

В.М. ПЛЮСНИН, А.Д. КИТОВ

Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН,
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1, Россия,
plyusnin@irigs.irk.ru, kitov@irigs.irk.ru

ДИНАМИКА ВНУТРИКОНТИНЕНТАЛЬНЫХ ЛЕДНИКОВ СИБИРИ И ВОСТОЧНОЙ АЗИИ С МАЛОГО ЛЕДНИКОВОГО ПЕРИОДА

Представлены результаты десятилетнего исследования локальных особенностей динамики горных ледников центральной части Азии — от широт средней тайги Прибайкалья и Забайкалья, гор степной зоны Монгольского Алтая и пустынной зоны Китая до холодных пустынь Гималаев. Выполнено дешифрирование разновременных космических снимков, что позволило получить количественную информацию об изменениях площади и длины ледников на ключевых участках исследуемых горных территорий. Эти данные увязаны с климатическими параметрами, абсолютной высотой, мерзлотой, морфологией и тектоникой хребтов, антропогенным воздействием. В ходе исследования выявлен общий тренд — отступление ледников с 1970-х гг. при повышении среднегодовой температуры воздуха в северном полушарии на 1,4–1,6 °С. Ускорение таяния, уменьшение площади и длины ледников фиксируется с 1990 по 2020 гг., когда было наиболее значительное потепление. Выделены следующие годы с температурой выше средней: 1990, 1995, 1997, 2002, 2005, 2007, 2008, 2011, 2012, 2016, 2019, 2020. В этот период также наблюдалось увеличение площади и длины некоторых исследуемых ледников в 2013–2015 гг. и в 2021 г., связанное с аномальными зимними осадками в 2012, 2013 и 2020 гг. Установлено, что в горах юга Восточной Сибири в эти годы наблюдалось замедление сокращения площади ледников, увеличение количества многолетних снежников и частоты схода снежных лавин. Выявлено, что от конечных морен Малого ледникового периода ледники в Сибири, Монгольском Алтае и хр. Алтын-Таг отступили в среднем на 500 м, на хребте Карлыктаг — на 800–900 м, а в Гималаях (местность Ланганг) — от 1 до 4,5 км.

Ключевые слова: горы, горные ледники, глобальное потепление, дистанционные исследования, ГИС, базы данных.

V.M. PLYUSNIN, A.D. KITOV

V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
664033, Irkutsk, ul. Ulan-Batorskaya, 1, Russia,
plyusnin@irigs.irk.ru, kitov@irigs.irk.ru

THE DYNAMICS OF INTRACONTINENTAL GLACIERS OF SIBERIA AND EAST ASIA SINCE THE LITTLE ICE AGE

We present results from a ten-year-long study into local features of mountain glacier dynamics in the central part of Asia — from the latitudes of the middle taiga of Cisbaikalia and Transbaikalia, through the mountains of the steppe zone of Mongolian Altai and the desert zone of China to the cold deserts of the Himalayas. Interpretation of multi-temporal satellite images was carried out, thereby making it possible to obtain quantitative information on changes in the area and length of glaciers in the key areas of the mountain territories under study. These data are linked to climatic parameters, absolute altitude, permafrost, morphology and tectonics of the mountain ridges, and to anthropogenic impact. The study revealed a general trend, namely a retreat of the glaciers starting in the 1970s, with an increase in the average annual air temperature in the northern hemisphere by 1.4–1.6 °C. Accelerated glacier melting and a reduction in glacier length were observed from 1990 to 2020 when there occurred the most significant warming. The following years with above-average temperatures are highlighted: 1990, 1995, 1997, 2002, 2005, 2005, 2007, 2008, 2011, 2012, 2016, 2019, and 2020. During this period also showed an increase in the area and length of some of the glaciers studied during 2013–2015 and in 2021 associated with abnormal winter precipitation in 2012, 2013 and 2020. It was found that in the mountains of the south of Eastern Siberia the aforementioned years showed a slowdown in the reduction of the area of glaciers, an increase of the number of perennial snow patches, and an increase in the frequency of snow avalanches. It has been revealed that the glaciers in Siberia, Mongolian Altai, and the Altyn-Tag Range retreated from the terminal moraines of the Little Ice Age retreated an average of 500 m, on the Karlyktag Range 800–900 m, and in the Himalayas (Langtang area) from 1 to 4.5 km.

Keywords: mountains, mountain glaciers, global warming, remote sensing studies, GIS, databases.

ВВЕДЕНИЕ

Горные ледники наиболее чувствительны к изменениям климата [1]. Приокеанические и внутриконтинентальные ледники по-разному реагируют на эти изменения. Влияние основных факторов функционирования и динамики ледников, выявление закономерностей изменения их размеров и реакции на колебания климатических показателей — важная фундаментальная задача географии. В последние годы этой проблеме уделяется достаточное внимание. В 2015 г. вышла монография сотрудников Института географии РАН «Современные изменения ледников горных районов России» [2], где представлены материалы об источниках данных о ледниках России, изменении климата на севере Евразии на рубеже XX–XXI вв. и изменении ледников основных центров горного оледенения России. По исследуемым нами горным массивам Восточной Сибири ранее проводился анализ динамики ледников в хр. Кодар [3, 4] и Восточном Саяне [5].

Современное глобальное потепление началось в середине 1970-х гг., когда средняя годовая температура воздуха на Евразийском континенте устойчиво повышалась до середины 1990-х — начала 2000-х гг. примерно на 0,8–1,0 °С. Затем, в течение 15 лет на севере Евразии увеличивалась повторяемость аномально холодных зим, что отразилось в уменьшении роста температуры [6]. Но с 2015 г. температура воздуха в северном полушарии остается рекордно высокой по данным 3288 метеостанций [7], а 2020 г. стал самым теплым в России за 132 года (с 1891 г.) инструментальных наблюдений. Средняя годовая температура воздуха на севере Евразии повысилась с середины 1970-х гг. на 1,4–1,6 °С.

Цель данной работы — сравнение динамики ледников гор юга Восточной Сибири, на которых в последние годы проводятся наземные гляциологические исследования, с горными ледниками Монголии, Китая и Непала, преимущественно не изученных. Рассмотрение динамики ледников от среднетаежных гор Прибайкалья, сухостепных гор Монголии, полупустынных и пустынных гор Китая до высокогорных холодных пустынь Непала дает фактический материал для выявления закономерностей динамики этих ледников в связи с текущим глобальным потеплением.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для анализа выбирались группы ледников, находящихся преимущественно у самых высоких вершин горных массивов. Контуры ледников и моренные отложения были вручную оцифрованы по космическим снимкам разных лет, полученных в основном с геоинформационных порталов Google, GLSF с использованием SRTM, а также полевых GPS-измерений, данных каталогов [8] и различных картографических материалов [9].

