

# Ледники и ледниковые покровы

УДК 551.324

doi: 10.31857/S2076673420030043

## Распределение и морфология современных ледников Камчатки

© 2019 г. А.Я. Муравьев

Институт географии РАН, Москва, Россия  
anton-yar@rambler.ru

## Distribution and morphology of present-day glaciers on Kamchatka

A.Ya. Muraviev

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia  
anton-yar@rambler.ru

Received July 17, 2019 / Revised October 16, 2019 / Accepted December 10, 2019

Keywords: *area, aspect, Kamchatka, morphological types, mountain glaciers.*

### Summary

The current glacierization of the Kamchatka Peninsula includes 643 glaciers with a total area  $769.48 \pm 48.34 \text{ km}^2$ . A variety of combinations of macro-relief factors, climate and volcanism caused irregular distribution of glaciers on the Peninsula, as well as the great variability of its characteristics in different areas. In quantitative terms, the prevailing glaciers here are the corrie (31.3%) and corrie-valley (12.8%) ones, but the largest areas are occupied by the transection-valley (26.6% or  $204.42 \pm 7.56 \text{ km}^2$ ) and the corrie-valley (16.5% or  $126.78 \pm 9.77 \text{ km}^2$ ) glaciers. The average area of the Kamchatka's glaciers is  $1.2 \text{ km}^2$ , and it varies from  $0.7 \text{ km}^2$  in non-volcanic regions to  $2.87 \text{ km}^2$  in zones of active volcanism. The part of the largest ( $> 5 \text{ km}^2$ ) glaciers in the total number of them and the total area is maximal (10.9 and 67.1%, respectively) in regions of active volcanism, and it is minimal (2.2 and 21.6%) in non-volcanic territories. As for the small glaciers ( $0.1\text{--}0.5 \text{ km}^2$ ), the proportion of them in the total number and area is maximal (55.1 and 18.7%, respectively) in non-volcanic regions, and minimal (20.7 and 1.5%) in regions of active volcanism. The Kamchatka glacierization is characterized by various morphological types of glaciers. The transaction-valley glaciers cover the largest areas in regions of both the active volcanism (33.7% or  $89.03 \pm 2.26 \text{ km}^2$ ) and in non-volcanic ones (31.8% or  $41.45 \pm 2.04 \text{ km}^2$ ). In the regions of Quaternary volcanism, the dominating in areas are the corrie-valley glaciers (24.3% or  $91.09 \pm 7.04 \text{ km}^2$ ). The regions of active volcanism are characterized by the greatest variety of morphological types of glaciers. The largest part of the glaciation area of Kamchatka falls on the glaciers of the Western (24.7%), South-Western (22.3%) and Eastern (20%) exposures. But the glaciers of the Western (23%), North-Western (20.7%) and Eastern (15.1%) exposures are also predominant by quantity. The greatest vertical extent and average heights are characteristic of glaciers in areas of active volcanism, while the smallest ones occur in non-volcanic areas.

Citation: Muraviev A.Ya. Distribution and morphology of present-day glaciers on Kamchatka. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2020. 60 (3): 325–342. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673420030043.

Поступила 17 июля 2019 г. / После доработки 16 октября 2019 г. / Принята к печати 10 декабря 2019 г.

**Ключевые слова:** *горные ледники, Камчатка, морфологические типы, площадь, экспозиция.*

С использованием современных спутниковых снимков и цифровых моделей рельефа определены морфологические типы и экспозиция ледников Камчатки по состоянию на 2002–2015 гг. Выявлены преобладающие по числу и площади морфологические типы ледников, распределение оледенения по склонам разных экспозиций, изменение размеров ледников и их высотного положения.

### Введение

Систематические работы по изучению современного оледенения Камчатки начались относительно недавно — с 1958 г. До этого гляциологические данные собирались при геологических,

вулканологических, ботанических и иных исследованиях [1]. Важнейшая веха в этих работах — издание в 1968 г. 20-го тома Каталога ледников СССР [2], содержащего сведения о линейных размерах и площади каждого ледника Камчатки, его положении на местности по отношению

## Район исследований

к бассейнам рек и вулканам (в схематическом виде), а также данные о морфологическом типе, экспозиции, высотном положении и ряде других характеристик по состоянию на 1950-е – первую половину 1960-х годов (в зависимости от конкретного района). Практически все последующие работы на ледниках Камчатки в той или иной мере использовали данные этого Каталога.

В 2010-х годах появился ряд публикаций с новыми сведениями о современных параметрах оледенения отдельных районов Камчатки, среди которых: Ключевская группа вулканов [3, 4], северная часть Срединного хребта [5], Авачинская группа вулканов [6], Кроноцкий полуостров и вулканический массив Алней-Чашаконджа [7], а также о Камчатке в целом [1, 8]. Все они содержат сведения о площади ледников – наиболее наглядном параметре оледенения, получаемом, как правило, при анализе данных дистанционного зондирования Земли, и её изменениях во времени. Помимо площадных параметров современного оледенения, в некоторых из перечисленных работ есть сведения об изменении пространственного положения фронтов ледников и их высотного положения (высоты низшей и высшей точек ледников и др.). При этом информация о морфологическом типе и экспозиции ледников, как правило, приводится со ссылкой на Каталог ледников СССР, т.е. по состоянию на середину XX в.

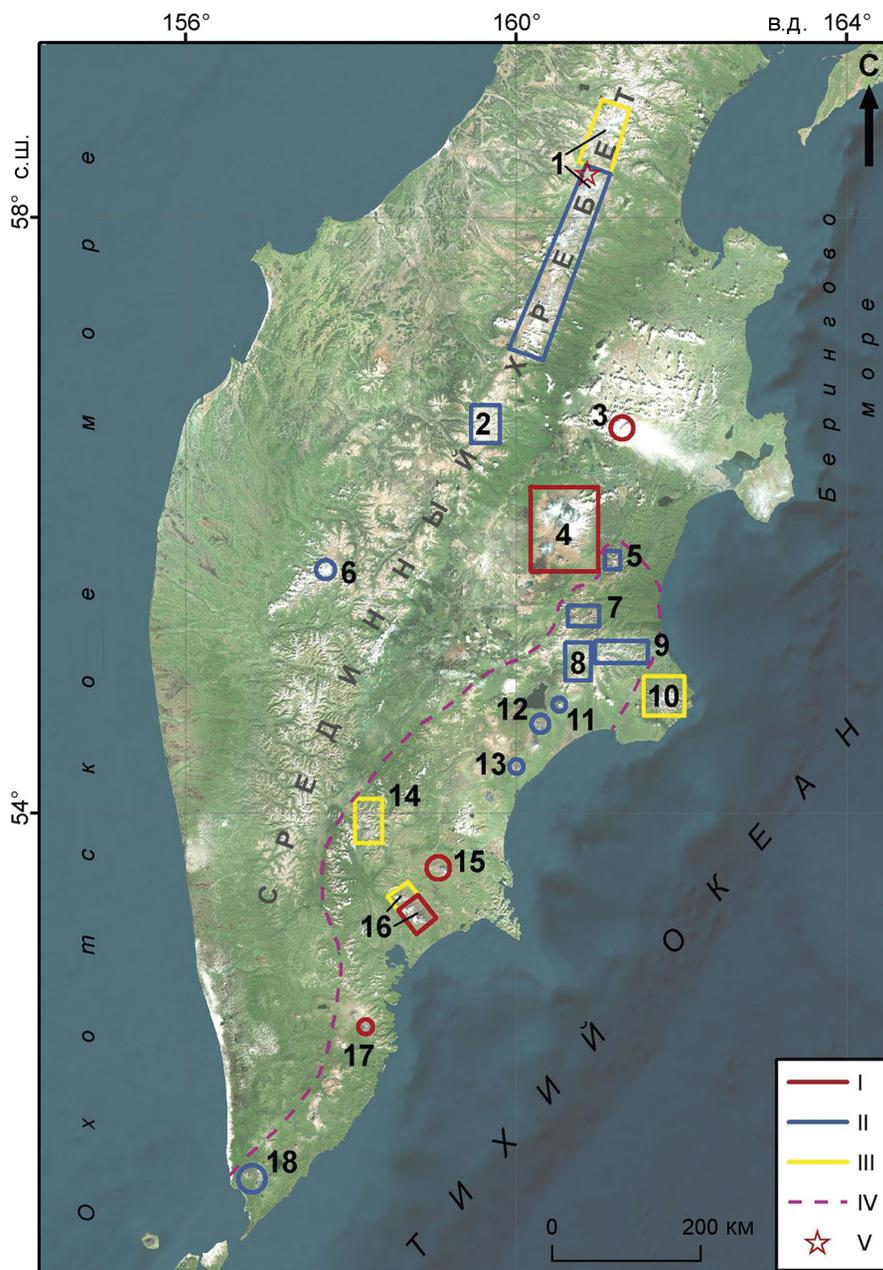
В связи с этим возникла потребность в обновлении знаний о морфологии и экспозиции ледников Камчатки. Во-первых, со времени каталогизации было обнаружено большое число ледников (190 в северной части Срединного хребта по данным работы [5]), не зарегистрированных в Каталоге. Во-вторых, в случаях распада ледников возникающие ледники меньшего размера могут отличаться от исходного ледника по морфологическому типу и экспозиции. В-третьих, со времени каталогизации морфологический тип ряда ледников изменился. Например, некоторые карово-долинные ледники сократились в размерах и трансформировались в каровые. В-четвёртых, изменение пространственных границ и поверхности ледников может приводить к изменению их экспозиции.

Задача настоящей работы – анализ особенностей современного распределения ледников Камчатки в целом и в некоторых районах полуострова.

