

Гляциология и геокриология

Гляциология және геокриология

Glaciology and geocryology

<https://doi.org/10.55764/2957-9856/2024-3-68-83.27>

МРНТИ 37.29.35
УДК 551.324

М. Е. Татькова*¹, И. В. Северский², З. С. Усманова³, В. П. Капица⁴

^{1*} Младший научный сотрудник, докторант

(Центрально-Азиатский региональный гляциологический центр категории 2 под эгидой ЮНЕСКО, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан; tatkova_m@mail.ru)

² Академик НАН РК, доктор географических наук, профессор; научный руководитель (Центрально-Азиатский региональный гляциологический центр категории 2 под эгидой ЮНЕСКО, Алматы, Казахстан; iseverskiy@gmail.com)

³ Научный сотрудник (Центрально-Азиатский региональный гляциологический центр категории 2 под эгидой ЮНЕСКО, Алматы, Казахстан; zamira_usmanova@mail.ru)

⁴ Старший научный сотрудник (Центрально-Азиатский региональный гляциологический центр категории 2 под эгидой ЮНЕСКО, Алматы, Казахстан; vasil.geo@mail.ru)

ТЕСТИРОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЕТОДИКИ ОПЕРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА ГОРНО-ЛЕДНИКОВЫХ СИСТЕМ

Аннотация. Рассмотрены возможности оценки площади оледенения Северо-Илейской и Илейско-Кунгейской ледниковых систем по данным мониторинга ограниченной по количеству выборки тестовых ледников. В ходе тестирования в каждой из упомянутых ледниковых систем по данным о площади двух выборок по 10 ледникам, общей их выборки (20 ледников) и их доле в суммарной площади ледников каждого из названных районов оледенения рассчитана площадь ледников соответствующей ледниковой системы. Согласно результатам тестирования коэффициенты корреляции расчетных и фактических (по результатам каталогизации ледников) значений площади оледенения по трем выборкам ледников составили 0,99, 0,98 и 0,99 для Северо-Илейской ледниковой системы и 0,99, 0,97, 0,99 для Илейско-Кунгейской. Результаты тестирования не оставляют сомнений в возможности оперативного мониторинга динамики площади оледенения горно-ледниковых систем по данным о площади, ограниченной по количеству выборки ледников соответствующей ледниковой системы с погрешностью не более $\pm 5\%$. По результатам тестирования в 88% случаев расчетные значения площади оледенения рассматриваемых ледниковых систем были менее 5% относительно фактических и лишь в 4 случаях из 33 (12%) превысили этот порог при среднем значении отклонений расчетных данных от фактических менее 2% и наибольших ошибках расчета 7,8 и -9,6%. Это свидетельствует о высокой эффективности методики оперативного мониторинга горно-ледниковых систем. Она позволяет оперативно (повторяемостью от 1 раза в несколько лет до ежегодной) оценить потери многолетнего льда исследуемой ледниковой системы и вклад талых ледниковых вод в формирование речного стока, что, в свою очередь, является хорошей основой для моделирования современных и прогнозных изменений.

Ключевые слова: Иле Алатау, Кунгей Алатау, ледниковая система, площадь ледников, мониторинг ледников.

Введение. Информация о современных и прогнозных изменениях оледенения и речного стока имеет решающее значение для водной, экологической и продовольственной безопасности стран Центральной Азии, где дефицит водных ресурсов является одним из наиболее значимых факторов, сдерживающих экономическое развитие, особенно в странах нижнего течения главных рек региона – в Узбекистане, Казахстане и Туркменистане [1-4].

В условиях продолжающегося потепления климата сокращение ледниковой составляющей в речном стоке потенциально может существенно изменить режим стока с гляциально-нивального на нивально-плювиальный [3, 5]. Это может значительно осложнить возможности развития отраслей водного сектора экономики стран региона с обострением проблем продовольственной, энергетической и экологической безопасности. Согласно прогнозным оценкам, основанным на данных последовательной серии идентичных по содержанию каталогов ледников, при сохранении современных тенденций деградации оледенения подавляющая часть ледников внешних хребтов Северного и Западного Тянь-Шаня, Алтая и Жетысу (Джунгарского) Алатау может исчезнуть уже к концу текущего столетия [6-9]. Логично полагать, что исчезновение ледников коренным образом изменит межсезонное распределение стока со сдвигом максимума с июля-августа на апрель-май и может значительно ограничить возможности орошаемого земледелия со всеми последствиями для водной, продовольственной, энергетической и экологической безопасности стран региона [4, 10-12].

Ледники по всему миру продолжают отступать. Согласно результатам мониторинга за 2019/20 и 2020/21, а также предварительным наблюдениям за 2021/22 гидрологические годы среднегодовой баланс массы ледника Туйыксу составил $-0,97$ м водного эквивалента (в. э.) в год. Это на 17% больше, чем среднегодовой баланс массы за первые два десятилетия XXI века. В горах Центральной Азии среднерегionalные балансы массы в 2019/20 и 2020/21 годы составили -119 и -629 мм в.э. соответственно [13].

Как и в других горных районах мира, ледники Тянь-Шаня сокращались с середины XIX в. – с окончания Малого Ледникового периода. Процесс деградации ледников существенно ускорился в начале 1970-х годов [3, 4, 13-18].

Согласно оценкам, в начале периода интенсивной деградации ледников (в Иле Алатау особенно с 1973 по 1978 гг.) ледниковый сток увеличился, но в последующем сокращался пропорционально уменьшению площади открытой части ледников [3, 16].

В последние полвека площадь ледников внешних хребтов Северного и Западного Тянь-Шаня, Алтая и Жетысу Алатау сокращалась с интенсивностью от 0,73 до 0,8% в год по площади и около 1% в год по объему льда [7, 19]. Столь тревожная перспектива предопределяет необходимость непрерывного мониторинга состояния горно-ледниковых систем с оценкой современных и вероятных в перспективе изменений и их проявлений в режиме речного стока и региональных водных ресурсах. Целям такого мониторинга на глобальном уровне служат наблюдения динамики баланса массы контрольных ледников Мировой службы мониторинга ледников (WGMS-Швейцария).

В настоящее время наблюдения за балансом массы на многочисленных ледниках, расположенных в разных горных районах мира, используются для оценки отклика оледенения на изменения климата, оценки общей потери массы ледников и их вклада в глобальное повышение уровня моря. Однако пространственную репрезентативность рядов, используемых в этих исследованиях, трудно оценить, поскольку данные мониторинга баланса массы доступны только для 440 ледников из более чем 200 000 по всему миру [13, 20-21]. Годовые изменения баланса массы эталонных ледников отражают региональные тенденции изменений, однако использование данных по балансу массы эталонных ледников сети мониторинга WGMS может привести к переоценке либо недооценке потерь площади/массы горно-ледниковых систем из-за влияния локальных факторов, контролирующих отклик ледников на изменения климата. Все это приводит к возникновению высокой неопределенности в оценках потерь ледниковых ресурсов и их проявлений в стоке рек с ледниковым питанием и уровне моря [22-24].

В последние десятилетия возможности мониторинга ледников значительно увеличились за счет достижений в области дистанционного зондирования Земли, методов обработки космических снимков и доступности данных мониторинга, что позволило улучшить понимание отклика ледников на современные и вероятные в будущем изменения климата, однако эти сведения разнородны и неполны [23, 25-30].

На базе данных мониторинга баланса массы эталонных ледников глобальной сети WGMS предпринимаются попытки «регионализации» – экстраполяции результатов наблюдений на эталонных ледниках на конкретные ледниковые регионы [24, 28, 31-33].

В целях мониторинга динамики ледников в региональном масштабе применяются методы классификации ледников на основе автоматизации обработки космических снимков с использованием оптических и радарных данных и цифровых моделей рельефа в высоких временных и пространственных масштабах разрешения [34, 35, например], однако эти методы имеют свои достоинства и ограничения.

В данной работе предпринята попытка преодолеть упомянутые неопределенности, опираясь на возможности методики оперативного мониторинга горно-ледниковых систем [36]. Рассмотрены возможности оценки состояния оледенения целостных ледниковых систем по данным мониторинга оледенения частных бассейнов на примере Северо-Илейской (ледники северного склона Иле Алатау) и Илейско-Кунгейской (ледники бассейна р. Шелек) ледниковых систем.

Во избежание разночтений определимся с используемыми в статье терминами. Под ледниковой системой мы понимаем территориально общую совокупность ледников с едиными условиями существования и реакции на изменения климата. Например, Северо-Илейская ледниковая система объединяет всю совокупность ледников бассейнов рек северного склона Иле Алатау – от Узын Каргалы на западе хребта до его западной границы распространения ледников, включая бассейн р. Турген. Под частным бассейном понимаем территорию отдельного водосборного бассейна, ледники которого составляют неотъемлемую часть соответствующей ледниковой системы. В нашем примере частным является любой из 11 горно-ледниковых бассейнов упомянутого междуречья.

Район исследования. Горный хребет Иле Алатау – одна из крайних северных дуг Тянь-Шаня шириной 40-60 км – вытянут на расстояние около 280 км с запада на восток вдоль широты 43° с. ш. в пределах 75-78° в. д. Северный склон хребта опускается к предгорным равнинам. На юге хребет круто обрывается к межгорным долинам рек Шелек и Чон-Кемин, отделяющим хребты Иле Алатау и Кунгей Алатау. В истоках этих рек хребты соединяются, образуя Шелеко-Кеминский горный узел. На востоке естественной границей хребта Иле Алатау является река Шарын, на западе – перевал Кастек (рисунок 1).