В результате ГИС-анализа каждого исследуемого горного массива определялись площади открытых частей ледников, их длина. Так как нижние части ледников в основном закрыты моренным материалом, то современную границу ледника и участков льда, покрытых обломками горных пород, отчленившихся от основного тела ледника, определить было сложно. Поэтому все измерения по космическим снимкам (площадь, длина, расстояние до морен Малого ледникового периода (МЛП)) осуществлялись для открытых частей ледников.

Для анализа ледников были использованы преимущественно данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) Landsat (пространственное разрешение до 15 м). Для некоторых ледников горных массивов хребта Кодар и вершины Мунку-Сардык применялись данные более высокого разрешения World View, Quick Bird, а также данные Google Earth.

На территорию гор юга Восточной Сибири — хребты Кодар, Байкальский, Баргузинский, Восточный Саян (у вершины Мунку-Сардык и пика Топографов) — были составлены базы данных (БД) нивально-гляциальных объектов, отражающие динамику основных ледников с 1960-х гг. до нашего времени [10–14].

Мировой службой мониторинга ледников (WGMS) и Мировым центром данных по гляциологии (NSIDC) в 1998 г. создан Всемирный каталог ледников (WGI) [15]. К настоящему времени он содержит информацию о более чем 130 тыс. ледниках Земли. В программе GLIMS [16] возможно получение данных о площади, длине ледников, изменении контуров за определенный промежуток времени. Эти данные получены преимущественно со спутников ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), для которых параметры космической съемки скорректированы специально в целях мониторинга ледников [2]. К 2013 г. в дополнение к существующей создана международная БД RGI (Randolph Glacier Inventory) [17].

Как правило, для оценки текущего состояния ледников нами использовались космические снимки Landsat наиболее оптимального периода съемки — с середины июля до середины августа. Часто в

этот период та или иная территория горного массива бывает закрыта облаками или их тенью, поэтому для уточнения границ ледников приходится использовать снимки предыдущих или последующих лет. Кроме того, после 2003 г. аппаратура Landsat-7 частично вышла из строя (появились полосы на снимках), но с 2013 г. ситуация улучшилась, когда был запущен спутник Landsat-8, поставляющий качественные изображения.

Дешифрирование и векторизация границ объектов проводились в ручном режиме RGB-синтезированных снимков: каналы 4-5-7 для Landsat-2, каналы 2-4-7 для Landsat-5 и 7 и 3-5-7 для Landsat-8 и 9 с улучшением до 15 м по каналу 8 (для Landsat-7, 8, 9). Все измерения выполнялись в программе ArcViewGIS-3.2a. Учитывая разрешение снимков 15 м/пиксель, систематическая погрешность определения площади ледника оценивается в 0,12 км², или 5 % от измеряемой величины. Для снимков Landsat-2, 5 с разрешением 60 и 30 м/пиксель точность определения площади порядка 10–20 %. Также использовались наземные снимки для детального морфологического изучения объектов.

Для анализа данных по каждому горному массиву был составлен ГИС-проект. Технология обработки снимков заключалась в следующем:

- привязка в единой картографической проекции имеющихся данных; обычно проекция поперечная Меркатора, UTM-84 соответствующей зоны данной проекции;
- векторизация ледников по топографической карте (обычно это наиболее раннее состояние ледников 1950–1960-х гг.);
- ГИС-анализ с помощью ПО ArcView-3a (расчет площади, периметра, длины ледника и др.).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Хребет Кодар (57° с. ш., 117° в. д.). Общей чертой всех ледников Кодара является их существование на 800–1000 м ниже климатической снеговой границы. Для многих ледников характерно их распространение в глубоких карах и узких верховьях троговых долин. Здесь формируется особый микроклимат, способствующий развитию ледников. Значительное лавинное питание и запас холода в многолетнемерзлых грунтах способствуют сохранению ледников и в современных условиях глобального потепления. Климат хр. Кодар обусловлен его положением в поясе умеренных широт и особенностями горно-котловинного рельефа. Радиационный режим характеризуется большей интенсивностью и контрастностью, чем на равнинной территории этих широт. Это проявляется в повышенном притоке тепла вследствие относительно небольшой облачности и в больших контрастах величин радиационного и теплового балансов, обусловленных влиянием значительного вертикального расчленения (до 1200 м), абсолютной высоты и типом растительного покрова. Суровость климата подчеркивается низкими годовыми температурами воздуха (–7...–12 °С), значительным запасом холода. Осадков в горах выпадает 750–800 мм/год [18]. Снеговая линия проходит на высоте 2500 м при климатической снеговой границе 3200 м.

Ледники Кодара за 50 лет значительно уменьшились в размерах. Если брать за начало отсчета более точные наземные съемки 1976–1979 гг., то малые ледники (7, 8, 23) при текущем потеплении климата через 20–30 лет могут исчезнуть. Средние по площади ледники южной экспозиции (21, 22, 24) интенсивно сокращаются в размерах, а северной (9, 10, 11, 20) — уменьшаются в меньшей мере, и только самый большой ледник в группе (12) остается почти без изменения (табл. 1). В верховьях Верхнего и Среднего Сакукана имеются ледниковые озера (рис. 1, а).

В целом языки ледников бронируются обломочным материалом, уменьшающим их таяние, но создающим условия для образования каменных глетчеров у краев ледников. Каровые ледники тают, уменьшаясь в толщину, и у некоторых в моренных отложениях формируются озера. Среднее расстояние от нижнего края ледников до морен МЛП составляет 500 м.

Восточный Саян. Восточный Саян вытянут с северо-запада на юго-восток на 800 км. Один из горных массивов хребта — пик Топографов (52°30' с. ш., 99° в. д.), несущий на себе современные ледники, также выбран нами для анализа динамики оледенения. Здесь широко распространены альпипиотипные формы рельефа с остроконечными пикообразными вершинами, достигающими 3089 м. Многочисленны глубокие кары с ледниками и снежниками, нередко с озерами, а долины несут следы ледниковой обработки и сохраняют форму трогов.