Крупнейшее горное сооружение Камчатки – *Срединный хребет*, простирающийся практически через весь полуостров в направлении с северо-востока на юго-запад (рис. 1) и представляющий собой цепь вулканов высотой 1700–2600 м. В центральной части Срединного хребта расположен крупный обособленный вулканический массив – Ичинский вулкан (3621 м). Наибольшие высоты, кроме Ичинского вулкана, характерны для массива Острая-Хувхойтун, расположенного в северной части хребта. Массив Острая-Хувхойтун – наиболее северный участок Срединного хребта, где четвертичный вулканизм наложил отпечаток на облик рельефа [2]. Помимо разрушенных вулканических построек, в этом районе встречаются многочисленные свежие, незадернованные лавовые потоки, свидетельствующие об относительно недавней вулканической деятельности. К югу от массива Острая-Хувхойтун, до вулканического массива Алней-Чашаконджа, Срединный хребет характеризуется среднегорным сглаженным рельефом.

Вдоль восточного побережья параллельно Срединному хребту Камчатки простирается *Восточный хребет*, отделённый от него Центральной Камчатской депрессией и состоящий из ряда горных хребтов меньшего размера, вытянутых в северо-восточном направлении. В северной части Центральной Камчатской депрессии расположено крупное вулканическое плато высотой 1000–1100 м, которое занимает Ключевская группа вулканов, а к северо-востоку от неё расположен крупный действующий вулкан Шивелуч (3307 м). Между Восточным хребтом и побережьем Тихого океана находится восточная вулканическая область, образованная вулканическими плоскогорьями с расположенными на них вулканами и их группами [1]. В южной части Камчатки, между Срединным хребтом и побережьем Тихого океана, расположена южная вулканическая область, сформированная отдельными лавовыми плато с вулканическими постройками. На восточном побережье Камчатки (*Кроноцкий полуостров*) находится низкогорный Кроноцкий хребет (высшая точка 1324 м).

Северные и центральные районы Срединного хребта, крупные вулканические постройки и их группы, а также ряд хребтов юго-восточной Камчатки представляют собой центры совре-



**Рис. 1.** Районы оледенения Камчатки:

1 – северная часть Срединного хребта; 2 – вулканический массив Алней-Чашаконджа; 3 – вулкан Шивелуч; 4 – Ключевская группа вулканов; 5 – вулкан Шиш; 6 – Ичинский вулкан; 7 – хр. Тумрок; 8 – хр. Гамчен, вулканы Высокий и Гамчен; 9 – Чажминский хребет; 10 – Кроноцкий полуостров; 11 – вулкан Кроноцкий; 12 – вулкан Крашенинникова; 13 – вулкан Большой Семячик; 14 – Валагинский и Ганальский хребты; 15 – вулкан Жупановский; 16 – Авачинская группа вулканов; 17 – вулкан Мутновский; 18 – вулканы Камбальный и Кошелева.

Цветом показаны типы районов оледенения Камчатки: I – районы активного вулканизма; II – районы четвертичного вулканизма; III – невулканические районы; IV – граница Юго-Восточной Камчатки; V – вулкан Подснежный (1598 м)

**Fig. 1.** Glaciation areas of Kamchatka:

1 – the northern part of the Middle range; 2 – Alney-Chashakondzha volcanic massif; 3 – Shiveluch volcano; 4 – Klyuchevskaya group of volcanoes; 5 – Shish volcano; 6 – Ichinsky volcano; 7 – Tumrok range; 8 – Gamchen range, Visoky and Gamchen volcanoes; 9 – Chashminsky range; 10 – Kronotsky peninsula; 11 – Kronotsky volcano; 12 – Krasheninnikova volcano; 13 – Bolshoi Semyachik volcano; 14 – Valaginsky and Ganalsky ranges; 15 – Shupanovsky volcano; 16 – Avachinskaya group of volcanoes; 17 – Mutnovsky volcano; 18 – Kambalny and Kosheleva volcanoes.

Types of glaciation areas of the Kamchatka: I – areas of active volcanism; II – areas of quaternary volcanism; III – non-volcanic areas; IV – border of Southeastern Kamchatka; V – Podsneshny volcano (1598 m)

менного оледенения (см. рис. 1). Сочетания форм макрорельефа, климатических характеристик и наличия (или отсутствия) современной вулканической активности привели к большому разнообразию морфологических типов ледников и их режимных характеристик в разных районах Камчатки, а также к неравномерному распределению оледенения по территории полуострова [1]. По данным работы [9], на Камчатке, относящейся к северному звену Курило-Камчатской островной дуги, расположено 29 действующих вулканов. Наиболее активный из них – стратовулкан Ключевской (около 4750 м) – самый высокий из действующих вулканов Европы и Азии.

Районы и узлы оледенения Камчатки можно разделить на три типа, выделенные авторами работ [2, 10]: районы активного вулканизма; четвертичного вулканизма; невулканические (см. рис. 1). Эти типы гляциологических районов существенно различаются степенью разрушенности форм макрорельефа, абсолютными высотами и наличием (или отсутствием) современной вулканической активности.

Ледники районов *активного вулканизма* расположены главным образом на крупных вулканических постройках и часто занимают отрицательные формы вулканического рельефа: кратеры, кальдеры, барранкосы, атрио, взрывные и обвальные цирки. Для этих районов характерно распространение специфических типов ледников, которых нет в других типах ледниковых районов. Крупнейший район активного вулканизма и второй по размеру район оледенения на Камчатке – Ключевская группа вулканов (№ 4 на рис. 1).

Районы *четвертичного вулканизма* характеризуются существенно большей степенью разрушения форм макрорельефа. На склонах многочисленных потухших вулканов, подвергнувшихся воздействию верхнечетвертичного оледенения, находится большое число трогов и каров. Эти районы имеют меньшие абсолютные высоты, чем районы активного вулканизма. Разрушенные вулканические постройки часто опознают по периклинальному залеганию вулканических пород [11] и радиальной гидрографической сети (например, вулканы Шиш и Тумрок). Крупнейший район четвертичного вулканизма и первый по площади район оледенения на Камчатке – северная часть Срединного хребта к югу от вулкана Подснежный (1598 м) (см. № 1 на рис. 1).

*Невулканические районы* отличаются наименьшими среди районов оледенения Камчатки абсолютными высотами. К таким районам оледенения Камчатки относятся: северная часть Срединного хребта к северу от вулкана Подснежный (1598 м) (см. № 1 на рис. 1); Кроноцкий полуостров (№ 10 на рис. 1); хребты Валагинский и Ганальский (№ 14 на рис. 1); Пиначевский хребет, расположенный на северо-западе Авачинской группы вулканов (см. № 16 на рис. 1).

Климат Камчатки зависит от особенностей процессов циркуляции атмосферы над Охотским морем и северной частью Тихого океана. Зимой тепляющее влияние Тихого океана определяет здесь относительно высокую среднюю годовую температуру воздуха, изменяющуюся от  $-10 \div -7$  °С на севере полуострова до 2 °С в прибрежных районах юго-востока [12]. Климатические условия в районах Камчатки существенно различны [13, 14].

### Данные и методы

В настоящем исследовании использованы: а) данные о пространственном положении границ ледников Камчатки и их площадях из работы [1] в виде полигональных «shapefile» в проекции UTM (зона 57N) на эллипсоиде WGS 1984; б) цифровая модель рельефа Arctic DEM v3.0 [15]; в) цифровая модель рельефа ASTER GDEM2; г) данные о пространственных границах ледников и их площадных характеристиках в начале XXI в. (2002–2015 гг. в зависимости от района) из работы [1], полученные при дешифрировании спутниковых снимков ASTER, Landsat (сенсор OLI\_TIRS), WorldView-2, GeoEye-1 и IKONOS. Пространственное разрешение спутниковых снимков – от 2 м (в мультиспектральном режиме) до 15 м. Единственное отличие от данных работы [1] заключается в пересчёте погрешностей площади ледников северной части Срединного хребта (район № 1 на рис. 1) с использованием методики, по которой были рассчитаны погрешности площадей ледников других районов оледенения Камчатки в работе [1], вместо методики работы [5].

Цифровые модели рельефа (далее ЦМР) использованы для определения высотного положения и экспозиции ледников. Положение высших и низших точек ледников, а также их средняя и медианная (высота 50%-го распределения площадей)

высоты определялись с помощью инструментария программного пакета QGIS с точностью (округлением) до 10 м. Экспозиция ледников находилась с помощью автоматизированного анализа растровых изображений экспозиции поверхности, созданных из ЦМР, в QGIS и ArcGIS. Полученные данные об экспозиции представляют собой медианное значение ориентации (азимут в градусах) всех ячеек ЦМР в пределах границ ледника. Подобный подход отличается существенно меньшей субъективностью, чем метод определения экспозиции ледников, основанный на экспертной оценке.

В исследовании использована мозаика ЦМР Arctic DEM версии 3.0 с пространственным разрешением 2 м. Характеристики её вертикальной и горизонтальной точности, по информации разработчиков [15], не были проверены. Покрытие мозаики ArcticDEM v3.0 на ледниковые районы Камчатки сформировано по результатам обработки спутниковых снимков WorldView-1, WorldView-2, WorldView-3 и GeoEye 2010–2017 гг. (в основном 2013–2016 гг.), точность пространственной привязки которых без использования наземных контрольных точек находится в пределах 4, 3,5, 3,5 и 3 м соответственно. В результате вертикальная точность Arctic DEM V 3.0 должна существенно превосходить точность ASTER GDEM2, находящуюся в пределах 17 м с уровнем доверия 95% [16], и SRTM4, находящуюся в пределах 10 м с уровнем доверия 90% [17]. ЦМР ASTER GDEM2 характеризуется вертикальной точностью 17 м с уровнем доверия 95% [16]. Она использована для северной части Срединного хребта, а также для отдельных ледников других районов оледенения Камчатки, не покрытых данными Arctic DEM v3.0.