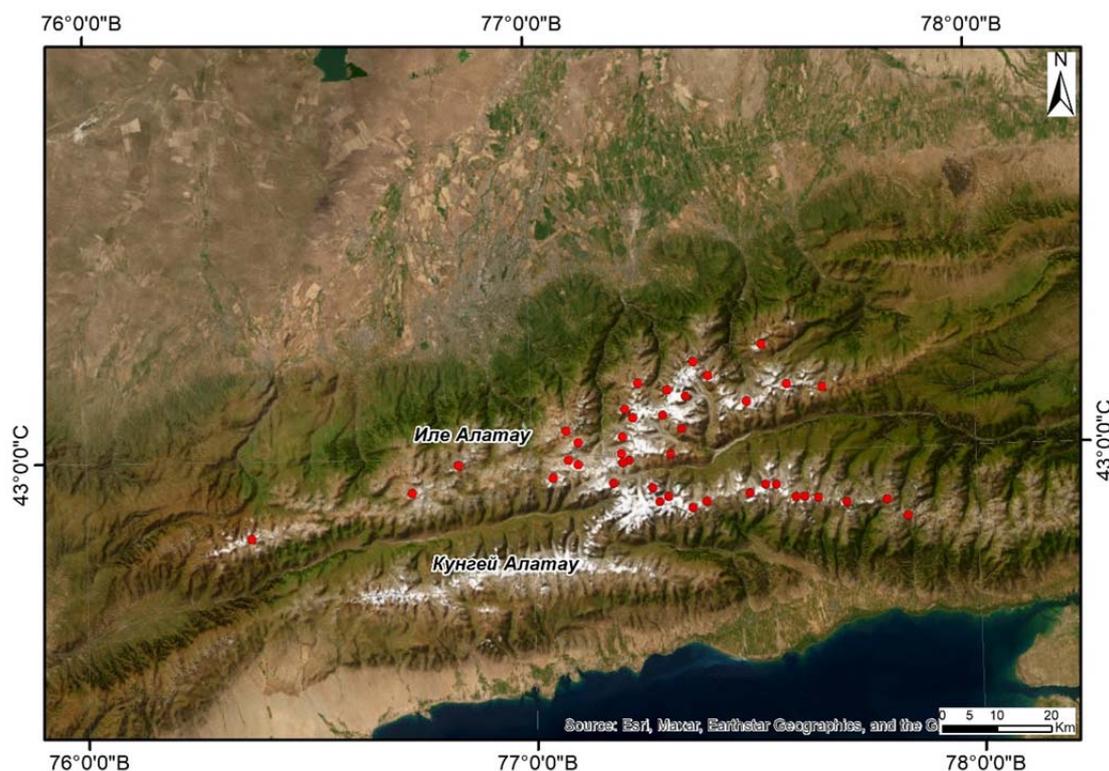


Рисунок 1 – Район исследования

Figure 1 – Research area

Главный водораздел хребта достигает наибольших высот (4000 м и более) в центральной части протяженностью 140-150 км. Высшей точкой является пик Талгар – 4973 м. Высота ряда вершин в районе Талгарского массива превышает 4500-4600 м.

Ледниковая система северного склона Иле Алатау снизу ограничена изогипсой 3300 м. Современное оледенение расположено в бассейнах рек Узын Каргалы, Шамалган, Каскелен, Аксай, Каргалы, Улкен и Киши Алматы, Талгар, Есик и Турген, относящихся к бассейну р. Иле.

Горная часть бассейна реки Шелек представляет собой широкую продольную долину, заложенную в грабене между хребтами Иле Алатау на севере и Кунгей Алатау на юге. Верхний ее участок, до устья р. Каракыя, является хорошо выраженным трогом, ниже долина реки Шелек принимает облик типичного V-образного ущелья. Хребет Кунгей Алатау входит в бассейн р. Шелек лишь северным склоном своей восточной части. Высота хребта вблизи Шелеко-Кеминского горного узла достигает 4653 м, восточный участок, где еще сохраняются ледники, ниже и едва достигает 4000 м.

Гляциальный пояс в бассейне реки Шелек ограничивается снизу изогипсой 3300 м и отличается значительным вертикальным расчленением. Амплитуда относительных высот составляет 600-800 м и более. Часть территории пояса занята оледенением, другая сравнительно недавно освободилась от ледников [37-39].

Материалы и методы исследования. Ясно, что для исследований изменений оледенения и причин межбассейновых и межрегиональных различий их динамики наибольший интерес представляют данные о состоянии оледенения целостных ледниковых систем – совокупности ледников, объединенных территорией с общими взаимосвязями с окружающей средой [40].

Исследования изменений состояния ледниковых систем сопряжено с необходимостью единовременной каталогизации ледников значительных по площади районов за различные годы, разделенные промежутками времени в 5-10 лет, как минимум.

В этом отношении одним из наиболее изученных является Балкаш-Алакольский бассейн – на эту территорию есть каталоги/данные о площади ледников каждой из четырех ледниковых систем бассейна – Северо-Илейской (ледники северного склона Иле Алатау), Илейско-Кунгейской (ледники бассейна р. Шелек), Жетысу Алатау и Верхне-Илейской (ледники китайской части бассейна р. Иле) по состоянию на 8-10 временных срезов за период с 1955/56 (год первой каталогизации) по 2022-2023 гг. Результаты этих исследований обобщены в многочисленных публикациях, включая монографии [6, 36, 41].

Каталогизация ледников – долгий процесс, не лишенный существенных погрешностей по причинам объективного (чаще всего – качество космических снимков) и субъективного характера (опыт и степень вовлеченности оператора в проблему, оценка морфометрических параметров ледников методом полуавтоматической обработки космических снимков без должного контроля их качества) [42, 43].

В этой связи представляется интересной попытка рассмотреть возможности оценки состояния оледенения целостных ледниковых систем по данным мониторинга оледенения частных бассейнов. Основанием для этого служит очевидное предположение, что факторы, определяющие межбассейновые и межрегиональные различия состояния ледниковых систем, в той или иной мере проявляются в гляциологических характеристиках ежегодно, а в среднем за многолетний период их влияние остается более или менее устойчивым. В конечном итоге это должно проявляться в устойчивости отношения площади ледников частного бассейна к площади оледенения соответствующей ледниковой системы. Это предположение вполне подтверждается результатами сравнительного анализа данных последовательных каталогов ледников различных районов [36]. В этом отношении наиболее изученным является оледенение гор Юго-Восточного Казахстана: на эту территорию имеются унифицированные каталоги /данные о площади всей совокупности ледников по состоянию на 1955, 1972/74, 1990, 1999/2000, 2008, 2014, 2017, 2022 годы (Северо-Илейская ледниковая система), на 1953/64, 1973/75, 1990, 2008, 2017, 2023 (Илейско-Кунгейская ледниковая система) и 1956, 1972, 1990 и 2000, 2012 гг. (ледниковая система Жетысу Алатау).

Сравнительный анализ данных повторных каталогов ледников Иле и Жетысу Алатау и Алтая не оставляет сомнений в устойчивости соотношений площади оледенения частного бассейна и соответствующей ледниковой системы [36, 44].

В таблице 1 представлено изменение доли площади оледенения отдельных речных бассейнов в суммарной площади оледенения северного склона Иле Алатау.

Таблица 1 – Изменение доли площади ледников частных бассейнов в суммарной площади ледников северного склона Иле Алатау (учтена лишь площадь открытой части ледников – «чистый лед») [36], дополненная данными за последующий период

Table 1 – Change in the share of the area of glaciers of private basins in the total area of glaciers of the northern slope of the Ile Alatau (only the area of the open part of glaciers – "pure ice" is taken into account) [36], supplemented with data for the subsequent period.

Год	Бассейн реки и доля площади его ледников в суммарной площади оледенения ледниковой системы, %										
	Узын Каргалы	Ша- малган	Кас- келен	Аксай	Кар- галы	Про- ходная	У. Алматы	К. Алматы	Талгар	Есик	Турген
1955	3,9	0,6	3,6	4,7	1,4	2,2	9,3	3,4	40,1	17,9	12,9
1974	4,6	1,2	5,6	5,4	1,3	2,6	8,2	3,0	38,9	16,9	12,6
1990	4,7	0,5	4,7	5,0	1,2	1,9	8,2	3,1	40,4	17,6	12,7
2006	4,3	0,4	4,1	4,9	1,2	1,6	8,3	3,2	41,2	18,4	12,3
2008	4,6	0,9	5,0	5,4	1,4	1,9	8,2	3,3	39,2	18,2	11,9
2014	4,2	0,3	4,0	4,9	1,1	1,5	8,2	3,0	41,7	18,4	12,6
2017	4,3	0,4	4,3	5,0	1,1	1,4	7,9	3,0	41,4	18,1	13,7
2022	3,9	0,2	3,7	4,5	1,1	1,4	7,9	2,7	41,9	19,3	13,7

Как видим, с 1955 по 2022 г. доля площади оледенения бассейнов рек северного склона Иле Алатау в суммарной площади ледников всей ледниковой системы междуречья Узын Каргалы – Турген практически не изменилась. Просматриваемые в отдельных бассейнах изменения носят случайный характер и обусловлены, скорее всего, погрешностями определения площади ледников по снимкам различного разрешения и качества. Не изменились эти соотношения в Жетысу Алатау и на Алтае [36, 44].

Устойчивость рассматриваемых соотношений является свидетельством единой реакции оледенения частных бассейнов и соответствующих ледниковых систем на изменения климата. Иными словами, несмотря на различные темпы изменения состояния отдельных ледников, обусловленных различиями их морфологии, размеров, экспозиции, вся совокупность ледников частного бассейна реагирует на внешние воздействия так же, как и соответствующая ледниковая система в целом.

Это открывает возможности для оперативного мониторинга состояния ледниковых систем: оценив площадь оледенения контрольного бассейна и зная ее долю в суммарной площади ледников всего района (либо группы бассейнов), несложно рассчитать площадь оледенения соответствующей ледниковой системы.

Устойчивость рассматриваемых соотношений многократно подтверждена на основе опубликованных данных о площади ледников горно-ледниковых бассейнов на три и более временных среза, в том числе Памира, Гиссаро-Алая [7, 45, 46] и гор Высокой Азии – Гиндукуш-Гималаев, Непальских Гималаев, Тибетского нагорья. В качестве примера в таблицах 2 и 3 представлена динамика доли площади ледников горно-ледниковых бассейнов Гиндукуш-Гималаев и Непала соответственно.

