., Bolch, T., and Hoelzle, M.* Multi-decadal mass balance series of three Kyrgyz glaciers inferred from modelling constrained with repeated snow line observations. *The Cryosphere*. 2018, 12: 1899–1919. doi: 10.5194/tc-12-1899-2018.
- Barandun M., Pohl E., Naegeli K., McNabb R., Huss M., Berthier E., Saks T., Hoelzle M.* Hot spots of glacier mass balance variability in Central Asia. *Geophys. Research Letters*. 2021. 48: e2020GL092084. doi: 10.1029/2020GL092084.
- Bhattacharya A., Bolch T., Mukherjee K., King O., Menounos B., Kapitsa V., Neckel N., Yang W.f., Yao T.* High Mountain Asian glacier response to climate revealed by multi-temporal satellite observations since the 1960s. *Nature Communic.* 2021, 12: 4133. doi: 10.1038/s41467-021-24180-y.
- Brun F., Berthier E., Wagnon P., Kääh A. and Treichler D.* A spatially resolved estimate of High Mountain Asia glacier mass balances, 2000–2016. *NatureGeoscience*. 2017, 10: 668–673. doi: 10.1038/NGEO2999.A.
- Chen Y., Li W., Deng H., Fang G., and Li Z.* Changes in Central Asia’s Water Tower: Past, Present and Future. *Scientific Reports*. 2016, 6: 35458. doi: 10.1038/srep35458.
- Dyrgerov M.B., Meier M.F.* Glaciers and the Changing Earth System: A 2004 Snapshot. Institute of Arctic and Alpine Research University of Colorado. *ISTAAR Occasional Paper*. 2005, 58: 117.
- Granshaw F.D., Fountain A.G.* Glacier change (1958–1998) in the North Cascades National Park Complex, Washington, USA. *Journ. of Glaciology*. 2006, 52 (177): 251–256. doi: 10.3189/172756506781828782.
- Huss M.* Density assumptions for converting geodetic glacier volume change to mass change. *The Cryosphere*. 2013, 7: 877–887. doi: 10.5194/tc-7-877-2013.
- Huss M. and Hock R.* Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nature Climate Change*. 2018, 8: 135–140. doi: 10.1038/s41558-017-0049-x.
- Kääh A., Strozzi T., Bolch T., Caduff R., Trefall, H., Stoffel M., Kokarev A.* Inventory, motion and acceleration of rock glaciers in Ile Alatau and Kungöy Ala-Too, northern Tien Shan, since the 1950s. *The Cryosphere*. 2021, 15: 927–949. doi: 10.5194/tc-15-927-2021.
- Kapitsa V., Shahgedanova M., Severskiy I., Kasatkin N., White K. and Usmanova Z.* 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 Im-

- Li H, Wang P, Li Z, Jin S, Xu C, Liu S, Zhang Z, Xu L.* An application of three different field methods to monitor changes in Urumqi Glacier No. 1, Chinese Tien Shan, during 2012–2018 // *Journ. of Glaciology.* 2022. V. 68. № 267. P. 41–53. doi: 10.1017/jog.2021.71.
- Nolan M, Arendt A, Rabus B., Hinzman L.* Volume change of McCall Glacier, Arctic Alaska, USA, 1956–2003. // *Annals of Glaciology.* 2005. № 42. P. 409–416. doi: 10.3189/172756405781812943.
- Paul F., Barrand N.E., Baumann S., Berthier E., Bolch T., Casey K., Frey H., Joshi S.P., Konovalov V., Le Bris R., Mölg N., Nosenko G., Nuth C., Pope A., Racoviteanu A., Rastner P., Raup B., Scharrer K., Steffen S., Winsvold S.* On the accuracy of glacier outlines derived from remote-sensing data // *Annals of Glaciology.* 2013. № 54. V. 63. P. 171–182. doi: 10.3189/2013AoG63A296.
- Pieczonka T., Bolch T.* Region-wide glacier mass budgets and area changes for the Central Tien Shan between ~1975 and 1999 using Hexagon KH-9 imagery // *Global and Planetary Change.* 2015. № 128. P. 1–13. doi: 10.1016/j.gloplacha.2014.11.014.