Морфологические типы ледников определялись на основе классификации из работы [18], дополненной материалами исследования [19] и классификациями из работ [2, 20] для ледников вулканических районов. В работе учитывались ледники площадью менее 0,1 км<sup>2</sup>, которые не регистрировались в Каталоге [2].

### Результаты исследования

Современное оледенение Камчатки, состоящее из 643 ледников общей площадью 769,48±48,34 км<sup>2</sup>, приурочено к крупнейшим горным хребтам полуострова, а также к крупным

обособленным вулканическим постройкам и их группам (см. рис. 1 и табл. 1). Крупнейшие районы оледенения Камчатки – северная часть Срединного хребта и Ключевская группа вулканов, в пределах которых сосредоточено 71,4% всей площади оледенения полуострова. В центральной части Срединного хребта расположено два обособленных района оледенения – вулканический массив Алней-Чашаконджа (№ 2 на рис. 1) и Ичинский вулкан (№ 6 на рис. 1). Южнее Ичинского вулкана (3621 м) ледники на Срединном хребте не обнаружены, что связано с уменьшением абсолютных высот хребта в его южной части.

К низкогорному Кроноцкому хребту (№ 10 на рис. 1), расположенному на Кроноцком полуострове в центральной части восточного побережья Камчатки, приурочен третий по площади район оледенения Камчатки (см. табл. 1). Это, несмотря на относительно малые абсолютные высоты (высшая точка 1324 м), – следствие особенностей сложившихся в данном районе климатических условий, среди которых: большое количество твёрдых атмосферных осадков (3000 мм и более в ледниковой зоне [21]) и пасмурное холодное лето.

Оледенение Юго-Восточной Камчатки приурочено к отдельным вулканическим постройкам (№ 5, 11–13, 15, 17, 18 на рис. 1), Авачинской группе вулканов (№ 16 на рис. 1), а также относительно небольшим горным хребтам (№ 7–9, 14 на рис. 1) и содержит 92 ледника общей площадью 55,77±3,78 км<sup>2</sup>. За исключением Авачинской группы вулканов, ледниковые районы Юго-Восточной Камчатки имеют относительно небольшие размеры оледенения – менее 10 км<sup>2</sup> по отдельности (см. табл. 1).

На Камчатке наблюдается значительное разнообразие морфологических типов ледников (табл. 2). В количественном отношении преобладают каровые и карово-долинные ледники. Однако наибольшие площади заняты перемётно-долинными ледниками, к которым относятся крупнейшие ледники Камчатки – Эрмана (42,33±1,16 км<sup>2</sup>) и Богдановича (42,26±0,85 км<sup>2</sup>) [3], расположенные в Ключевской группе вулканов. Наибольшие размеры на Камчатке характерны для перемётно-долинных, сложных долинных и кальдерно-долинных ледников, наименьшие – для висячих, склоновых и присклоновых.

Таблица 1. Распределение ледников по районам и узлам оледенения Камчатки

Номер района на рис. 1	Районы и узлы оледенения Камчатки	Число ледников	Площадь ледников, км <sup>2</sup>	Средний размер ледника, км <sup>2</sup>	Годы, на которые приведены данные
<b>Районы активного вулканизма</b>					
3	Вулкан Шивелуч	8	16,62±0,84	2,08	2013
4	Ключевская группа вулканов	40	214,33±6,56	5,36	2010–2015
15	Вулкан Жупановский	12	8,58±0,60	0,72	2011–2013
16	Авачинская группа вулканов: вулканы Авачинский, Козельский и Корякский	19	21,00±1,25	1,11	2012–2013
17	Вулкан Мутновский	13	3,55±0,14	0,27	2012
<b>Итого</b>		92	264,08±9,39	2,87	–
<b>Районы четвертичного вулканизма</b>					
1	Северная часть Срединного хребта южнее вулкана Подснежный (1598 м)	266	278,77±21,88	1,05	2002
2	Вулканический массив Алней-Чашаконджа	45	50,31±3,44	1,12	2010
5	Вулкан Шиш	5	2,16±0,25	0,43	2013
6	Ичинский вулкан	20	29,03±1,41	1,45	2011–2014
7	Хр. Тумрок	3	3,22±0,15	1,07	2013
8	Хр. Гамчен, вулканы Гамчен и Высокий	12	3,54±0,36	0,30	2011–2014
9	Чажминский хребет	2	0,39±0,05	0,20	2014
11	Вулкан Кроноцкий	3	3,67±0,24	1,23	2011
12	Вулкан Крашенинникова	4	0,57±0,10	0,14	2011–2013
13	Вулкан Большой Семячик	2	0,82±0,02	0,41	2011
18	Вулканы Камбальный и Кошелева	4	2,60±0,30	0,65	2015
<b>Итого</b>		366	375,09±28,20	1,02	–
<b>Невулканические районы</b>					
1	Северная часть Срединного хребта севернее вулкана Подснежный (1598 м)	122	56,54±5,91	0,46	2002
10	Кроноцкий полуостров	50	68,1±4,52	1,36	2013
14	Валагинский хребет	5	4,24±0,15	0,85	2007
16	Авачинская группа вулканов: Пиначевский хребет	8	1,43±0,17	0,18	2012–2013
<b>Итого</b>		185	130,31±10,76	0,70	–
<b>Всего</b>		643	769,48±48,34	1,20	2002–2015

Отметим, что сложные долинные, склоновые и присклоновые ледники в Каталоге ледников СССР на территорию Камчатки [2] не регистрировались, как и ледники площадью менее 0,1 км<sup>2</sup>. Единственный ледник типа ледяной пояс (Ключевской (№ 170)), представленный в Каталоге как отдельное целостное образование, в данной работе не рассматривался по причинам, сформулированным в публикации [3]: «Фактически это не ледник в классическом понимании данного термина, а сложный вулканогляциальный комплекс, служащий источником подпитки ледников Ключевского вулкана». Северо-восточная часть ледяного пояса, относя-

щаяся к бассейнам рек Сопочная и Каменистая, в Каталоге [2] рассматривается обособленно, а части, относящиеся к бассейнам рек Студеная и Сухая Хапица, включены в состав ледников Богдановича и № 171 соответственно. Границы данного образования с нижележащей зоной «пассивных» льдов крайне нечёткие. Поэтому потоки льда, подпитывающие ледники Ключевского вулкана, рассматривались как части данных ледников. Обособленные (не контактирующие с другими) потоки льда на конусе вулкана рассматривались как самостоятельные ледники.

Средний размер современных ледников Камчатки – 1,2 км<sup>2</sup>, но он сильно дифферен-

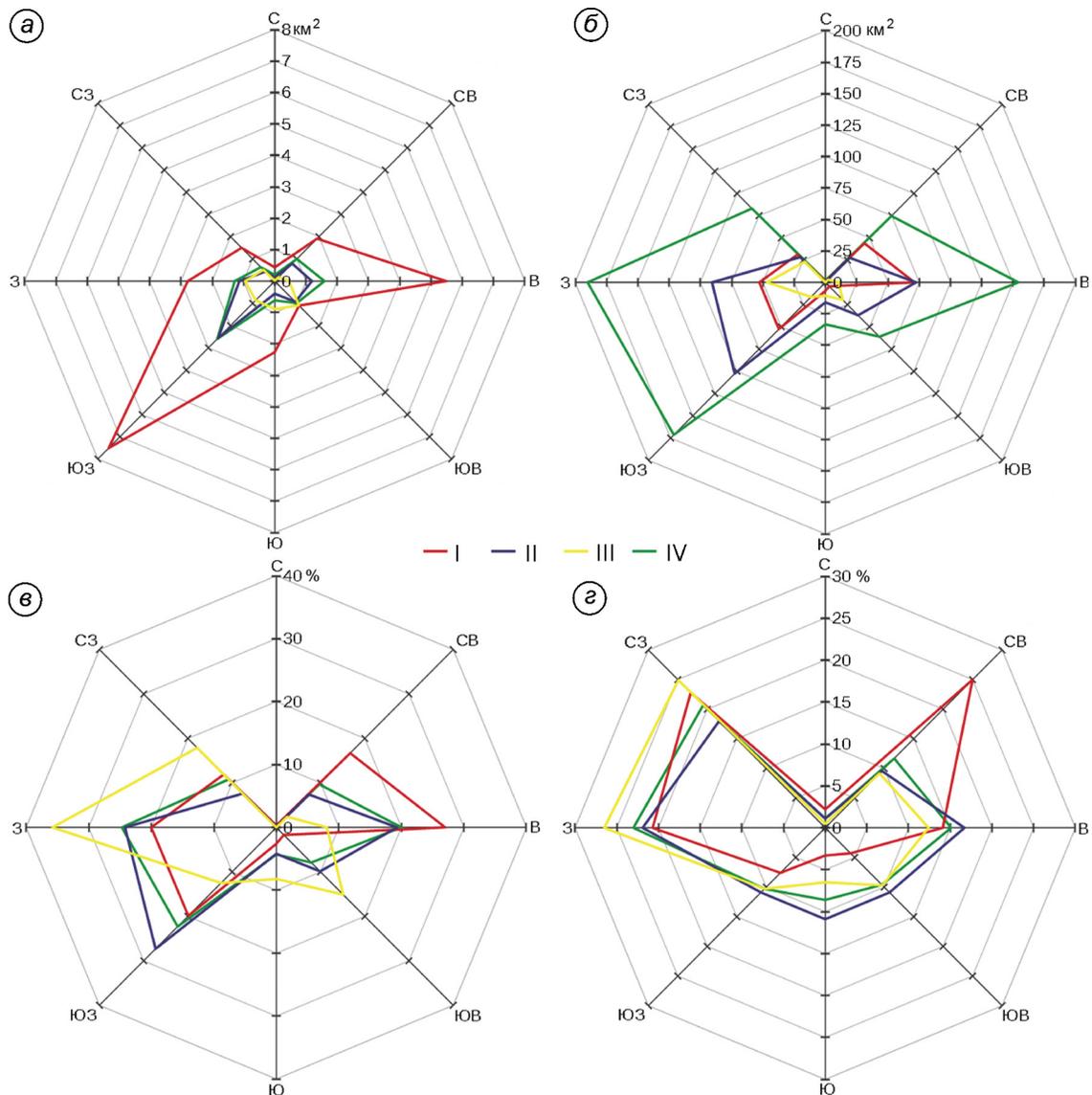
Таблица 2. Морфологические типы ледников Камчатки\*

