

Сокращение ледников северной части Срединного хребта на Камчатке в период с 1950 по 2016–2017 гг.

© 2020 г. А.Я. Муравьев

Институт географии РАН, Москва, Россия

anton-yar@rambler.ru

Degradation of glaciers in the northern part of the Middle Range on Kamchatka Peninsula along the period from 1950 over 2016–2017

A.Ya. Muraviev

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

anton-yar@rambler.ru

Received July 10, 2020 / Revised August 14, 2020 / Accepted September 9, 2020

Keywords: *altitude distribution, area reduction, mountain glaciers, Kamchatka, Sredinny (Central) Range.*

Summary

The Northern part of the Sredinny (Middle) Range is the largest glaciation area in Kamchatka in terms of the numbers and areas of glaciers. As of 2016–2017, there were 465 glaciers in this area with a total area of about 255 ± 17 km². Amongst the morphological types, the cirque (corrie), slope, and corrie-valley glaciers predominate (64%), but more than half of the total area (54%) is covered by the corrie-valley and transaction glaciers. The average area of glaciers over this region is 0.55 km², while for the transection ones it is 8.3 km². The main part (77.4%) of the glaciers in the region is located in the altitude range of 1200–1800 m. The firn line on both slopes of the Central Range lies within the altitude range of 880–1910 m. Analysis of changes in the size of the recent glaciation in comparison with the data of the mid-twentieth century indicates that the trend towards its reduction, established in the second half of the twentieth century, remains at the present time. The loss of the area of glaciers in the region registered in the USSR Glacier Inventory (1950), by 2016–2017 amounts to almost 125 km² (35.6%). Note, that losses for the first 15 years of the twenty-first century turn out to be approximately equal to the total sum of losses for second half of the twentieth century. It means that at the beginning of the twenty-first century the rate of reduction of glaciers is 4.3 times greater, i.e. about 1.45% of the area per year. The glaciers of the South-Eastern (62.9%) and Southern (43.6%) exposures reduced the most (significantly more than others). Loss of the total area was the greatest in small glaciers with sizes smaller 0.1 km² (>70%) and the smallest in large glaciers exceeding 5 km² (<11%). The process of disintegration of large glaciers into smaller ones did also accelerate, that increased total number of glaciers. The increase in the rate of glaciers area reduction in the region at the beginning of the twenty-first century was mainly caused by the rise in summer air temperatures, that also intensified in these years. Similar values of the relative reduction of glacier areas are observed in the North Chui Range (Altay), in the Bernese and Pennine Alps, in the Polar Ural, in the Nordenskjöld Land (Svalbard), etc.

Citation: Muraviev A.Ya. Degradation of glaciers in the northern part of the Middle Range on Kamchatka Peninsula along the period from 1950 over 2016–2017. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2020. 60 (4): 498–512. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673420040055.

Поступила 10 июля 2020 г. / После доработки 14 августа 2020 г. / Принята к печати 9 сентября 2020 г.

Ключевые слова: *высотное распределение, горные ледники, Камчатка, сокращение площади, Срединный хребет.*

Приводятся данные о размерах, морфологии и высотных параметрах ледников северной части Срединного хребта на Камчатке в 2016–2017 гг. Дана оценка изменения оледенения района за три временных периода: с 1950 по 2016–2017 гг., с 1950 по 2002 гг., с 2002 по 2016–2017 гг. Установлены резкое увеличение скорости сокращения ледников с 2002 по 2016–2017 гг. (1,45% площади в год) по сравнению с 1950–2002 гг. (0,34% площади в год), а также интенсификация распада ледников (вместо 152 ледников, зарегистрированных во второй половине XX в., обнаружены 187 ледников в 2002 г. и 249 ледников в 2016–2017 гг.).

Введение

В последние десятилетия горное оледенение умеренных широт Северного полушария интенсивно сокращается, что связано с потеплением климата. Такой процесс наблюдается в

Альпах [1, 2], на Кавказе [3, 4], Алтае [5, 6], в Восточном Саяне [7], на Камчатке [8] и в Кордильерах [9]. Однако произошедшие в этих горных системах изменения часто неоднородны и зависят от местных климатических условий, рельефа, морфологии, экспозиции и размеров лед-

ников. Подобная неоднородность изменений ярко выражена на Камчатке. Так, на Кроноцком полуострове сокращение ледников со времени каталогизации [10] достигало 27,6% за 1957–2013 гг., но оно не было выявлено в районах активного вулканизма, к которым относятся Ключевская и Авачинская группы вулканов [8, 11].

Изученность ледников разных районов Камчатки и повторяемость наблюдений на них крайне неоднородны. Лучше всего изучены ледники Ключевской и Авачинской групп вулканов, находящиеся вблизи относительно населённых районов Камчатки [8]. Меньше исследовано оледенение Кроноцкого полуострова и ряда вулканов и хребтов Юго-Восточной Камчатки. К одному из наиболее труднодоступных и наименее изученных районов оледенения Камчатки относится северная часть Срединного хребта. Этот район удалён от активных вулканов, что увеличивает его интерес для исследования влияния на ледники современных климатических изменений.

Полевые исследования ледников северной части Срединного хребта немногочисленны. Первая экспедиция с целью изучения вулканов и ледников была организована летом 1964 г. Камчатским отделом Географического общества СССР и Институтом вулканологии СО АН СССР. Её основные результаты опубликованы в работе [12]. Следующие полевые гляциологические исследования проведены спустя 15 лет (в 1979 г.) на леднике Гречишкина. Это были балансовые наблюдения и геодезические измерения [13]. С 1979 г. гляциологические исследования на ледниках этого района не проводились.

Наиболее актуальные сведения о ледниках северной части Срединного хребта приведены в работе [8] на 2002 г. (на основе данных ручного дешифрирования границ ледников на спутниковых снимках) и в Каталоге Randolph Glacier Inventory 6.0 [14] на 2000–2011 гг. (на основе данных автоматизированного дешифрирования границ ледников на спутниковых снимках). Согласно работе [8], в 2002 г. в этом районе насчитывалось 388 ледников общей площадью около 335 км²; по данным Каталога [14] – 533 ледника общей площадью около 421 км². Пришла пора актуализировать сведения о ледниках этого района, проанализировать их изменения за последние 15–20 лет и сопоставить их с материалами более ранних исследований. Задачи этой рабо-

ты – получить и исследовать характеристики современного оледенения северной части Срединного хребта, а также их изменения со времени каталогизации (1950 г.) и с 2002 г.

Район исследований

Район исследований расположен в северной части Срединного хребта на Камчатке, к северу от 57°15' с.ш. (рис. 1), и простирается примерно на 270 км в направлении с юго-юго-запада на северо-северо-восток до 59°26' с.ш. От Парпольского дола Срединный хребет постепенно повышается до горного массива Острая–Хувхойтун и имеет сглаженный среднегорный рельеф. Примерно до 58°17' с.ш. – вулкан Подснежный (1598 м) – он образован цепью вулканов позднеплейстоценового возраста с абсолютными высотами 1700–2600 м (высшая точка – гора Хувхойтун высотой 2613 м). Вулканические постройки здесь чётко выражены в рельефе. Сведений об их активности в XX–XXI вв. в научной литературе нет, однако в данном районе встречаются проявления относительно недавней вулканической деятельности в виде многочисленных свежих, не задернованных лавовых потоков. На склонах вулканов находится большое число каров и трогов, появление которых связано с воздействием позднечетвертичного оледенения. К северу от вулкана Подснежный вулканических форм рельефа не обнаружено.

Климатические условия определяются особенностями атмосферной циркуляции над северо-востоком Охотского моря и Беринговым морем. Климат восточного склона северной части Срединного хребта более континентальный, чем западного [15]. Годовое количество атмосферных осадков на восточном склоне (600–800 мм) существенно больше, чем на западном (400–500 мм), выше на восточном склоне и зимние температуры воздуха – в среднем на 2–3 °С. Летние климатические условия на западном и восточном склонах различаются существенно меньше, чем зимние. Для открытого ветрам с Охотского моря западного склона хребта не характерны заметные скачки метеорологических параметров.

