

## Современное состояние и динамика нивально-гляциальных систем массивов Монгун-Тайга и Таван-Богдо-Ола

© 2015 г. К.В. Чистяков, Д.А. Ганюшкин, Ю.Н. Курочкин

Санкт-Петербургский государственный университет

*kirill.chistyakov@gmail.com*

## Present state and dynamics of glacio-nival systems of Mongun-Taiga and Tavan-Bogdo-Ola mountain massifs

K.V. Chistyakov, D.A. Ganyushkin, Y.N. Kurochkin

Saint-Petersburg State University

*Статья принята к печати 19 ноября 2014 г.*

*Баланс массы, каменно-ледовые образования, колебания климата, ледники, снежники, термокарст.  
Climatic fluctuations, glaciers, mass balance, snow patches, stone-ice bodies, thermokarst.*

Исследуются современная динамика параметров климата юго-восточного Алтая и реакция на них элементов нивально-гляциальных систем: снежников, ледников и каменно-ледовых образований. Установлено замедление отступления концов ледников в 1967–1981 и 2008–2013 гг., согласующееся с периодами относительного похолодания и увеличения осадков. Выполнены предварительные балансовые расчёты для 2012/13 гляциологического года и вычислены значения индекса баланса массы для периода 1966–2013 гг. для ледника Селиверстова. Приведены результаты измерений скоростей термокарстовых процессов на моренах малой ледниковой эпохи, ядро которых сложено погребённым ледниковым льдом.

Present-day dynamics of climate characteristics in South-East Altai and response of glacio-nival systems (snow patches, glaciers, stone-ice formations) to the climate changes are studied. Retreats of glacier snouts were found to slow down in 1967–1981 and 2008–2013, and that correlated well with periods of relative cooling and precipitation increasing. Preliminary balance calculations were made for the glaciological year 2012/13, and values of the mass balance index were calculated for the Seliverstov Glacier for 1966–2013. The results of the thermokarst rate measurements on the Little Ice Age moraines whose ice cores consist of buried glacier ice are presented.

Территория исследования – высокогорные массивы Монгун-Тайга (3970 м, 90°05' в.д. и 50°15' с.ш.) и Таван-Богдо-Ола (северный склон высотой до 4117,6 м, 49°08'45" с.ш., 87°49'09" в.д.) – расположена на стыке горных сооружений юго-востока Русского Алтая и горных систем Саян и Монгольского Алтая. В условиях низких температур и малого количества осадков в высокогорье установлены современное оледенение, многолетние снежники, наледи, каменные глетчеры, погребённые ледниковые льды. Нивально-гляциальные системы юго-восточного Алтая – объекты детального исследования географов Санкт-Петербургского государственного университета с конца 1980-х годов. Одна из важнейших задач – определение скоростей их изменений, трендов и цикличности их динамики, а также выявление связей происходящих процессов с изменениями климата.

### Методы и материалы

В основу работы положены данные полевых наблюдений с конца 1980-х годов до 2013 г. Мониторинг динамики современного оледенения включал в себя маршрутные наблюдения,

GPS-привязки краёв ледников и заложение реперов у концов ледников. Вспомогательная роль отводилась дешифрированию имеющихся космических снимков высокого разрешения (от 30 до 2,5 м): Landsat-7 04.09.2001; Landsat-8 12.08.2013; Spot-5 19.09.2011 для массива Монгун-Тайга; Spot-2 01.06.2006, 23.07.2006 и 12.09.2007 для массива Таван-Богдо-Ола. Исследования проведены с использованием данных дистанционного зондирования Земли ресурсного центра СПбГУ «Космических и геоинформационных технологий». Космические снимки со спутников SPOT-2 и SPOT-5, предоставленные ИТЦ «СканЭкс», обработаны в ресурсном центре СПбГУ «Космических и геоинформационных технологий». Информация о ледниках и снежниках в середине XX в. получена по результатам дешифрирования аэрофотоснимков залётов 24.08.1962 и 10.07.1966 гг., фотоснимков и описаний ледников. Для характеристики климата территории использованы приведённые на сайте ВНИИГМИ-МЦД <http://meteo.ru/data> средние месячные значения по температуре и осадкам для метеостанций (ГМС) Кош-Агач и Мугур-Аксы, а также данные инструментальных метео- и гидрологических (включая

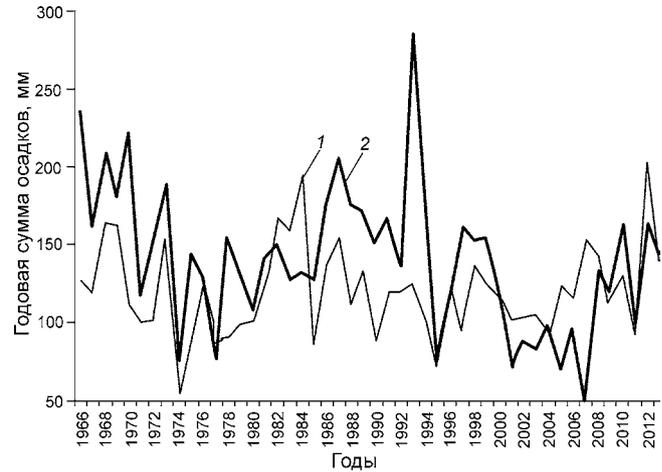
балансовые) наблюдений авторов в разные годы в перигляциальной зоне и на ледниках.

### Полученные результаты

**Динамика параметров климата.** Установить закономерности изменчивости осадков в горных условиях довольно трудно из-за мозаичности их пространственного распределения, наличия орographicеских барьеров и ячеек местной атмосферной циркуляции. Вместе с тем сопоставление данных по изменчивости годовых сумм осадков с 1966 по 2013 г. для двух наиболее длиннорядных ГМС региона – Кош-Агач и Мугур-Аксы показало подобие этих рядов (рис. 1), хотя расстояние между этими ГМС составляет примерно 135 км и расположены они по разные стороны хр. Чихачева. Изменчивость средних летних и средних годовых температур по данным обеих станций имеет ещё большую степень сходства (рис. 2).

Основываясь на сходстве многолетнего режима осадков и температуры на этих станциях, мы рассчитали средние по двум станциям летнюю и годовую температуру, а также годовую сумму осадков и построили обобщённые кривые их многолетнего хода (рис. 3) в относительных значениях, сглаженных методом скользящей средней по трёхлетним интервалам. Данные кривые можно считать показательными для колебаний температуры и осадков в регионе. Обращает на себя внимание синхронность колебаний температуры и количества осадков: относительно тёплым периодам соответствуют засушливые условия, а холодным – более влажные. За период наблюдений можно выделить два тёплых и засушливых периода – примерно 1973–1980, 1999–2007 гг. и три прохладных и влажных – до 1970 г., 1982–1994 гг. и начиная с 2009 г. Также отмечаются отчётливый тренд к потеплению и слабый тренд к уменьшению количества осадков. Последнее похолодание не очень чётко проявляется на кривой летних температур, но заметно после 1998 г. на обобщённой кривой годовых температур, причём температуры нескольких последних лет – наиболее низкие с конца 1980-х годов.