Климат Восточного Саяна характеризуется как резко континентальный с суровой продолжительной зимой и коротким дождливым летом. Повышенная инсоляция, обусловленная чистотой и разреженностью атмосферы, способствует сильному нагреванию поверхности днем, зато ночью и в плохую погоду она быстро охлаждается, что ускоряет процесс физического выветривания скал и поверхностных каменистых грунтов.

Таблица 1

Динамика ледников хребта Кодар (Сыгыттинско-Сакуканская группа, Россия)

Номер ледника на рис. 1, а	Экспозиция	Площадь ледника, км ²					Длина ледника, м, 2021 г.	Расстояние от края ледника до морен МЛП, м	Высота нижнего края ледника, м, 2021 г.
		1972 г. Каталог ледников СССР [8]	1979 г. Наземные съемки [9]	2009 г. к/сн	2015 г. к/сн	2021 г. к/сн			
7	з	0,4	0,15	0,15	0,12	0,10	480	480	2370
8	с	0,5	0,25	0,25	0,31	0,11	560	360	2220
9	с	0,7	0,6	0,5	0,37	0,35	880	240	2050
10	с	0,7	0,5	0,3	0,33	0,26	920	560	2170
11	с-в	0,7	0,45	0,4	0,38	0,29	930	760	2150
12	с	1,4	1,1	1,0	1,16	1,03	1500	280	2180
20	с	0,8	0,65	0,6	0,53	0,41	1260	320	2130
21	ю	0,6	0,35	0,3	0,35	0,27	960	800	2370
22	ю	0,4	0,35	0,3	0,28	0,20	720	680	2380
23	с-в	0,4	0,1	0,1	0,16	0,08	400	200	2300
24	ю	0,8	0,6	0,55	0,81	0,35	1080	800	2480
Всего		7,4	5,1	4,45	4,80	3,45	Средняя длина 880	Среднее расстояние 500	Ср. сев. 2170 Ср. южн. 2400

Динамика ледников Восточного Саяна рассмотрена на примере восьми ледников пика Топографов. С 1973 г. площадь ледников на нем уменьшилась на 35 % (с 5,2 до 3,39 км²) (табл. 2). Расстояние от современного края ледника до морены МЛП в среднем составило 700 м. Малые ледники сокращаются быстрее, чем более крупные. На южных склонах этого массива нет ледников, зато имеются озера ледникового происхождения (см. рис. 1, б).

Горный узел Цамбагарав (48° с. ш., 91° в. д.) в Монгольском Алтае с 2000 г. имеет статус национального парка. Здесь не только охраняются редкие горные виды животных, лекарственные растения, но и развивается горный туризм и альпинизм. Платообразный хребет обрывается на север, восток и запад крутыми уступами с формированием каров и троговых долин, а южный склон пологий. Абсолютные высоты вершин достигают 3800–4000 м, высшая точка горного узла — гора Цаст-Ула (4208 м).

На хребте преобладают плосковершинные ледники (около 40 % от площади всех ледников). Они питают долинские ледники, в том числе и снегом, сдуваемым с их поверхности.

Климат резко континентальный. По данным реанализа NCEP/NCAR (объединения двух национальных центров США — Экологического прогнозирования и Атмосферных явлений, основанных на регулярных метеорологических наблюдениях, аэрологической и спутниковой информации) [19, 20] получены среднемесячные температуры воздуха с 1977 по 2016 г. на высоте 3000 м, что практически соответствует снеговой линии на хр. Цамбагарав. Среднегодовые температуры за этот период составили –7,1 °С, а количество атмосферных осадков — 140 мм. Зимой территория находится в области господства западного отрога Азиатского антициклона. В это время преобладают западные и северо-западные ветры, приводящие к перераспределению снега в горах и его значительной концентрации на подветренных склонах.

По анализу климатических данных с 1977 по 1994 г., наблюдался небольшой рост выпадения атмосферных осадков (в среднем 144 мм/год) при уменьшении запаса холода (в среднем 1112,4 °С/год) и роста сумм положительных температур (в среднем 147,6 °С/год) при средней годовой температуре 6,7 °С. В последующий период 1995–2011 гг. осадков выпадало в среднем 130 мм/год, а суммы отрицательных температур увеличились в среднем до 1197,6 °С/год при уменьшении сумм положительных температур (132 °С/год) и средней годовой температуры (7,4 °С). С 2012 по 2016 г. наблюдалось увеличение атмосферных осадков до 155 мм/год, увеличение сумм положительных температур (158,4 °С/год), но уменьшение среднегодовой температуры до 7,1 °С и сумм отрицательных температур (1186,8 °С/год). Последующие годы характеризуются повышением средней годовой температуры и, соответственно, увеличением положительных сумм годовых температур и уменьшением отрицательных.