Также устойчивы во времени и соотношения площади отдельных ледников и площади оледенения соответствующего бассейна [36, 44]. Это позволяет использовать данные о площади отдельных ледников для расчета площади оледенения всего бассейна, что существенно расширяет возможности мониторинга динамики оледенения различных районов и может быть использовано для реконструкции оледенения горных районов на основе фотоснимков и инструментальных съемок отдельных ледников за исторический период.

Таблица 2 – Изменение доли площади ледников частных бассейнов в суммарной площади ледников Гиндукуш-Гималаев по данным [47]

Table 2 – Change in the share of the area of glaciers of private basins in the total area of glaciers of the Hindu Kush-Himalayas according to [47]

Бассейн	Площадь оледенения, км ²				Доля площади ледников в общей площади оледенения бассейна			
	1980	1990	2000	2010	1980	1990	2000	2010
Wakhan Corridor	56,5	55,8	51,4	52,3	20,74	21,82	20,8	21,7
Shyok Basin	115,1	109,2	198,3	108,6	42,25	42,7	43,8	45,1
Imja Valley	57,4	51,3	40,3	43,8	20,1	20,06	19,95	18,2
Lunana area	43,4	39,4	38,1	36,1	15,93	15,4	15,42	15
Всего	272,4	255,7	247,1	240,8	100	100	100	100

Таблица 3 – Изменение доли площади ледников частных бассейнов в суммарной площади ледников Непала по данным [48, таблица 4.1]

Table 3 – Change in the share of the glacier area of private basins in the total glacier area of Nepal according to [48, table 4.1]

Бассейн	Суб-бассейн	Площадь ледников, км ²				Доля площади ледников бассейна в общей, %			
		1980	1990	2000	2010	1980	1990	2000	2010
	Sub-basin								
Mahakali		158,5	134,6	120,3	112,5	3,07	2,99	2,86	2,9
Karnali	West Seti	210,7	191,1	162,8	146	15,21	15,53	14,62	14,27
	Kawari	42,3	37,2	33,5	29,2	3,05	3,02	3,01	2,85
	Humla	457,4	408,2	374,9	337,9	33,01	33,18	33,68	33,04
	Mugu	164,2	142,9	130,2	119,2	11,85	11,61	11,7	11,65
	Tila	36,5	33,1	29,3	26,8	2,63	2,65	2,63	2,62
	Bheri	474,2	417,6	382,4	363,8	34,23	33,95	34,4	35,57
Karnali в целом		1,385,4	1,230,1	1,113,1	1,022,8	26,8	27,3	26,4	26,2
Gandaki	Kalin Gandaki	677,3	587,3	558,5	527,4	31,86	31,79	31,64	31,69
	Seti	88,6	78,8	75,5	71,6	4,17	4,26	4,28	4,30
	Marsyangdi	632,8	557,8	535,9	509	29,77	30,19	30,36	30,58
	Budhi Gandaki	447	384,6	370,8	348,8	21,13	20,82	21,0	20,96
	Trishuli	279,8	237,9	224,3	207,6	13,16	12,88	12,7	12,48
Gandaki в целом		2,125,5	1,847,4	1,764,9	1,664,4	41,1	41,0	41,91	42,6
Kashi	Indrawati	23,9	20,1	18,4	16,2	1,59	1,55	1,52	1,46
	Sun Koshi	72,6	62,4	59,7	52,6	4,84	4,82	4,41	4,77
	Tama Koshi	120,3	101,7	94,2	84,4	8,02	7,86	7,77	7,66
	Likhu	32,7	27,2	25,2	23	2,18	2,10	2,08	2,09
	Dudh Koshi	535,4	455,9	426,7	391,2	35,72	35,23	35,19	35,48
	Arun	208,2	177,8	166	149,2	13,89	13,74	13,69	13,53
	Tamor	506,9	449	422,5	385,9	33,81	34,69	32,36	35,0
Kashi в целом		1,498,9	1,294,2	1,212,6	1,192,6	29,9	28,7	28,8	28,3
Всего		5,168,30	4,506,3	4,210,9	3,902,4	100	100	100	100

Изложенное позволяет предположить возможность оценки изменений оледенения горно-ледниковых бассейнов по данным о площади, ограниченной по количеству выборки ледников соответствующей ледниковой системы. Поскольку погрешность определения площади малых ледников по космическим снимкам априори выше, в тестовую выборку логично включить крупные ледники – в нашем случае площадью более 2 км² по состоянию на год первой каталогизации ледников (1955/56) и не менее 1 км² по состоянию на 2022/23 г. Для тестирования возможностей методики оперативного мониторинга горно-ледниковых систем воспользуемся данными о динамике площади ледников Северо-Илейской и Илейско-Кунгейской ледниковых систем с данными о площади оледенения на 7 и 6 временных срезов соответственно. Тестирование выполнено в двух вариантах – по двум выборкам площади 10 ледников и их общей выборке в 20 тестовых ледников. Выборки тестовых ледников Северо-Илейской и Илейско-Кунгейской ледниковых систем представлены в таблицах 4 и 5. Расположение тестовых ледников показано на рисунке 1.

Таблица 4 – Площадь 20 тестовых ледников Северо-Илейской ледниковой системы по состоянию на 1955/56 и 2022 гг.

Table 4 – The area of 20 test glaciers of the North-Ili glacial system for 1955/56 and 2022

Северный склон Иле Алатау – Северо-Илейская ледниковая система		
№ и название ледника по схеме (каталог СССР 1955/56 г.)	Площадь открытой части ледника, км ²	
	1955/56 г.	2022 г.
<i>10 ледников первой выборки</i>		
№ 134 Дмитриева	17	9,22
№ 234 Горного института	9,4	5,82
№ 206 Григорьева	8,5	5,2
№ 144 Колесника	6,4	4,3
№ 128 Туристов	6	2,81
№ 138 Тогузак (лев.)	5,4	2,9
№ 34 К. Макаревича	5,1	2,96
№ 190 Жарсай (прав.)	4,8	3,04
№ 147 Северцова	4,2	2,41
№ 241 Гляциологов	3,2	1,9
Средняя величина площади 10 выбранных ледников, км²	7	4,06
<i>10 ледников второй выборки</i>		
№ 107 Центр. Туяксуйский (Туйыксу)	3,2	1,96
№ 85 Черный	2,9	1,77
№ 227	2,8	1,74
№ 88 Городецкого (прав.)	2,6	1,14
№ 182 Металлург	2,6	1,51
№ 53 Теплофизиков	2,6	1,58
№ 157 Тагильцев (Желдымуз)	2,3	1,04
№ 150 Фрунзе	2,3	1,09
№ 171 Крошка	2,2	1,6
№ 6 Узункаргалинский	2,2	1,25
Средняя величина площади 10 выбранных ледников, км²	2,57	1,47
Общая площадь оледенения Северо-Илейской ледниковой системы, км²	287,3	138,1

Таблица 5 – Площадь 20 тестовых ледников Илейско-Кунгейской ледниковой системы (бассейна р. Шелек) по состоянию на 1953/64 и 2023 гг.

Table 5 – The area of 20 test glaciers of the Ileysko-Kungeyskaya glacial system (Shelek river basin) for 1953/64 and 2023

Бассейн реки Шелек – Илейско-Кунгейская ледниковая система		
№ и название ледника по схеме (каталог СССР 1953/64 г.)	Площадь открытой части ледника, км ²	
<i>10 ледников первой выборки</i>		
	1953/64 г.	2023 г.
№ 38 Корженевского	37,5	32,75
№ 74 Жангырык	17,3	12,81
№ 85 Новый	12,8	9,31
№ 90 Кенсай	6,4	3,37
№124 Сутбулак	6,1	3,83
№ 116 Корумдык	5,7	2,62
№ 58 Котлякова	4,5	3,15
№ 144 Зотикова	4,2	3,46
№ 134 Тулькисай	4,1	2,89
№ 54	3,4	2,82
Средняя величина площади 10 выбранных ледников, км²	10,2	7,7
<i>10 ледников второй выборки</i>		
№ 83	3,1	2,72
№ 71 Джазыкмуз	3	2,11
№ 110 Кайракты	2,8	1,57
№ 164 Каракыя	2,8	0,31
№ 112	2,5	1,73
№ 48	2,4	1,28
№125	2,4	1,58
№ 70 Сыргымалымуз	2,2	1,27
№ 92 Жарбулак	2,2	0,88
№ 150 Каскасу	2	1,03
Средняя величина площади 10 выбранных ледников, км²	2,54	1,45
Общая площадь оледенения бассейна, км²	277,9	182,1

Методика тестирования. Для решения задачи, приняв долю площади тестовой выборки ледников на год первой каталогизации ледников (1955/56–1957 гг.), мы рассчитывали по ней площадь ледников соответствующей ледниковой системы по состоянию на год следующей каталогизации ледников (на 1972/74 гг.). Далее, приняв долю площади ледников тестовой выборки по состоянию на 1972/74 гг., рассчитывали площадь всей совокупности ледников бассейна по состоянию на год следующей каталогизации и так последовательно по 2022/23 год включительно.

Результаты и их обсуждение. На рисунке 2 представлены результаты оценки динамики площади ледников Северо-Илейской ледниковой системы за период с 1955/56 г. (год первой каталогизации ледников) по 2022 г. [49]. Синим цветом показаны результаты каталогизации по данным [36, 41], а красным – выполненной магистрантом Б. Мукановой [49].