Северная часть Срединного хребта – крупнейший район оледенения Камчатки по площади и числу ледников [8, 10]. По данным карты

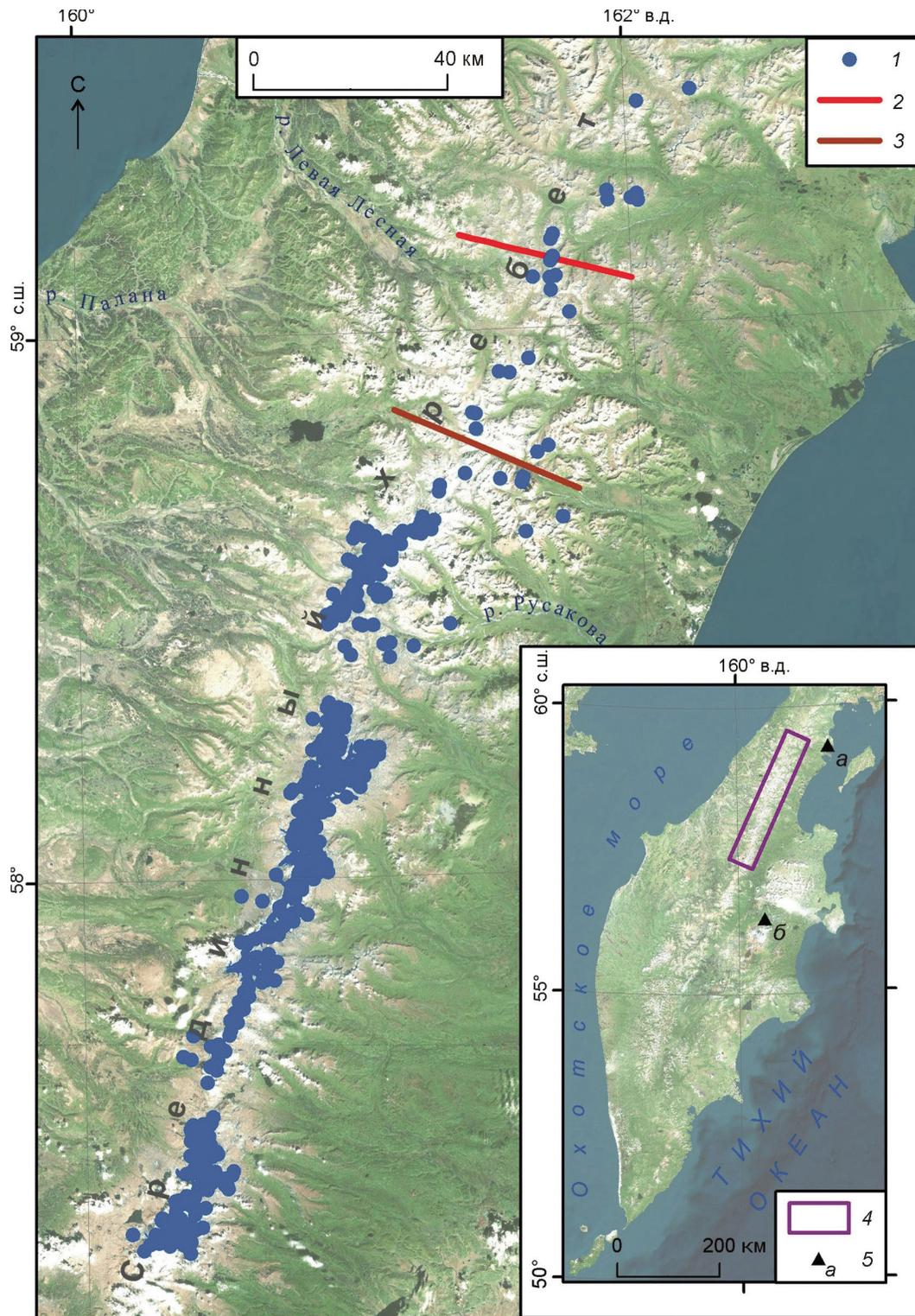


Рис. 1. Район исследований в 2016–2017 гг.

1 – местоположение ледников в 2016–2017 гг.; 2 – северная граница зоны охвата снимков ASTER от 18.08.2002 г.; 3 – северная граница зоны охвата схем Каталога [10]; 4 – границы района исследований на схеме Камчатки; 5 – ГМС Оссора (а) и Ключи (б)

Fig. 1. Research area in 2016–17.

1 – location of glaciers in 2016–17; 2 – northern boundary of the ASTER 18.08.2002 image coverage area; 3 – northern boundary of the Catalog [10] schemes coverage area; 4 – research area boundaries; 5 – weather stations Ossora (a) and Kluchi (b)

«Режим ледников» из работы [16], области питания ледников района образованы холодной фирновой, фирново-ледяной и ледяной зонами льдообразования. В нивально-гляциальной зоне широко распространены крупные многолетние снежники, что хорошо видно на сериях разновременных спутниковых снимков и отмечалось исследователями и ранее [12, 17].

Данные и методы

В работе использованы следующие материалы: 1) спутниковые снимки Sentinel-2 уровня обработки L1C от 19.08.2016 г., 10.09.2017 г. и 31.08.2018 г. с пространственным разрешением 10 м; 2) скорректированные данные о пространственном положении границ ледников в 2002 г. из работы [17]; 3) мозаика цифровой модели рельефа (далее ЦМР) ArcticDEM v3.0 [18] с пространственным разрешением 2 м; 4) ЦМР ASTER GDEM V3 [19] с пространственным разрешением 30 м в географической системе координат на эллипсоиде WGS 1984; 5) данные Каталога ледников СССР [10]; 6) среднемесячная температура воздуха [20] и месячные суммы осадков с устранением погрешностей осадкомерных приборов [21] на гидрометеостанциях (ГМС) Ключи и Оссора из архива ВНИИГМИ-МЦД за 1950–2018 гг.

Границы ледников на спутниковых снимках Sentinel-2 дешифрировали вручную в соответствии с методикой Международного проекта GLIMS [22]. Из-за облачности в горах подобрать спутниковые снимки нужного качества на конец августа – начало сентября в пределах одного года в период 2015–2019 гг. оказалось невозможным. Поэтому дешифрирование границ ледников велось по подборке снимков Sentinel-2 2016–2018 гг.: 43,1% общего числа ледников были обработаны по четырём снимкам 19.08.2016 г.; 53,4% – по четырём снимкам 10.09.2017 г.; 3,4% – по двум снимкам 31.08.2018 г. Снимки Sentinel-2 31.08.2018 г. были наименее качественными из всей подборки и использовались только в том случае, когда ледники на снимках Sentinel-2 от 19.08.2016 г. и 10.09.2017 г. были закрыты облачностью. Площадь ледников, границы которых дешифрировались по ним, составляет всего 1,3% общей площади оледенения

района исследований. Исходя из таких пропорций, можно сделать вывод, что результаты работы отражают параметры оледенения северной части Срединного хребта в 2016–2017 гг.

Погрешность определения площади ледников по спутниковым снимкам Sentinel-2 определялась умножением протяжённости границ ледников на точность пространственной привязки этих снимков, находящуюся, по данным ESA (European Space Agency), в пределах 11 м с уровнем доверия 95,5% [23]. Точность определения площадей ледников и их минимальный размер составляли 0,01 км². В Каталоге ледников СССР [10] на территорию Камчатки ледники с площадью менее 0,1 км² не регистрировались, однако в данном исследовании они учитывались. Морфологические типы ледников определены по классификации работы [24], дополненной материалами других исследований [10, 25].

ЦМР ArcticDEM v3.0 [18] использована для определения таких параметров ледников, как высоты высших и низших точек, средние высоты, вертикальная протяжённость, высота фирновой линии и высотное распределение площади ледников. Мозаика данной ЦМР на территорию района исследований сформирована из результатов обработки спутниковых снимков WorldView-1, WorldView-2, WorldView-3 и GeoEye-1 2010–2017 гг., скорректированных по высоте с использованием данных съёмки ICESat. Точность пространственной привязки таких снимков и, следовательно, ЦМР на их основе без использования наземных контрольных точек находится в пределах 4, 3,5, 3,5 и 3 м соответственно. ЦМР ASTER GDEM V3 [19] применялась аналогично ArcticDEM v3.0 для шести ледников в северной части района исследований, не покрытых данными ArcticDEM v3.0. Средняя высота каждого ледника определялась как среднее значение всех ячеек ЦМР в пределах границ ледника. ArcticDEM v3.0 использовали также как вспомогательный материал при проведении ледоразделов. Построенные растровые изображения экспозиции и наклона поверхности позволили существенно повысить точность проведения ледоразделов по сравнению с дешифрированием по визуальным признакам. Отметим, что проведение ледоразделов в Каталоге [10] и в данной работе может существенно различаться, поэтому в ряде случаев следует

анализировать изменения пространственных характеристик не отдельных ледников, а двух-трёх ледников, имеющих общие ледоразделы.

Положение фирновой линии на ледниках визуально определялось на спутниковых снимках. Значение высоты фирновой линии снималось с ЦМР в точке её пересечения с центральной линией ледника, предварительно построенной в модели «Open Global Glacier Model» (OGGM). Входными данными в OGGM служили границы ледников, дешифрованные по использованным в настоящей работе спутниковым снимкам Sentinel-2, а также ЦМР ArcticDEM v3.0 и ASTER GDEM V3 (для шести ледников, не покрытых данными ArcticDEM v3.0). Если центральная линия ледника пересекала фирновую линию более одного раза (например, крупные участки со льдом на поверхности среди фирновых полей), то высота фирновой линии не определялась.