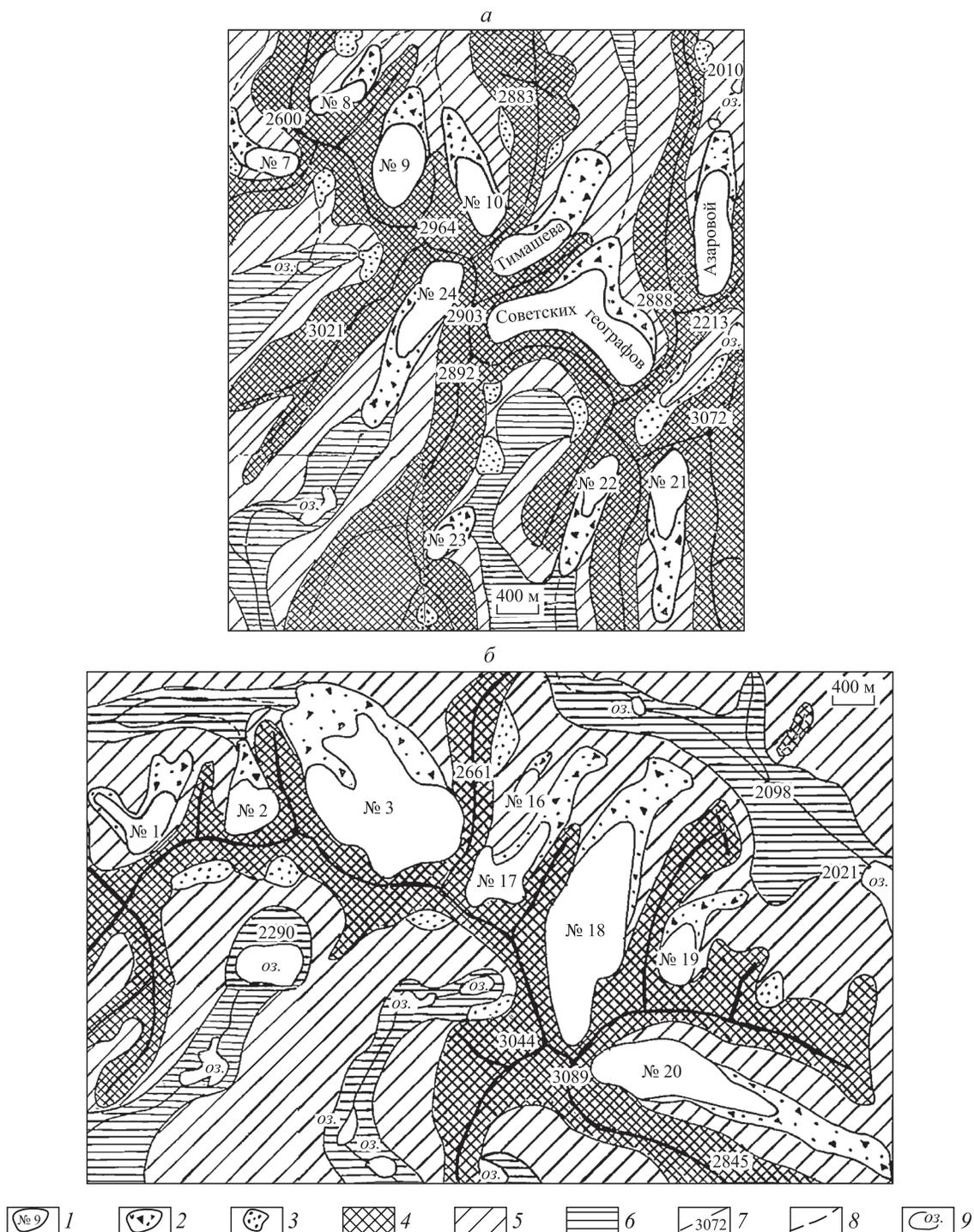


Рис. 1. Схемы ледников хребта Кодар (Сыгыттинско-Сауканская группа) (а) и Восточного Саяна (пик Топографов) (б), Россия.

1 — ледники и их номера; 2 — моренные отложения; 3 — многолетние снежники; 4 — скальные поверхности; 5 — пологие склоны; 6 — днища долин; 7 — водоразделы с отметками высот; 8 — реки; 9 — озера.

Таблица 2

Динамика ледников у пика Топографов (Восточный Саян, Россия)

Номер ледника на рис. 1, б	Экспозиция	Площадь ледника, км ²			Длина ледника, м, 2020 г.	Расстояние от края ледника до морен МЛП, м	Высота нижнего края ледника, м, 2020 г.
		1973 г.	2002 г.	2020 г.			
1	с	0,5	0,4	0,4	680	400	2440
2	с	0,2	0,15	0,15	480	520	2480
3	с-з	1,4	1,0	0,82	1520	720	2550
16	с-в	0,2	0,1	0,05	360	280	2360
17	с-в	0,5	0,4	0,27	1120	720	2480
18	с	1,2	1,0	0,9	1700	880	2380
19	с	0,2	0,1	0,1	440	680	2400
20	в	1,0	0,7	0,7	1680	1440	2430
Всего		5,2	3,85	3,39	Средняя длина 1000	Среднее расстояние 700	Средняя высота 2440

Анализировалась группа ледников у главной вершины горы Цаст-Ула. Горный рельеф здесь формируют две вершины — Цаст-Ула (4208 м) и к востоку от нее в 3,75 км вершина 4089 м. От них в северо-восточном направлении перпендикулярно основному (северо-запад — юго-восток) направлению хр. Цамбагарав отходят два отрога, создавая благоприятные условия для существования и развития долинных ледников 7 и 9. Остальные ледники, стекающие с этих вершин, относительно небольшие по площади, но их таяние происходит более интенсивно (табл. 3, рис. 2, а).

Таблица 3

Динамика группы ледников хребта Цамбагарав (массив Цаст-Ула, Монголия)

Номер ледника на рис. 2, а	Экспозиция	Площадь ледника, км ²		Длина ледника, м, 2015 г.	Расстояние от края ледника до морен МЛП, м	Высота нижнего края ледника, м, 2015 г.
		2010 г.	2015 г.			
1	с-з	0,36	0,29	1200	340	3340
2	с-з	0,06	0,05	630	350	3400
3	с-з	0,18	0,15	820	320	3370
4	с-з	0,14	0,11	670	370	3260
5	с	1,90	1,86	2720	340	3360
6	с	1,80	1,57	1950	570	3230
7	с	5,34	4,86	4340	680	3000
8	с	0,43	0,37	1320	340	3430
9	с-в	4,82	4,71	4860	1030	3100
10	с-в	0,18	0,06	570	340	3490
11	в	0,64	0,63	1600	460	3560
12	в	0,43	0,41	1600	100	3660
13	ю-в	0,04	0,04	310	220	3720
14	ю	1,43	1,24	2140	340	3430
15	ю	0,79	0,45	1230	910	3470
16	ю	0,68	0,60	1050	680	3590
17	ю	0,91	0,84	1420	290	3490
18	ю	1,25	1,07	1580	460	3560
19	з	0,17	0,13	570	550	3430
20	з	0,48	0,38	1220	460	3400
21	пл.	0,23	0,23	550	—	4000
Всего		22,26	20,05	Средняя длина 1540	Среднее расстояние 460	Средняя высота 3440

Примечание. пл. — плосковершинный, прочерк — расстояние до морены не определено.