Как следует из рисунка 2, а, обе группы данных о площади ледников рассматриваемой ледниковой системы демонстрируют единый тренд, но площадь ледников в определениях Б. Мукановой [49] смещена на графике вверх относительно данных наших каталогизаций на постоянную величину – на 6%. Очевидные причины различий две. Первая заключается в том, в определениях [49] учтены ледники площадью более 0,01 км², против 0,1 км² в оценках [36, 41]. Вторая причина

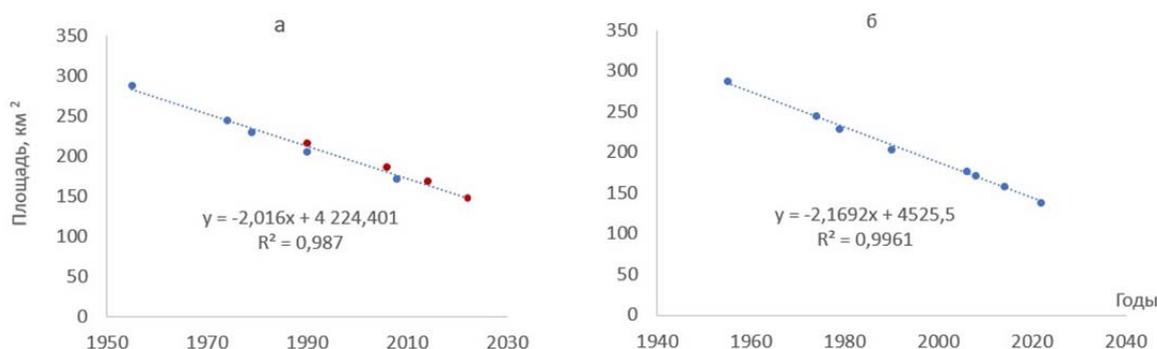


Рисунок 2 – Сокращение площади ледников Северо-Илейской ледниковой системы:
 а – синий цвет – по данным прежних каталогов [36, 41], красный – по определениям Б. Мукановой;
 б – по данным всех каталогов с рассмотренной ниже коррекцией данных Б. Мукановой

Figure 2 – Reduction of the North-Ileian glacial system's area: *a* – blue color – according to previous catalogs [36, 41], red – according to B. Mukanova's definitions; *b* – according to all catalogs with the correction of B. Mukanova's data discussed below

системного завышения площади ледников по оценкам [49] в том, что данные первой группы каталогизаций получены в результате ручной обработки исходных аэрофотоснимков (1955, 1990 гг.) и космических снимков за последующий период, а в определениях Б. Мукановой [49] – полуавтоматическим методом картирования контуров ледников.

Для приведения обеих групп данных к сопоставимому виду мы уменьшили значения площади ледников в определениях Б. Мукановой на упомянутые 6% и с учетом этой поправки оценили сокращение площади ледников Северо-Илейской ледниковой системы за весь рассматриваемый период. Итоговый результат, представленный на рисунке 2, б, не оставляет сомнений в том, что площадь ледников Северо-Илейской ледниковой системы в течение всего рассматриваемого периода продолжает сокращаться линейно со средним темпом 0,73% в год. Перспектива исчезновения подавляющей части ледников рассматриваемого региона к концу текущего столетия с соответствующим обострением проблем водной, продовольственной и экологической безопасности становится все более тревожной, а необходимость разработки превентивных мер адаптации к меняющимся условиям все более актуальной.

На рисунке 3 представлены итоговые результаты тестирования, основанного на данных о динамике оледенения северного склона Иле Алатау (Северо-Илейская ледниковая система).

Результаты тестирования по всем трем выборкам ледников практически идентичны: расчетные и фактические данные о площади ледников тесно скоррелированы: $R^2 = 0,99, 0,98$ и $0,99$ соответственно. Расчет по данным о площади 20 тестовых ледников не является предпочтительным – с той же достоверностью площадь ледников соответствующей ледниковой системы можно рассчитать по данным о площади 10 тестовых ледников. Практически тот же результат тестирования получен по контрольным выборкам ледников бассейна р. Шелек (рисунок 4).

Результаты тестирования идентичны рассмотренным выше по ледникам Северо-Илейской ледниковой системы – расчетные и фактические данные о площади ледников тесно скоррелированы: $R^2 = 0,99, 0,97$ и $0,99$ соответственно.

В таблице 6 показано отклонение расчетной площади от фактической (%), рассчитанное по доле площади тестовых ледников в суммарной площади оледенения Северо-Илейской и Илейско-Кунгейской ледниковых систем.

В 88% случаев расчетные значения площади оледенения рассматриваемых ледниковых систем были менее 5% относительно фактических и лишь в 4 случаях (12%) превысили этот порог при среднем значении отклонений расчетных данных от фактических менее 2% и наибольших ошибках расчета 7,8 и -9,6%. Это вполне согласуется с результатами прежних оценок [36], основанных на выявленной устойчивости соотношений площади ледников частного бассейна и площади оледенения соответствующей ледниковой системы и свидетельствует о высокой эффективности методики оперативного мониторинга горно-ледниковых систем. Она позволяет оперативно (повторяемостью вплоть до погодичного) оценить потери многолетнего льда исследуемой ледниковой системы и вклад талых ледниковых вод в формирование речного стока, что, в свою очередь, хорошая основа для соответствующего моделирования современных и прогнозных изменений.

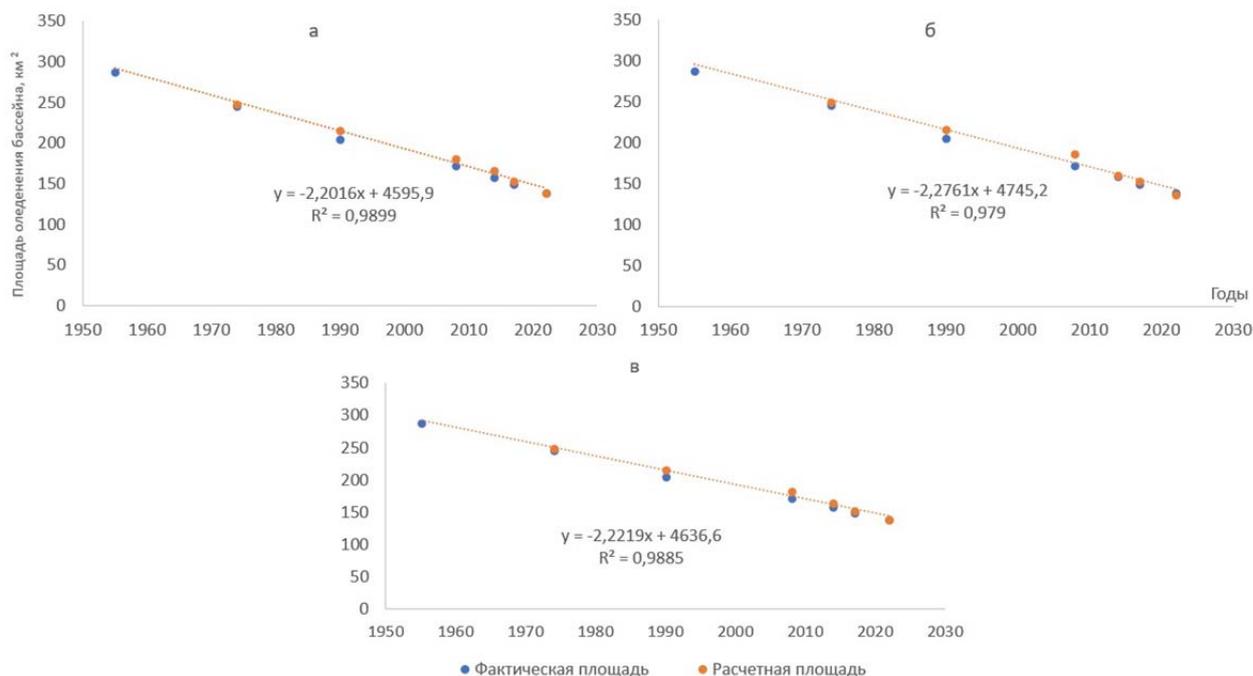


Рисунок 3 – Отклонения площади оледенения северного склона Иле Алатау, рассчитанной по доле площади двух выборок по 10 ледников в каждой (а, б) и их суммарной площади –20 тестовых ледников (в) по состоянию на годы последовательной каталогизации

Figure 3 – Deviations of the glaciation area of the northern slope of the Ile Alatau, calculated from the proportion of the area of two samples of 10 glaciers each (a, b) and their total area of 20 test glaciers (c) as of the years of sequential cataloging

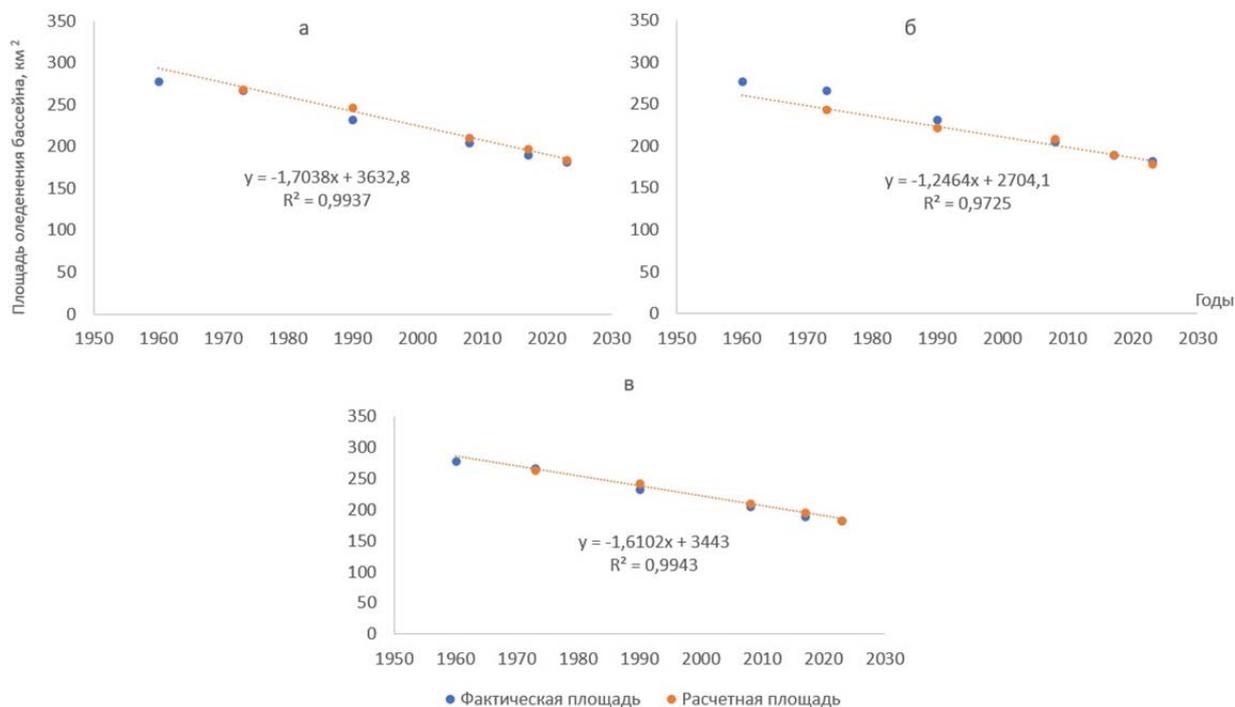


Рисунок 4 – Отклонение площади ледников бассейна р. Шелек (Илейско-Кунгейская ледниковая система), рассчитанной по доле площади 10 тестовых ледников первой (а) и второй (б) выборок и их общей выборки (20 ледников) (в) от фактической площади ледников по каталогу

