

УДК 551.32

ДИНАМИКА ПУЛЬСИРУЮЩИХ ЛЕДНИКОВ БАССЕЙНА РЕКИ СУГРАН НА ПАМИРЕ

Академик РАН В. М. Котляков, Л. П. Чернова, А. Я. Муравьев, Т. Е. Хромова*

Поступило 22.08.2019 г.

Сопоставлены результаты измерений площади пульсирующих ледников в 1974 и 2018 гг. с данными об их площади в 1913 г. Обнаружена большая внутривековая изменчивость площади оледенения бассейна, сопоставимая с её межвековыми изменениями. Показано, что в южную меридиональную циркуляционную эпоху, несмотря на высокие летние температуры, на фоне повышенного количества осадков площадь пульсирующих ледников в бассейне р. Сугран возрастала, что подтверждает предположение об их паводочной природе.

Ключевые слова: оледенение Памира, пульсирующие ледники, колебание климата.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524893307-312>

ВВЕДЕНИЕ

Одним из крупнейших проектов, выполненных советскими гляциологами в 1960–1980-х гг., стало создание Каталога ледников СССР [1]. Он состоит из 69 книг [2] и охватывает 23 ледниковые системы [3] общей площадью (на то время) 78 240,65 км² (табл. 1). Площадь ледниковых систем характеризуется в нём по состоянию на 1940–1970-е гг. В 1990-е гг. Каталог ледников СССР стал частью Мирового каталога ледников [4].

В результате дальнейших исследований [5] было обнаружено, что площадь ледников постоянно изменяется со скоростью в десятые доли процентов, а иногда и в целые проценты за год; при этом она может и уменьшаться, и увеличиваться в результате ежегодных изменений твёрдых атмосферных осадков и летних температур воздуха. XX в. отмечен почти непрерывным потеплением, особенно сильным в середине столетия. Атмосферные осадки, как известно, связаны с изменениями общей циркуляции атмосферы, и они в течение всего столетия не показывали такой явной тенденции.

Закономерности атмосферных процессов зависят от того, на каком временном или пространственном масштабе они рассматриваются. Так, Б.Л. Дзердзеевский [6] выделил для периода 1899–1968 гг. три макроциркуляционные эпохи: меридиональную северную в 1899–1915 гг., зональную циркуляционную в 1916–1956 гг. и меридиональную южную в 1957–1968 гг. Обе меридиональные эпохи отличались повышенным количеством осадков. Как показали

дальнейшие исследования [7], южная меридиональная эпоха продолжается по настоящее время.

Одна из задач настоящей работы — показать, как с этими эпохами соотносится динамика современного оледенения, а также выявить соотношение внутри- и межвековых изменений площади ледников в одном из ледниковых бассейнов Памира. Наблюдения в разных частях планеты показывают, что за последние 170 лет на фоне всеобщего сокращения площади оледенения нередко происходило увеличение размеров некоторых ледников, сопоставимое с размерами их сокращения. Подобное случилось прежде всего с пульсирующими ледниками.

В Каталоге ледников СССР не уделялось специальное внимание пульсирующим ледникам, способным внезапно — за несколько дней или месяцев — увеличить свою площадь на десятки процентов [8]. В какой-то мере этот пробел восполняет Каталог пульсирующих (нестабильных) ледников Памира, составленный в 1998 г. [9], где из общего количества 6730 ледников [10] 630 ледников оказались нестабильными. На эти ледники приходится более 60% от 7493 км² всей площади оледенения Памира. С этой точки зрения особый интерес представляют особенности морфологии и динамики пульсирующих ледников.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования был выбран бассейн р. Сугран, текущей на север и впадающей в р. Муксу [11]; бассейн расположен на северном склоне хр. Петра Первого (рис. 1). Ледники этого бассейна охарактеризованы в части 8 третьего выпуска в т. 14 Каталога ледников СССР [1]. Река Сугран начинается на од-

Институт географии

Российской Академии наук, Москва

*E-mail: tkhromova@gmail.com

Таблица 1. Площадь (км²) ледниковых систем СССР по состоянию на 1940–1970-е гг. [1–3]