**Многолетние снежники.** Среди элементов низовально-гляциальных систем снежники наиболее динамичны. В последние годы мы исследовали динамику многолетних снежников массива Монгун-Тайга [2, 3]. С 1966 по 2008 г. число снежни-

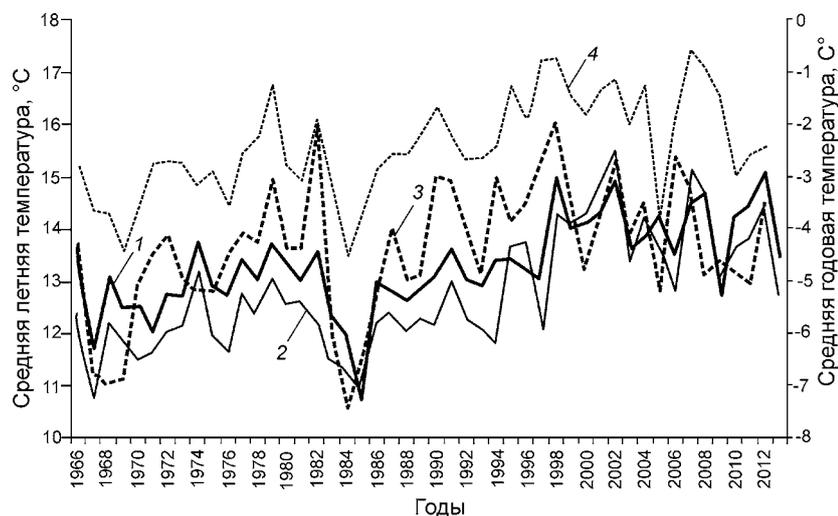


**Рис. 1.** Изменение годовой суммы осадков (мм) по данным ГМС Кош-Агач (1) и Мугур-Аксы (2)

**Fig. 1.** Variability of the annual precipitation, mm, for Kosh-Agach (1) and Mugur-Aksy (2) meteorological stations

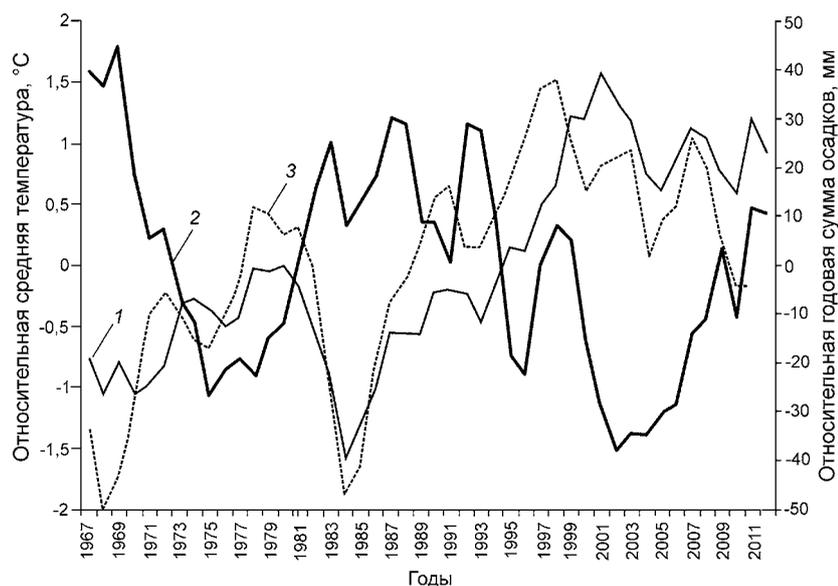
ков уменьшилось в 4 раза, их площадь – в 15 раз, а абсолютная высота нижней границы их распространения возросла на 250–300 м. В 2008–2011 гг. тенденция была обратной: нижняя граница пояса опустилась примерно на 250 м, сформировались новые снежники на поверхности ледников, забронированных в предшествующий тёплый и сухой интервал. По нашим расчётам, годовое количество осадков примерно 190 мм на уровне 3000 м – пороговое для существования большинства многолетних снежников массива, поэтому колебания этого значения в ту или иную сторону приводят к быстрому изменению их численности, высотного и экспозиционного распределения.

Подобная тенденция динамики снежников продолжилась в 2013 г, когда в результате аномально снежных условий выросли мощности и площади ранее существовавших снежников, появились новые снежники и увеличилось их морфологическое разнообразие. В руслах временных водотоков нами отмечены снежники длиной до 1 км с вертикальным диапазоном до 300 м, примыкавшие на разных участках к ледникам и многолетним наледям. Большое число снежников отмечено на берегах горных озёр. Часто они лежали на ледяном основании, которое погружалось в озеро на глубину нескольких метров. В большом количестве пустующих цирков появились снежные поля, полностью закрывшие их днища. Некоторые снежники частично или полностью перекрыли поверхность наледей.



**Рис. 2.** Многолетняя изменчивость соответственно средней летней и средней годовой температуры по данным ГМС Кош-Агач (1, 3) и Мугур-Аксы (2, 4)

**Fig. 2.** Long-term variability of the average summer and annual temperature for Kosh-Agach (1, 3) and Mugur-Aksy (2, 4) meteorological stations



**Рис. 3.** Обобщённая региональная кривая колебаний относительных значений (от средних для периода 1966-2013 гг.) средней летней температуры (1), годовой суммы осадков (2) и средней годовой температуры (3)

**Fig. 3.** General regional curves of the fluctuations of relative values (as an average for 1966-2013) of the mean summer temperature (1), annual precipitation (2) and mean annual temperature (3)

Интересный по морфологии снежник мы обнаружили на внешнем (северо-восточном по экспозиции) крае моренного комплекса малой ледниковой эпохи, обрамляющего ледник Селиверстова (№ 12 по Каталогу ледников СССР [6], № 14 по новейшему Каталогу ледников массива [15]). Размеры его примерно  $120 \times 60$  м, мощность визуально не превышает 2–2,5 м. Поверхность снежника полностью покрыта слоем пылевой супеси толщиной не более 2–3 см, очевидно перенесённой ветром с расположенного менее чем в 100 м приледникового зандра. Сама супесь была влажная и плотная, поэтому при зачистке поверхности снежника снять её было трудно. Поверхность снежника сложена плотным фирном. Визуальные наблюде-

ния за состоянием снежника на протяжении периода абляции позволили предположить, что он успешно перелетовывает во многом за счёт уменьшения абляции под воздействием защитного чехла. Подобные сильно запылённые снежники отмечены также на восточных крутых склонах платообразных поверхностей выравнивания к востоку от р. Шара-Хорагай.