Figure 4 – Deviation of the glacier area of the Shelek River basin (Ileysko-Kungeyskaya glacial system), calculated from the proportion of the area of 10 test glaciers of the first (a) and second (b) samples and their total sample (20 glaciers) (c) from the actual glacier area according to the catalog

Таблица 6 – Отклонение расчетной площади от фактической (%), рассчитанное по доле площади тестовых ледников в суммарной площади оледенения Северо-Илейской и Илейско-Кунгейской ледниковых систем

Table 6 – Deviation of the calculated area from the actual (%), calculated by the share of the area of test glaciers in the total glaciation area of the North-Ileisk and Ileisk-Kungey glacial systems

Ледни- ковая система	Год	Общая площадь оледенения, км ²	Площадь ледников ледниковой системы (км ²), рассчитанная по доле площади			Отклонение расчетной площади от фактической (%), рассчитанное по доле площади		
			10 ледников первой выборки	10 ледников второй выборки	20 ледников	10 ледников первой выборки	10 ледников второй выборки	20 ледников
Северо- Илейская	1972/74	245,1	247,77	249,2	248,16	1,08	1,65	1,23
	1990	204,7	214,99	215,3	215,08	4,35	4,92	4,82
	2008	171,9	180,33	186,35	181,96	4,68	7,76	5,53
	2014	158,4	166,25	160,43	164,64	4,73	1,27	3,8
	2017	149,2	152,57	153,21	152,74	2,21	2,62	2,32
	2022	138,1	139,22	136,21	138,41	0,81	-1,37	0,23
Илейско- Кунгей- ская	1973/75	266,79	268,41	243,39	263,42	0,6	-9,61	-1,28
	1990	232,29	246,45	222,68	242,07	5,75	-4,32	4,04
	2008	204,96	210,61	208,52	210,25	2,68	1,71	2,52
	2017	189,83	197,25	189,27	195,91	3,76	-0,29	3,1
	2023	182,06	184,1	178,39	183,17	1,11	-2,05	0,61
Среднее								1,85
Мин.								-9,61
Макс.								7,76

Закключение. Таким образом, рассмотренная методика оперативного мониторинга горно-ледниковых систем позволяет по данным о площади контрольной выборки из 10-20 ледников оценить изменения площади оледенения (всей совокупности ледников) соответствующей ледниковой системы с погрешностью не более $\pm 5\%$.

Согласно результатам тестирования в 88% случаев расчетные значения площади оледенения Северо-Илейской и Илейско-Кунгейской ледниковых систем были менее 5% относительно фактических и лишь в 4 случаях (12%) превысили этот порог при среднем значении отклонений расчетных данных от фактических менее 2% и наибольших ошибках расчета 7,76 и -9,6%. При этом расчет по выборке из 20 ледников не имеет преимуществ – столь же достоверны результаты расчета по выборке из 10 ледников, важно лишь, чтобы в тестовой выборке были крупные ледники – площадью не менее 1-2 км².

Рассмотренные результаты тестирования свидетельствует о высокой эффективности нашей методики. Она позволяет по данным о площади контрольной выборки из 10-20 ледников оценить изменения площади оледенения соответствующей ледниковой системы с погрешностью не более $\pm 5\%$. Этократно увеличивает возможности оперативного мониторинга горно-ледниковых систем и позволяет оперативно (повторяемостью от одного раза в несколько лет до ежегодной) оценить потери многолетнего льда исследуемой ледниковой системы в условиях меняющегося климата и вклад талых ледниковых вод в формирование речного стока, что, в свою очередь, является хорошей основой для соответствующего моделирования современных и прогнозных изменений.

Благодарности и финансирование. Авторы благодарны Марие Шахгедановой за замечания и рекомендации, позволившие значительно улучшить содержание статьи.

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.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Оледенение Тянь-Шаня / Под ред. М. Б. Дюргерова. – М., 1995. – 237 с.
- [2] Aizen V., Aizen E., Melack J., Dozier J. Climate and Hydrologic Changes in the Tien Shan, Central Asia // *Journal of Climate*. – 1997. – Vol. 10, No. 6. – P. 1393-1404. DOI:10.1175/1520-0442(1997)010<1393:CAHCIT>2.0.CO;2
- [3] Sorg A., Bolch T., Stoffel M., Solomina O., Beniston M. Climate change impacts on Glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia) // *Nature Climate Change*. – 2012. – Vol. 2(10). – P. 725-731. DOI:10.1038/NCLIMATE1592
- [4] Hoelzle M., Barandun M., Bolch T., Fiddes J., Gafurov A., Muccione V., Saks T., Shahgedanova M. The status and role of the alpine cryosphere in Central Asia // *The Aral Sea Basin: Water for sustainable development in Central Asia*. Xenarios S., Schmidt-Vogt D., Qadir M., Janusz Pawletta B., Abduallev I. (eds.). – Abingdon, Oxon: Routledge, 2020. – P. 100-121. <https://doi.org/10.4324/9780429436475-8>
- [5] Braun L., Hagg W. Present and future impact of snow cover and glaciers on runoff from mountain regions – comparison between Alps and Tien Shan // *Assessment of Snow, Glacier and Water Resources in Asia: Selected papers from the Workshop in Almaty, Kazakhstan*. – Koblenz, 2009. – P. 36-43.
- [6] Severskiy I.V., Kokarev A.L., Severskiy S.I., Tokmagambetov T.G., Shagarova L.V., Shesterova I.N. Contemporary and prognostic changes of glaciation in Balkhash Lake Basin. – Almaty: VAC Publishing House, 2006. – 68 p.
- [7] Батыров Р.С., Яковлев А. В. Мониторинг горных ледников некоторых районов Гиссаро-Алая с использованием космических снимков ASTER TERRA // *Гляциология горных областей: Труды НИГМИ*. – Ташкент, 2004. – Вып. 3(248). – С. 22-27.
- [8] Вилесов Е.В., Морозова В. И., Северский И. В. Оледенение Джунгарского (Жетысу) Алатау: прошлое, настоящее, будущее. – Алматы, 2013. – 244 с.
- [9] Narama C., Kaab A., Duishonakunov M., Abdrakhmatov K. Spatial variability of recent glacier area changes in the Tien Shan Mountains, Central Asia, using Corona (~1970), Landsat (~2000), and ALOS (~2007) satellite data // *Global and Planetary Change*. – 2010. – Vol. 71. – P. 42-54. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2009.08.002>
- [10] Xenarios S., Gafurov A., Schmidt-Vogt D., Sehring J., Manandhar S., Hergarten C., Shigaeva J., Foggin M. Climate change and adaptation of mountain societies in Central Asia: uncertainties, knowledge gaps, and data constraints // *Regional Environmental Change*. – 2019. – P. 1339-1352. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10113-018-1384-9>
- [11] Pritchard H. Asia's shrinking glaciers protect large populations from drought stress // *Nature*. – 2019. – Vol. 569. – P. 649-654. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1240-1>
- [12] Huss M., Bookhagen B., Huggel C., Jacobsen D, Bradley R., Clague J., Vuille M., Buytaert W., Cayan D., Greenwood G, Mark B., Milner A., Weingartner R., Winder M. Toward mountains without permanent snow and ice // *Earth's Future*. – 2017. – No. 5. – P. 418-435. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016EF000514>
- [13] WGMS 2023. *Global Glacier Change Bulletin No. 5 (2020–2021)* / Edited by: Zemp M., Gärtner-Roer I., Nussbaumer S.U., Welty E.Z., Dussailant I. and Bannwart J. ISC(WDS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/ WMO, World Glacier Monitoring Service. – Zurich, 2023. – 134 p. https://wgms.ch/downloads/WGMS_GGCB_05.pdf
- [14] Aizen V., Kuzmichenok V., Surazakov A., Aizen E. Glacier changes in the central and northern Tien Shan during the last 140 years based on surface and remote-sensing data // *Annals of Glaciology*. – 2006. – Vol. 50. – P. 328-340. DOI: <https://doi.org/10.3189/172756406781812465>
- [15] Bolch T. Climate change and glacier retreat in northern Tien Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) using remote-sensing data // *Global and Planetary Change*. – 2007. – No. 56 (1-2). – P. 1-12 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.009>
- [16] Kotlyakov V. M., Severskiy I. V. Glaciers of Central Asia: current situation, changes and possible impact on water resources // *Assessment of Snow, Glaciers and Water Resources in Asia: Selected papers from the Workshop in Almaty, Kazakhstan*. – Koblenz, 2009. – P. 36-43.
- [17] Cogley J. G. Glacier shrinkage across High Mountain Asia // *Annals of Glaciology*. – 2016. – Vol. 57(71). – P. 41-49. DOI: <https://doi.org/10.3189/2016AoG71A040>
- [18] Li B., Zhu A., Zhang Y., Pei T., Qin C., Zhou C. Glacier change over the past four decades in the middle Chinese Tien Shan // *Journal of Glaciology*. – 2007. – Vol. 52. – P. 425-432. DOI:10.3189/172756506781828557
- [19] Северский И.В., Благовещенский В.П., Северский С.И., Пиманкина Н.В., Се Зичу, Жан Жизонг, Ху Руджи. Снежный покров и лавины Тянь-Шаня. – Алматы, 2006. – 184 с.
- [20] WGMS (2015). *Global Glacier Change Bulletin No. 1 (2012–2013)* / Edited by: Zemp M., Gärtner-Roer I., Nussbaumer S. U., Hüsler F., Machguth H., Mölg, N., Paul F., Hoelzle M. ISC(WDS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/ WMO, World Glacier Monitoring Service. – Zürich, 2015. – 230 p. DOI: <https://doi.org/10.5904/wgms-fog-2015-11>
- [21] Zemp M., Frey H., Gärtner-Roer I., Nussbaumer S., Hoelzle M., Paul F., Haeberli W., Denzinger F... Vincent C. Historically unprecedented global glacier declines in the early 21st century // *Journal of Glaciology*. – 2015. – Vol. 61(228). – P. 745-762. DOI: <https://doi.org/10.3189/2015JoG15J017>
- [22] Fountain G., Hoffman M. J., Granshaw F., Riedel J. The 'benchmark glacier' concept – does it work? Lessons from the North Cascade Range, USA // *Annals of Glaciology*. – 2009. – Vol. 50(50). – P. 163-168. DOI: <https://doi.org/10.3189/172756409787769690>
- [23] Vincent C., Fischer A., Mayer C., Bauder A., Galos S. P., Funk M, Thibert E., Six D., Braun L., Huss M. Common climatic signal from glaciers in the European Alps over the last 50 years // *Geophysical Research Letters*. – 2017. – Vol. 44. – P. 1376-1383. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016GL072094>
- [24] Zemp M., Huss M., Eckert N., Thibert E., Paul F., Nussbaumer S. U., Gärtner-Roer I. Brief communication: Ad hoc estimation of glacier contributions to sea-level rise from the latest glaciological observations // *The Cryosphere*. – 2020. – Vol. 14. – P. 1043-1050. DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-14-1043-2020>
- [25] Barandun M., Fiddes J., Scherler M., Mathys T., Saks T., Petrakov D., Hoelzle M. The state and future of the cryosphere in Central Asia // *Water Security*. – 2020. – Vol. 11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2020.100072>
- [26] Sakai, A. Brief communication: Updated GAMDAM glacier inventory over high-mountain Asia // *The Cryosphere*. – 2019. – Vol. 13. – P. 2043-2049. DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-13-2043-2019>