Ледниковая система	По А.Н. Кренке [3]	По О.Н. Виноградову [2]	По Каталогу [1]	
			площадь, км ²	том, выпуск, часть
ЗФИ и о. Виктория	13740	13 745,5	13 749,7	3, 0, 1
Остров Ушакова	325,4	325,4	325,4	16, 1, 7
Северная Земля	18810	18 325,5	18 326,1	16, 1, 1
Острова Де-Лонга	86	80,6	80,6	17, 7, 1
Новая Земля	23640	23 645,4	23 645,4	3, 0, 2
Хибины	—	0,1	0,1	1, 0, 1
Урал	28,7	28,7	28,66	3, 0, 3
Кавказ	1425,3	1428,2	1427,12	8, 0, 1–12; 9, 1, 2, 3, 4;
Джунгарский Алатау	1000	1000	999,8	13, 2, 4–7
Памиро-Алай*	9668	9808,6	9828,04	14, 1, 8–10; 14, 3, 1–20*
Тянь-Шань*	7273	7325,8	7305,36	13, 2, 1–3; 14, 1, 1–7, 11; 14, 2, 1–11*
Алтай	923,1	923,1	923,1	15, 1, 1–8; 16, 1, 4
Кузнецкий Алатау	5,4	6,8	6,79	15, 2, 2
Восточный Саян	30,3	30,3	30,3	16, 1, 3; 1, 5; 16, 2, 1
Хребет Кодар	18,8	18,8	18,8	17, 2, 1
Горы Путорана	2	2,5	2,54	16, 1, 6
Горы Бырранга	30,5	30,5	30,5	16, 1, 2
Хребет Орулган	20,2	18,4	18,38	17, 5, 2
Остров Врангеля	3,4	3,5	3,46	19, 0, 1
Горы Черского	156,7	156,2	155,4	17, 7, 2; 7, 4; 19, 0, 4
Сунтар-Хаята	201	201,6	201,6	17, 3, 1; 7, 3; 19, 0, 3
Корякское нагорье	223,6	259,7	259,5	20, 0, 1
Камчатка	874,0	874,1	874,0	20, 0, 2; 3; 4
Всего в СССР	78 485,4	78 239,3	78 240,65	

ноимённом леднике и принимает три притока слева и четыре притока справа; все они также стекают с ледников. “Левые” ледники (с юга на север) — № 795 (Гандо), № 789 и 803, “правые” — ледники № 785, 772 (Шини-Бини), № 775 (Гульчат) и № 772 (Бырс). Площади ледников в бассейне р. Сугран определены по аэрофотоснимкам 1974 г. [9]: всего в бассейне 34 ледника, их общая площадь в 1974 г. составляла 94 км² [1]. 80% этой площади занимали три пульсирующих ледника: Бырс (рис. 2) [12], Шини-Бини и Сугран.

МЕТОДЫ

Данные о площади ледников в 1974 г. получены из Каталога ледников СССР. Оценка площади ледников в 1913 г. сделана по результатам экспедиции Клебельсберга [13] и по следам пульсаций, идентифицированным на космическом снимке 2018 г. Основным источником информации о перемещении фронта ледников в настоящее время служат космические снимки.

В работе использованы следующие материалы: 1) спутниковые снимки Sentinel-2 с уровнем обработки L1C от 27.08.2018 г. и 30.08.2018 г. с простран-

ственным разрешением 10 м; 2) спутниковые снимки ASTER уровня обработки L1T от 21.08.2002 г., 08.08.2003 г., 10.08.2004 г., 25.09.2009 г., 13.07.2011 г. и 06.08.2014 г. с пространственным разрешением 15 м; 3) спутниковые снимки Landsat-5 уровня обработки L1TP от 22.08.1988 г., 14.07.1991 г., 20.08.1993 г., 07.06.1995 г., 03.09.1998 г. и 23.08.2000 г. с пространственным разрешением 30 м; 4) спутниковые снимки Landsat-1 уровня обработки L1TP от 10.09.1972 г. и 29.09.1977 г. с пространственным разрешением 60 м; 5) цифровая модель рельефа (ЦМР) ASTER GDEM2.