Данные об оледенении района исследований в Каталоге [10] приведены на 1950 г. Они получены в результате анализа материалов дешифрирования аэрофотоснимков, сделанных в августе 1950 г. Во всех случаях (около 30% ледников района), когда в основной таблице Каталога приводятся данные о высоте фирновой линии, в графе «способ определения и дата» стоит отметка «АФС 10/VIII-50». Единственное исключение — ледник Гречишкина, где в 1964 г. были выполнены полевые исследования [12]. Это, однако, не означает, что площади остальных ледников определяли с помощью иных материалов (например, топографических карт). Фирновая линия визуально находится далеко не всегда и на современных спутниковых снимках. Оценить погрешности всех данных о площадях ледников в Каталоге [10] невозможно, так как исходные материалы аэрофотосъёмки недоступны. Однако такая оценка была сделана для ледников Слюнина и Гречишкина в работе [17]. В результате обработки данных дешифрирования границ этих ледников на привязанных аэрофотоснимках 1950 г. было показано, что измеренные площади расходятся с данными Каталога [10] на 0,7% для ледника Слюнина и на 2,2% для ледника Гречишкина.

Данные о пространственном положении границ ледников района исследований в 2002 г. взяты из работы [17]. Они получены в результате ручного дешифрирования четырёх спутниковых

снимков ASTER (ортопродукт) от 18.08.2002 г. с пространственным разрешением 15 м. Анализу подверглись исходные файлы данных в векторном формате «shapefile» (полигональный) после коррекции. Коррекция заключалась в более точном определении границ нескольких ледников с развитой поверхностной мореной. Три ледника, ранее считавшиеся распавшимися (на восемь сегментов), были определены как сохранившие целостность. Отметим, что пространственный охват района исследований снимками ASTER 2002 г. в его северной части меньше охвата снимками Sentinel-2 в 2016–2017 гг. (см. рис. 1) и больше охвата схемами Каталога [10].

При анализе изменений ледники разбивались на группы согласно их площадям в 2016–2017 гг. В случае распада ледников, зарегистрированных в Каталоге [10] или в работе [17], учитывалась суммарная площадь всех фрагментов данных ледников в 2016–2017 гг. Все использованные в работе спутниковые снимки и ЦМР были зарегистрированы в проекции UTM (зона 57N) на эллипсоиде WGS 1984. Эти данные обрабатывали в программных пакетах QGIS и ESRI ArcGIS.

Результаты исследования

Обработка современных спутниковых снимков Sentinel-2 для района исследований позволила идентифицировать 465 ледников общей площадью около 255 ± 17 км². Из Каталога ледников СССР [10] идентифицировано 249 ледников, 106 из которых сохранили целостность, а 143 ледника представляли собой фрагменты 46 распавшихся ледников, зарегистрированных в Каталоге; 45 ледников из 197, зарегистрированных в Каталоге [10] на территорию района исследований, не были выявлены на снимках Sentinel-2. При сравнении с работой [17] (на 2002 г.) идентифицировано 433 ледника: 288 ледников сохранили целостность, а 145 ледников были фрагментами 56 распавшихся ледников, выявленных в работе [17]. 39 ледников, зарегистрированных в этой работе, не были идентифицированы на снимках Sentinel-2 (из них девять были зарегистрированы в Каталоге [10]). 32 ледника, выявленных на снимках Sentinel-2, не регистрировались ранее в работах [10, 17].

Таблица 1. Морфологические типы ледников северной части Срединного хребта в 2016–2017 гг.

Морфологический тип ледников	Число ледников	Площадь ледников, км ²	Средний размер ледника, км ²	Доля ледников данного морфологического типа в общем числе ледников/в общей площади, %
Долинный	23	25,4±1,6	1,10	4,9/10,0
Сложный долинный	2	31,0±0,9	15,49	0,4/12,1
Перемётно-долинный	8	66,1±2,3	8,26	1,7/25,9
Карово-долинный	60	70,9±4,7	1,18	12,9/27,8
Каровый	157	29,9±3,6	0,19	33,8/11,7
Висячий	12	0,4±0,1	0,03	2,6/0,1
Склоновый	79	7,1±1,3	0,09	17,0/2,8
Присклоновый	50	4,1±0,8	0,08	10,8/1,6
Барранкосов	9	1,2±0,2	0,14	1,9/0,5
Подножий	39	16,8±1,5	0,43	8,4/6,6
Котловинный	21	1,8±0,3	0,08	4,5/0,7
Не определён	5	0,5±0,1	0,10	1,1/0,2
<i>Всего</i>	465	255,2±17,4	0,55	100/100

Анализ морфологии ледников, выявленных на современных снимках Sentinel-2, отражён в табл. 1. В количественном отношении в районе исследований преобладают каровые, склоновые и карово-долинные ледники. Менее всего распространены сложные долинные, перемётно-долинные и ледники барранкосов. По площади преобладают карово-долинные и перемётно-долинные. Наименьшие площади заняты висячими ледниками и ледниками барранкосов. Наибольшие средние размеры характерны для сложных долинных и перемётно-долинных ледников, к которым относятся крупнейшие ледники района – Слюнина (29,2±0,7 км²), Хувхойтун (21,9±0,7 км²), Гречишкина (13,8±0,3 км²) и др. Наименьшие средние размеры у висячих, присклоновых и котловинных ледников.

Низшие точки 97,4% ледников северной части Срединного хребта находятся выше 800 м над ур. моря (все высоты в статье даны над уровнем моря), 89,7% – выше 1000 м, 66,9% – выше 1200 м. Наименьшая высота конца ледника – 520 м – зафиксирована у присклонового ледника. Это – единственный ледник района исследований, спускающийся ниже 650 м. Вертикальная протяжённость 98,1% ледников района исследований составляет менее 1000 м (рис. 2, а), 95,9% – менее 800 м, 92,7% – менее 600 м, 83,7% – менее 400 м. Вертикальная протяжённость более 1000 м свойственна крупнейшим перемётно-долинным (Хувхойтун, Начикинский, Гречишкина), долинным (Хайлюлинский) и ка-

рово-долинным ледникам. Максимальное значение этого показателя (1780 м) зафиксировано на леднике Хувхойтун.

Средние высоты 94,6% ледников северной части Срединного хребта находятся в диапазоне 900–1900 м (см. рис. 2, б), 87,5% – в диапазоне 1000–1800 м, 75,5% – в диапазоне 1100–1700 м. Медианное значение средней высоты ледников составило 1430 м. Диапазон средних высот крупнейших (> 5 км²) ледников района составляет 1390–1610 м. Высота фирновой линии установлена для 152 ледников, 86 из которых расположены на западном склоне Срединного хребта, а 66 – на восточном. Её значения изменяются от 880 до 1910 м на западном склоне и от 870 до 1860 м на восточном, а медианное значение составило около 1430 м. На восточном склоне Срединного хребта медианное значение высоты фирновой линии (1410 м) немного ниже, чем на западном (1435 м). В направлении с юга на север высота фирновой линии на ледниках закономерно понижается. Вероятно, фирновую линию без дополнительных исследований не следует отождествлять с границей питания ледников, так как в областях питания ледников в этом районе широко распространены фирново-ледяная и ледяная зоны льдообразования (карта № 234 [16]).

Результаты анализа изменений ледников, зарегистрированных в Каталоге [10] на территорию района исследований, с 1950 по 2016–2017 гг. приведены в табл. 2. За указанный период общее сокращение зарегистрированных в этом Катало-