- [27] Mölg N., Bolch T., Rastner P., Strozzi T., Paul F. A consistent glacier inventory for Karakoram and Pamir derived from Landsat data: Distribution of debris cover and mapping challenges // *Earth System Science Data*. – 2018. – Vol. 10. – P. 1807-1827. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-10-1807-2018>.
- [28] Zemp M., Huss M., Thibert E., Eckert N., McNabb R., Bannwart J., Barandun M., Cogley, J. Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016 // *Nature*. – 2019. – Vol. 568. DOI: 10.1038/s41586-019-1071-0
- [29] Wouters B., Gardner S. A., Moholdt G. Global Glacier Mass Loss During the GRACE Satellite Mission (2002-2016) // *Frontiers in Earth Science*. – 2019. – Vol. 7. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00096>
- [30] Miles E., McCarthy M., Dehecq A., Kneib M., Fugger S., Pellicciotti F. Health and Sustainability of Glaciers in High Mountain Asia // *Nature Communications*. – 2021. – Vol. 12. DOI: 10.1038/s41467-021-23073-4
- [31] Arendt A., Echelmeyer K., Harrison W., Lingle C., Zirnheld S., Valentine V., Ritchie B., Druckenmiller M. Updated estimates of glacier volume changes in the western Chugach Mountains, Alaska, and a comparison of regional extrapolation methods // *Journal of Geophysical Research*. – 2006. – Vol. 111(F3). DOI:10.1029/2005JF000436
- [32] Huss M. Extrapolating glacier mass balance to the mountain-range scale: the European Alps 1900–2100 // *The Cryosphere*. – 2012. – Vol. 6. – P. 713-727. DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-6-713-2012>
- [33] Davaze L., Rabatel A., Dufour A., Hugonnet R., Arnaud Y. Region-Wide Annual Glacier Surface Mass Balance for the European Alps From 2000 to 2016 // *Frontiers in Earth Science*. – 2020. – Vol. 8:149. DOI:10.3389/feart.2020.00149
- [34] Zhuang L., Ke C., Cai Y., Nourani V. Measuring glacier changes in the Tianshan Mountains over the past 20 years using Google Earth Engine and machine learning // *Journal of Geographical Sciences*. – 2023. – Vol. 33. – P. 1939-1964. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11442-023-2160-4>
- [35] Caro A., Condom T., Rabatel A. Climatic and Morphometric Explanatory Variables of Glacier Changes in the Andes (8–55°S): New Insights from Machine Learning Approaches // *Frontiers in Earth Science*. – 2021. – Vol. 9. – P. 1-21. DOI: 10.3389/feart.2021.713011
- [36] Водные ресурсы Казахстана: оценка, прогноз, управление: Т. VI. Северский И. В., Кокарев А. Л., Пиманкина Н. В. Снежно-ледовые ресурсы Казахстана. – Алматы, 2012. – 246 с.
- [37] Вилесов Е.Н. Динамика и современное состояние оледенения гор Казахстана. – Алматы, 2016. – 268 с.
- [38] Ресурсы поверхностных вод СССР. Каталог ледников СССР. Т. 13. Центр. и Южный Казахстан. Вып. 2, ч. 1. Составители: Вилесов Е.Н., Хонин Р. В. Бассейны левых притоков р. Или от устья р. Курты до устья р. Тургенъ. – Л.: Гидрометеиздат, 1967. – 78 с.
- [39] Ресурсы поверхностных вод СССР. Каталог ледников СССР. Т. 13. Центр. и Южный Казахстан. Вып. 2, ч. 2. Составитель Вилесов Е.Н. Река Чилик. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 52 с.
- [40] Гляциологический словарь / Под ред. В. М. Котлякова. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 528 с.
- [41] 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. – Vol. 57(71). – P. 382-394. DOI: 10.3189/2016AOG71A575
- [42] Paul F., Barrant N., Baumann S., Berthier E., Bolch T., Casey K., ... Winsvold S. On the accuracy of glacier outlines derived from remote-sensing data // *Annals of Glaciology*. – 2013. – Vol. 54(63). – P. 171-182. DOI:10.1016/j.rse.2017.08.038
- [43] Paul F., Bolch T., Briggs K., Käab A., McMillan M., McNabb R., Nagler T., Nuth C., Rastner P., Strozzi T., Wuite J. Error sources and guidelines for quality assessment of glacier area, elevation change, and velocity products derived from satellite data in the Glaciers cci project // *Remote Sensing of Environment*. – 2017. – Vol. 203. – P. 256-275. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.08.038>
- [44] Северский И. В. К проблеме мониторинга изменений оледенения целостных ледниковых систем // *Вопросы географии и геоэкологии*. – 2012. – № 2. – С. 12-18.
- [45] Щетинников А. С. Морфология и режим ледников Памиро-Алая. – Ташкент: Изд-во САНИГМИ, 1998. – 219 с.
- [46] Усубалиев Р. А., Дудашвили А. С., Элеманов О. И. Оледенение северных склонов Туркестанского и Алайского хребтов и его современная динамика // *Лед и снег*. – 2012. – № 1(117). – С. 24-28.
- [47] Bajracharya S. R., Maharjan S. B., Shrestha F., Guo W., Liu S., Immerzeel W., Shrestha B. (2015). The glaciers of the Hindu Kush Himalayas: current status and observed changes from the 1980s to 2010 // *International Journal of Water Resources Development*. – 2015. – Vol. 31(2). – P. 161-173. DOI: 10.1080/07900627.2015.1005731
- [48] Bajracharya S. R., Maharjan S. B., Shrestha F., Bajracharya O. R., Baidya S. Glacier status in Nepal and decadal change from 1980 to 2010 based on landsat data / *Research report 2014 (2)*. Kathmandu, ICIMOD – 2014. Table 4.1. [Электрон. ресурс]. – 2014. URL: lib.icimod.org (Дата обращения 01.05.2024)
- [49] Северский И. В., Муканова Б. А., Капица В. П., Татьяна М. Е., Кокарев А. Л., Шестерова И. Н. Изменение оледенения северного склона Иле Алатау за семидесятилетний период // *Вестник КазНУ. Серия географическая*. – 2024. – Т. 73(2). – С. 59-71. DOI: <https://doi.org/10.26577/JGEM.2024.v73.i2-05>

REFERENCES

- [1] Glaciation of the Tien Shan / Ed. by M. B. Dyurgerov. M., 1995. 237 p. (in Russ.).
- [2] Aizen V., Aizen E., Melack J., Dozier J. Climate and Hydrologic Changes in the Tien Sham, Central Asia // *Journal of Climate*. 1997. Vol. 10, No. 6. P. 1393-1404. DOI:10.1175/1520-0442(1997)010<1393:CAHCIT>2.0.CO;2
- [3] Sorg A., Bolch T., Stoffel M., Solomina O., Beniston M. Climate change impacts on Glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia) // *Nature Climate Change*. 2012. Vol. 2(10). P. 725-731. DOI:10.1038/NCLIMATE1592
- [4] Hoelzle M., Barandun M., Bolch T., Fiddes J., Gafurov A., Muccione V., Saks T., Shahgedanova M. The status and role of the alpine cryosphere in Central Asia // *The Aral Sea Basin: Water for sustainable development in Central Asia*. Xenarios S., Schmidt-Vogt D., Qadir M., Janusz Pawletta B., Abduallev I. (eds.). Abingdon, Oxon: Routledge, 2020. P. 100-121. <https://doi.org/10.4324/9780429436475-8>
- [5] Braun L., Hagg W. Present and future impact of snow cover and glaciers on runoff from mountain regions – comparison between Alps and Tien Shan // *Assessment of Snow, Glacier and Water Resources in Asia: Selected papers from the Workshop in Almaty, Kazakhstan*. Koblenz, 2009. P. 36-43.