**Динамика ледников.** В целом площадь современного оледенения рассматриваемых массивов на территории России составляет около  $43 \text{ км}^2$ , из них  $22,8 \text{ км}^2$  приходится на северный склон массива Таван-Богдо-Ола [8, 14]. При количественном преобладании малых висячих и склоновых ледников доля более крупных долинных и карово-долинных ледников в суммарной пло-

щади оледенения составляет от 40% (массив Та-ван-Богдо-Ола, северный склон) до 57% (массив Монгун-Тайга). Большинство ледников образуют комплексы, в которых куполовидные ледниковые вершины и плосковершинные ледники составляют ядро, от которого радиально расходятся прочие ледники. При малом количестве осадков в высокогорье (300–400 мм/год) ледники существуют или вследствие высокого гипсометрического положения и малой абляции, или за счёт высокой концентрации снега на подветренных склонах, накапливающегося в результате лавинного и метелевого переноса. Коэффициент концентрации для ледников массива Монгун-Тайга на подветренных склонах составляют от 2 до 6, а на наветренных – 0,3–0,8 [14, 15].

Начиная с максимума малой ледниковой эпохи, который для массива Монгун-Тайга, по нашим данным, относится к середине XIX в. [1], ледники отступают. Максимальные с этого времени средние темпы сокращения площадей ледников (1,6–1,7% в год) отмечались в начале XXI в. Важную роль в уменьшении площадей ледников в 2000-х годах сыграло сокращение оледенения на высотах 3200–3400 м, соответствующее уровню нижней части области питания. Вызвано это было выходом на поверхность скальных выступов и обнажением ригелей на фоне уменьшения толщины ледников; другой процесс, внёсший существенный вклад в уменьшение оледенения, – бронирование малых ледников [1, 8]. Однако уже в 2010/11 г. отступление ледников массива Монгун-Тайга замедлилось. При этом граница питания на большинстве ледников опустилась до уровня периода середины 1990-х годов. Рост заснеженности территории и снижение температуры были наиболее заметны в сезон абляции 2012/13 гляциологического года, когда большинство ледников полностью было закрыто снегом; лишь к середине августа открылись языки наиболее крупных ледников. Приведём высоту фирновой границы для разных ледников на 12 августа: ледник Селиверстова (№ 12 по Каталогу [6], № 14 по новейшему Каталогу ледников массива [15]) – 3250–3300 м; ледник Восточный Мугур (№ 11 по [6], № 18 по [15]) – 3350 м; ледник Правый Мугур (№ 12 по [15]) – 3350 м; ледник Левый Мугур (№ 7 по [6], № 5 по [15]) – 3210 м; ледник Западный Мугур (№ 6 по [6], № 4 по [15]) – 3110 м. Высоко расположенные плоско-

сковершинные, склоновые и висячие ледники были полностью закрыты снегом до конца периода абляции. Для сравнения: в середине 1990-х годов высота фирновой границы на этих ледниках составляла 3450, 3350, 3300, 3250 и 3175 м соответственно, т.е. высота средней взвешенной границы питания была на 55 м выше. А в 2007–2008 гг. высота фирновой границы поднималась до среднего уровня 3600 м, т.е. колебания её положения всего за 5–6 лет превышают 300 м.

В 2013 г. в массиве Монгун-Тайга языки большинства ледников из-за малой абляции не отступили, а многие испытали приращение к ним крупных снежников и наледей. Так, у края ледника Восточный Мугур наледь заняла всё пространство приледникового зандра, а приращение по длине составило около 100 м. Подобные явления ранее отмечались нами, в частности, в 1993 г.

**Современный баланс массы ледников.** При анализе современных условий аккумуляции/абляции изучаемого ледникового района необходимо помнить, что в некоторых случаях гляциогидроклиматические параметры аномального по отношению к многолетним нормам периода могут значительно перекрывать влияние предыдущих, менее выраженных колебаний этих параметров. Предварительный анализ данных, полученных в 2013 г. с 26 июня по 20 июля на леднике Селиверстова, показывает, что показатели этого периода (2012/13 г.) были экстремальными относительно роста приходной части баланса массы и изменения сальдо в положительную сторону, в том числе за счёт значительного уменьшения расходной части. Вероятно, гляциоклиматические показатели ледникового комплекса стали изменяться раньше: уже во второй половине августа 2012 г. на опорной ГМС Мугур-Аксы зафиксировано выпадение 50 мм осадков при среднесуточной температуре 10,4 °С, что, с учётом среднего высотного градиента температуры 0,67 °С/100 м, позволяет предполагать отсутствие значимой абляции на леднике, а с условием плювиометрического градиента [13] 7 мм/100 м, подтверждённого наблюдениями 2013 г., количество осадков на леднике за этот начальный период можно увеличить втрое.

Такое накопления твёрдых осадков послужило началом аномального сезона аккумуляции, который был поддержан осенними осадками в размере 24 мм, что на 25% выше 12-летней

нормы; зимними осадками в размере 6 мм, что в пределах 12-летней нормы; аномальными весенними осадками в размере 25 мм, превышающими норму более чем вдвое. В этих условиях к концу весны толщина снежного покрова в области абляции могла составить 55–60 см, а в области аккумуляции – 65–70 см, а с учётом коэффициентов концентрации для данного ледникового комплекса на некоторых его объектах снежная толща должна была достичь 1,5–2 м. Ранее (в июне) начало гляциологических работ в 2013 г. позволило подтвердить эти предположения.

Летний термический режим поддержал и закрепил тенденцию изменения баланса массы в положительную сторону: средняя летняя температура 12,6 °С на ГМС Мугур-Аксы не наблюдалась уже 20 лет и оказалась ниже 12-летней нормы на 1,5 °С, что равносильно опусканию границы питания на леднике Селиверстова почти на 200 м – до уровня 3300–3350 м и уменьшению площади возможного таяния до 1,0 км<sup>2</sup>, а области абляции – до 0,76 км<sup>2</sup>. Кроме того, значительно снизилось поступление лучистой энергии к леднику из-за роста альбедо до 54–58% (среднее за период наблюдений) за счёт более долгого сохранения снежного покрова в начале абляционно-го периода и снегопадов в его середине. Данный показатель оказался почти вдвое больше зарегистрированного при актинометрических наблюдениях на этом леднике в 1990 г. [14].