Морфологический тип ледников	Районы активного вулканизма			Районы четвертичного вулканизма			Невулканические районы			Камчатка в целом			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	Доля в общей площади оледенения, %
Сложный долинный		—**											
Долинный	8	18,63±0,86	2,33	28	61,23±3,84	2,19	3	49,77±2,36	16,59	3	49,77±2,36	16,59	6,5
Перемётно-долинный***	4	89,03±2,26	22,26	7	73,94±3,26	10,56		7	9,53±0,76	43	89,39±5,46	2,08	11,6
Кальдерно-долинный***	3	41,59±1,19	13,86					11	41,45±2,04	22	204,42±7,56	9,29	26,6
Атрио-долинный***	2	2,40±0,17	1,20	2	6,49±0,24	3,25			—	3	41,59±1,19	13,86	5,4
Карово-долинный		—		56	91,09±7,04	1,63		26	35,69±2,72	82	126,78±9,77	1,55	16,5
Каровый	1	0,06	0,06	95	36,91±4,09	0,39		105	33,34±3,90	201	70,31±7,99	0,35	9,2
Висячий	16	1,55±0,14	0,10	14	0,66±0,17	0,05		3	0,35±0,06	33	2,56±0,37	0,08	0,3
Склоновый	9	0,97±0,07	0,11	49	9,44±1,70	0,19		17	5,24±0,68	75	15,65±2,45	0,21	2
Прислоновый		—		41	8,21±1,36	0,20		4	0,58±0,11	45	8,79±1,46	0,20	1,1
Подножный	5	19,2±0,68	3,84	28	19,8±2,03	0,71		8	3,24±0,33	41	42,24±3,04	1,03	5,5
Котловинный				16	5,60±0,85	0,35		3	0,70±0,12	19	6,30±0,97	0,33	0,8
Кратерный***	2	2,05±0,05	1,03	1	0,26±0,03	0,26				3	2,31±0,09	0,77	0,3
Баранкосов***	34	72,22±3,25	2,12	17	6,23±0,67	0,37				51	78,45±3,92	1,54	10,2
Атрио***	2	1,51±0,11	0,76	3	0,31±0,07	0,10				5	1,82±0,17	0,36	0,2
Обвальных цирков***	4	11,67±0,48	2,92						—	4	11,67±0,48	2,92	1,5
Звездообразный***		—		1	3,30±0,20	3,30				1	3,30±0,20	3,30	0,4
Кальдерный***	1	2,39±0,06	2,39							1	2,39±0,06	2,39	0,3
Ледяная шапка***	1	0,81±0,07	0,81							1	0,81±0,07	0,81	0,1
Не определён		—		5	1,85±0,30	0,37		1	0,19±0,03	6	2,04±0,33	0,34	0,3
<b>Итого</b>	<b>92</b>	<b>264,08±9,39</b>	<b>2,87</b>	<b>366</b>	<b>375,09±28,2</b>	<b>1,02</b>		<b>185</b>	<b>130,31±10,76</b>	<b>643</b>	<b>769,48±48,35</b>	<b>1,20</b>	<b>100</b>

\*1 – число ледников; 2 – общая площадь, км<sup>2</sup>; 3 – средняя площадь, км<sup>2</sup>. \*\*Прочерк – ледники данного морфологического типа отсутствуют. \*\*\*Ледники, характерные для вулканических построек.

цирован в зависимости от типов ледниковых районов и экспозиции (табл. 2, рис. 2, а). Наибольшие средние размеры характерны для ледников юго-западной и восточной экспозиций, наименьшие – для ледников северной, южной и юго-восточной. Подобное распределение ледников можно объяснить, по крайней мере, двумя причинами: а) меридиональная ориентация крупнейших горных хребтов Камчатки – Срединного и Восточного – обуславливает относительно небольшую долю склонов северной и южной экспозиции; б) расположение основных источников поступления осадков – Берингово море на востоке и Охотское море на западе. Камчатский полуостров окружён морями со всех сторон, кроме северного направления.

Самые крупные ледники находятся в районах активного вулканизма, где средняя площадь ледников составляет 2,87 км<sup>2</sup>, а в невулканических районах она невелика – 0,7 км<sup>2</sup>. К основным факторам такой дифференциации относятся макрорельеф и вулканизм. Рельеф определяет, прежде всего, диапазон абсолютных высот, в котором при современных климатических условиях могут существовать ледники. Самые высокие на Камчатке – вулканические постройки: вулканы Ключевской (4750 м), Камень (4579), Крестовский (4057 м), Ушковский (3903 м), Толбачик (3672 м), Корякский (3456 м), Шивелуч (3307 м), Жупановский (2923 м) и др. Высота гор районов четвертичного вулканизма существенно ниже. Высочайшие вершины данных районов – вулканы Ичинский (3621 м) и Кроноцкий (3521 м).



**Рис. 2.** Изменение ряда характеристик оледенения Камчатки в районах с разным типом зависимости ледников от экспозиции:

*a* – среднего размера ледники; *б* – площади оледенения; *в* – доли ледников в общей площади оледенения данного типа ледниковых районов; *г* – доли ледников в общем количестве ледников данного типа ледниковых районов; I – районы активного вулканизма; II – районы четвертичного вулканизма; III – невулканические районы; IV – Камчатка в целом

**Fig. 2.** Changes in the glaciation characteristics of Kamchatka in areas of glaciation of various types depending on exposure:

*a* – average glaciers size; *б* – glaciation area; *в* – share of glaciers in the total area of glaciation in this type of glacial regions; *г* – share of glaciers in the total number of glaciers in this type of glacial regions. I – areas of active volcanism; II – areas of quaternary volcanism; III – non-volcanic areas; IV – full Kamchatka

Остальные постройки ниже 3000 м – горы Хувхойтун (2613 м), Алней (2598 м), Острая (2552 м), Чашаконджа (2526 м), Шишель (2525 м). Невулканические районы оледенения Камчатки гораздо ниже, самая высокая гора Ааг (2310 м) расположена в пределах Пиначевского хребта. Абсолютные высоты гор Кроноцкого полуостро-

ва – крупнейшего невулканического района оледенения Камчатки – не превышают 1324 м (гора Отдельная). Для современного оледенения наиболее благоприятны районы активного вулканизма, а менее всего – невулканические районы.

Морфология, режим и динамика ледников Камчатки сильно зависят от современного вулка-

Таблица 3. Размеры ледников Камчатки и их характеристики

Размер ледников, км <sup>2</sup>	Число ледников (числитель) и доля ледников в общем числе/в общей площади, % (знаменатель)			
	Камчатка в целом	районы активного вулканизма	районы четвертичного вулканизма	невулканические районы
> 5	$\frac{26}{4,0/46,4}$	$\frac{10}{10,9/67,1}$	$\frac{12}{3,3/40,4}$	$\frac{4}{2,2/21,6}$
2–5	$\frac{62}{9,6/24,4}$	$\frac{19}{20,7/20,3}$	$\frac{30}{8,2/25,4}$	$\frac{13}{7,0/29,5}$
1–2	$\frac{58}{9,0/10,6}$	$\frac{13}{14,1/7,3}$	$\frac{29}{7,9/11,3}$	$\frac{16}{8,6/15,3}$
0,5–1	$\frac{90}{14,0/8,4}$	$\frac{12}{13,0/3,3}$	$\frac{52}{14,2/10,0}$	$\frac{26}{14,1/13,8}$
0,1–0,5	$\frac{299}{46,5/9,5}$	$\frac{19}{20,7/1,5}$	$\frac{178}{48,6/11,9}$	$\frac{102}{55,1/18,7}$
< 0,1	$\frac{108}{16,8/0,8}$	$\frac{19}{20,7/0,4}$	$\frac{65}{17,8/0,9}$	$\frac{24}{13,0/1,1}$
<i>Всего ледников</i>	643	92	366	185

низма. Отдельные механизмы такого влияния способствуют ледникам, а другие оказывают негативное воздействие [1]. Наиболее значимые из них: а) бронирующая роль чехла вулканогенного материала, регулярно поступающего на поверхность (в ходе вулканических извержений, обвальнo-осыпных процессов и ветрового переноса) и существенно снижающего абляцию ледников; б) сейсмическое воздействие вулканов, влияющее на их динамику. В работе [1] показано, что современный вулканизм в целом благоприятно сказывается на развитии ледников, несмотря на нынешнее ухудшение климатических условий их существования.

Доля крупнейших (более 5 км<sup>2</sup>) ледников в общем количестве и площади максимальна (10,9 и 67,1% соответственно) в районах активного вулканизма (табл. 3). Здесь в 2,5 раза больше, чем в других типах ледниковых районов, доля ледников площадью 2–5 км<sup>2</sup>. В районах четвертичного вулканизма ледников размерами более 5 км<sup>2</sup> всего 3,3%, но они составляют более 40% площади оледенения. В невулканических районах их доля минимальна. В целом во всех районах по численности доминируют ледники малых размеров – менее 1 км<sup>2</sup>. В невулканических районах они составляют более 80% ледников, примерно столько же на территориях четвертичного вулканизма и более половины в районах активного вулканизма. В последнем случае они занимают всего 5,2% общей площади ледников.