- [6] Severskiy I.V., Kokarev A.L., Severskiy S.I., Tokmagambetov T.G., Shagarova L.V., Shesterova I.N. Contemporary and prognostic changes of glaciation in Balkhash Lake Basin. *Almaty: VAC Publishing House, 2006. 68 p.*
- [7] Batyrov R.S., Yakovlev A. V. Monitoring of mountain glaciers in some areas of the Gissar-Alai using ASTER TERRA images // *Glaciology of mountain regions: Proceedings of NIGMI. Tashkent, 2004. Issue. 3(248). P. 22-27 (in Russ.).*
- [8] Vilesov Ye.V., Morozova V.I., Severskiy I.V. Glaciation of the Dzungarian (Zhetysu) Alatau: past, present, future. *Almaty, 2013. 244 p. (in Russ.).*
- [9] Narama C., Kaab A., Duishonakunov M., Abdrakhmatov K. Spatial variability of recent glacier area changes in the Tien Shan Mountains, Central Asia, using Corona (~1970), Landsat (~2000), and ALOS (~2007) satellite data // *Global and Planetary Change. 2010. Vol. 71. P. 42-54. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2009.08.002>*
- [10] Xenarios S., Gafurov A., Schmidt-Vogt D., Sehring J., Manandhar S., Hergarten C., Shigaeva J., Foggin M. Climate change and adaptation of mountain societies in Central Asia: uncertainties, knowledge gaps, and data constraints // *Regional Environmental Change. 2019. P. 1339-1352. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10113-018-1384-9>*
- [11] Pritchard H. Asia's shrinking glaciers protect large populations from drought stress // *Nature. 2019. Vol. 569. P. 649-654. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1240-1>*
- [12] Huss M., Bookhagen B., Huggel C., Jacobsen D., Bradley R., Clague J., Vuille M., Buytaert W., Cayan D., Greenwood G, Mark B., Milner A., Weingartner R., Winder M. Toward mountains without permanent snow and ice // *Earth's Future. 2017. Np. 5. P. 418-435. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016EF000514>*
- [13] WGMS 2023. Global Glacier Change Bulletin No. 5 (2020–2021) / Edited by: Zemp M., Gärtner-Roer I., Nussbaumer S.U., Welty E.Z., Dussaillant I. and Bannwart J. ISC(WDS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/ WMO, World Glacier Monitoring Service. Zurich, Switzerland, 2023. 134 p. https://wgms.ch/downloads/WGMS_GGCB_05.pdf
- [14] Aizen V., Kuzmichenok V., Surazakov A., Aizen E. Glacier changes in the central and northern Tien Shan during the last 140 years based on surface and remote-sensing data // *Annals of Glaciology. 2006. Vol. 50. P. 328-340. DOI: <https://doi.org/10.3189/172756406781812465>*
- [15] Bolch T. Climate change and glacier retreat in northern Tien Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) using remote-sensing data // *Global and Planetary Change. 2007. No. 56 (1-2). P. 1-12 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.009>*
- [16] Kotlyakov V. M., Severskiy I. V. Glaciers of Central Asia: current situation, changes and possible impact on water resources // *Assessment of Snow, Glaciers and Water Resources in Asia: Selected papers from the Workshop in Almaty, Kazakhstan. Koblenz, 2009. P. 36-43.*
- [17] Cogley J. G. Glacier shrinkage across High Mountain Asia // *Annals of Glaciology. 2016. Vol. 57(71). P. 41-49. DOI: <https://doi.org/10.3189/2016AoG71A040>*
- [18] Li B., Zhu A., Zhang Y., Pei T., Qin C., Zhou C. Glacier change over the past four decades in the middle Chinese Tien Shan // *Journal of Glaciology. 2007. Vol. 52. P. 425-432. DOI:10.3189/172756506781828557*
- [19] Severskiy I.V., Blagoveshenskiy V.P., Severskiy S.I., Pimankina N.V., Xie Zichu, Zhan Zhizong, Hu Ruji. Snow cover and avalanches of Tien Shan. *Almaty, 2006. 184 p. (in Russ.).*
- [20] WGMS (2015). Global Glacier Change Bulletin No. 1 (2012–2013) / Edited by: Zemp M., Gärtner-Roer I., Nussbaumer S. U., Hüsler F., Machguth H., Mölg, N., Paul F., Hoelzle M. ISC(WDS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/ WMO, World Glacier Monitoring Service. Zürich, 2015. 230 p. DOI: <https://doi.org/10.5904/wgms-fog-2015-11>
- [21] Zemp M., Frey H., Gärtner-Roer I., Nussbaumer S., Hoelzle M., Paul F., Haerberli W., Denzinger F... Vincent C. Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century // *Journal of Glaciology. 2015. Vol. 61(228). P. 745-762. DOI: <https://doi.org/10.3189/2015JoG15J017>*
- [22] Fountain G., Hoffman M. J., Granshaw F., Riedel J. The 'benchmark glacier' concept – does it work? Lessons from the North Cascade Range, USA // *Annals of Glaciology. 2009. Vol. 50(50). P. 163-168. DOI: <https://doi.org/10.3189/172756409787769690>*
- [23] Vincent C., Fischer A., Mayer C., Bauder A., Galos S. P., Funk M, Thibert E., Six D., Braun L., Huss M. Common climatic signal from glaciers in the European Alps over the last 50 years // *Geophysical Research Letters. 2017. Vol. 44. P. 1376-1383. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016GL072094>*
- [24] Zemp M., Huss M., Eckert N., Thibert E., Paul F., Nussbaumer S. U., Gärtner-Roer I. Brief communication: Ad hoc estimation of glacier contributions to sea-level rise from the latest glaciological observations // *The Cryosphere. 2020. Vol. 14. P. 1043-1050. DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-14-1043-2020>*
- [25] Barandun M., Fiddes J., Scherler M., Mathys T., Saks T., Petrakov D., Hoelzle M. The state and future of the cryosphere in Central Asia // *Water Security. 2020. Vol. 11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2020.100072>*
- [26] Sakai, A. Brief communication: Updated GAMDAM glacier inventory over high-mountain Asia // *The Cryosphere. 2019. Vol. 13. P. 2043-2049. DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-13-2043-2019>*
- [27] Mölg N., Bolch T., Rastner P., Strozzi T., Paul F. A consistent glacier inventory for Karakoram and Pamir derived from Landsat data: Distribution of debris cover and mapping challenges // *Earth System Science Data. 2018. Vol. 10. P. 1807-1827. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-10-1807-2018>*
- [28] Zemp M., Huss M., Thibert E., Eckert N., McNabb R., Bannwart J., Barandun M...Cogley J. Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016 // *Nature. 2019. Vol. 568. DOI: 10.1038/s41586-019-1071-0*
- [29] Wouters B., Gardner S. A., Moholdt G. Global Glacier Mass Loss During the GRACE Satellite Mission (2002-2016) // *Frontiers in Earth Science. 2019. Vol. 7. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00096>*
- [30] Miles E., McCarthy M., Dehecq A., Kneib M., Fugger S., Pellicciotti F. Health and Sustainability of Glaciers in High Mountain Asia // *Nature Communications. 2021. Vol. 12. DOI: 10.1038/s41467-021-23073-4*
- [31] Arendt A., Echelmeyer K., Harrison W., Lingle C., Zirnheld S., Valentine V., Ritchie B., Druckenmiller M. Updated estimates of glacier volume changes in the western Chugach Mountains, Alaska, and a comparison of regional extrapolation methods // *Journal of Geophysical Research. 2006. Vol. 111(F3). DOI: 10.1029/2005JF000436*
- [32] Huss M. Extrapolating glacier mass balance to the mountain-range scale: the European Alps 1900–2100 // *The Cryosphere. 2012. Vol. 6. P. 713-727. DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-6-713-2012>*