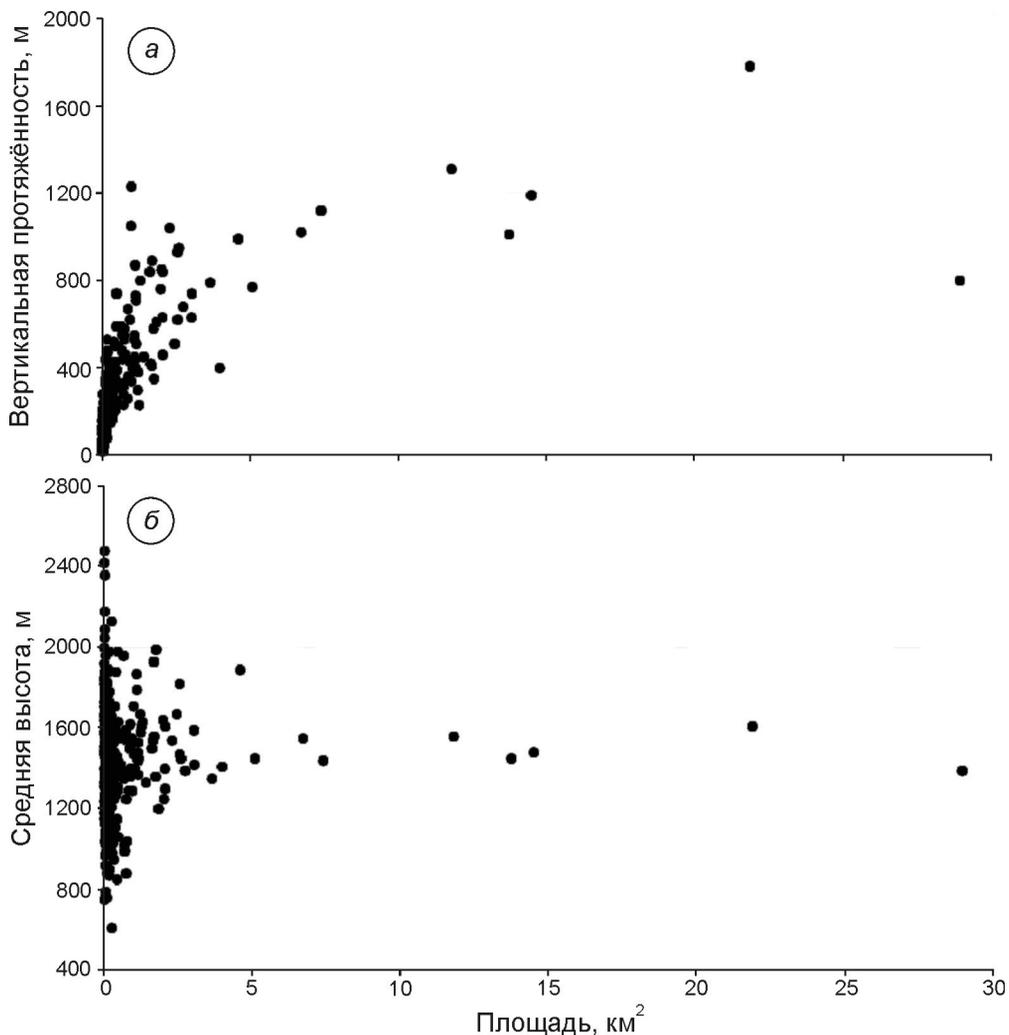


Рис. 2. Вертикальная протяжённость (а) и средние высоты (б) ледников разных размеров северной части Срединного хребта

Fig. 2. Altitude range (a) and average glacier heights (b) of different sizes in the northern part of the Middle Range

ге ледников, идентифицированных на современных спутниковых снимках Sentinel-2, составило около 125 км², или 35,6%. Примерно половина площади сокращения (около 62 км²) потеряна в 1950–2002 гг., что составляет 1,20 км², или 0,34% исходной площади ледников в год. Остальные потери (63 км²) пришлось на период с 2002 по 2016–2017 гг. – в среднем 4,20 км², или 1,45% площади ледников 2002 г. в год, т.е. скорость сокращения ледников в этом районе за 2002 – 2016–2017 гг. увеличилась примерно в 4,3 раза по сравнению с периодом 1950–2002 гг.

Для анализа ледники были разделены на группы в соответствии с их площадями в 2016–2017 гг. Для распавшихся ледников учитывалась суммарная площадь всех фрагментов. Наименьшее от-

носительное сокращение (10,9%) по сравнению с данными Каталога [10] претерпели наиболее крупные (> 5 км²) ледники. Небольшое увеличение площади (1,4%) этой группы ледников в 1950–2002 гг., вероятно, следствие погрешностей определения их площадей в Каталоге и разного проведения ледоразделов. Несколько ледников данной группы имеют мощный моренный покров на языках и протяжённые ледоразделы в области аккумуляции. По этим причинам, а также из-за сложной конфигурации протяжённой (69,7 км в 2002 г.) границы площадь ледника Хувхойтун (24,2 км²), составившая в 2002 г. $27,2 \pm 1,4$ км², видимо, была недооценена в Каталоге [10].

С уменьшением площадей ледников увеличивается относительное сокращение их площа-

Таблица 2. Изменение числа и площади ледников разных размеров северной части Срединного хребта, зарегистрированных в Каталоге ледников [10], в 1950–2002, 2002 – 2016–2017 и в 1950 – 2016–2017 гг.

Размер ледников в 2016–2017 гг., км ²	Число ледников			Площадь ледников, км ²			Изменение площади ледников, км ² /%		
	1950 г.	2002 г.	2016–2017 гг.	1950 г.	2002 г.	2016–2017 гг.	1950–2002 гг.	2002 – 2016–2017 гг.	1950 – 2016–2017 гг.
> 5	9	12	20	132,7	134,5±7,7	118,16±4,03	1,8/1,4	-16,3/-12,1	-14,5/-10,9
2–5	15	18	28	65,7	55,6±5,2	43,24±2,65	-10,1/-15,4	-12,3/-22,1	-22,4/-34,1
1–2	22	37	53	59,3	45,1±5,5	32,23±2,59	-14,2/-23,9	-12,9/-28,6	-27,1/-45,7
0,5–1	23	29	44	36,1	22,9±3,0	15,24±1,49	-13,2/-36,6	-7,7/-33,7	-20,9/-57,9
0,1–0,5	65	73	83	49,8	28,0±4,7	16,48±2,19	-21,8/-43,8	-11,5/-41,1	-33,3/-66,9
< 0,1	18	18	21	7,9	3,2±0,7	0,94±0,24	-4,7/-59,5	-2,3/-71,0	-7,0/-88,6
<i>Всего</i>	152	187	249	351,5	289,3±26,8	226,29±13,19	-62,2/-17,7	-63,0/-21,8	-125,2/-35,6

ди. Наибольшее сокращение наблюдается у ледников с площадью менее 0,1 км². Эта закономерность характерна как для периода с 1950 по 2016–2017 гг. в целом, так и для периодов 1950–2002 и с 2002 по 2016–17 гг. по отдельности. Параллельно с сокращением площадей ледников шёл процесс их распада (рис. 3, а), ускорившийся с 1950 по 2016–2017 гг. Так, 46 ледников, зарегистрированных в Каталоге [10], к 2016–2017 гг. распались на 143 фрагмента. При этом в 2002 г. им соответствовал 81 ледник.

Изменение площади ледников, зарегистрированных в Каталоге [10], в зависимости от их экспозиции отражено на рис. 3, б. Больше всего сократились ледники, ориентированные на юго-восток (на 62,9%, или 19,6 км²) и юг (на 43,6%, или 5,0 км²). Для этих групп ледников также характерно наибольшее сокращение в периоды 1950–2002 (на 42,1 и 23,0% соответственно) и с 1950 по 2016–17 гг. (на 35,9 и 26,7% соответственно). Отметим, что ледники данных экспозиций имеют по сравнению с ледниками иных экспозиций относительно небольшие средние размеры как по Каталогу [10], так и в 2002 и 2016–2017 гг. (см. рис. 3, в). Менее всего с 1950 по 2016–17 гг. сократилась площадь ледников северо-восточной (на 25,8%, или 13,5 км²), юго-западной (на 29,4%, или 13,1 км²) и северной (на 29,7%, или 11,1 км²) экспозиций. Для ледников, ориентированных на северо-восток и юго-запад, подобную динамику можно объяснить двумя причинами. Во-первых, это ориентация данных ледников по отношению к влагонесущим воздушным массам, поступающим с Охотского и Берингова морей с запада и востока соответственно. Во-вторых, ледники данных экспозиций характеризуются наибольшими средними размерами в районе исследований (см. рис. 3, в). Кроме того, интенсивность процесса распада ледников юго-западной экспозиции оказалась довольно мала – шести ледникам, зарегистрированным в Каталоге [10], соответствуют восемь ледников в 2016–2017 гг.

Самый интенсивный распад характерен для ледников восточной экспозиции – 27 ледникам, зарегистрированным в Каталоге [10], к 2016–2017 гг. стали соответствовать 58 ледников. При этом их средний размер сократился с 2,60 до 0,78 км². Возможно, это объясняется относительно небольшой долей каровых ледников (около 40%) в данной группе. Наименее подвержены распаду ледники южной экспозиции, число которых с 1950 по 2016–2017 гг. увеличилось с 10 до 11 (распался только один ледник после 2002 г.), что можно объяснить преобладанием (8 из 11) небольших каровых ледников.