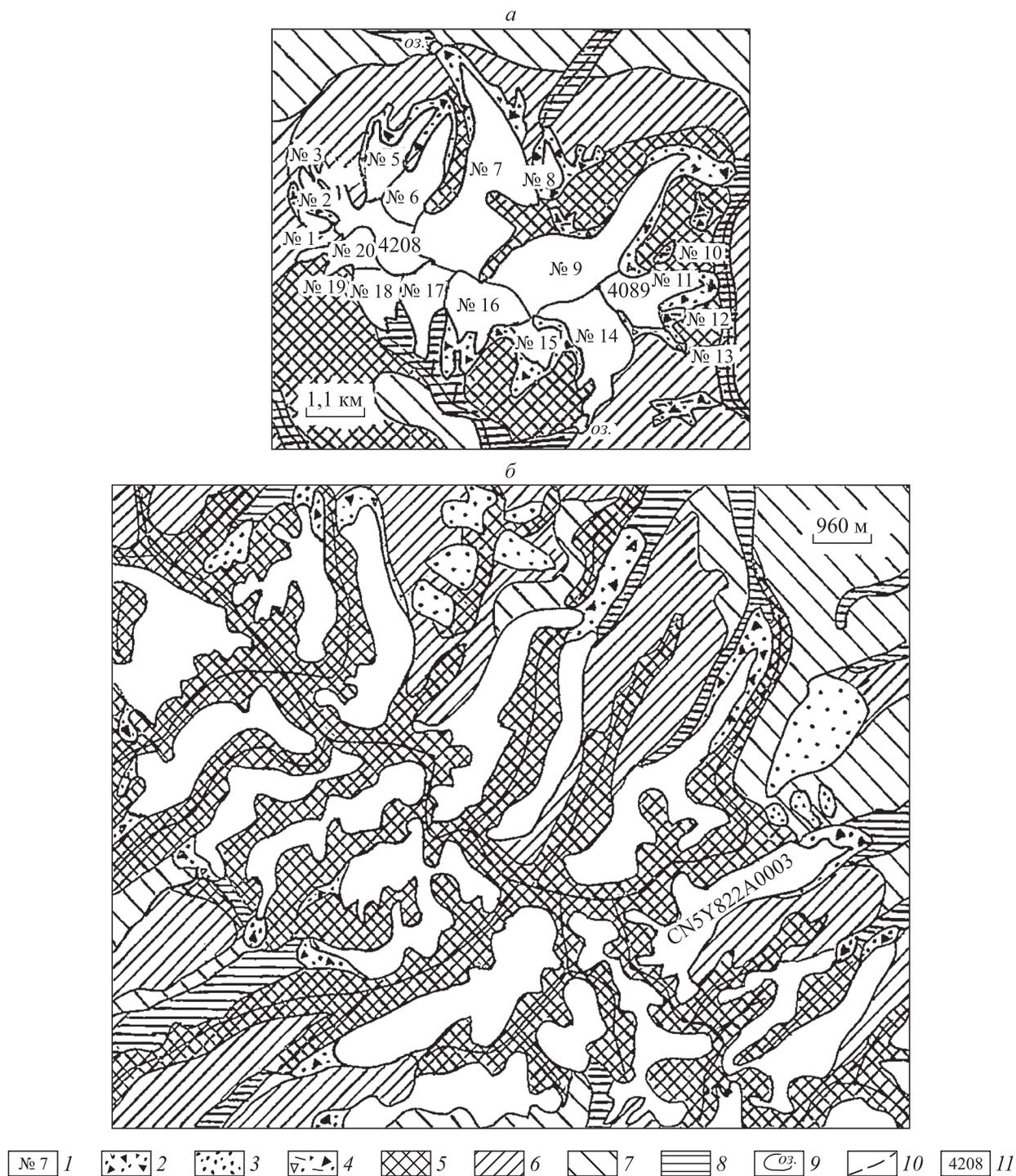


Рис. 2. Схемы ледников хребтов Цамбагарав (массив Цаст-Ула, Монголия) (а) и Карлыктаг (Восточный Тянь-Шань, Китай) (б).

1 — ледники; 2 — моренные отложения; 3 — многолетние снежники; 4 — каменные глетчеры; 5 — скальные поверхности; 6 — крутые склоны; 7 — пологие склоны; 8 — днища долин; 9 — озера; 10 — реки; 11 — отметки высот.

Среднее расстояние от нижнего края ледника до морен МЛП составляет 460 м.

Наши исследования суммарной площади ледников этого массива, при анализе космических снимков, дали следующие результаты: 1977 г. — 32,65 км², 1989 г. — 23,41, 2001 г. — 21,62, 2005 г. — 21,81, 2011 г. — 19,86, 2013 г. — 21,11, 2014 г. — 20,07, 2015 г. — 19,23, 2022 г. — 18,16 км². Как видно, площадь оледенения сокращается во все годы, кроме 2013 и 2014 гг., когда она увеличилась на 1,25 км² (6,3 %).

Другие исследователи, проводившие измерения на этих ледниках, получили следующие результаты: 2010 г. — 21,77 км² [21], 2015 г. — 20,05 км² [22].

Хребет Карлыктаг. Хребет расположен на северо-западе Китая в самой восточной части Тянь-Шаня на 43° с. ш., 95° в. д. Климат резко континентальный. Зимы суровые, холодные (–20...–28 °С), в горах лето прохладное. Осадков выпадает мало (20–150 мм/год).

Для исследования в восточной части хребта выбран ледниковый массив с максимальной отметкой 4885 м и стекающий с этой вершины ледник CN5Y822A0003 северо-восточной экспозиции. В ходе анализа космических снимков были определены площади льда всего массива, а также площадь выбранного ледника и его длина (табл. 4, см. рис. 2, б).

В целом при общем уменьшении площади оледенения и длины анализируемого ледника выделяется 2013 г., когда площадь ледника увеличилась на 0,23 км² по сравнению с 2010 г. От конечной морены МЛП ледник отступил на 860 м. К сожалению, в 2013, 2014 и 2019 гг. облака закрыли западную часть массива, поэтому не удалось определить площадь всех ледников в эти годы.

Таблица 4

Динамика ледников хребта Карлыктаг и отдельно ледника CN5Y822A0003 (Восточный Тянь-Шань, Китай)

Космический снимок	Дата	Площадь ледников всего массива, км ²	Ледник CN5Y822A0003	
			Площадь, км ²	Длина, км
Landsat-2	26.08.1977	76,13	3,61	4,14
Landsat-5	14.07.1986	68,14	3,37	4,11
Landsat-5	23.08.1989	67,19	3,33	4,07
Landsat-7	12.07.2000	66,10	3,25	3,97
Landsat-7	14.08.2006	62,32	3,05	3,95
Landsat-7	25.08.2010	61,69	2,94	3,92
Landsat-7	01.08.2013	—	3,17	3,91
Landsat-8	27.07.2014	—	2,92	3,89
Landsat-8	31.08.2015	61,87	2,90	3,89
Landsat-8	10.08.2019	—	2,82	3,85
Landsat-8	15.08.2021	61,11	2,85	3,84

Примечание. Прочерк — нет данных.