Границы ледников дешифрировали на спутниковых снимках вручную в программном пакете ArcGIS. Все материалы дистанционного зондирования Земли, использованные в работе, находились в проекции UTM (зона 42N) на эллипсоиде WGS1984. В результате были получены границы ледников бассейна р. Сугран по состоянию на конец периода абляции 2018 г., а также границы языков ледников Сугран, Бырс и Шини-Бини на ряд промежуточных дат в период 1972–2018 гг., что позволило провести анализ их динамики. Погрешности определения площадей ледников оценивали путём

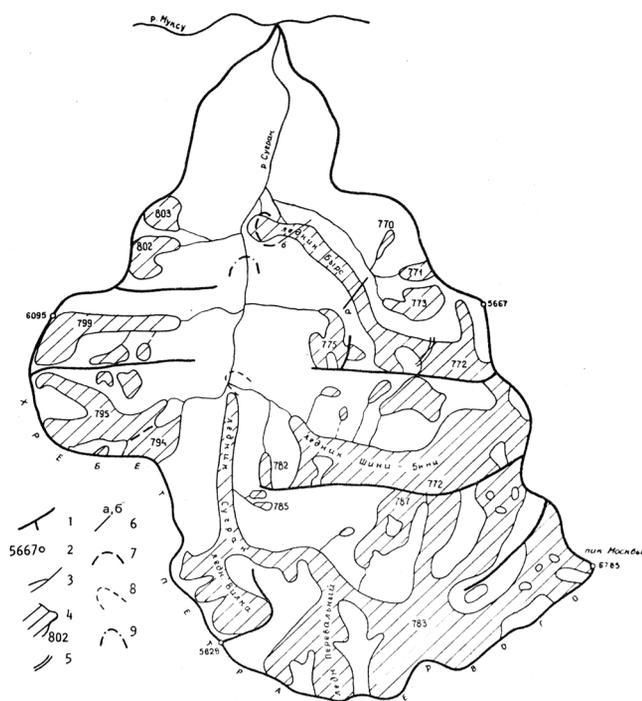


Рис. 1. Схема оледенения бассейна р. Сугран в 1974 г. по [11]. 1 — главные водораздельные гребни; 2 — вершины и их высоты; 3 — реки; 4 — ледники и их номера по Каталогу ледников СССР; 5 — верхняя граница участка активизации на леднике Бырс 18 декабря 1981 г.; 6 — нижняя граница участка активизации на леднике Бырс: а) 18 декабря 1981 г., б) 15 марта 1982 г.; 7 — нижняя граница продвинувшегося языка ледника Бырс 1 февраля 1983 г.; 8 — нижняя граница языка ледника Шини-Бини после подвижки в 1959 г.; 9 — нижняя граница языка ледника Сугран до 1959 г.

построения вдоль границ ледников буферной зоны, шириной в размере удвоенного значения пространственного разрешения спутниковых снимков. Для языков ледников Сугран, Бырс и Шини-Бини между самым высоким и самым низким из зафиксированных положений их фронтов в период 1972–2018 гг. были построены осевые линии, вдоль которых проводили измерения колебаний фронтов.

ASTER GDEM2 использовалась для определения высотного положения ледников и уклона их поверхности. Данная ЦМР имеет пространственное разрешение около 15 м на пиксель и точность по высоте в пределах 17 м с уровнем доверия 95% [14]. Высоты высших и низших точек ледников были получены путём автоматизированного анализа ячеек ЦМР в пределах границ ледников в программном пакете QGIS. Уклон поверхности ледника определяли методом автоматизированного анализа раstra уклона поверхности, созданного из исходной ЦМР, как медианное значение уклона всех ячеек ЦМР в пределах границ ледника.