- [33] Davaze L., Rabatel A., Dufour A., Hugonnet R., Arnaud Y. Region-Wide Annual Glacier Surface Mass Balance for the European Alps From 2000 to 2016 // *Frontiers in Earth Science*. 2020. Vol. 8:149. DOI: 10.3389/feart.2020.00149
- [34] Zhuang L., Ke C., Cai Y., Nourani V. Measuring glacier changes in the Tianshan Mountains over the past 20 years using Google Earth Engine and machine learning // *Journal of Geographical Sciences*. 2023. Vol. 33. P. 1939-1964. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11442-023-2160-4>
- [35] Caro A., Condom T., Rabatel A. Climatic and Morphometric Explanatory Variables of Glacier Changes in the Andes (8–55°S): New Insights from Machine Learning Approaches // *Frontiers in Earth Science*. 2021. Vol. 9. P. 1-21. DOI: 10.3389/feart.2021.713011
- [36] Water resources of Kazakhstan: assessment, forecast, management: Vol. VI. Severskiy I. V., Kokarev A. L., Pimankina N. V. Snow and ice resources of Kazakhstan. Almaty, 2012. 246 p. (in Russ.).
- [37] Vilesov Ye. N. Dynamics and current state of glaciation of the mountains of Kazakhstan. Almaty, 2016. 268 p. (in Russ.).
- [38] Surface water resources of the USSR. Catalogue of glaciers of the USSR. Vol. 13. Central and Southern Kazakhstan. Issue 2, part 1. Authors: Vilesov Ye.N., Khonin R.V. Basins of the left tributaries of the Ili River from the mouth of the Kurty River to the mouth of the Turgen River. L.: Gidrometeoizdat, 1967. 78 p. (in Russ.).
- [39] Surface water resources of the USSR. Catalog of glaciers of the USSR. Vol. 13. Center. and Southern Kazakhstan. Vol. 2, part 2. Compiled by Ye. N. Vilesov. Chilik River. L.: Gidrometeoizdat, 1968. 52 p. (in Russ.).
- [40] Glaciological Dictionary / Ed. by V. M. Kotlyakov. L.: Gidrometeoizdat, 1984. 528 p. (in Russ.).
- [41] Severskiy I., Vilesov Ye., 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. Vol. 57(71). P. 382-394. DOI: 10.3189/2016AoG71A575
- [42] Paul F., Barrand N., Baumann S., Berthier E., Bolch T., Casey K., ... Winsvold S. On the accuracy of glacier outlines derived from remote-sensing data // *Annals of Glaciology*. 2013. Vol. 54(63). P. 171-182. DOI:10.1016/j.rse.2017.08.038
- [43] Paul F., Bolch T., Briggs K., Käb A., McMillan M., McNabb R., Nagler T., Nuth C., Rastner P., Strozzi T., Wuite J. Error sources and guidelines for quality assessment of glacier area, elevation change, and velocity products derived from satellite data in the Glaciers cci project // *Remote Sensing of Environment*. 2017. Vol. 203. P. 256-275. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.08.038>
- [44] Severskiy I. V. On the problem of monitoring changes in glaciation of integral glacial systems // *Questions of geography and geocology*. 2012. No. 2. P. 12-18 (in Russ.).
- [45] Shchetinnikov A. S. Morphology and regime of glaciers of the Pamir-Alai. Tashkent, SANIGMI Publishing House, 1998. 219 p. (in Russ.).
- [46] Usubaliev R. A., Dudashvili A. S., Elemanov O. I. Glaciation of the northern slopes of the Turkestan and Alai ranges and its modern dynamics // *Ice and snow*. 2012. No. 1(117). P. 24-28 (in Russ.).
- [47] Bajracharya S. R., Maharjan S. B., Shrestha F., Guo W., Liu S., Immerzeel W., Shrestha B. (2015). The glaciers of the Hindu Kush Himalayas: current status and observed changes from the 1980s to 2010 // *International Journal of Water Resources Development*. 2015. Vol. 31(2). P. 161-173. DOI: 10.1080/07900627.2015.1005731
- [48] Bajracharya S. R., Maharjan S. B., Shrestha F., Bajracharya O. R., Baidya S. Glacier status in Nepal and decadal change from 1980 to 2010 based on landsat data / *Research report 2014 (2)*. Kathmandu, ICIMOD – 2014. Table 4.1. [Электрон. Ресурс]. – 2014. URL: lib.icimod.org (Дата обращения 01.05.2024)
- [49] Severskiy I. V., Mukanova B. A., Kapitsa V. P., Tatkova M. Ye., Kokarev A. L., Shesterova I. N. Changes in the glaciation of the northern slope of Ile Alatau over the seventy-year period // *Bulletin of KazNU. Geographical Series*. 2024. Vol. 73(2). P. 59-71. DOI: <https://doi.org/10.26577/JGEM.2024.v73.i2-05>

М. Е. Таткова*¹, И. В. Северский², З. С. Усманова³, В. П. Капица⁴

* Кіші ғылыми қызметкер, докторант (ЮНЕСКО аясындағы 2-санатты Орталық Азия өңірлік гляциологиялық орталығы, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан; tatkova_m@mail.ru)

² ҚР ҰҒА академигі, география ғылымдарының докторы, профессор; ғылыми жетекшісі (ЮНЕСКО аясындағы 2-санатты Орталық Азия өңірлік гляциологиялық орталығы, Алматы, Қазақстан; iseverskiy@gmail.com)

³ Ғылыми қызметкер (ЮНЕСКО аясындағы 2-санатты Орталық Азия өңірлік гляциологиялық орталығы, Алматы, Қазақстан; zamira_usmanova@mail.ru)

⁴ Ғылыми қызметкер (ЮНЕСКО аясындағы 2-санатты Орталық Азия өңірлік гляциологиялық орталығы, Алматы, Қазақстан; vasil.geo@mail.ru)

ТАУ МҰЗДЫҚ ЖҮЙЕЛЕРІН ОПЕРАТИВТІ МОНИТОРИНГТЕУ ӘДІСТЕМЕСІНІҢ МҮМКІНДІКТЕРІН ТЕСТІЛЕУ

Аннотация. Мақалада тестілік мұздықтардың санының шектеулі таңдамасы бойынша мониторинг деректері негізінде Солтүстік-Іле және Іле-Күнгей мұздық жүйелерінің мұзбасу аймағын бағалау мүмкіндіктері қарастырылған. Аталған мұздық жүйелерінің әрқайсысында тестілеу жүргізу барысында 10 мұздық бойынша екі таңдама, олардың жалпы таңдамасы (20 мұздық) және аталған әрбір мұзбасу аймағындағы олардың жиынтық ауданы үлесіндегі аумақтары туралы мәліметтер бойынша тиісінше мұздық жүйелеріндегі

мұздықтар ауданы есептелді. Тестілеу нәтижелеріне сәйкес, мұздықтардың аталған үш таңдамасы бойынша мұзбасу ауданының есептік және нақты (мұздықтарды каталогтау нәтижелері бойынша) мәндерінің корреляция коэффициентінің шамалары Солтүстік-Іле мұздық жүйесі үшін 0,99, 0,98 және 0,99 және Іле-Күнгей жүйесі үшін тиісінше 0,99, 0,97, 0,99 құрады. Тестілеу нәтижелері қателігі $\pm 5\%$ -дан аспайтын тиісті мұздық жүйесінде мұздықтардың санының шектеулі таңдамасының аудандары бойынша мәліметтер негізінде тау мұздық жүйелерінің мұзбасу алаңының динамикасын жедел мониторингтеу мүмкіндігіне күмән келтірмейді. Тестілеу нәтижелеріне сәйкес, 88% жағдайда қарастырылып отырған мұздық жүйелерінің мұзбасу ауданының есептік мәндері нақты мәндерге қатысты 5%-дан төмен болды және 33-тің 4-де ғана (12%) есептік деректердің нақты деректерден ауытқуының орташа мәні 2%-дан төмен және есептеудің едәуір жоғары қателіктері 7,76 және -9,6% көрсетті. Бұл тау мұздық жүйелерін оперативті мониторингтеу әдістемесінің жоғары тиімділігін көрсетеді. Бұл зерттелетін мұздық жүйесінің көпжылдық мұзының жойылуын және еріген мұздық суларының өзен ағынының қалыптасуына ықпалын оперативті (бірнеше жылда 1 реттен әр жыл сайын қайталану) бағалауға мүмкіндік береді, бұл өз кезегінде қазіргі және болжамды өзгерістерді сәйкесінше модельдеу үшін жақсы негіз болып табылады.

Түйін сөздер: Іле Алатауы, Күнгей Алатауы, мұздық жүйесі, мұздық ауданы, мұздық мониторингі.

M. Ye. Tatkova^{*1}, I. V. Severskiy², Z. S. Usmanova³, V. P. Kapitsa⁴

^{1*} Junior Researcher, Doctoral Student (Central Asian Regional Glaciological Center as a category 2 under the auspices of UNESCO, al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; tatkova_m@mail.ru)

² Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Doctor of Geographical Sciences, Professor; Scientific Director (Central Asian Regional Glaciological Center as a category 2 under the auspices of UNESCO, Almaty, Kazakhstan; iseverskiy@gmail.com)

³ Researcher (Central Asian Regional Glaciological Center as a category 2 under the auspices of UNESCO, Almaty, Kazakhstan; zamira_usmanova@mail.ru)

⁴ Senior Researcher (Central Asian Regional Glaciological Center as a category 2 under the auspices of UNESCO, Almaty, Kazakhstan; vasil.geo@mail.ru)

TESTING THE CAPABILITIES OF THE METHOD OF OPERATIONAL MONITORING OF MOUNTAIN GLACIER SYSTEMS

Abstract. The article considers the possibilities of assessing the glaciation area of the Northern Ile and Ile-Kungey glacier systems based on monitoring data from a limited sample of test glaciers. During testing in each of the mentioned glacier systems, based on the data on the area of two samples of 10 glaciers, their total sample (20 glaciers) and their share in the total area of glaciers in each of the named glaciation regions, the area of glaciers of the corresponding glacier system was calculated. According to the testing results, the values of the correlation coefficient of the calculated and actual (based on the results of glacier cataloguing) values of the glaciation area for the three mentioned glacier samples were 0.99, 0.98, and 0.99 for the Northern Ile glacier system and 0.99, 0.97, and 0.99 for the Ile-Kungey, respectively. The testing results leave no doubt about the possibility of operational monitoring of the glaciation area dynamics of mountain glacier systems based on the data on the area of a limited sample of glaciers of the corresponding glacier system with an error of no more than $\pm 5\%$. According to the testing results, the calculated values of the glacier area of the considered glacier systems in 88 % of cases were less than 5% of the actual values, and only in 4 cases out of 33 (12 %) they exceeded this threshold, with an average deviation of the calculated data from the actual values of less than 2 % and the largest calculation errors of 7.8 and -9.6 %. This indicates the high efficiency of the method of operational monitoring of mountain glacier systems. It allows to rapidly (with a repeatability from once every few years to annually) assess the loss of perennial ice in the considered glacier system and the contribution of glacial meltwater to the formation of river flow. Which, in its turn, is a good basis for the corresponding modeling of current and predicted changes.

Keywords: Ile Alatau, Kungei Alatau, glacier system, glacier area, glacier monitoring.