- Severskiy I., Vilesov E., Armstrong R., Kokarev A., Kogutenko L., Usmanova Z., Morozova V., Raup B.* Changes in glaciation of the Balkhash-Alakol basin, central Asia, over recent decades // *Annals of Glaciology.* 2016. № 57 (71). P. 382–394. doi: 10.3189/2016AoG71A575.
- Shahgedanova M., Afzal M., Hagg W., Kapitsa V., Kasatkin N., Mayr E., Rybak O., Saidaliyeva Z., Severskiy I., Usmanova Z., Wade A., Yaitskaya N.* Emptying water towers? Impacts of future climate and glacier change on river discharge in the Northern Tien Shan, Central Asia // *Water.* 2020. № 12. V. 3. 627 p. doi: 10.3390/w12030627.
- Stocker T. F., Qin D., Plattner G.K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex B., Midgley B.* IPCC, 2013: climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. New York, NY, USA, Cambridge University Press. 2013. 1535 p.
- 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.* Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016 // *Nature.* 2019. № 568. P. 382–386. doi: 10.1038/s41586-019-1071-0.
- Zemp M., Roer I., Kääh A., Hoelzle M., Paul F., Haerberli W.* WGMS (2008): global glacier changes: facts and figures. World Glacier Monitoring Service. 2008. 45 p.
- agery // *Front. in Earth Science.* 2020, 8 (259): 1–14. doi: 10.3389/feart.2020.00259.
- Li H, Wang P, Li Z, Jin S, Xu C, Liu S, Zhang Z, Xu L.* An application of three different field methods to monitor changes in Urumqi Glacier No. 1, Chinese Tien Shan, during 2012–2018. *Journ. of Glaciology.* 2022, 68 (267): 41–53. doi: 10.1017/jog.2021.71.
- Nolan M, Arendt A, Rabus B., Hinzman L.* Volume change of McCall Glacier, Arctic Alaska, USA, 1956–2003. *Annals of Glaciology.* 2005, 42: 409–416. doi: 10.3189/172756405781812943.
- Paul F., Barrand N.E., Baumann S., Berthier E., Bolch T., Casey K., Frey H., Joshi S.P., Konovalov V., Le Bris R., Mölg N., Nosenko G., Nuth C., Pope A., Racoviteanu A., Rastner P., Raup B., Scharrer K., Steffen S., Winsvold S.* On the accuracy of glacier outlines derived from remote-sensing data. *Annals of Glaciology.* 2013, 54 (63): 171–182. doi: 10.3189/2013AoG63A296.
- Pieczonka T., Bolch T.* Region-wide glacier mass budgets and area changes for the Central Tien Shan between ~1975 and 1999 using Hexagon KH-9 imagery. *Global and Planetary Change.* 2015, 128: 1–13. doi: 10.1016/j.gloplacha.2014.11.014.
- Severskiy I., Vilesov E., Armstrong R., Kokarev A., Kogutenko L., Usmanova Z., Morozova V., Raup B.* Changes in glaciation of the Balkhash-Alakol basin, central Asia, over recent decades. *Annals of Glaciology.* 2016, 57 (71): 382–394. doi: 10.3189/2016AoG71A575.
- Shahgedanova M., Afzal M., Hagg W., Kapitsa V., Kasatkin N., Mayr E., Rybak O., Saidaliyeva Z., Severskiy I., Usmanova Z., Wade A., Yaitskaya N.* Emptying water towers? Impacts of future climate and glacier change on river discharge in the Northern Tien Shan, Central Asia. *Water.* 2020, 12 (3): 627. doi: 10.3390/w12030627.
- Stocker T. F., Qin D., Plattner G.K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex B., Midgley B.* IPCC, 2013: climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. — New York, NY, USA, Cambridge University Press. 2013:1535.
- 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.* Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016. *Nature.* 2019, 568: 382–386. doi: 10.1038/s41586-019-1071-0.
- Zemp M., Roer I., Kääh A., Hoelzle M., Paul F., Haerberli W.* WGMS (2008): global glacier changes: facts and figures. World Glacier Monitoring Service. 2008: 45.