Результирующим показателем потерь ледниковой массы служит сток. Оптимальное расположение верхнего гидрологического створа на высоте 3060 м под самым ледником в одностороннем стабильном потоке позволило получить достоверные данные по талому ледниковому стоку. За период наблюдений в 26 дней его суммарное значение составило 503 000 м<sup>3</sup>, а среднее за сутки – 19 346 м<sup>3</sup> при максимуме – 32 153 м<sup>3</sup>. Абляционные потери за этот же период с учётом выпавших жидких осадков равны 555 000 м<sup>3</sup>, а следовательно 52 000 м<sup>3</sup>, или около 10% воды, испарилось или ушло на внутреннее питание ледника. Среднесуточная величина абляции в области таяния составила всего 2,1 см в водном эквиваленте (в.э.), а взвешенная по всему леднику – 0,75 см. Сравнение максимального суточного стока в 2013 г. со стоком в 1990 г., равным 110 000 м<sup>3</sup>, подтверждает чётко выраженное уменьшение абляции.

Таблица 1. Сопоставление метеорологических условий 1989/90 (числитель) и 2012/13 (знаменатель) гляциологических годов на гидрометеостанции Мугур-Аксы

Сезон	Средняя температура, °С	Средняя сумма осадков, мм
Осень	–2,2/–2,2	12,6/24,3
Зима	–17,2/–18,4	20,4/6,2
Весна	–0,2/0,9	9,1/25,4
Лето	12,3/12,6	114,0/85,
Год	–1,9/–1,8	156/141

Таким образом, сравнение изменений основных гляциогидрометеорологических характеристик на леднике Селиверстова в 1990 и 2013 г. позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, отмечена определённая идентичность (табл. 1) протекающих в нём и вокруг него процессов за последние 47 лет. Хотя есть и различия, обусловленные более значительным накоплением осадков за сезон аккумуляции 2012/13 г., весьма серьёзным количеством жидких осадков летом 1990 г. и значительно большей, чем сейчас, площадью ледникового языка. При этом термический режим периода абляции был практически одинаков. Во-вторых, даже при почти одинаковых годовых показателях метеорологического режима ледника, межсезонные смещения этих показателей могут играть решающую роль в итоговых значениях баланса массы ледников. Наконец, с учётом сильного сокращения за прошедший период площадей ледников в области абляции, возвращение к аналогичным 1990 г. метеорологическим условиям может приводить к более положительным значениям баланса массы ледника в целом.

Приведённые факты позволяют констатировать небольшой пока сдвиг баланса ледниковой массы в сторону уменьшения его дефицита. Для мониторинга текущего состояния ледников и предварительных оценок баланса массы без непосредственных наблюдений, но с привлечением оперативной метеорологической информации с опорной ГМС будет использоваться уже апробированная расчётная модель [14], основанная на известных подходах к решению таких задач (Г.Е. Глазырин [4], А.Н. Кренке [7] и др.)

#### **Многолетняя динамика фронтов ледников.**

Первые наблюдения за морфологией и положением ледников массивов Монгун-Тайга и Таван-Богдо-Ола (табл. 2) относятся к середине 1960-х

Таблица 2. Основные характеристики долинных ледников исследуемых массивов в 2013 г.

Ледник	Площадь, км <sup>2</sup>	Высота точки, м нижней/верхней	Средний уклон языка, градусы	Экспозиция
Селиверстова	2,78	3095/3803	7	В
Восточный Мугур	3,84	2935/3970	14	СВ
Правый Мугур	0,82	2895/3830	17	
Левый Мугур	0,93	3060/3660	11	
Толайты	0,63	3075/3480	9	Ю
Аргамджи-2 Западный	5,48	3055/4117	7	С
Аргамджи-3	3,57	2880/3760	8	

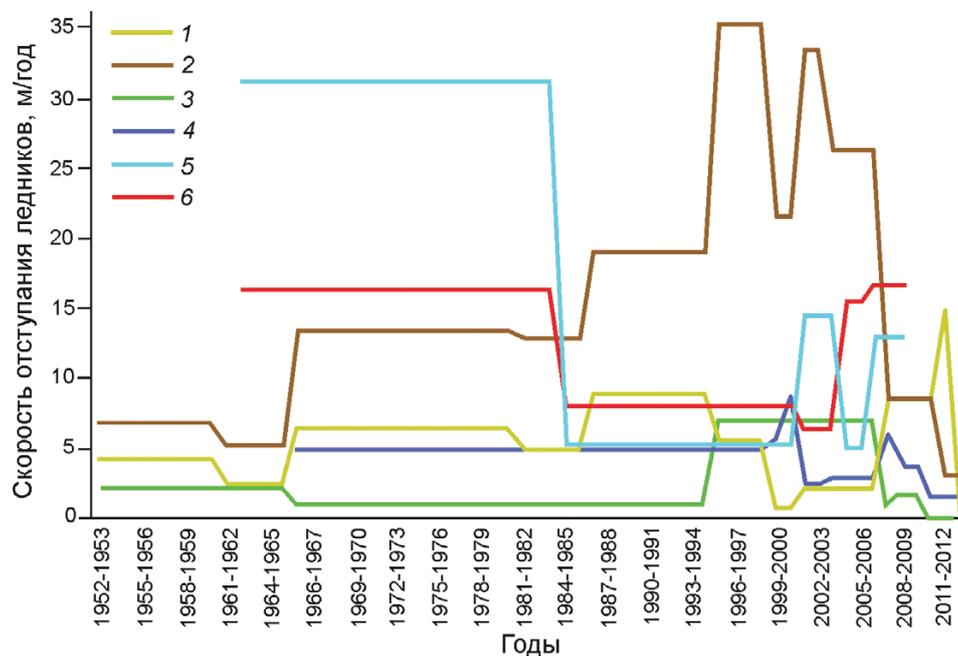
годов [9, 12]. С начала 1980-х годов [10, 11] проводятся инструментальные наблюдения за положением краёв долинных ледников обоих массивов (табл. 3). При рассмотрении всего массива данных по отступанию долинных ледников (рис. 4) мы видим разнообразие их отклика на климатические изменения. Закономерные связи отступания ледников с климатическими изменениями установить трудно отчасти из-за больших временных интервалов между измерениями положений их языков, особенно в 1960–80-е годы. При сохранении общего тренда к отступанию, изменения скоростей отступания фронтов часто разнонаправленны. По-видимому, причины этого – различия в высотном положении ледников, форме и экспозиции вмещающей ледник долины, уклонах ложа ледника, положениях подлёдных ригелей. Все они приводят к неодинаковой мощности льда в языковой части, разным скоростям движения, разной степени забронированности моренным материалом. Отметим лишь некоторое общее снижение скоростей отступания ледников в начале 1980-х годов, что согласуется с установленным в это время похолоданием и ростом количества осадков. Вторая общая особенность – замедление отступания ледников после 2007 г. (кроме ледников массива Таван-Богдо-Ола, где наблюдения пока ограничиваются 2009 г.) тоже определяется похолоданием и увлажнением в последние годы, а также синхронным выходом концов ледников массива Монгун-Тайга на более крутые участки.