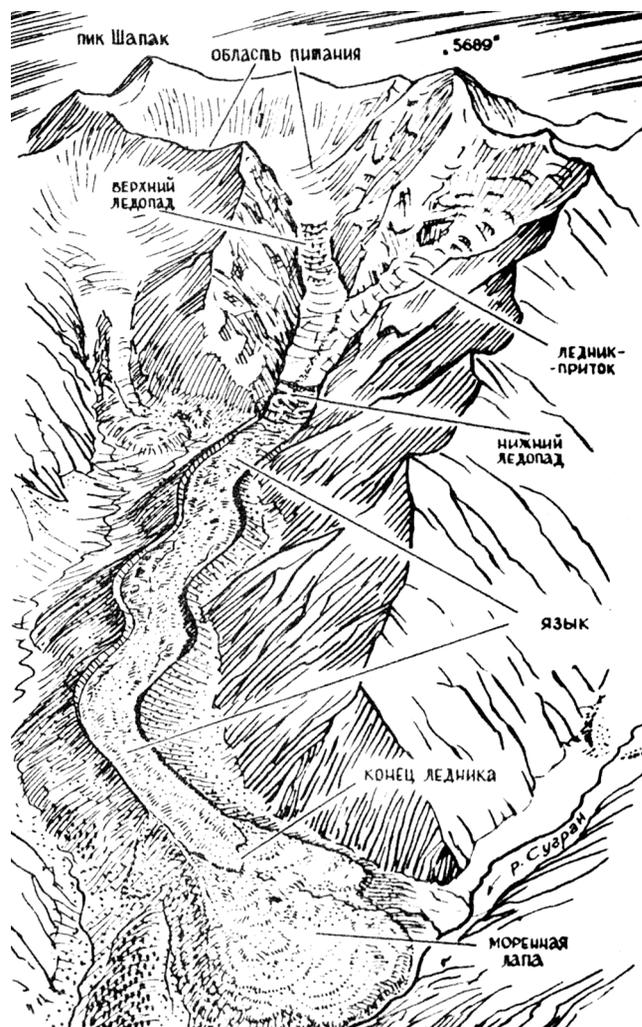


Рис. 2. Схема строения ледника Бырс по [12].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Экспедиция Клебельсберга 1913 г. [13] обнаружила ледники Сугран, Шини-Бини и Гандо слившимися воедино. Конец ледника Сугран лишь на 1,5 км не достигал конца ледника Бырс, тогда как в 1974 г. язык ледника Сугран был на 6 км короче (рис. 3). Это позволяет предполагать, что ледниковая система в 1913 г. превосходила по площади не только всю систему в 1974 г., но, как будет показано ниже, и систему 2018 г.

В том же 1913 г., приходящемуся на самый конец меридиональной северной циркуляционной эпохи, по Дзержевскому, произошли единственная за XX в. пульсация ледника Федченко (ледник увеличил свою площадь на 2 км², подпрудив русло р. Баландкиик) и единственная в XX в. пульсация ледника Мушкетова. Оба ледника также принадлежат к бассейну р. Муксу.

После 1913 г., за незначительными исключениями, имеются данные только об отступлениях памир-

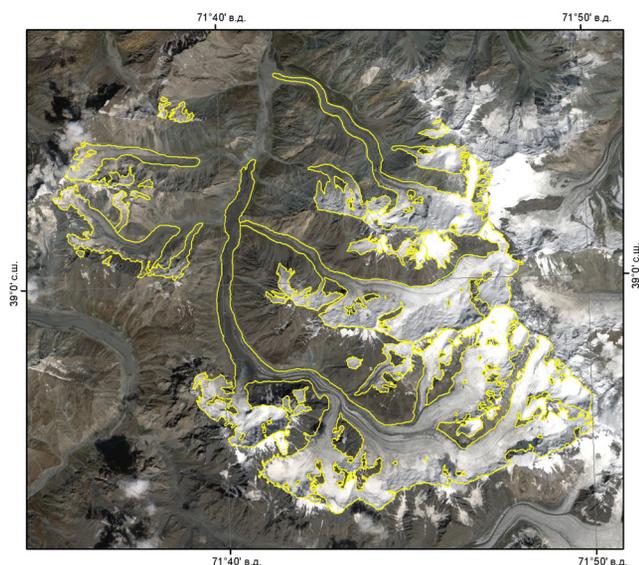


Рис. 3. Схема оледенения бассейна р. Сугран в 2018 г.

ских ледников вплоть до 1959 г. — в течение всей зональной циркуляционной эпохи, по Дзердзеевскому. Поведение ледников в третью, южную меридиональную циркуляционную эпоху освещено наблюдениями гораздо лучше.

В XX в. наблюдатели отметили две пульсации ледника Бырс (в 1964–1969 и 1983 гг.) [11, 12] и три пульсации ледника Шини-Бини (1959–1961, 1982–1983 и 1990 гг.), между которыми этот ледник отступал на 3 км (Г.Б. Осипова, личное сообщение). Но, несмотря на очевидность факта значительных изменений площади пульсирующих ледников за очень короткие отрезки времени, данные о размерах всех 630 ледниках на Памире, привязанных к единому году, отсутствуют.