Некоторые морфологические типы ледников (кальдерно-долинный, кальдерный, обвальных

цирков, ледяная шапка) встречаются только в районах активного вулканизма. Другие морфологические типы ледников, специфичные для вулканических построек (барранкосов, кратерный, атрио-долинный, атрио), распространены шире и встречаются в районах активного и четвертичного вулканизма. В невулканических районах оледенения Камчатки таких ледников нет. Практически все ледники этих морфологических типов (кроме типа ледяная шапка) приурочены к отрицательным формам вулканического рельефа – барранкосам и кратерам. Однако кратерных ледников на Камчатке относительно мало. Ледники барранкосов, напротив, широко распространены на вулканических постройках районов активного и четвертичного вулканизма (см. табл. 2). Такие типы ледников, как кальдерно-долинный, кальдерный, обвальных цирков, атрио-долинный и атрио, встречаются гораздо реже.

Каровые и карово-долинные ледники – наиболее многочисленные ледники Камчатки – практически отсутствуют в районах активного вулканизма (см. табл. 2). Это объясняется незавершённостью формирования современного макрорельефа – здесь практически отсутствуют кары. Эти типы ледников достигают максимума в невулканических районах, где горные постройки наиболее разрушены.

В районах активного вулканизма по площади преобладают перемётно-долинные и кальдерно-долинные ледники (см. табл. 2), тогда как в районах четвертичного вулканизма наибольшая доля

площади оледенения приходится на карово-долинные, перемётно-долинные и долинные ледники. В невулканических районах Камчатки по площади наиболее распространены перемётно-долинные, карово-долинные и каровые ледники.

Ледники Камчатки неравномерно распределены по склонам разных экспозиций. Наибольшую долю занимают ледники западной (24,7%), юго-западной (22,3%) и восточной (20%) экспозиций (см. рис. 2, б, в). Это связано с субмеридиональным простираем крупнейших хребтов Камчатки (Срединного и Восточного) и положением основных источников поступления осадков – Охотского моря на западе и Тихого океана на востоке. Количественно также преобладают ледники западной (23%), северо-западной (20,7%) и восточной (15,1%) экспозиций (см. рис. 2, г). Доля ледников северной экспозиции в районах активного вулканизма существенно больше, чем в других районах Камчатки. Это обусловлено большей долей склонов северной экспозиции на отдельно стоящих вулканических постройках, чем на меридионально ориентированных Срединном и Восточном хребтах.

Концы ледников Камчатки ниже всего спускаются на Кроноцком полуострове. Так, самый крупный ледник Кроноцкого полуострова – перемётно-долинный ледник Корято ( $7,52 \pm 0,31 \text{ км}^2$ ) в 2013 г. заканчивался на высоте около 260 м, а ледник Поле Бунина ( $6,72 \pm 0,28 \text{ км}^2$ ) – на высоте около 420 м. В северной части Срединного хребта низшая точка конца ледника – 520 м над ур. моря. В районах активного вулканизма наиболее низкое положение фронта ледника отмечено в Авачинской группе вулканов – около 710 м.

Вертикальная протяжённость (разница высот между высшей и низшей точками) ледников (рис. 3, а) и их средняя высота (см. рис. 3, б) определяются прежде всего рельефом районов оледенения. Так, наибольшая вертикальная протяжённость (46,7% ледников с вертикальной протяжённостью 1000 м и более) характерна для ледников районов активного вулканизма, вулканические постройки которых имеют наибольшие для Камчатки абсолютные высоты. Помимо относительно больших абсолютных высот вулканических построек, этому способствует развитая здесь поверхностная морена, предохраняющая от таяния языки ледников. Наибольшую вертикаль-

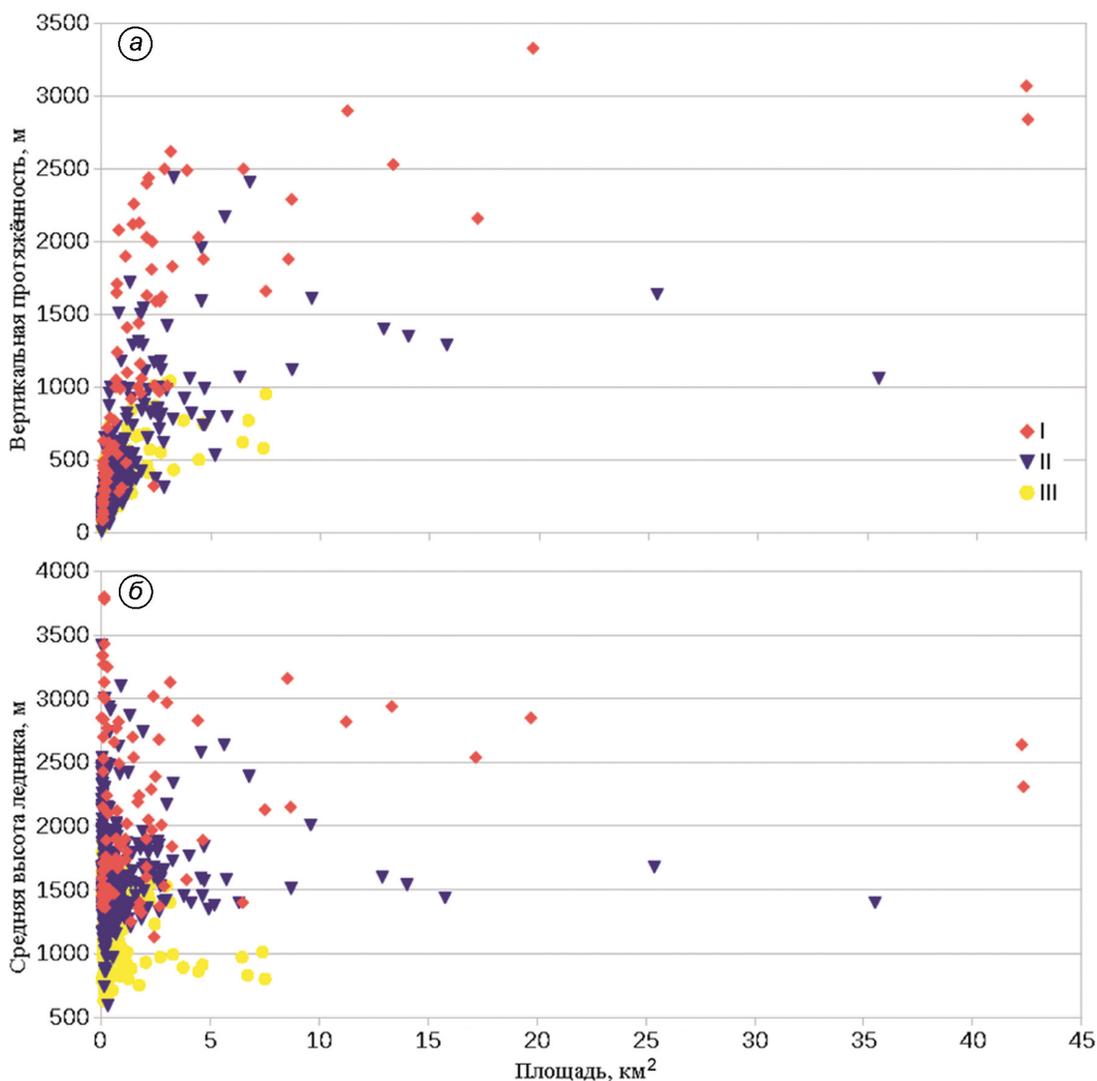
ную протяжённость на Камчатке имеют ледники Бильченок ( $3330 \pm 10 \text{ м}$ ), Богдановича ( $3070 \pm 10 \text{ м}$ ), Эульченок ( $2900 \pm 10 \text{ м}$ ) и Эрмана ( $2840 \pm 10 \text{ м}$ ), расположенные в Ключевской группе вулканов.

Наименьшая вертикальная протяжённость (98,4% ледников с вертикальной протяжённостью менее 1000 м) наблюдается на ледниках невулканических районов, где отмечаются наименьшие для Камчатки абсолютные высоты. При этом прямой связи между площадью ледников и их вертикальной протяжённостью нет (см. рис. 3, а). Коэффициент корреляции данных характеристик составляет: 0,6 – для районов активного вулканизма; 0,54 – для районов четвертичного вулканизма; 0,67 – для невулканических районов и 0,59 – для Камчатки в целом. Однако если рассматривать отдельно ледники разных морфологических типов, то картина становится существенно более дифференцированной. Для перемётно-долинных ледников Камчатки характерна наиболее высокая корреляция (0,91) между площадью и вертикальной протяжённостью ледников, для склоновых и котловинных – самая низкая (0,38 и 0,27 соответственно). По медианным значениям вертикальной протяжённости ледников на Камчатке резко разнятся районы активного вулканизма и все остальные районы оледенения. Медианное значение вертикальной протяжённости ледников в районах активного вулканизма составляет 940 м, а в районах четвертичного вулканизма и неледниковых районах – 250 м.

Распределение средних высот ледников Камчатки (см. рис. 3, б) аналогично распределению их вертикальной протяжённости. Ниже всего расположены ледники невулканических районов – 53 из 185 (28,6%), средние высоты ледников в этих районах не превышают 1000 м. В районах четвертичного вулканизма таких ледников только семь (1,9%), а 45 ледников (12,3%) имеют средние высоты более 2000 м. В районах активного вулканизма ледников со средними высотами ниже 1000 м нет, а 47 ледников (51,1%) имеют средние высоты выше 2000 м.