Для понимания динамики ледников необходимо рассматривать положение их языков относительно структурных элементов продольного профиля долин. Для верховьев ледниковых

Таблица 3. Изменение скоростей отступания некоторых долинных ледников исследуемого района

Годы	Скорость отступания, м/год
<i>Ледник Толайты</i>	
1952–1966	2,1
1966–1995	1,1
1995–2007	6,9
2007–2008	1,0
2008–2010	1,5
2010–2013	0
<i>Ледник Аргамджи-2 Западный</i>	
1962–1984	15,8
1984–2001	7,9
2001–2004	6,3
2004–2007	15,5
2006–2009	16,6
<i>Ледник Селиверстова</i>	
1952–1961	6,7
1961–1966	5,2
1966–1981	13,4
1981–1986	12,8
1986–1995	19,0
1995–1999	35,3
1999–2001	21,5
2001–2003	33,5
2003–2007	26,3
2007–2011	8,3
2011–2013	3,0
<i>Ледник Аргамджи-3</i>	
1962–1984	10,8
1984–2001	5,2
2001–2004	14,3
2004–2007	5,0
2006–2009	13,3

трогов района исследования характерна большая степень сходства продольного профиля, что позволяет построить схему характерных положений ледников относительно его элементов (рис. 5). Как правило, язык ледника расположен на моренном пьедестале, сформированном образованиями малой ледниковой эпохи (реконструкции оледенения малой ледниковой эпохи обоих исследуемых массивов были сделаны нами ранее [1, 8]) и исторической стадии, налегающими на ригель. Участок трога выше морены малой ледниковой эпохи обычно имеет относительно малые уклоны. Конец ледника может

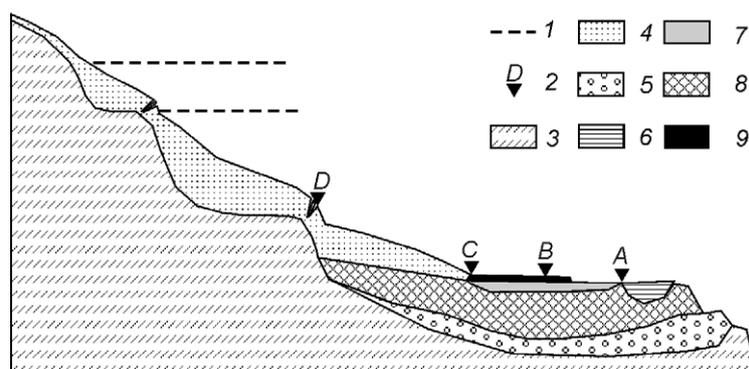


**Рис. 4.** Скорости отступления долинных ледников (м/год) исследуемых массивов:

1 – Восточный Мугур; 2 – Селиверстова; 3 – Толайты; 4 – Правый Мугур; 5 – Аргамджи-3; 6 – Аргамджи-2 Западный

**Fig. 4.** The rates of the valley glaciers retreat (m/year) of the massifs studied:

1 – East Mugur; 2 – Seliverstova; 3 – Tolaity; 4 – Right Mugur; 5 – Argamgi-3; 6 – Argamgi-2 West



**Рис. 5.** Продольный профиль, характерный для долинных ледников региона:

1 – уровни водоразделов при отсутствии над долинным ледником плосковершинного ледника (Толайты, Аргамджи-3); 2 – варианты положения фронтов ледников (А – Толайты; В – Аргамджи-2 Западный; С – Селиверстова; D – Аргамджи-3); 3 – скальные породы; 4 – ледник; 5 – морена исторической стадии; 6 – озеро; 7 – зандр; 8 – морена малой ледниковой эпохи; 9 – приледниковая наледь или снежник

**Fig. 5.** Longitudinal profile, typical for the valley glaciers of the region:

1 – watershed levels in cases of a flat-summit glacier absence over the valley glacier (Tolaity; Argamgi-3); 2 – variants of the glacial front locations (A – Tolaity; B – Argamgi-2 Western; C – Seliverstova; D – Argamgi-3); 3 – rocks; 4 – glacier; 5 – historical stage moraine; 6 – lake; 7 – sandr; 8 – LIA moraine; 9 – periglacial icing or snow patch

непосредственно примыкать к моренному валу малой ледниковой эпохи, но чаще находится от него на некотором расстоянии, а между ледником и мореным валом может располагаться озеро или зандр. Характерно также наличие приледниковой наледи или снежника. Выше языка обычно присутствует подлёдный ригель с зоной сераков или трещиноватости, над которым находятся цирки. Из них берут начало основные ледниковые потоки. Для долинных ледников района ха-

рактерно двухкамерное строение ледника, когда слияние потоков из смежных цирков происходит ниже ригеля. Над цирками могут располагаться водораздельные гребни (для периферийных участков массивов). Однако в большинстве случаев ледники имеют многоярусное строение, связанное с проявлением ступенчатости и наличием так называемых каровых лестниц. В подобных случаях над упомянутыми цирками располагается ещё одна ступень, где находятся

полностью закрытые ледниками кары, а над каровой лестницей расположены куполовидные вершины или поверхности выравнивания, покрытые маломощным ледниковым панцирем.

Возможно, что при регрессе оледенения, которое сопровождается перемещением концов ледников вверх по профилю долины, ледники проходят определённую последовательность фаз отступления. Однако за счёт индивидуальных морфологических особенностей ледников и вмещающих их долин на территории района исследования долинные ледники отступают с разной скоростью и находятся на разных фазах сокращения, каждая из которых характеризуется своими скоростями и механизмами отступления ледников. Рассмотрим эти фазы на конкретных примерах.