В работе [17] в северной части Срединного хребта было идентифицировано 190 ледников, не зарегистрированных в Каталоге [10]. Преимущественно это небольшие ледники – 55 из них имели площадь менее 0,1 км², а площадь ещё 116 находилась в пределах 0,1–0,5 км². Чтобы получить более полное представление об изменениях оледенения северной части Срединного хребта в период с 2002 по 2016–2017 гг., были проанализированы изменения 344 ледников, идентифицированных на снимках ASTER от 18.08.2002 г., и соответствующих им ледников, выявленных на

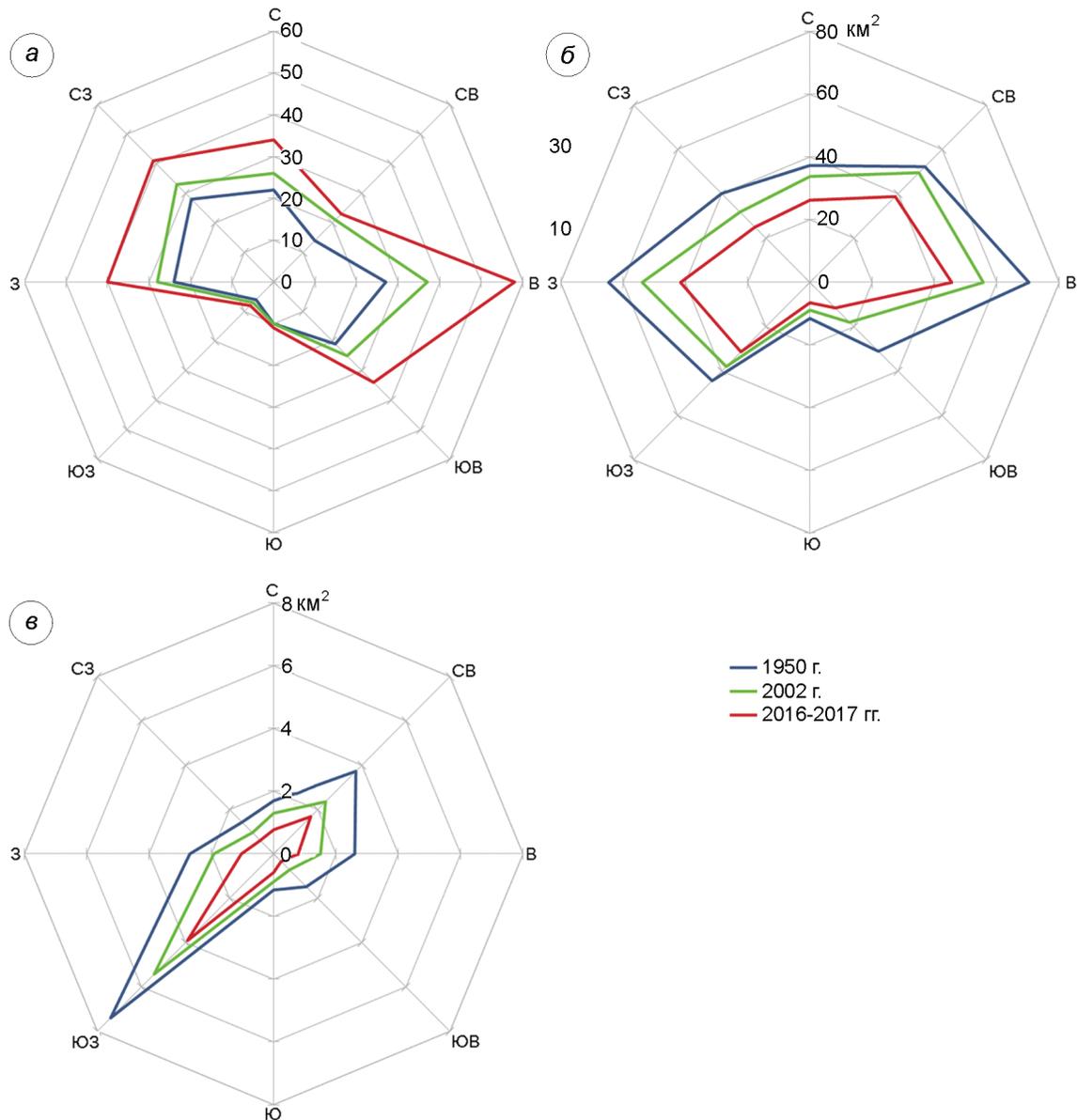


Рис. 3. Изменение числа (а), площади (б) и средних размеров (в) ледников северной части Срединного хребта, зарегистрированных в Каталоге ледников [10], с 1950 по 2016–2017 гг.

Fig. 3. Change in quantity (a), area (b), and average size (c) of glaciers in the northern part of the Middle Range, recorded in the Catalog of glaciers [10], from 1950 to 2016–2017

современных снимках Sentinel-2 (табл. 3). Общее сокращение площади зарегистрированных в работе [17] ледников, идентифицированных на современных спутниковых снимках Sentinel-2, за данный период равно 88,1 км², или 26,0%, что составляет в среднем 5,87 км², или 1,73% исходной площади ледников в год. Из табл. 3 видно, что относительное сокращение площади ледников в районе исследований обратно пропорционально их размерам. Менее всего (на 12,3%) сократились

самые крупные ледники площадью более 5 км². Наибольшее сокращение (на 68,5%) претерпели самые мелкие ледники площадью менее 0,1 км².

Дополнительно проведено исследование сокращения оледенения с 2002 по 2016–2017 гг. по высотным зонам (рис. 4). Большая часть оледенения северной части Срединного хребта (76,6% в 2002 г. и 77,4% в 2016–17 гг.) сосредоточена в высотном диапазоне 1200–1800 м. На эти же высоты приходятся основные потери площади

Таблица 3. Изменение числа и площади ледников северной части Срединного хребта, зарегистрированных в работе [17], с 2002 по 2016–2017 гг.

Размер ледников в 2016–2017 гг., км ²	Число ледников		Площадь ледников, км ²		Изменение площади ледников с 2002 по 2016–2017 гг., км ² /%
	2002 г.	2016–2017 гг.	2002 г.	2016–2017 гг.	
> 5	8	17	128,4±7,1	112,6±3,7	-15,8/-12,3
2–5	16	23	59,1±5,3	46,5±2,7	-12,6/-21,3
1–2	22	34	41,4±4,6	30,2±2,2	-11,2/-27,1
0,5–1	29	43	33,3±3,9	21,1±1,9	-12,2/-36,6
0,1–0,5	154	194	59,8±10,8	35,0±4,9	-24,8/-41,5
< 0,1	115	122	16,8±4,3	5,3±1,4	-11,5/-68,5
<i>Всего</i>	344	433	338,8±36,0	250,7±16,8	-88,1/-26,0

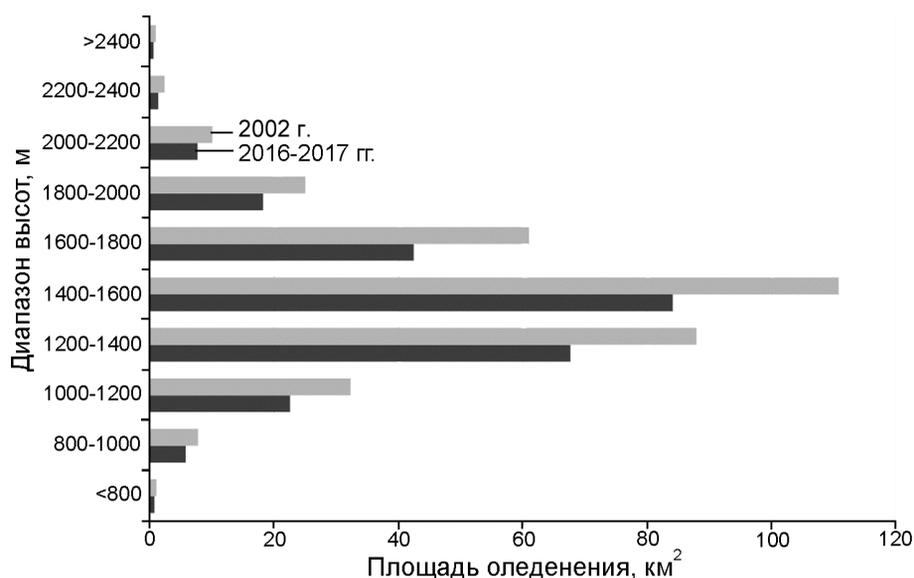


Рис. 4. Высотное распределение площади оледенения северной части Срединного хребта в 2002 и 2016–2017 гг.
Fig. 4. Altitude distribution of glaciation area in the northern part of the Middle Range in 2002 and 2016–2017

оледенения в период с 2002 по 2016–2017 гг. – 65,5 км² (25,2%) при общем сокращении ледников за данный период на 88,1 км². Доля оледенения, расположенного здесь ниже 800 м, составляет около 0,3%. Малая площадь оледенения на высотах выше 2000 м обусловлена меньшими высотами основной части горного массива Острая–Хувхойтун.