### Обсуждение результатов

Разнообразие факторов рельефа, климата и вулканизма на Камчатке вызывает не только существенные различия в распределении ледников, но и разницу их изменений во времени.



**Рис. 3.** Вертикальная протяжённость ледников Камчатки (а) и средние высоты ледников (б) разной площади в трёх типах районов оледенения Камчатки.

I – районы активного вулканизма; II – районы четвертичного вулканизма; III – невулканические районы

**Fig. 3.** Altitude range occupied by Kamchatka glaciers (a) and average glacier heights (б).

I – areas of active volcanism; II – areas of quaternary volcanism; III – non-volcanic areas

Так, общее сокращение площади ледников Камчатки с 1950 по 2002–2015 гг. составило 10,6%, или 82,81 км<sup>2</sup> [1], однако в разных районах это происходит неодинаково. Больше всего сократились (27,6%, или 24,6 км<sup>2</sup> за 1957–2013 гг.) тёплые ледники Кроноцкого полуострова, наиболее чувствительные к изменениям климата. Существенно меньше сократились ледники северной части Срединного хребта (16,6%, или 57,65 км<sup>2</sup> за 1950–2002 гг.) и вулканического массива Алней-Чашаконджа (19,5%, или 11,8 км<sup>2</sup> за 1950–2010 гг.). Ледники районов активного вулканизма, напротив, не показывали сокращения

площади. Например, площадь оледенения Ключевской группы вулканов с 1950 по 2010–2015 гг. возросла на 4,3% (8,7 км<sup>2</sup>) [3], а Авачинской группы вулканов с 1950 по 2012–2013 гг. – на 6,5% (1,3 км<sup>2</sup>) [1].

Подобные различия нельзя объяснить только географическим положением, климатическими изменениями или разными абсолютными высотами рельефа. Так, массив Алней-Чашаконджа, где площадь оледенения за 1950–2010 гг. сократилась приблизительно на 19% [7, 1], находится всего в 60 км к северо-западу от Ключевской группы вулканов, оледенение которой

с середины XX в. не сокращалось. На метеостанции «Ключи», расположенной между данными районами, отмечено повышение средних летних (с июня по август) температур воздуха в 1989–2015 гг. по сравнению с 1951–1980 гг. на 1,2 °С при практически неизменном (сокращение на 2,3%) количестве твёрдых атмосферных осадков [1]. Разница в высотах гор подобные различия также не объясняет – высота вулканов Авачинской группы близка к высоте горных вершин массива Алней-Чашаконджа, однако оледенение Авачинской группы вулканов за 1950–2012/13 гг. в размерах не сократилось. Климатические условия существования ледников Авачинской группы вулканов за этот период даже ухудшились. На метеостанции «Петропавловск-Камчатский» средние летние температуры воздуха в 1989–2015 гг. по сравнению с 1951–1980 гг. выросли на 0,9 °С, а суммы твёрдых осадков за тот же период по сравнению с 1966–1980 гг. в среднем сократились на 14,3%. Отсюда ясно, что принципиальная разница в изменении оледенения районов активного вулканизма и иных ледниковых районов Камчатки обусловлена исключительно вулканическим фактором.

Вертикальная протяжённость ледников также хорошо иллюстрирует разницу в условиях существования ледников районов активного вулканизма и иных районов Камчатки. Медианное значение данного показателя для оледенения районов четвертичного вулканизма и невулканических районов практически одинаково (250 м), несмотря на большую разницу в абсолютных высотах, степени разрушенности гор и климатических условиях. В районах активного вулканизма медианное значение вертикальной протяжённости ледников (940 м) почти в 3,8 раза больше, чем в других типах ледниковых районов. Подобная дифференциация вертикальной протяжённости ледников в разных районах оледенения Камчатки объясняется прежде всего различиями в их режиме и особенностями режима ледников, расположенных вблизи активных вулканов.

Для понимания причин подобных различий следует подробнее рассмотреть механизмы влияния активного вулканизма на ледники. К основным механизмам такого влияния относятся [1]: 1) бронирующая роль чехла моренного материала вулканогенного происхождения; 2) сейсмическое воздействие вулканов на ледни-

ки; 3) механическое разрушение ледников; 4) захоронение ледников во время извержений под толщей вулканогенного материала; 5) тепловое воздействие продуктов извержений на ледники; 6) нагружение ледников вулканогенным материалом; 7) вулканогенный материал внутри ледников; 8) вода на ложе ледников во время извержений; 9) выпадение на поверхность ледников вулканического пепла. Влияние этих механизмов существенно различается по масштабам и направлению (одни механизмы способствуют сохранению и движению ледников, другие воздействуют на них негативно).

Для ледников, расположенных вблизи активных вулканов, характерна развитая поверхностная морена, состоящая из продуктов вулканических извержений (вулканические шлаки, пеплы, обломки пород), в разной степени предохраняющих ледники от поверхностной абляции. Вулканогенный материал поступает на поверхность ледников во время извержений, в ходе обвального-осыпных и оползневых процессов на крутых склонах вулканических построек, со снежными лавинами, а также в результате ветрового перераспределения.

В работе [22] В.Н. Виноградов привёл данные полевых наблюдений о влиянии пирокластического материала на таяние, происходящее на поверхности ледников. Полученные результаты показали, что наличие слоя пирокластического материала мощностью менее 1 см усиливает поверхностное таяние. При толщине слоя пирокластического материала более 1 см таяние замедлялось. При полевых наблюдениях на леднике Козельский (Авачинская группа вулканов) установлено сокращение таяния льда в 7 раз при толщине слоя пирокластике 5 см, в 12 раз – при 12 см, в 21 раз – при 20 см и в 150 раз – при 50 см.

В подобных условиях таяние происходит преимущественно на крутых склонах краёв ледниковых языков, где перекрывающий чехол тонок, а также в местах размыва моренного чехла временными водотоками. Вследствие резкого снижения поверхностной абляции на языках ледников в районах активного вулканизма за счёт бронирующей роли мощной поверхностной морены ледники практически непрерывно наступают в течение десятков лет. Самые наглядные примеры таких ледников – Эрмана и Богдановича в Ключевской группе вулканов [3] и ледник Козельский в Авачинской группе вул-



**Рис. 4.** Ледник Козельский 21 августа 2019 г. Фото А.Я. Муравьева  
**Fig. 4.** The Kozelsky Glacier on August 21, 2019. Photo by A.Ya. Muraviev

канов [1]. С 1967 по 2015 г. фронт этого ледника продвинулся вниз по долине на  $1010 \pm 15$  м. Полевые наблюдения 2019 г. показали, что ледник продолжает наступать (рис. 4).

Влияние сейсмической активности вулканов на ледники выражается в ухудшении сцепления ледников с ложем, т.е. в снижении сил трения, что приводит к увеличению скорости движения льда. «Динамика ледовых толщ на склонах действующих вулканов зависит от эффектов сейсмической подготовки перед извержениями и сейсмической активности во время извержений» [3]. На местности подобный эффект выражается в активизации фронтов ледников, а также в формировании новых ледниковых языков. Нагляднее всего эти процессы проявляются на Ключевском вулкане, в зоне «ледяного пояса» которого, на высотах более 3000 м, лежат небольшие языки активного льда (рис. 5), не зафиксированные в Каталоге ледников СССР и научных публика-

циях 1970–90-х годов, но, по данным работы [3], существовавшие уже в 2012 г.

Эффект механического разрушения ледников скоротечен. Он выражается в механическом уничтожении ледника или его части при разрушении вулканической постройки во время извержения. Так, в 1965 г. при взрыве вулкана Безымянный были уничтожены фирновые поля в его вершинной части, а взрыв вулкана Шивелуч в 1964 г. уничтожил часть области аккумуляции ледника Тюшева [20]. Проседание и обрушение внутренней кальдеры вулкана Плоский Толбачик во время извержения 1975–1976 гг. привело к разрушению 2/3 Толбачинского ледника в пределах границ кромки провала [23]. Заметим, что механическое разрушение ледников – локальное событие, оказывающее огромное влияние на режим и динамику конкретных ледников, затронутых им. Известны случаи, когда во время вулканических извержений происходило захоронение ледников,



**Рис. 5.** Небольшие молодые ледники на северном склоне Ключевского вулкана 5 августа 2019 г. (1, 2 – см. текст). Фото А.Я. Муравьева

**Fig. 5.** Small young glaciers on the northern slope of Klyuchevskoy volcano on August 5, 2019 (1, 2 – see text). Photo by A.Ya. Muraviev

расположенных на извергающихся вулканах или в непосредственной близости от них. На Камчатке известны два подобных случая. В 1945 г. ледник Козельский был полностью перекрыт чехлом пирокластического материала (продуктами извержения Авачинского вулкана) толщиной до 2 м [24].

Во время извержений вулканов происходит тепловое воздействие продуктов извержений на ледники. Самое сильное и длительное тепловое воздействие на ледники оказывают проходящие по их поверхности лавовые и пирокластические потоки, вызывающие интенсивное таяние снега, фирна и льда. Такие события могут приводить к существенному локальному уменьшению толщины ледников либо к их частичному или полному уничтожению. Подобным образом лавовым пото-

ком была уничтожена значительная часть области питания и часть южного языка ледника Келля во время побочного извержения Ключевского вулкана в 1983 г. [25]. Влияние на поверхностное таяние пирокластического материала, выпадающего на поверхность ледников во время извержений, относительно невелико – он очень рыхлый, поэтому быстро остывает и служит в дальнейшем хорошим теплоизолятором [20]. Непосредственное тепловое воздействие извержения на удалённые от извергающегося вулкана ледники крайне ограничено.