Данные о площадях ледников бассейна в 1974 и 2018 гг. приведены в табл. 2. Сведения о площади ледников в 2018 г. получены А.Я. Муравьевым путём измерений на снимках Sentinel-2.

Сравнивая морфологию трёх самых больших пульсирующих ледников — Бырса, Суграна и Шини-Бини — с морфологией остальных ледников бассейна, отметим не только самую большую вертикальную протяжённость, но и самый маленький уклон первых трёх: для ледника Суграна это 0,15, для ледников Бырса и Шини-Бини — 0,25 при вертикальной протяжённости в 3000 м. Все остальные ледники бассейна имеют уклон 0,4–0,8, а вертикальную протяжённость менее 1000 м. Они заканчиваются на высоте более 4000 м, тогда как низшие точки ледников Сугран, Бырс и Шини-Бини лежат почти на 1000 м ниже. Такое сочетание позволяет предполагать, что эти три пульсирующих ледника — “па-водочные”.

Это означает, что усиление активности этих ледников в эпохи увеличения осадков неизбежно. Малый уклон ложа, а для ледника Бырс и наличие нескольких горизонтальных ступеней на продольном профиле ложа, создающих условия для торможения движения льда, способствуют возникновению режима пульсаций в годы увеличения массы ледника — либо из-за добавочной аккумуляции, либо из-за недостаточной абляции в предыдущее холодное лето. Замедление движения льда над горизонтальными тормозящими участками ложа и ускорение над более крутыми были многократно измерены на леднике Медвежем [8]. Пульсации этих ледников на протяжении южной меридиональной циркуляционной эпохи каждый раз увеличивали площадь ледниковой системы бассейна. Ледник Бырс “вырос” на 0,3 км² во время подвижки 2004–2009 гг., ледник Шини-Бини прибавил более 1 км² во время своей подвижки в 1959–1960 гг., когда его язык, ранее отстоявший на 2 км от долины р. Сугран, достиг её и выдвинулся в долину на 150–200 м, почти полностью перегородив её. К 1981 г. ледниковый язык отступил далеко вверх по своей долине и находился в 2,8 км от её устья [11], а к 2009 г. вновь составлял одно целое с ледником Сугран.

Сложная, происходившая в несколько этапов пульсация ледника Сугран детально прослежена по космическим снимкам и описана в [10]. Она началась в конце 1990-х гг. и происходила в три этапа, разделённых остановками или замедлением продвижения динамического языка: первый этап завершился в 2001–2002 гг., когда продвижение активного конца было остановлено мёртвым льдом предыдущей его подвижки. Завершение второго этапа связано с поддержкой динамического конца мёртвым льдом и моренами — остатками продвигавшегося в начале 1990-х языка ледника Шини-Бини. На третьем этапе (ноябрь 2004 г. — весна 2005 г.) язык ледника продвигался практически по свободной ото льда долине и увеличил свою площадь более чем на 1 км². И всё же его площадь в 2018 г. по крайней мере на 1,5 км² меньше его площади в 1913 г. Учитывая, что площадь ледника Гандо и расположенного рядом ледника № 794 в 1913 г. также увеличивалась на 0,5 км², поскольку они соединялись с основным стволом ледника Сугран, можно предположить, что площадь ледников бассейна превышала их площадь в 2018 г. по крайней мере на 2 км². По данным табл. 2 площадь ледниковой системы в 1974 г. была на 9 км² меньше, чем в 2018 г.

В итоге можно сказать, что площадь ледников бассейна р. Сугран в 1913 г. составляла 105 км²,

Таблица 2. Изменение оледенения бассейна р. Сугран за 1974–2018 гг.