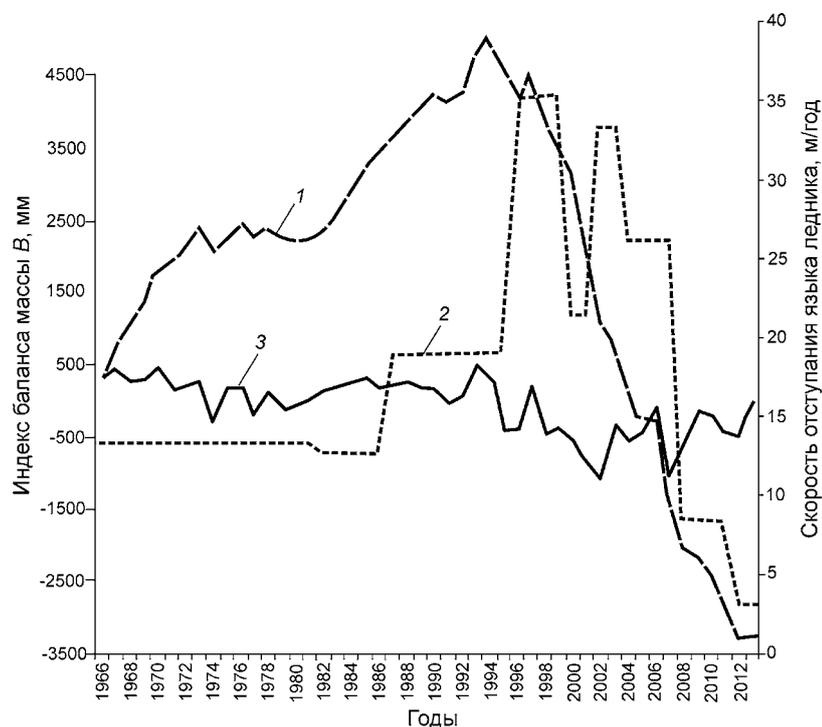
Край ледника *Левый Толайты* (№ 17 по [6], № 22 по [15]) расположен относительно высоко (3075 м). При средней крутизне склонов долины более 40° превышение верхних частей склонов над поверхностью ледника достигает 700–800 м, что обеспечивает, несмотря на южную экспозицию, большую степень затенённости поверхности ледника и повышенную аккумуляцию снега на его поверхности за счёт лавинной деятельности. Благодаря этим особенностям скорости отступления ледника не превышают 7 м/год. В 1966–1995 гг. средняя скорость отступления составляла всего 1 м/год, что указывает на возможность его стационарирования в наиболее благоприятные с точки зрения баланса массы годы. Поэтому ледник до сих пор примыкает к моренному комплексу малой ледниковой эпохи, только у нижней точки ледника их разделяет маленькое (около 25 м радиусом) приледниковое озеро. Предположительно ледник Толайты всё ещё находится в начальной фазе отступления от морен малой ледниковой эпохи.

По нашему мнению, ледник *Аргамджи-2 Западный* (№ 253 по [5], № 9 по новейшему Каталогу ледников Таван-Богдо-Ола [8]) находится в следующей по сравнению с ледником Левый Толайты фазе отступления. Он расположен практически на такой же высоте (до 3055 м), что и ледник Левый Толайты. Площадь его в 9 раз больше площади ледника Левый Толайты, однако размеры их языков различаются в меньшей степени. Язык ледника расположен на слабозрезанном участке долины, фактически склонами долины для него служат моренные валы малой

ледниковой эпохи, возвышающиеся над его поверхностью на 30–50 м. Конец ледника отступил от фронтальной морены малой ледниковой эпохи примерно на 900 м, сформировав зандр протяжённостью примерно 320 м. Пока язык имеет длину около 1,7 км и не потерял непосредственного контакта с боковыми моренными валами малой ледниковой эпохи. Вместе с тем наличие продольных трещин на боковых моренах вдоль края ледника свидетельствует о некоторой потере стабильности внутреннего края морен, хотя пока этот процесс не привёл к активизации оползневых и термокарстовых процессов. Скорости отступления ледника варьируют от 17 м/год в тёплые и сухие периоды 1970-х и второй половины 2000-х годов до 7 м/год в прохладный и влажный отрезок 1980-х – начала 1990-х годов.

Язык ледника *Селиверстова* имеет значительное сходство с ледником Аргамджи-2 Западный, которое выражается в его малых уклонах (6–8° по данным мензульной съёмки 1990 г.), близком гипсометрическом положении, слабой врезанности участка долины, на котором расположен язык ледника (не более 100–150 м), наличии мощного моренного комплекса малой ледниковой эпохи, обрамляющего ледник и возвышающегося над его поверхностью на 50–100 м, в хорошо выраженном зандре протяжённостью более 800 м. В то же время он находится в следующей по сравнению с ледником Аргамджи-2 Западный фазе регрессии, выражающейся в скачкообразном отступании языка (до 35 м/год), которое сопровождается отчленением краевых участков языка с образованием площадей мёртвого льда и потерей мореной малой ледниковой эпохи стабильности. Можно предположить, что ледник Аргамджи-2 Западный в настоящее время находится в фазе регрессивной эволюции, соответствующей состоянию ледника Селиверстова в начале 1980-х годов, перед резким ростом скоростей отступления. Вероятно, большее отступление ледника Селиверстова связано с несколько меньшими его размерами и вертикальным диапазоном, меньшей мощностью льда (по визуальным оценкам) и, как следствие, меньшей степенью устойчивости к климатическим изменениям.

Мы сопоставили данные об изменениях скоростей отступления ледника Селиверстова с результатами расчёта индекса баланса массы, выполненными нами для границы питания лед-



**Рис. 6.** Ледник Селиверстова:

1 – кумулятивная кривая индекса баланса массы для высоты 3450 м; 2 – скорость отступления языка ледника, м/год; 3 – изменчивость индекса баланса массы для высоты 3450 м

**Fig. 6.** Seliverstova Glacier:

1 – cumulative curve of the mass balance index for the level of 3450 m; 2 – the retreat rates of the glacier snout; 3 – variability of the mass balance index for the level of 3450 m

ника по состоянию на начало – середину 1990-х годов (3450 м). Расчёты проводились на основе методики Г.Е. Глазырина [4], согласно которой для расчётов необходимо знать следующие параметры: среднюю летнюю температуру; среднее годовое количество осадков; высоту фирновой границы; термический (0,69/100 м) и плювио-метрический (7 мм/100 м) градиенты; высоту границы питания. При расчётах использовались данные ГМС Мугур-Аксы; значения термического и плювио-метрического градиентов определены на основе полевых наблюдений [14, 15]. Подробно алгоритм расчётов приведён нами в работе [1]. Результаты расчётов показаны на рис. 6. На графике отчётливо выделяются периоды с положительным балансом массы (когда граница питания была ниже уровня 3450 м): 1967–1973 и 1981–1994 гг.; периоды с балансом массы, близким к нулю: 1973–1981, 1994–1997 гг.; периоды с отрицательным балансом массы: 1997–2012 гг. Скорости отступления ледника в высокой степени синхронны с изменениями баланса массы ледника. Вероятно, импульсное возрастание скоростей отступления ледника было связано не только с резким изменением климатических условий в неблагоприятную сторону, но и с уменьшением за счёт сокращения притока льда сверху динамической активности языка ледника

до критических значений, приводящих к омертвлению его краевых участков с последующим отсечением водотоками от тела ледника.

В последующие несколько лет скорость сокращения языка ледника Селиверстова уменьшилась почти в 10 раз, причём произошло это на несколько лет раньше, чем улучшились условия питания. Последнее лишь наложилось на сокращение абляции, которое было вызвано увеличением степени забронированности языка моренным материалом, а также отсутствием потенциальных возможностей быстрого сокращения ледниковых языков в предыдущий период из-за стаивания самых маломощных и пологих участков льда. Определённую роль сыграл и выход конца ледника на участок с большим уклоном. Всё это может быть признаком постепенного перехода ледника Селиверстова в новую фазу сокращения.