Обсуждение результатов

Для определения причин сокращения ледников в северной части Срединного хребта были исследованы климатические изменения, произошедшие здесь в 1950–2018 гг. Для этого анализировались находящиеся в открытом доступе

данные наблюдений на ближайших ГМС с относительно длинными рядами наблюдений – Оссора (3 м над ур. моря) и Ключи (28 м над ур. моря) (см. рис. 1). Анализировались средние летние (с июня по август) температуры приземного слоя воздуха [20] за 1950–2018 гг. и суммы осадков с устранением погрешностей осадкомерных приборов [21] с октября по май (период аккумуляции на ледниках Камчатки) за 1950–2015 гг. для ГМС Ключи и за 1959–2015 гг. для ГМС Оссора. Средние летние температуры воздуха в районе исследований после 2000 г. были существенно выше, чем до 2000 г. (рис. 5, а, б). Их значения для ГМС Ключи с осреднением по пятилетним временным интервалам с 2000 г. не опускались ниже 14 °С, чего не было ни для одного пятилетнего интервала до 2000 г. На ГМС Оссора с середины 2000-х

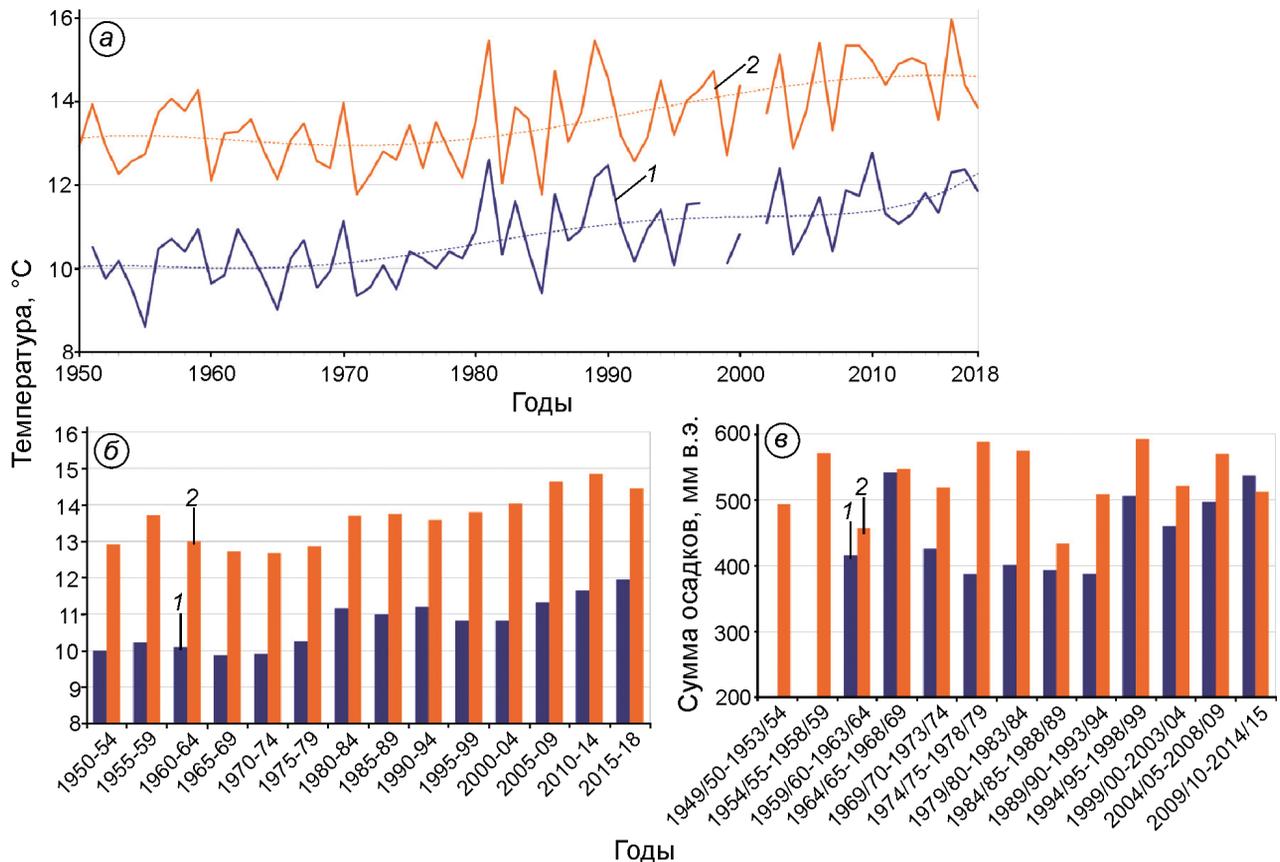


Рис. 5. Средние летние температуры воздуха (а) и их тренды (полином 5-й степени), в том числе с усреднением по пяти годам (б), и суммы осадков с октября по май с усреднением по пяти годам (в) на метеостанциях Оссора (1) и Ключи (2)

Fig. 5. Average summer air temperatures (а) and their trends (polynomial of the 5th degree), including averaging over five years (б), and precipitation from October to May averaged over five years (в) at weather stations Ossora (1) and Kluchi (2)

годов прослеживается существенный рост летних температур воздуха по сравнению с 1980-ми, 1990-ми и началом 2000-х годов.

Дополнительно проанализированы изменения средних летних температур воздуха в период современного потепления (с 1989 г.) по сравнению с базовым периодом 1951–1980 гг. Выбор данных периодов обоснован в работах [3, 26]. На ГМС Ключи и Оссора средние летние температуры воздуха, осреднённые за 1989–2018 гг., по сравнению с 1951–1980 гг. выросли на 1,3 °С. На находящейся на побережье Охотского моря к северо-западу от района исследований ГМС Усть-Воямполка (58°31' с.ш., 159°10' в.д.) средние летние температуры воздуха, осреднённые за 1989–2006 гг., по сравнению с 1951–1980 гг. повысились на 0,6 °С [8]. Осреднённое количество осадков, выпадающих с октября по май, в 1989–2015 гг. по сравнению с 1951–1980 гг. на ГМС Ключи (см.

рис. 5, в) практически не изменилось. Похожая картина наблюдается при сравнении периода 2000–2015 гг. с 1980–1990 гг. (рост на 0,5%). На ГМС Оссора, напротив, наблюдается явный рост количества выпадающих в холодный период осадков, он составил 13,3% за период 1989–2015 гг. по сравнению с 1959–1980 гг. и 19,5% за период 2000–2015 гг. по сравнению с 1980–90-ми годами. На ГМС Усть-Воямполка осреднённые суммы осадков с октября по май за период 1989–2006 гг. были на 20,8% меньше, чем в 1966–1980 гг. [8].

Приведённые данные позволяют сделать вывод о климатических причинах сокращения оледенения северной части Срединного хребта во второй половине XX и начале XXI вв. Главная причина – повышение летних температур воздуха. Увеличение количества выпадающих твёрдых осадков в северо-восточной части района исследований, судя по полученным результатам, не ком-

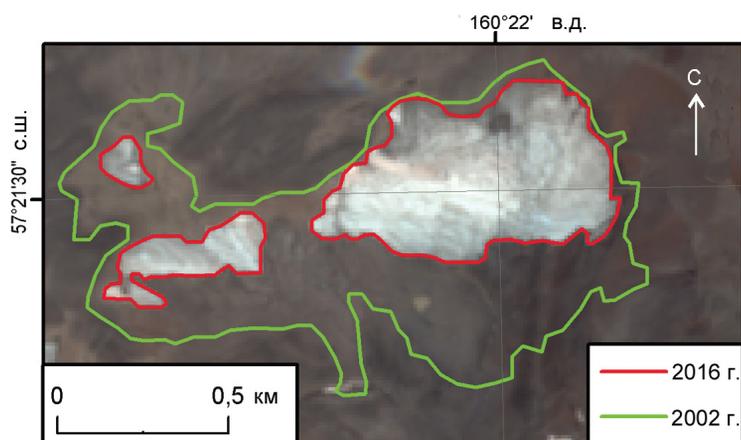


Рис. 6. Ледник № 115 в 2002 и 2016 гг. В подложке – спутниковый снимок Sentinel-2 от 19.08.2016 г.

Fig. 6. Glacier No 115 in 2002 and 2016. On the background – the space imagery Sentinel-2 19.08.2016

пенсирует увеличение летнего таяния. Обращает на себя внимание резкий рост скорости сокращения оледенения здесь в начале XXI в. – с 0,34% площади в год в 1950–2002 гг. до 1,45% площади в год в период с 2002 по 2016–2017 гг. для ледников, зарегистрированных в Каталоге [10]. Он происходил в условиях ускорившегося роста летних температур воздуха и активного процесса распада ледников на фрагменты меньшего размера.

На рис. 6 приведён пример ледника (№ 115), распавшегося в период 2002–2016 гг. на три фрагмента. При этом его площадь сократилась с 0,9 км² в 2002 г. до 0,4 км² в 2016 г., т.е. более чем вдвое. Особенность данного ледника – небольшая вертикальная протяжённость, всего около 200 м. Вероятно, это – основная причина стремительного сокращения его площади в условиях повышения летних температур. Рост летних температур, зафиксированный на ближайших ГМС, мог привести к подъёму границы питания ледника выше его верхней точки, т.е. к практически полному исчезновению его области питания (что видно на рис. 6).

Резкое ускорение процесса распада ледников в начале XXI в. может свидетельствовать о том, что к концу XX в. их нижние части стали истончёнными. Дальнейшее понижение поверхности за счёт абляции, усилившейся в результате повышения летних температур воздуха, привело к масштабному вытаяванию элементов подлёдного рельефа и фрагментации ледников (как на рис. 6). Из-за труднодоступности района исследований это предположение пока не подтверждено опубликованными данными полевых наблюдений. Однако подобные события наблюдались на горных ледниках западной

части Земли Норденшельда (архипелаг Шпицберген), где активизация распада ледников была зафиксирована многолетними полевыми наблюдениями, а скорость сокращения оледенения увеличилась с 0,49% площади в год в период с 1936 по 2002–2004 гг. (0,51% площади в год в период с 1990 по 2002–2004 гг.) до 1,67% площади в год в период с 2002–2004 по 2016–2017 гг. [27], т.е. в 3,4 раза. Близкая к этим значениям скорость сокращения площади оледенения (1,54% в год) установлена на Полярном Урале в период 2000–2018 гг. [28]. Она возросла примерно вдвое по сравнению со скоростью сокращения площади ледников в период 1953–2000 гг.