Таблица 5

Динамика ледников центрального массива хребта Алтынтаг и отдельно ледника CN5Y561B0005 под вершиной 5821 м (Китай)

Год	Источник данных	Площадь ледников всего массива, км ²	Ледник CN5Y561B0005	
			Площадь, км ²	Длина, м
1966	БД RGI [17]	33,97	2,92	2680
1966	БД NSIDC [23]	28,52	3,02	2800
1991	Landsat-5	32,27	2,91	2875
1995	Landsat-5	31,19	2,78	2640
2000	Landsat-7	30,41	2,80	2622
2005	Landsat-7	31,78	2,82	2597
2012	Landsat-7	29,85	2,72	2612
2015	Landsat-8	30,13	2,74	2620
2021	Landsat-8	27,14	2,54	2593

Хребет Алтынтаг (39° с. ш., 94° в. д.). Хребет находится на западе Китая, обрамляет с севера Цайдамскую котловину. Рельеф в центральной высокой части хребта скалистый, сильно расчлененный, с преобладанием ледниковых форм. Климат засушливый, резко континентальный с продолжительными холодными зимами и коротким теплым летом. Осадков выпадает немного, у подножий гор 20–50 мм/год, в горах — до 150 мм/год. Нивально-гляциальный пояс представлен переметными и долинными ледниками и крупными многолетними снежниками.

Для анализа динамики был выбран ледниковый массив у вершины 5821 м и отдельно ледник CN5Y561B0005 (табл. 5, рис. 3, а). Этот ледник отступил от морены МЛП около 500 м.

Ледники хр. Алтынтаг наиболее устойчивы к потеплению. Сокращение площади ледников здесь не столь существенно по сравнению с другими анализируемыми горными территориями. При общем все же уменьшении отмечаются 2005 и 2015 гг., когда площади ледников незначительно увеличивались.

Местность Лангтанг (Гималаи, Непал) (28° с. ш., 86° в. д.). Национальный парк Лангтанг расположен к северу от Катманду. Климат Лангтанга меняется в зависимости от высоты, на низких высотах — субтропический, выше — высокогорный пустынный. Климатические условия здесь являются экстремальными. В январе, самом холодном месяце, средняя температура составляет –36 °С, даже в июле — всего 19 °С. Зимой юго-западный ветер может достигать 80 м/с. С июня по сентябрь в горы приходят муссоны с Индийского океана. В это время выпадает большинство осадков (до 2330 мм), а на вершинах господствуют снежные штормы.

Здесь рассматривается три ледника: Лангтанг Лирунг (NP50185E0007), Юбра (NP50185E0008) и Гхонне (NP50185E0006) (см. рис. 3, б).

Последний представляет собой пульсирующий ледник и связан с трагедией, произошедшей во время майского землетрясения 2015 г. В Гималаях с 2010 по 2014 гг. дешифрировалось увеличение накопления снега и ледяных масс. Землетрясение 5 мая 2015 г. спровоцировало сдвиги ледников и массовый сход лавин. В национальном парке на дер. Лангтанг сошла нижняя часть языка ледника Гхонне, в результате чего погибло 250 человек, из которых 175 непальцы, а остальные — туристы из разных стран.

На востоке парка от заснеженных водоразделов спускается живописный ледник Юбра, оканчивающийся языком-ледопадом в двух километрах от пос. Кянжин Гумба. К этому же поселку с вершины шеститысячника Чангбу подходит ледник Лирунг. В его нижней части образовалось ледниковое озеро, представляющее собой резервуар для деривационной ГЭС. Нами рассматривается только долинная часть ледника, так как его зона питания очень обширна. С западной стороны от главной вершины (7227 м) спускается ледник Гхонне. Он окружен крутыми склонами и имеет разрывы с зоной питания. Его боковые части обрамляют реки, берущие начало значительно выше, формируя узкий канал для движения ледника. На высотах 4200–4680 м имеется более пологий участок, способствующий накоплению льда, а ниже — крутые склоны, обрывающиеся до 3200 м к дер. Лангтанг. Конус выноса на ледниковой террасе, где расположено поселение, говорит о более ранних отложениях конечной морены ледника.

Ледник Лирунг отступил от своего максимального продвижения в МЛП на 4,5 км, Гхонне — на 1,65 км, а Юбра — на 1 км (табл. 6). Средняя величина (2,38 км) — наибольшая из анализируемых ледников — подтверждает тезис о значительном сокращении площади гималайских ледников при повышении летней температуры воздуха с конца 1980-х гг. на 2,5 °С [24, 25].

Таблица 5

Динамика ледников центрального массива хребта Алтынтаг и отдельно ледника CN5Y561B0005 под вершиной 5821 м (Китай)

Год	Источник данных	Площадь ледников всего массива, км ²	Ледник CN5Y561B0005	
			Площадь, км ²	Длина, м
1966	БД RGI [17]	33,97	2,92	2680
1966	БД NSIDC [23]	28,52	3,02	2800
1991	Landsat-5	32,27	2,91	2875
1995	Landsat-5	31,19	2,78	2640
2000	Landsat-7	30,41	2,80	2622
2005	Landsat-7	31,78	2,82	2597
2012	Landsat-7	29,85	2,72	2612
2015	Landsat-8	30,13	2,74	2620
2021	Landsat-8	27,14	2,54	2593