Следующую фазу отступления иллюстрирует динамика ледников *Левый Мугур* (№ 7 по [6], № 5 по [15]) и *Аргамджи-3* (№ 254 по [5], № 9 по [8]). Здесь возможны два варианта поведения ледников. Первый вариант – сохранение высоких скоростей отступления ледникового языка вплоть до перемещения края ледника к ригелю, после чего скорость резко падает в результате действия за ригелем подпруживающего эффек-

та. Этот вариант имел место на западном потоке ледника Аргамджи-3, где скорости отступления упали примерно втрое. Второй вариант – покрытие моренным чехлом из более интенсивно поступающего с обнажающихся склонов осыпного материала языковой части с приближением к более крутым склонам и скалам. За счёт резкого сокращения абляции скорость отступления края ледника уменьшается. Поскольку таяние расположенной выше открытой части ледника остаётся прежним, ледниковая поверхность там продолжает снижаться и язык ледника отчленяется от его основного тела по ригелю с образованием полей мёртвого забронированного льда. Описанный процесс часто сопровождается разделением смежных ледниковых потоков, отчленением боковых ледниковых притоков и даже распадом долинного ледника, что наблюдалось на леднике Левый Мугур, где в результате этого процесса в 1999–2011 гг. край ледника (основной ледовый поток) переместился на 650 м, а ледник распался на три составляющие. Ледник Аргамджи-3 потерял связь со своей восточной составляющей, которая была отсечена ригелем и полностью забронирована. Отметим, что данный процесс протекал как раз в засушливый и тёплый период, что ускорило сам процесс и подчеркнуло его импульсный характер.

**Каменно-ледовые образования.** Динамика этих образований характеризуется несколькими аспектами.

*Во-первых*, это собственно процессы их формирования, которые могут протекать сравнительно медленно (каменные глетчеры, предосыпные валы и террасы), а могут происходить всего за 10–15 лет (образование забронированных ледников, полей мёртвого льда, обособление срединных морен с ледяным ядром). В наибольшем масштабе этот процесс отмечался в нижней части ледника Левый Мугур, где основной ледниковый поток был отчленён от языковой части поперечным ригелем, а ледниковый поток, вышедший из кара, и язык ледника были полностью погребены под моренным материалом и потеряли движение. Площадь забронированной поверхности составила около 0,35 км<sup>2</sup>. Некоторые небольшие ледники в карах были в этот период полностью забронированы. Общая площадь льдов, забронированных в 1995–2008 гг. в массиве Монгун-Тайга, составила, по нашим оценкам, примерно 5,2%

общей площади ледников массива на 1995 г., что одновременно составляет около 27% общего изменения площади ледников в 1995–2008 гг.

Иногда каменно-ледовые формы образуются непосредственно на теле ледника задолго до его деградации. Это – процесс формирования срединных морен на относительно крупных ледниках, что, например, отмечается на леднике Восточный Мугур, где мощная срединная морена предохраняет погребённый ею лёд от вытаявания. В 1994–1995 гг. она находилась почти на одном уровне с открытой частью ледника, в 2011–2013 гг. различие в высоте достигало 5–10 м за счёт таяния и уменьшения мощности открытого льда. В настоящее время правый (юго-восточный) ледниковый поток начинает уходить под данную морену, а она в нижней части начинает смыкаться с боковой мореной малой ледниковой эпохи. В перспективе нижняя часть срединной морены может стать отдельным от ледника объектом. Подобные древние срединные морены с ледяным ядром на месте деградировавших языков ледника встречаются в соседней долине р. Правый Мугур. Вероятно, процесс бронирования обратим. В 2009–2013 гг. многие забронированные ледники стали восстанавливать свою область питания за счёт аккумуляции снега над бронирующим моренным слоем.

*Во-вторых*, динамика каменно-ледовых образований проявляется через процессы движения фронтов каменных глетчеров. Вероятно, при повышении температуры в связи с потеплением погребённые льды становятся более пластичными и оплывают вниз по склону вместе с моренным чехлом. При этом часть льдов вытаявает, что приводит к увеличению глубины залегания льда и накоплению моренного материала на поверхности каменного глетчера. Не исключено, что периодическое скачкообразное отчленение от расположенных выше ледников новых масс омертвевшего и забронированного льда обеспечивает относительно непрерывное питание каменного глетчера и его активность. По косвенным оценкам, скорости движения двух активных каменных глетчеров, расположенных ниже долинных ледников Левый Мугур и Правый Мугур, составляют 0,5–0,7 м/год.

*В-третьих*, динамика каменно-ледовых образований проявляется через термокарстовые процессы. Активизация термокарстовых процес-

сов на моренах позднего голоцена и малой ледниковой эпохи отмечена нами в конце 1990-х – начале 2000-х годов на фоне роста летних температур и некоторого снижения количества осадков. Выяснилось, что моренные скопления разного облика, считавшиеся каменными образованиями, оказались такими лишь сверху, а основная их часть была сложена льдом. В последнее десятилетие в результате снижения среднегодовых температур интенсивность термокарстовых процессов уменьшилась и продолжается лишь на отдельных участках. Летом 2013 г. мы провели наблюдения за термокарстовыми процессами на морене малой ледниковой эпохи у края ледника Селиверстова (массив Монгун-Тайга). Были заложены репера у краёв шести термоцирков юго-западной экспозиции на склоне морены, обращённой к леднику, на высоте примерно 3150 м. Высота участков заложения термоцирков относительно ледника составляла 50–70 м, глубина днищ относительно поверхности морены – 2–4 м, средняя крутизна склона морены – примерно 52°. Наблюдения проводились на протяжении трёх пентад (со 2 по 17 июля). За это время скорости отступления стенок термоцирков возрастали от средней величины 7 см/день до 13 см/день, достигая в последней пентаде 33 см/день. Мы использовали для характеристики гидротермических условий периода наблюдений данные ГМС Мугур-Аксы и измерения, проведённые нами в базовом лагере, расположенном на высоте 2770 м примерно в 3 км от места наблюдений.

Температура воздуха в период наблюдений возрастала, но рост этот не был монотонным (табл. 4): во второй пентаде она была ниже, чем в первой. Тем не менее, колебания температуры не повлияли на увеличение скорости термокарстовых процессов. То же самое можно сказать об осадках, тем более что доля осадков в жидкой фазе в рассматриваемый период была невелика. Незначительная изменчивость условий облачности свидетельствует о небольших колебаниях прихода солнечной радиации. Вероятно, отмеченные особенности протекания термокарстовых процессов на участке наблюдения связаны с большой крутизной

Таблица 4. Отступление стенок термоцирков на морене малой ледниковой эпохи у края ледника Селиверстова летом 2013 г.