Похожее увеличение скорости сокращения оледенения наблюдается и в горных районах умеренных широт Северного полушария. Так, на Северо-Чуйском хребте (Алтай) она возросла с 0,37% площади в год в период 1968–2008 гг. до 1,21% площади в год в 2008–2017 гг. [6], т.е. в 3,3 раза. Оледенение Бернских, Пеннинских и Грайанских Альп в 2000–2014 гг. сокращалось со скоростью около 1,8% площади в год [2]. Разница в скорости сокращения площади ледников северной части Срединного хребта, зарегистрированных в Каталоге [10] и в работе [17], составляет 1,45 и 1,73% площади в год соответственно в период с 2002 по 2016–17 гг. и объясняется существенно большей выборкой в работе [17]. Из 190 ледников, не зарегистрированных в Каталоге [10] и учтённых в работе [17], 171 ледник имел площадь, не превышающую 0,5 км². Ледники таких размеров характеризуются наибольшими скоростями сокращения площади, что подтверждается результатами настоящего (см. табл. 2) и предыдущих [3, 4, 17, 28] исследований.

Заключение

Северная часть Срединного хребта – крупнейший район оледенения Камчатки по числу и площади ледников. По состоянию на 2016–2017 гг. его оледенение насчитывало 465 ледников общей площадью около 255 ± 17 км². Наиболее распространённые морфологические типы ледников – каровые, склоновые и карово-долинные (см. табл. 1). По площади преобладают карово-долинные и перемётно-долинные. Большая часть площади ледников района (77,4%) сосредоточена в высотном диапазоне 1200–1800 м над ур. моря.

Анализ изменений ледников со времени каталогизации в середине XX в. показал, что тенденция к сокращению их размеров, установившаяся во второй половине XX в., сохраняется и в настоящее время. Площадь ледников и их средние размеры продолжают сокращаться (см. рис. 3, б, в), а их число увеличивается за счёт распада ледников (см. рис. 3, а). При этом процессы сокращения площади ледников и их фрагментации существенно ускорились с 2002 по 2016–2017 гг. по сравнению с 1950–2002 гг. Так, ледники, зарегистрированные в Каталоге ледников СССР [10], потеряли 62,2 км² площади в 1950–2002 гг. и примерно столько же (63,0 км²)

в период с 2002 по 2016–2017 гг., т.е. такую же площадь, но за период в 3,5 раза меньше.

Относительное сокращение площади ледников обратно пропорционально их размерам. Наименьшее сокращение с 1950 г. претерпели наиболее крупные (более 5 км²) ледники, а наибольшее – небольшие ледники площадью менее 0,1 км² (см. табл. 2). Более всего с 1950 по 2016–2017 гг. сократились ледники юго-восточной и южной экспозиций (см. рис. 3, б), менее всего – северо-восточной, юго-западной и северной. Продолжение и ускорение в XXI в. сокращения ледников северной части Срединного хребта объясняется ростом летних температур воздуха, ускорившимся в начале XXI в. Близкие скорости сокращения оледенения зафиксированы на Северо-Чуйском хребте (Алтай), в Альпах, на Полярном Урале и Земле Норденшельда (архипелаг Шпицберген).

Благодарности. Статья подготовлена по теме Государственного задания № 0148-2019-0004 (AAAA-A19-119022190172-5).

Acknowledgments. The paper includes the results obtained withing the framework of the research project № 0148-2019-0004 (AAAA-A19-119022190172-5).

Литература

1. Paul F., Arnaud Y., Ranzi R., Rott H. European Alps. Chapter 20 in: Global Land Ice Measurements from Space. Chichester, UK: Spriger, Praxis Publishing, 2014. P. 439–463. doi: 10.1007/978-3-540-79818-7.
2. Sommer C., Malz P., Seehaus T.C., Lippl S., Zemp M., Braun M.H. Rapid glacier retreat and downwasting throughout the European Alps in the early 21st century // Nature Communications. 2020. V. 11. № 3209. doi: 10.1038/s41467-020-16818-0.
3. 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.: Т-во научных изданий КМК, 2015. 288 с.
4. Khromova T., Nosenko G., Nikitin S., Muraviev A., Popova V., Chernova L., Kidyayeva V. Changes in the mountain glaciers of continental Russia during the twentieth to twenty-first centuries // Regional Environmental Change. 2019. V. 19. № 5. P. 1229–1247. doi: 10.1007/s10113-018-1446-z.
5. Носенко Г.А., Никитин С.А., Хромова Т.Е. Изменение площади и объёма ледников Горного

References

1. Paul F., Arnaud Y., Ranzi R., Rott H. European Alps. Chapter 20 in: Global Land Ice Measurements from Space. Chichester, UK: Spriger, Praxis Publishing, 2014: 439–463. doi: 10.1007/978-3-540-79818-7.
2. Sommer C., Malz P., Seehaus T.C., Lippl S., Zemp M., Braun M.H. Rapid glacier retreat and downwasting throughout the European Alps in the early 21st century. Nature Communications. 2020, 11 (3209). doi: 10.1038/s41467-020-16818-0.
3. Kotlyakov V.M., Khromova T.Y., Nosenko G.A., Popova V.V., Chernova L.P., Muraviev A.Y., Rototaeva O.V., Nikitin S.A., Zverkova N.M. *Sovremennye izmeneniya lednikov gornyykh raionov Rossii*. Recent glacier changes in mountain regions of Russia. Moscow: KMK Scientific Press, 2015: 288 p. [In Russian].
4. Khromova T., Nosenko G., Nikitin S., Muraviev A., Popova V., Chernova L., Kidyayeva V. Changes in the mountain glaciers of continental Russia during the twentieth to twenty-first centuries. Regional Environmental Change. 2019, 19 (5): 1229–1247. doi: 10.1007/s10113-018-1446-z.
5. Nosenko G.A., Nikitin S.A., Khromova T.E. Glacier area and volume changes in the Mountain Altai (Russia)