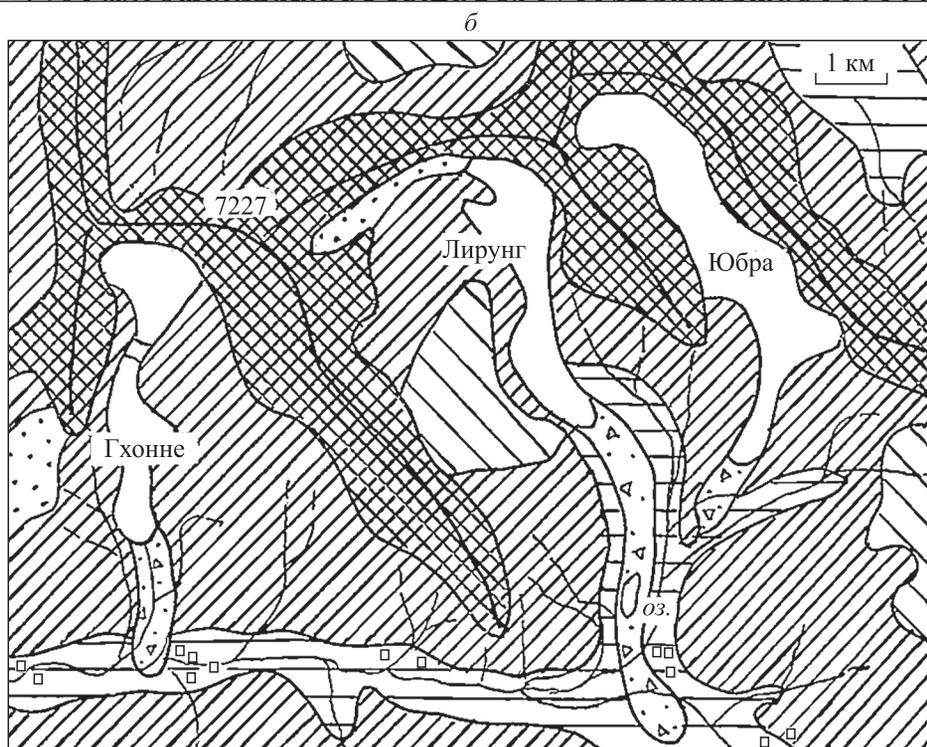
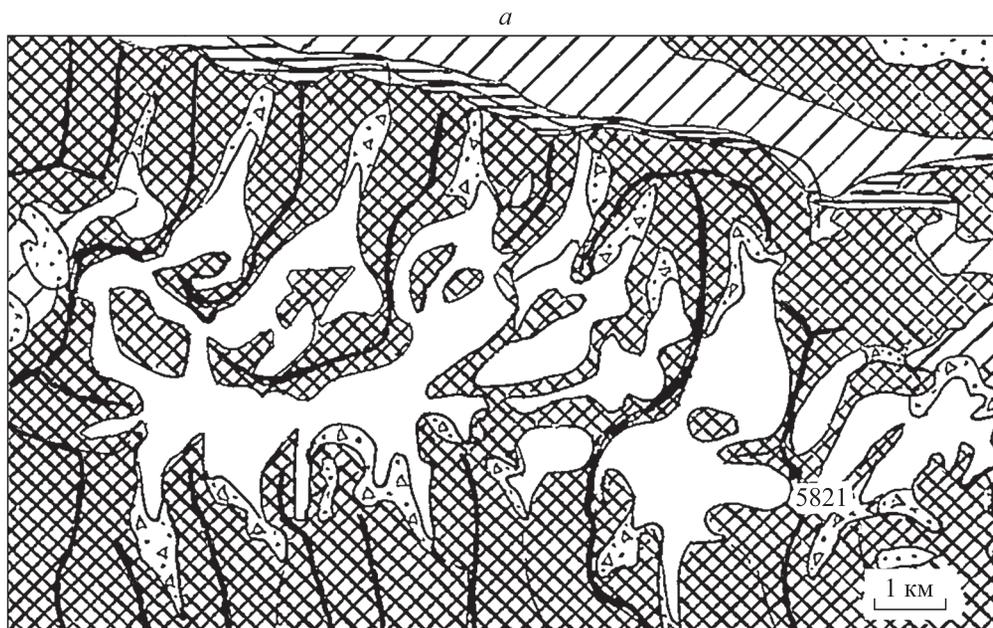


Рис. 3. Схемы ледников хребта Алтынтаг (Китай) (а) и местности Лангтанг Лирунг (Непал, Гималаи) (б).
 1 — ледники; 2 — моренные отложения; 3 — многолетние снежники; 4 — скальные поверхности; 5 — крутые склоны; 6 — пологие склоны; 7 — днища долин; 8 — водоразделы с отметками высот; 9 — озера; 10 — реки; 11 — сельские населенные пункты.

Динамика ледников национального парка Лангтанг Лирунг (Непал, Гималаи)

Год	Источник данных	Ледник Гхонне		Ледник Лирунг		Ледник Юбра	
		Площадь, км ²	Длина, м	Площадь, км ²	Длина, м	Площадь, км ²	Длина, м
1960	WGI [16]	1,10	2300	12,02	7300	6,25	6000
1972	Landsat-1	1,13	2290	2,94	4960	4,94	5630
1988	Landsat-5	0,97	2260	—	—	—	—
1992	Топокарта	—	—	2,73	6440	4,91	5640
2001	Aster	0,95	2320	1,99	4500	4,74	5460
2014	Landsat-7	1,08	2370	1,75	3700	4,33	5480
2015	Landsat-7,8	0,49	1480	1,58	3530	3,79	5160
2017	Landsat-7	0,93	2340	1,50	3510	4,20	5340

Примечание. Прочерк — нет данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ космических снимков, баз данных ледников, опубликованных материалов дали представление об изменении площади и длины горных ледников в условиях глобального потепления. Сравнительный ГИС-анализ динамики ледников шести горных массивов внутри евразийского континента от 28 до 57° с. ш. позволил более подробно выявить некоторые особенности их изменения в последние десятилетия с максимума МЛП.

Общий для всех тренд — дегляциация, вызванная глобальным потеплением, начавшимся с конца 1970-х гг. Рост средних годовых температур воздуха в Евразии за это время составил 1,4–1,6 °С.

Ледники формируются здесь на значительных высотах в холодном и относительно сухом континентальном климате при сравнительно малом фоновом снегонакоплении. В сибирском регионе на абляцию влияет многолетняя мерзлота и расположение ледников ниже климатической снеговой границы в глубоких карах и узких верховьях троговых долин. Большое количество обломков горных пород, поступающих с крутых склонов, бронируют тело ледников, препятствуя интенсивному таянию. В среднем ледники гор юга Восточной Сибири отступили от конечных морен МЛП на 520 м. Примерно на такую же величину отступили ледники в Монгольском Алтае (гора Цаст-Ула) — на 460 м и на хр. Алтынтаг — на 500 м. Здесь преобладают ледники плоских вершин и переметные, которые при таянии уменьшаются в толщину и переходят в долинные. Долинные же ледники (на хр. Карлыктаг) отступили на большую величину — на 800–900 м. Но более всего отступили гималайские ледники (в местности Лангтанг в среднем на 2,38 км). Здесь уже сказывается океаническое влияние, выражающееся в значительно большем поступлении атмосферных осадков, а также большем приходе тепла в последнее время.

Измеренные площади ледников с 1970-х гг. сократились на хр. Кодар на 53 %, в Восточном Саяне (пик Топографов) на 35 %, на Монгольском Алтае на 44 %, на хребтах Карлыктаг и Алтынтаг на 20 %, в Гималаях на 66 %. По сравнению с предыдущими десятилетиями ледники больше всего потеряли в массе с 1990 по 2020 г. В 2012–2013 гг. из-за обильного поступления атмосферных осадков произошло даже увеличение площади и длины некоторых ледников, увеличилось количество многолетних снежников.