Параметры	Период измерения параметров		
	2.07–7.07	7.07–12.07	12.07–17.07
Отступление за пентаду стенок термоцирков (№ 1–6), см:			
№1	10	10	80
№2	56	130	10
№3	90	Нет свед.	140
№4	87	85	165
№5	13	2	5
№6	10	55	60
Средняя скорость отступления за пентаду, см	35,2	56,4	64
Средняя дневная температура в базовом лагере, °С	12,1	10,8	15,0
Средняя суточная температура (ГМС Мугур-Аксы), °С	13,41	12,9	15,0
Суммарное количество осадков (ГМС Мугур-Аксы), мм	4,9	1,0	0,6
Максимальная сумма осадков за 12 ч (ГМС Мугур-Аксы), мм	2,0	1,0	0,6
Средняя общая облачность, %	50	40	40

и нестабильностью склона морены, обращённого к леднику. Последнее вызвано тем, что интенсивно отступающий язык ледника больше не подпруживает на данном участке морену, что вызывает осыпание моренного материала и обнажение ледяного ядра морены. Положительные температуры воздуха служат катализатором этого процесса. Далее имеет место собственно процесс термокарста – протаивание ведёт к оползанию всё больших масс моренного материала, нестабильных изначально. Вероятно, интенсивные проявления термокарста будут протекать на данном участке до выработки естественного профиля равновесия и выполаживания склона.

### Выводы

Нивально-гляциальные объекты рассматриваемой территории образуют единую систему. Динамика погребённых льдов тесно связана с динамикой края ледников, что видно на примере термокарстовых процессов на морене малой ледниковой эпохи у края ледника Селиверстова. В последние годы на месте массива мёртвого льда из-за продолжающегося сноса материала с морены малой ледниковой эпохи сформировался небольшой фронтальный моренный вал, что привело к некоторому затруднению стока, увеличению ак-

кумуляции снега у края ледника и образованию между ним и этим валом перелетывающей наледи в сочетании со снежником. Данные образования причленяются к краю ледника, замедляя его таяние и отступление. Современная динамика нивально-гляциальных систем рассматриваемого района определяется чередованием тёплых сухих и холодных влажных климатических интервалов. В настоящее время есть основание предполагать переход к очередной прохладной и влажной фазе. Реакция на климатические колебания может быть как быстрой и очевидной (снежники), так и асинхронной и различной по масштабам.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ и РГО, проекты № 13-05-41075 РГО\_а, № 12-05-00588\_а, № 13-05-00851-а, № 14-05-00796.

### Литература

1. Ганюшкин Д.А., Москаленко И.Г., Чистяков К.В. Колебания ледников массива Монгун-Тайга (Юго-Восточный Алтай) после максимума малой ледниковой эпохи // Лёд и Снег. 2010. № 3 (111). С. 5–12.
2. Ганюшкин Д.А., Москаленко И.Г., Чистяков К.В. Динамика многолетних снежников и снежно-фирновых полей массива Монгун-Тайга // Вестн. СПбГУ. 2012. Сер. 7. Вып. 4. С. 163–174.
3. Ганюшкин Д.А., Москаленко И.Г., Чистяков К.В. Особенности динамики многолетних снежников массива Монгун-Тайга в 1966–2011 гг. // Лёд и Снег. 2013. № 4 (124). С. 43–51.
4. Глазырин Г.Е. Распределение и режим горных ледников. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 181 с.
5. Каталог ледников СССР. Т. 15. Вып. 1. Ч. 5. Л. Гидрометеиздат, 1977. 47 с.
6. Каталог ледников СССР. Т. 15. Вып. 1. Ч. 8. Л. Гидрометеиздат, 1978. 80 с.
7. Кренке А.Н. Массообмен в ледниковых системах на территории СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 247 с.
8. Москаленко И.Г., Ганюшкин Д.А., Чистяков К.В. Современное и древнее оледенение северного склона массива Таван-Богдо-Ола // Лёд и Снег. 2013. № 3 (123). С. 33–44.
9. Ревякин В.С., Окишев П.А. Современное оледенение в верхней части бассейна р. Аргут // Гляциология Алтая. 1970. Вып. 6. С. 29–36.
10. Ревякин В.С., Мухаметов Р.М. Динамика ледников Алтае-Саянской горной системы за 150 лет // МГИ. 1986. Вып. 57. С. 95–99.
11. Ревякин В.С., Мухаметов Р.М. Динамика ледников Табын-Богдо-Ола // Гляциология Сибири. 1993. Вып. 4 (19). С. 83–92.
12. Селиверстов Ю.П. Современное оледенение Монгун-Тайги (юго-запад Тувы) // Изв. ВГО. 1972. Т. 104. Вып. 1. С. 40–44.
13. Чистяков К.В., Москаленко И.Г. Оледенение северного склона массива Таван-Богдо-Ола и его динамика // МГИ. 2006. Вып. 101. С. 111–116.
14. Чистяков К.В., Каледин Н.В., Москаленко И.Г., Ганюшкин Д.А., Глебова А.Б., Зеленукина Е.С., Хрущев С.А., Сыромятина М.В., Козачек А.В., Гаврилкина С.А., Севастьянов Д.В., Новиков С.А., Богатуров Д.С., Музалев А.А., Амбурцев Р.А., Ступин Ю.А. Горы и люди: изменения ландшафтов и этносы внутриконтинентальных гор России. СПб: изд. ВВМ, 2010. 438 с.
15. Чистяков К.В., Ганюшкин Д.А., Москаленко И.Г., Зеленукина Е.С., Амосов М.И., Волков И.В., Глебова А.Б., Гузэль Н.И., Журавлев С.А., Прудникова Т.Н., Пряхина Г.В. Горный массив Монгун-Тайга / Под ред. К.В. Чистякова. СПб: «Арт-Экспресс», 2012. 310 с.

### Summary

Climate-induced variations of glacio-nival systems (snow patches, glaciers, stone-ice formations) of the high-mountain massifs Mongun-Taiga and Tavan-Bogdo-Ola (north slope) were investigated for 1966–2013 period using results of field observations and analysis of aerial photos. Regional 25-year climatic cycles of the variations have been determined. Characteristics of response of glacio-nival objects to the climate changes were obtained. Results of preliminary mass balance calculations made for the 2012/13 glaciological year and values of the mass balance index calculated for the period 1966–2013 for the Seliverstov Glacier together with recorded climate cooling, increase of snow accumulation, and slowing down of glacier snout retreats give evidence to beginning of new 25-year cycle that is expected to be more favorable phase for existence of the above glacio-nival systems. Five-phase scheme of retreats of the valley glaciers happened after the LIA maximum was constructed on the basis of results of field observations performed for many years. Each phase is characterized by different retreat mechanisms as well as by different response to the same climate change that can be used as a basis for forecasting of future glacial dynamics. Rates of the thermokarst processes determined from observations and general mechanisms of dynamics of stone-ice formations are also discussed in the paper.