Номер ледника по Мировому каталогу ледников	Название	Площадь в 1974 г., км ²	Площадь в 2018 г., км ²	Изменение площади с 1974 по 2018 г., км ² /%	Длина в 1974 г., км	Высота в 2018 г., м		
						низшей точки	высшей точки	
SU5X14308770	Бырс	0,3	0,03±0,01	−0,27/−90,0	1,0	5050	5310	
SU5X14308771		0,6	0,29±0,04	−0,31/−51,7	1,4	4550	5310	
SU5X14308772		9,9	9,42±0,54	−0,48/−4,8	11,8	3000	5700	
SU5X14308773		0,7	1,87±0,13	1,17/167,1	2,3	3890	5400	
SU5X14308774		0,3	0,4±0,03	0,10/33,3	0,7	4320	5000	
SU5X14308775	Гульчат	1,7	2,58±0,16	0,88/51,8	2,4	3680	5120	
SU5X14308776	Шини-Бини	16,4	17,37±0,66	0,97/5,9	10,3	3290	6160	
SU5X14308777		0,3	0,55±0,06	0,25/83,3	1,0	4440	5340	
SU5X14308778, SU5X14308779*		0,4	0,66±0,1	0,26/65,0	—	4710	5620	
SU5X14308780	Сугран	0,2	0,29±0,04	0,09/45,0	0,9	4900	5540	
SU5X14308781		1,2	1,08±0,07	−0,12/−10,0	1,6	4840	5670	
SU5X14308782		0,2	0,5±0,05	0,30/150	0,8	4090	5120	
SU5X14308783		47,1	53,26±2,19	6,16/13,1	22,0	3020	6720	
SU5X14308784		0,1	0,07±0,02	−0,03/−30,0	0,5	4490	5030	
SU5X14308785		0,1	0,17±0,03	0,07/70,0	0,4	4370	5130	
SU5X14308786		0,1	0,19±0,02	0,09/90,0	0,4	4550	4860	
SU5X14308787		1,0	1,82±0,16	0,82/82,0	2,4	4270	5410	
SU5X14308788		0,3	0,47±0,04	0,17/56,7	1,0	4710	5150	
SU5X14308789		0,4	0,29±0,03	−0,11/−27,5	1,2	4880	5600	
SU5X14308790		0,1	0,03±0,01	−0,07/−70,0	0,4	5410	5590	
SU5X14308791		0,1	0,17±0,02	0,07/70,0	0,8	4610	5270	
SU5X14308792		0,2	0,2±0,02	0/0	0,7	4100	4600	
SU5X14308793		0,1	0,13±0,02	0,03/30,0	0,8	4490	5120	
SU5X14308794		1,8	1,12±0,09	−0,68/−37,8	2,7	3450	4700	
SU5X14308795		Гандо	5,1	4,91±0,24	−0,19/−3,7	6,0	3600	4840
SU5X14308796		0,1	0,06±0,01	−0,04/−40,0	0,5	4220	4560	
SU5X14308797		0,3	0,5±0,05	0,2/66,7	1,4	4100	4680	
SU5X14308798		0,4	0,12±0,02	−0,28/−70,0	1,0	4260	4660	
SU5X14308799		2,3	2,86±0,18	0,56/24,3	4,1	3610	5100	
SU5X14308800	0,3	0,5±0,06	0,2/66,7	0,8	4120	4890		
SU5X14308801	0,5	0,1±0,02	−0,4/−80,0	1,1	4240	4620		
SU5X14308802	0,8	0,46±0,07	−0,34/−42,5	1,2				
SU5X14308803	0,6	0,1±0,03	−0,50/−83,3	1,2				
Итого		94,0	102,57±5,21	8,57/9,1				
—			0,14±0,02					
—			0,06±0,01					
Всего			102,77±5,24					

* По состоянию на 2018 г. ледники № 778 и 779 образуют единый ледник.

в 1974 г. 94 км² и в 2018 г. 103 км². Суммарный вклад остальных ледников бассейна в увеличение его площади с 1974 по 2018 г. составил 1 км². Ледниковая система бассейна р. Сугран на фоне общего потепления климата сократилась с 1913 по 2018 г., по-видимому, не менее чем на 1 км². Внутривековое уменьшение было значительнее — не менее 9 км². Размеры этой системы в 1974 г. составляли 94 км², а в 2018 г. (определённые на основе стандартной

методики GLIMS по спутниковым снимкам Sentinel-2) — 102,77 ± 5,24 км². Пульсации ледника Бырс увеличили площадь ледниковой системы с 1988 по 2018 г. на 0,23 км², а пульсации Шини-Бини с 1977 по 2018 г. — на 0,90 км². Самый большой и одновременно пульсирующий ледник Сугран начиная с 1913 г. непрерывно отступал вплоть до 1974 г., а с 1974 по 2018 г. его площадь увеличилась на 6 км².