Продукты вулканических извержений не только накапливаются на ледниках в виде поверхностной морены, но и содержатся во льду внутри самих ледников. Наибольшее содержание вулканического материала во льду (до 40–50%) зафик-

сировано в зоне «ледяного пояса» Ключевского вулкана (на высотах от 2400–3500 до 4200 м) [26], где скорость движения льда составляет всего несколько метров в год, несмотря на большую крутизну (30–35°) склонов. Такое содержание породы во льду, по данным работы [27], уменьшает развитие различных возмущений на поверхности и в толще ледников в 4–10 раз, т.е. данный механизм влияния активного вулканизма на ледники работает на понижение скорости движения льда.

Вулканогенный материал, формирующий поверхностную морену ледников районов активного вулканизма, поступает на ледники в ходе обвально-осыпных и оползневых процессов и создаёт нагрузку на ледники. Данный механизм способствует увеличению скорости движения льда за счёт его пластичности. Яркий пример такого воздействия – длительное наступание ледника Эрмана, которое началось после схода на ледник крупного (около 0,3 км<sup>3</sup>) вулкано-гляциального оползня во время извержения Ключевского вулкана в 1945 г. [28]. С тех пор этот ледник практически непрерывно наступает. В 1949–2017 гг. фронт ледника Эрмана продвинулся на  $3690 \pm 15$  м по долине р. Сухая и на  $3580 \pm 15$  м по долине р. Крутенькая. Площадь языковой части ледника при этом увеличилась на  $4,97 \pm 0,39$  км<sup>2</sup> [29].

Наличие воды на ложе ледников во время извержений ограничено во времени. Значительные объёмы воды попадают на ложа ледников в результате таяния масс снега, фирна и льда под тепловым воздействием продуктов извержений. Однако данный эффект ограничен временем поступления на поверхность ледника больших масс раскалённого вулканического материала и временем, которое нужно, чтобы поступившая вода стекла или замёрзла. Кроме того, вода и водяной пар образуются при подлёдных извержениях на контакте льда и горячих продуктов извержений. В работе [22] отмечается, что при подлёдном извержении взрывного типа в талой воде во взвешенном состоянии может находиться вулканический пепел, значительно усиливающий таяние льда. В отличие от других механизмов влияния вулканизма на оледенение, перечисленных ранее, выпадение вулканического пепла воздействует не только на ледники, расположенные вблизи действующих вулканов [1]. Пеплы, выбрасываемые на высоту в несколько километров над вулканами, могут разноситься ветром на расстояние в сотни и тысячи

километров в направлении, зависящем от господствующей в районе розы ветров. Пепел, выпадающий на ледники и снежники тонким слоем, существенно усиливает поверхностную абляцию [22].

Из всех перечисленных механизмов влияния вулканизма на оледенение к основным относят бронирующую роль чехла моренного материала вулканогенного происхождения и сейсмическое воздействие вулканов на ледники, так как они характеризуются наибольшей областью воздействия и их длительностью. Значение остальных механизмов в динамике оледенения районов активного вулканизма Камчатки менее выражено.

Механическое разрушение ледников и их захоронение под толщей вулканогенного материала оказывают мощное влияние на некоторые ледники, однако это – единичные локальные события, не приводящие к существенным изменениям оледенения в масштабах ледниковых районов. Тепловое воздействие продуктов извержений на ледники либо существенно ограничено во времени (вулканические пеплы и шлаки, выпадающие на поверхность ледников во время извержений быстро остывают), либо локализовано (в случае лавовых и пирокластических потоков). Нагружение ледников вулканогенным материалом, с одной стороны, способствует быстрому движению льда под дополнительной нагрузкой, но с другой стороны, продукты извержений, содержащиеся внутри ледника, «армируют» лёд и препятствуют его движению. Вода на ложе ледников во время извержений сильно ограничена во времени или локализована в пространстве по тем же причинам, что и тепловое воздействие продуктов извержений на ледники.

Один из наиболее примечательных районов оледенения Камчатки – Кроноцкий полуостров (№ 10 на рис. 1). К основным особенностям ледников этого района относятся их низкое положение (медианное значение средних высот ледников составило около 900 м) и аномально интенсивный массообмен – следствия особенностей местного климата. Оледенение Кроноцкого полуострова имеет ярко выраженные черты океаничности. По данным работы [30], расчётная величина аккумуляции–абляции на высоте границы питания ледников района превышает 4000 мм в.э. в год, а вертикальный градиент внешнего массообмена достигает 14 г/см<sup>2</sup>год на 1 м высоты (на леднике Коруто). Это – наибольшее значение для ледниковых районов территории бывшего СССР.

### Заключение

Разнообразие сочетаний факторов макрорельефа, климата и вулканизма на Камчатке вызывает неравномерное распределение оледенения по территории полуострова (см. рис. 1 и табл. 1), а также большую изменчивость его характеристик в разных районах. К крупнейшим районам современного оледенения Камчатки относятся северная часть Срединного хребта, Ключевская группа вулканов и Кроноцкий полуостров, расположенные на значительном удалении друг от друга и представляющие разные типы ледниковых районов. Для Камчатки характерно непропорциональное распределение ледников на склонах разных экспозиций. Наибольшие площади оледенения (см. рис. 2, б) и средние размеры ледников (см. рис. 2, а) наблюдаются на склонах западной, юго-западной и восточной экспозиций. Это можно объяснить меридиональной ориентацией крупнейших горных хребтов Камчатки (Срединного и Восточного), что обуславливает относительно небольшую долю склонов северной и южной экспозиции, а также расположением основных источников поступления осадков (Берингово море на востоке и Охотское море на западе). На Камчатке весьма разнообразны морфологические типы ледников (см. табл. 2); самые распространённые – каровые и карово-долинные. Наибольшие площади заняты перемётно-долинными и карово-долинными ледниками.

В ледниковых районах Камчатки многие характеристики ледников сильно различаются. Среди них: число и суммарная площадь ледников (см. табл. 1); их количественное (см. рис. 2, з) и площадное (см. рис. 2, б) распределение по склонам разных экспозиций; средний размер ледников (см. рис. 2, а); их преобладающие мор-

фологические типы (см. табл. 2); вертикальная протяжённость (см. рис. 3, а); средние высоты (см. рис. 3, б) ледников и пр. Наибольшее число ледников и площадь оледенения приурочены к районам четвертичного вулканизма, гораздо меньше площадь оледенения в невулканических районах.

Особенно выделяется оледенение районов активного вулканизма. В этих районах разнообразны морфологические типы ледников (см. табл. 2), отсутствуют каровые и карово-долинные ледники. Для них характерны наибольшие на Камчатке средние размеры (см. табл. 1), вертикальная протяжённость и средние высоты ледников, а также максимальная их доля в общем числе и площади крупнейших (более 5 км<sup>2</sup>) ледников (см. табл. 3). Кроме того, оледенение районов активного вулканизма существенно отличается от оледенения других районов по своему режиму и динамике. Наоборот, в невулканических районах наименее разнообразны морфологические типы ледников (см. табл. 2), здесь самая большая доля в общем количестве и площади каровых и карово-долинных ледников и совсем мало крупных (более 5 км<sup>2</sup>) ледников (см. табл. 3). В невулканических районах Камчатки концы ледников и их средние высоты имеют более низкие показатели.

**Благодарности.** Статья подготовлена по теме Государственного задания № 0148-2019-0004 (АААА-А19-119022190172-5) «Оледенение и сопутствующие природные процессы при изменениях климата».

**Acknowledgments.** The paper includes the results obtained within the framework of the research project № 0148-2019-0004 (АААА-А19-119022190172-5) of the Research Plan of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences.

### Литература

1. Муравьев А.Я. Колебания ледников Камчатки во второй половине XX – начале XXI вв.: Дис. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. М.: Ин-т географии РАН, 2017. 168 с.
2. Виноградов В.Н. Каталог ледников СССР. Т. 20. Ч. 2–4. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 75 с.
3. Муравьев А.Я., Муравьев Я.Д. Колебания ледников Ключевской группы вулканов во второй половине XX – начале XXI века // Лёд и Снег. 2016.

### References

1. Muraviev A. Ya. Fluctuations of glaciers of Kamchatka in the second half of XX – beginning of XXI centuries. PhD. Moscow: Institute of Geography RAS, 2017: 168 p. [In Russian].
2. Vinogradov V. N. *Katalog lednikov SSSR*. USSR Glacier Inventory. V. 20. Parts 2–4. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1968: 75 p. [In Russian].
3. 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,