Работа выполнена за счет средств государственного задания Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН (АААА-А21-121012190017-5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IPCC. Climate change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Ed. S. Solomon, D. Qin, M. Manning. — Cambridge, N.Y. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. — 996 p.
2. Котляков В.М., Хромова Т.Е., Носенко Г.А., Попова В.В., Чернова Л.П., Муравьев А.Я., Рототаева О.В., Никитин С.А., Зверкова Н.М. Современные изменения ледников горных районов России. — М.: Тов-во научных изданий «КМК», 2015. — 288 с.

3. **Shahgedanova M., Popovnin V., Aleinikov A., Stokes C.R.** Geodetic mass balance of Asarova glacier Kodar mountains, Eastern Siberia and its links to observed climatic change // *Annals of Glaciology*. — 2011. — Vol. 52 (58). — P. 129–137.
4. **Stokes C.R., Shahgedanova M., Evans I.S., Popovnin V.V.** Accelerated loss of alpine glaciers in the Kodar Mountains, south-eastern Siberia // *Global and Planetary Change*. — 2013. — Vol. 101. — P. 82–96.
5. **Осипов Э.Ю., Ашметьев А.Ю., Осипова О.П., Клевцов Е.В.** Новая инвентаризация ледников в юго-восточной части Восточного Саяна // *Лед и снег*. — 2013. — № 3 (123). — С. 45–54.
6. **Попова В.В.** Современные изменения климата на севере Евразии как проявление вариаций крупномасштабной атмосферной циркуляции // *Фундаментальная и прикладная климатология*. — 2018. — Т. 1. — С. 84–111.
7. **Мониторинг** изменений климата Земного шара [Электронный ресурс]. — http://climatechange.igce.ru/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=31Itemid=75&lang=en (дата обращения 02.06.2023).
8. **Каталог** ледников СССР. Т. 17, вып. 2, ч. 1. Хребет Кодар. — Л.: Гидрометеоздат, 1972. — 44 с.
9. **Плюснин В.М.** Реакция внутриконтинентальных горных геосистем на глобальные изменения климата // *География и природ. ресурсы*. — 2007. — № 3. — С. 67–74.
10. **Китов А.Д., Плюснин В.М., Иванов Е.Н.** База данных. Ледники Баргузинского хребта. Св-во о государственной регистрации базы данных. № 2013620600 от 13 мая 2013 г. [Электронный ресурс]. — <https://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?webmap=2d17fd140c9f4c02a69637fad912dba> (дата обращения 05.06.2023)
11. **Китов А.Д., Плюснин В.М., Иванов Е.Н.** База данных. Ледники Байкальского хребта. Св-во № 2015620273 от 13 февр. 2015 г. [Электронный ресурс]. — <https://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?webmap=92f41-2500efd4db1bc04a87a35edc2f7>. (дата обращения 05.06.2023)
12. **Китов А.Д., Плюснин В.М., Иванов Е.Н., Коваленко С.Н.** База данных. Ледники массива Мунку-Сардык. Св-во № 2015620398 от 27 февр. 2015 г. [Электронный ресурс]. — <https://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?webmap=47e7cb4347d7478cbe6fa492369b6cae>. (дата обращения 05.06.2023)
13. **Китов А.Д., Плюснин В.М., Иванов Е.Н.** База данных. Ледники массива пика Топографов. Св-во о государственной регистрации базы данных № 2015621394 от 10.09.2015 г. [Электронный ресурс]. — <https://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?webmap=9669b602d4ca4f76adff609e62f13dc1>. (дата обращения 05.06.2023)
14. **Китов А.Д., Плюснин В.М., Иванов Е.Н.** База данных. Ледники хребта Кодар. Св-во о государственной регистрации базы данных № 2016621167 от 25 августа 2016 г. [Электронный ресурс]. — <https://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?webmap=d7990b6d228a4e00ace80406cdb27247>. (дата обращения 05.06.2023)
15. **Haeblerli W., Buisch H.** World Glacier Inventory — Status 1988. World Glacier Monitoring Service [Электронный ресурс]. — https://wgms.ch/downloads/-published/other_reports/wgms_1989_wgi.pdf (дата обращения 05.06.2023).
16. **GLIMS.** Global Land Ice Measurements from Space [Электронный ресурс]. — <http://glims.colorado.edu/cgi-bin/marpserv> (дата обращения 05.06.2023).
17. **RGI (Randolph Glacier Inventory)** [Электронный ресурс]. — <http://www.-glims.org/RGI/randolph.html> (дата обращения 05.06.2023).
18. **Дьяконов А.И.** Особенности климата горного обрамления котловин юга Восточной Сибири (на примере Кодаро-Удочанского района) и климатические аспекты развития экзогенных процессов // *Гляциологические исследования в Сибири*. — Иркутск, 1987. — С. 80–103.
19. **Earth System Research Laboratory.** NCEP/NCAR Reanalysis [Электронный ресурс]. — vk.cc/83PmRj (дата обращения 02.05.2018).
20. **Earth System Research Laboratory.** The NCEP/NCAR Reanalysis Project [Электронный ресурс]. — <https://vk.cc/83Pqyl> (дата обращения 03.05.2018).
21. **Отгонбаяр Д.** Современное оледенение горного узла Цамбагарав (Монгольский Алтай) // *Вестн. Томск. унта*. — 2011. — № 348. — С. 177–180.
22. **Ганюшкин Д.А., Отгонбаяр Д., Чистяков К.В., Кунаева Е.П., Волков И.В.** Современное оледенение хребта Цамбагарав (северо-западная Монголия) и его изменение с максимума малого ледникового периода // *Лед и снег*. — 2016. — Т. 56, № 4. — С. 437–452.
23. **NSIDC — National Snow and Ice Data Center:** The GLIMS Glacier Database is accessible on the World Wide Web [Электронный ресурс]. — <http://nsidc.org/glims/> (дата обращения 05.06.2023).
24. **Vajracharya S.R., Mool P.** Glaciers, glacial lakes and glacial lake outburst floods in the Mount Everest region, Nepal // *Annals of Glaciology*. — 2009. — Vol. 50, N 53. — P. 81–86.
25. **ERA-Interim,** 2015 [Электронный ресурс]. — <https://apps.ecmwf.int/datasets/-data/interim-full-daily/lev-tipe=sfc> (дата обращения 05.06.2023).

Поступила в редакцию 31.05.2023

После доработки 26.06.2023

Принята к публикации 29.06.2023