- Алтая (Россия) с середины XX в. по данным космических съёмок // *Лёд и Снег*. 2014. № 2 (126). С. 5–13. doi: 10.15356/2076-6734-2014-2-5-13.
6. *Торопов П.А., Алешина М.А., Носенко Г.А., Хромова Т.Е., Никитин С.А.* Современная деградация горного оледенения Алтая, её последствия и возможные причины // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 5. С. 118–130.
 7. *Осинов Э.Ю., Ашметьев А.Ю., Осипова О.П., Клевцов Е.В.* Новая инвентаризация ледников в юго-восточной части Восточного Саяна // *Лёд и Снег*. 2013. № 3 (123). С. 45–54. doi: 10.15356/2076-6734-2013-3-45-54.
 8. *Муравьев А.Я.* Колебания ледников Камчатки во второй половине XX – начале XXI вв.: Автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. М.: Ин-т географии РАН, 2017. 23 с.
 9. *Fountain A.G., Basagic H.J. IV, Cannon C., Devisser M., Hoffman M.J., Kargel J.S., Leonard G.J., Thorneykroft K., Wilson S.* Glaciers and perennial snowfields of the U.S. Cordillera // *Global Land Ice Measurements from Space*. Chichester, UK: Spriger, Praxis Publishing, 2014. P. 385–408. doi: 10.1007/978-3-540-79818-7.
 10. *Виноградов В.Н.* Каталог ледников СССР. Т. 20. Ч. 2–4. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 75 с.
 11. *Муравьев А.Я., Муравьев Я.Д.* Колебания ледников Ключевской группы вулканов во второй половине XX – начале XXI века // *Лёд и Снег*. 2016. Т. 56. № 4. С. 480–492. doi: 10.15356/2076-6734-2016-4.
 12. *Виноградов В.Н., Огородов Н.В.* Вулканы и ледники северной части Срединного хребта // *Вопросы географии Камчатки*. 1966. № 4. С. 70–85.
 13. Отчет Института вулканологии АН СССР «Динамика современного оледенения и взаимодействие с вулканизмом» / Руководитель темы и отв. исполнитель В.Н. Виноградов. Петропавловск-Камчатский: Ин-т вулканологии АН СССР, 1982. 333 с.
 14. RGI Consortium (2017). Randolph Glacier Inventory – A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0: Technical Report, Global Land Ice Measurements from Space, Colorado, USA. Digital Media. doi: 10.7265/N5-RGI-60.
 15. *Кондратиук В.И.* Климат Камчатки. М.: Гидрометеиздат, 1974. 204 с.
 16. Атлас снежно-ледовых ресурсов мира. Т. 1. М: изд. РАН, 1997. 392 с.
 17. *Муравьев А.Я., Носенко Г.А.* Изменения оледенения северной части Срединного хребта на Камчатке во второй половине XX в. // *Лёд и Снег*. 2013. № 2 (122). С. 5–11. doi: 10.15356/2076-6734-2013-2-5-11.
 18. *Porter C., Morin P., Howat I., Noh M.-J., Bates B., Peterman K., Keeseey S., Schlenk M., Gardiner J., Tomko K., Willis M., Kelleher C., Cloutier M., Husby E., Foga S., Nakamura H., Platson M., Wethington M.Jr.* since the mid-twentieth century from space imagery data. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2014, 2 (126): 5–13. doi: 10.15356/2076-6734-2014-2-5-13. [In Russian].
 6. *Toropov P.A., Aleshina M.A., Nosenko G.A., Khromova T.Y., Nikitin S.A.* Modern Deglaciation of the Altai Mountains: Effects and Possible Causes. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2020, 45 (5): 368–376. doi: 10.3103/S1068373920050088.
 7. *Osipov E.Y., Ashmetiev A.Y., Osipova O.P., Klevtsov E.V.* New inventory of glaciers in southeastern part of the Eastern Sayan Mountains. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2013, 3 (123): 45–54. doi: 10.15356/2076-6734-2013-3-45-54. [In Russian].
 8. *Muraviev A.Ya.* *Kolebaniya lednikov Kamchatki vo vtoroy polovine XX – nachale XXI vekov*. Fluctuations in the glaciers of Kamchatka in the second half of the XX – the beginning of the XXI century. PhD-thesis. Moscow: Institute of Geography RAS, 2017: 23 p. [In Russian].
 9. *Fountain A.G., Basagic H.J. IV, Cannon C., Devisser M., Hoffman M.J., Kargel J.S., Leonard G.J., Thorneykroft K., Wilson S.* Glaciers and perennial snowfields of the U.S. Cordillera. *Global Land Ice Measurements from Space*. Chichester, UK: Spriger, Praxis Publishing, 2014: 385–408. doi: 10.1007/978-3-540-79818-7.
 10. *Vinogradov V.N.* *Katalog lednikov SSSR*. USSR Glacier Inventory. V. 20. Parts 2–4. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1968: 75 p. [In Russian].
 11. *Muraviev A. Ya., Muraviev Ya.D.* Fluctuations of glaciers of the Klyuchevskaya group of volcanoes in the 20th –21st centuries. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2016, 56 (4): 480–492. doi: 10.15356/2076-6734-2016-4. [In Russian].
 12. *Vinogradov V.N., Ogorodov N.V.* Volcanoes and glaciers northern part of the Central Range. *Voprosy Geographii Kamchatki*. Geographical issues of Kamchatka, 1966, 4: 70–85. [In Russian].
 13. *Otchot Instituta vulkanologii AN SSSR «Dinamika sovremenogo oledneniya i vzaimodeistvie s vulkanizmom»*. Report of the Institute of Volcanology, USSR Academy of Sciences «Dynamics of modern glaciation and interaction with volcanism». Theme Leader and Executive V.N. Vinogradov. Petropavlovsk-Kamchatsky, 1982: 333 p. [In Russian].
 14. RGI Consortium (2017). Randolph Glacier Inventory – A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0: Technical Report, Global Land Ice Measurements from Space, Colorado, USA. Digital Media. doi: 10.7265/N5-RGI-60.
 15. *Kondratiuk V.I.* *Klimat Kamchatki*. Climate of Kamchatka. Moscow: Hydrometeoizdat, 1974: 204 p. [In Russian].
 16. World Atlas of Snow and Ice Resources. V. 1. Moscow: Russian Academy of Sciences, 1997: 392 p.
 17. *Muraviev A. Ya, Nosenko G.A.* Glaciation change in the northern part of the Middle Range on the Kamchatka Peninsula in the second half of the XX century // *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2013, 2 (122): 5–11. doi: 10.15356/2076-6734-2013-2-5-11. [In Russian].
 18. *Porter C., Morin P., Howat I., Noh M.-J., Bates B., Peterman K., Keeseey S., Schlenk M., Gardiner J., Tomko K., Wil-*

- Williamson C., Bauer G., Enos J., Arnold G., Kramer W., Becker P., Doshi A., D'Souza C., Cummins P., Laurier F., Bojesen M. 2018, «ArcticDEM», Harvard Dataverse, V1. doi: 10.7910/DVN/OHHUKH. Архив данных от 29.08.2018–30.08.2018.
19. NASA/METI/AIST/Japan Spacesystems, and U.S./Japan. ASTER Science Team. ASTER Global Digital Elevation Model V003. 2018, distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC. doi: 10.5067/ASTER/ASTGTM.003.
 20. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швец Н.В. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621485. <http://meteo.ru/data/156-temperature>.
 21. Электронный ресурс: <https://meteo.ru/data/506-mesyachnye-summy-osadkov-s-ustraneniem-sistematicheskikh-pogreshnostej-osadkomernykh-priborov> (дата обращения 28.03.2020 г.).
 22. Raup B., Khalsa S.J.S. GLIMS data analysis tutorial. 2010. 15 p. http://www.glims.org/MapsAndDocs/asets/GLIMS_Analysis_Tutorial_a4.pdf
 23. SENTINEL 2 Data Quality Report. ESA. Ref. S2-PDGS-MPC-DQR. 2020. Is. 51. 50 p. https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_L1C_Data_Quality_Report
 24. Руководство по составлению Каталога ледников СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 154 с.
 25. Гляциологический словарь / Под ред. В.М. Котлякова. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 528 с.
 26. Шмакин А.Б., Попова В.В. Динамика климатических экстремумов в Северной Евразии в конце XX века // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 2. С. 157–166.
 27. Чернов Р.А., Муравьев А.Я. Современные изменения площади ледников западной части Земли Норденшельда (архипелаг Шпицберген) // Лёд и Снег. 2018. Т. 58. № 4. С. 462–472. doi: 10.15356/2076-6734-2018-4-462-472.
 28. Носенко Г.А., Муравьев А.Я., Иванов М.Н., Синицкий А.И., Кобелев В.О., Никитин С.А. Реакция ледников Полярного Урала на современные изменения климата // Лёд и Снег. 2020. Т. 60. № 1. С. 42–57. doi: 10.31857/S2076673420010022.
 - lis M., Kelleher C., Cloutier M., Husby E., Foga S., Nakamura H., Platson M., Wethington M.Jr., Williamson C., Bauer G., Enos J., Arnold G., Kramer W., Becker P., Doshi A., D'Souza C., Cummins P., Laurier F., Bojesen M. 2018, «ArcticDEM», Harvard Dataverse, V1. doi: 10.7910/DVN/OHHUKH. Archive of data from 29.08.2018–30.08.2018.
 19. NASA/METI/AIST/Japan Spacesystems, and U.S./Japan. ASTER Science Team. ASTER Global Digital Elevation Model V003. 2018, distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC. doi: 10.5067/ASTER/ASTGTM.003.
 20. Buligina O.N., Razuvaev V.N., Trofimenko L.T., Shvets N.V. *Opisanie massiva dannykh srednemesyachnoi temperatury vozdukh na stantsiyakh Rossii*. Description of the data array of average monthly air temperature at stations in Russia. Certificate of state registration of the database № 2014621485. <http://meteo.ru/data/156-temperature>.
 21. <https://meteo.ru/data/506-mesyachnye-summy-osadkov-s-ustraneniem-sistematicheskikh-pogreshnostej-osadkomernykh-priborov> (last visited 28.03.2020).
 22. Raup B., Khalsa S.J.S. GLIMS data analysis tutorial. 2010: 15 p. http://www.glims.org/MapsAndDocs/asets/GLIMS_Analysis_Tutorial_a4.pdf.
 23. SENTINEL 2 Data Quality Report. ESA. Ref. S2-PDGS-MPC-DQR. 2020. Is. 51: 50 p. https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_L1C_Data_Quality_Report.
 24. *Rukovodstvo po sostavleniyu Kataloga lednikov SSSR*. USSR Glacier Inventory guide. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1966: 154 p. [In Russian].
 25. *Glyachiologichesky slovar'*. Glaciological glossary. Ed. by V.M. Kotlyakov. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1984: 528 p. [In Russian].
 26. Shmakin A.B., Popova V.V. Dynamics of climate extremes in Northern Eurasia in the late 20th century. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2006, 42 (2): 138–147. doi: 10.1134/S0001433806020022.
 27. Chernov R.A., Muraviev A.Y. Contemporary changes in the area of glaciers in the western part of the Nordenskjold Land (Svalbard). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2018, 58 (4): 462–472. doi: 10.15356/2076-6734-2018-4-462-472. [In Russian].
 28. Nosenko G.A., Muraviev A.Y., Ivanov M.N., Sinitsky A.I., Koblelev V.O., Nikitin S.A. Response of the Polar Urals glaciers to the modern climate changes. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2020, 60 (1): 42–57. doi: 10.31857/S2076673420010022. [In Russian].