Таким образом, внутривековые изменения площади ледниковой системы вполне соизмеримы с межвековыми.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование показало, что в южную меридиональную циркуляционную эпоху, несмотря на высокие летние температуры, на фоне повышенного количества осадков площадь пульсирующих ледников в бассейне р. Сугран возросла, что подтверждает предположение об их паводочной природе. Морфологические особенности пульсирующих ледников требуют более тщательного изучения, поскольку подобные ледники относятся к разряду нестабильных, а это, в свою очередь, затрудняет анализ их изменений за вековые периоды и исключает прямые предположения об их динамике в связи с изменениями глобальной температуры.

Благодарности. В работе использованы результаты, полученные в рамках темы № 0148–2019–0004 плана научно-исследовательских работ Института географии РАН и проекта, поддержанного Русским географическим обществом (№ 05/2018/РГО–РФФИ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каталог ледников СССР, 1965–1982.
2. *Виноградов О.Н.* Завершение работ по созданию Каталога ледников СССР // *Материалы гляциол. исследований.* 1984. Вып. 51. С. 10–16.
3. *Кренке А.Н.* Массообмен в ледниковых системах на территории СССР. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 288 с.
4. <http://www.webgeo.ru/index.php?r=47>
5. *Котляков В.М., Чернова Л.П., Муравьев А.Я., Хромова Т.Е., Зверкова Н.М.* Изменения горных ледников в Северном и Южном полушариях за последние 160 лет // *Лед и снег.* 2017. Т. 57. № 4. С. 453–467.
6. *Дзердзеевский Б.Л.* Циркуляционные механизмы в атмосфере северного полушария в XX столетии. *Материалы метеорологических исследований.* М.: ВИНТИ, 1968. 240 с.
7. *Кононова Н.К., Черенкова Е.А.* Повторяемость элементарных циркуляционных механизмов в атмосфере северного полушария // *Изв. РАН. Сер. геогр.* 2018. № 6. С. 17–25.
8. *Котляков В.М., Чернова Л.П., Хромова Т.Е., Муравьев А.Я., Качалин А.Б., Тюфлин А.С.* Уникальные циклические пульсации ледника Медвежий // *ДАН.* 2018. Т. 483. № 5. С. 547–552.
9. *Осипова Г.Б., Цветков Д.Г., Щетинников А.С., Рудак М.С.* Каталог пульсирующих ледников Памира // *Материалы гляциол. исследований.* 1998. Вып. 85. С. 3–136.
10. *Котляков В.М., Осипова Г.Б., Цветков Д.Г.* Космический мониторинг пульсирующих ледников Памира // *Изв. РАН. Сер. геогр.* 2008. № 4. С. 74–83.
11. *Усков Ю.С., Дильмурадов Н.* О подвижках ледников бассейна р. Сугран на Памире // *Материалы гляциол. исследований.* 1983. Вып. 47. С. 142–146.
12. *Роттаев К.П.* Динамика ледника Бырс за последние 20 лет // *Материалы гляциол. исследований.* 1983. Вып. 47. С. 147–156.
13. *Корженевский Н.Л.* Муксу и ее ледники // *Тр. Гидромет. отдела Средазмета.* Т. 1. Вып. 1. Ташкент, 1927. С. 7–66.
14. *Tachikawa T., Kaku M., Iwasaki A., Gesch D., Oimoen M., Zhang Z., Danielson J., Krieger T., Curtis B., Haase J., Abrams M., Robert Crippen R., Carabajal C.* ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 — Summary of Validation Results. 2011. 27 p.

DYNAMICS OF SURGING GLACIERS IN THE SUGRAN RIVER BASIN (PAMIRS)

Academician of the RAS V. M. Kotlyakov, L. P. Chernova, A. Y. Muraviev, T. Y. Khromova

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Received August 22, 2019

The results of measurements of the area of surging glaciers in 1974 and 2018 are compared to the data on their areas in 1913. A large decadal (middle-term) variability in the area of basin glaciation is revealed, and it is comparable to the respective secular (long-term) changes. It is shown that in, the southern meridional circulation epoch, despite high summer temperatures, the surging glaciers in the Sugran River basin grew in area due to increased precipitation, supporting the idea about their flood-runoff nature.

Keywords: glaciation of the Pamirs, Sugran Glacier, surges, climatic fluctuations.