- Т. 56. № 4. С. 480–492. doi: 10.15356/2076-6734-2016-4.
4. Докукин М.Д., Сейнова И.Б., Савернюк Е.А., Черногорец С.С. О наступании ледников в условиях вулканической деятельности вулкана Ключевской (Камчатка) // Лёд и Снег. 2017. Т. 57. № 1. С. 10–24. doi: 10.15356/2076-6734-2017-1-10-24.
  5. Муравьев А.Я., Носенко Г.А. Изменения оледенения северной части Срединного хребта на Камчатке во второй половине XX в. // Лёд и Снег. 2013. Т. 53. № 2. С. 5–11. doi: 10.15356/2076-6734-2013-2-5-11.
  6. Маневич Т.М., Муравьев Я.Д., Самойленко С.Б. Ледники Авачинской группы вулканов: современное состояние // Лёд и Снег. 2015. Т. 55. № 3. С. 14–26. doi: 10.15356/2076-6734-2015-3-14-26.
  7. Муравьев А.Я. Изменение размеров ледников Кроноцкого полуострова и массива Алней-Чашаконджа на Камчатке во второй половине XX – начале XXI в. // Лёд и Снег. 2014. Т. 54. № 2. С. 22–28. doi: 10.15356/2076-6734-2014-2-22-28.
  8. Lynch C.M., Barr I.D., Mullan D., Ruffell A. Rapid glacial retreat on the Kamchatka Peninsula during the early 21st century // The Cryosphere. 2016. № 10. P. 1809–1821. doi: 10.5194/tc-10-1809-2016
  9. Действующие вулканы Камчатки. В 2 томах. Т. 1. / Под. ред. С.А. Федотова и Ю.П. Масуренкова. М.: Наука, 1991. 302 с.
  10. Виноградов В.Н., Глазырин Г.Е. Статистический подход к изучению морфологии ледников Камчатки // Изв. ВГО. 1979. № 4. С. 325–329.
  11. Виноградов В.Н., Мелекесцев И.В. Морфологические особенности современного оледенения вулканических районов Камчатки // МГИ. 1966. Вып. 12. С. 91–99.
  12. Глазырин Г.Е., Муравьев Я.Д., Виноградов В.Н. О климатическом фоне оледенения Камчатки // Гляциол. исследования. № 27. М.: Наука, 1985. С. 51–66.
  13. Кондратюк В.И. Климат Камчатки. М.: Гидрометеоздат, 1974. 204 с.
  14. Шкаберда О.А. Современные тенденции изменения климата Камчатки: Дис. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. Владивосток: ДВФУ, 2014. 235 с.
  15. 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., 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. <https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH> Архив данных от 29.08.2018–30.08.2018.
  - 56 (4): 480–492. doi: 10.15356/2076-6734-2016-4. [In Russian].
  4. Dokukin M.D., Seynova I.B., Savernyuk E.A., Chernomorets S.S. On advancing of glaciers due to activity of the Klyuchevskaya Sopka volcano (Kamchatka). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2017, 57 (1): 10–24. doi: 10.15356/2076-6734-2017-1-10-24. [In Russian].
  5. 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, 53 (2): 5–11. doi: 10.15356/2076-6734-2013-2-5-11. [In Russian].
  6. Manevich T.M., Murav'ev Ya.D., Samoilenko S.B. Glaciers of the Avachinskaya volcano group: current condition. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2015, 55 (3): 14–26. doi: 10.15356/2076-6734-2015-3-14-26. [In Russian].
  7. Murav'yev A. Ya. Glacier size changes in Kronotsky Peninsula and Alney-Chashakondzha Massif, Kamchatka Peninsula in the second half of XX century and the beginning of XXI century. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2014, 54 (2): 22–28. doi: 10.15356/2076-6734-2014-2-22-28. [In Russian].
  8. Lynch C.M., Barr I.D., Mullan D., Ruffell A. Rapid glacial retreat on the Kamchatka Peninsula during the early 21st century. *The Cryosphere*. 2016, 10: 1809–1821. doi: 10.5194/tc-10-1809-2016.
  9. *Deistvuyushchie vulkany Kamchatki*. Active volcanoes of Kamchatka / Edited by S.A. Fedotov and Yu.P. Masurenkov. V. 2. Moscow: Nauka, 1991: 302 p. [In Russian].
  10. Vinogradov V.N., Glazyrin G.E. *Statisticheskiy podkhod k izucheniyu morfologii lednikov Kamchatki*. Statistical approach to the study of the morphology of glaciers on Kamchatka. *Izvestiya VGO*. Proc. of the Russian Geographical Society. 1979, 4: 325–329. [In Russian].
  11. Vinogradov V.N., Melekestsev I.V. Morphological features of present glaciation of the Kamchatka volcanic regions. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1966, 12: 91–99. [In Russian].
  12. Glazyrin G.E., Muraviev Ya.D., Vinogradov V.N. On the climatic background of Kamchatka's glaciations. *Glyatsiologicheskie Issledovaniya*. Glaciological Researches. 1985, 27: 51–66. [In Russian].
  13. Kondratyuk V.I. *Klimat Kamchatki*. Climate of Kamchatka. Moscow: Hydrometeoizdat, 1974: 204 p. [In Russian].
  14. Shkaberda O.A. *Sovremennye tendentsii izmeneniya klimata Kamchatki*. Current trends of climate change in Kamchatka. PhD. Vladivostok: Far Eastern Federal University, 2014: 235 p. [In Russian].
  15. 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., 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. <https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH> Data archive for 29.08.2018–30.08.2018.
  16. Tachikawa T., Kaku M., Iwasaki A., Gesch D., Oimoen M., Zhang Z., Danielson J., Krieger T., Curtis B., Haase J., Abrams M., Robert Crippen R., Carabjal C. ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results. 2011: 27 p.
  17. Rodriguez E., Morris C.S., Belz J.E., Chapin E.C., Martin J.M., Daffer W., Hensley S. An assessment of the SRTM

16. Tachikawa T., Kaku M., Iwasaki A., Gesch D., Oimoen M., Zhang Z., Danielson J., Krieger T., Curtis B., Haase J., Abrams M., Robert Crippen R., Carabjal C. ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results. 2011. 27 p.
17. Rodriguez E., Morris C.S., Belz J.E., Chapin E.C., Martin J.M., Daffer W., Hensley S. An assessment of the SRTM topographic products. Technical Report JPL D-31639. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, 2005. 143 p.
18. Руководство по составлению Каталога ледников СССР. Л.: Гидрометеоздат, 1966. 154 с.
19. Гляциологический словарь / Под ред. В.М. Котлякова. Л.: Гидрометеоздат, 1984. 528 с.
20. Виноградов В.Н. Современное оледенение районов активного вулканизма. М.: Наука, 1975. 103 с.
21. Виноградов В.Н., Ходаков В.Г. Снежный покров Кроноцкого массива и баланс льда ледника Корыто // МГИ. 1973. Вып. 22. С. 143–152.
22. Отчет Института вулканологии АН СССР «Динамика современного оледенения и взаимодействие с вулканизмом» / Руководитель темы и отв. исполнитель В.Н. Виноградов. Петропавловск-Камчатский, 1982. 333 с.
23. Виноградов В.Н., Муравьев Я.Д. Изменчивость современных ледников вулканических районов Камчатки // МГИ. 1982. Вып. 42. С. 164–170.
24. Виноградов В.Н., Муравьев Я.Д. Ледник Козельский (Авачинская группа вулканов). СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 119 с.
25. Виноградов В.Н., Муравьев Я.Д. Режим ледников вулканических районов Камчатки // Гляциол. исследования. № 27. М.: Наука, 1985. С. 36–50.
26. Виноградов В.Н., Муравьев Я.Д. Особенности развития ледников в условиях активного вулканизма // МГИ. 1989. Вып. 66. С. 93–99.
27. Божинский А.Н. Неустойчивость естественных масс льда и снега на склонах гор // Итоги науки и техники. Серия Гляциология. Т. 2. 1980. 124 с.
28. Муравьев Я.Д., Саламатин А.Н. Прогнозная оценка динамики ледниковых масс в вулканотектонических желобах Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1993. № 4. С. 43–53.
29. Котляков В.М., Муравьев А.Я., Никитин С.А., Носенко Г.А., Рототаева О.В., Хромова Т.Е., Чернова Л.П. Возрождение и наступания ледников в период потепления // ДАН. 2018. Т. 481. № 6. С. 680–685. doi: 10.31857/S086956520002108-1.
30. Атлас снежно-ледовых ресурсов мира. Т. 1. / Ред. В.М. Котляков. М.: изд. РАН, 1997. 392 с.
- topographic products. Technical Report JPL D-31639. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, 2005: 143 p.
18. Rukovodstvo po sostavleniyu Kataloga lednikov SSSR. USSR Glacier Inventory guide. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1966: 154 p. [In Russian].
19. Glyatsiologicheskyy slovar'. Glaciological glossary / Edited by V.M. Kotlyakov. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1984: 528 p. [In Russian].
20. Vinogradov V.N. *Sovremennoe oledenenie rayonov aktivno-go vulkanizma*. Modern glaciation in the regions of active volcanism. Moscow: Nauka, 1975: 103 p. [In Russian].
21. Vinogradov V.N., Khodakov V.G. Snow cover of the Kronotsk range and mass balance of the Koryto Glacier. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1973, 22: 143–152. [In Russian].
22. *Otchet Instituta vulkanologii AN SSSR «Dinamika sovremennogo oledneniya i vzaimodeystvie s vulkanizmom»*. Report of the Institute of Volcanology, USSR Academy of Sciences: «Dynamics of modern glaciation and interaction with volcanism». Topic manager and executive V.N. Vinogradov. Petropavlovsk-Kamchatsky, 1982: 333 p. [In Russian].
23. Vinogradov V.N., Muraviev Ya.D. Variability of the present-day glaciers in volcanic regions of Kamchatka. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1982, 42: 164–170. [In Russian].
24. Vinogradov V.N., Muraviev Ya.D. *Lednik Kozelsky (Avachinskaya gruppa vulkanov)*. Kozelsky Glacier (The Avachinsky volcanic group). St. Petersburg: Hydrometeoizdat, 1992: 119 p. [In Russian].
25. Vinogradov V.N., Muravyev Ya.D. Regime of the glaciers in the volcanic regions of Kamchatka. *Glyatsiologicheskije Issledovaniya*. Glaciological Researches. № 27. Moscow: Nauka, 1985: 36–50. [In Russian].
26. Vinogradov V.N., Muravyev Ya.D. Peculiarities of glaciers evolution in the conditions of active volcanism. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1989, 66: 93–99. [In Russian].
27. Boshinsky A.N. Neustoychivost' estestvennykh mass l'da i snega na sklonakh gor. Instability of natural masses of ice and snow on mountain slopes. *Itogi nauki i tekhniki. Seriya glatsiologiya*. Results of science and technology. Glaciology Series. V. 2. Moscow, 1980: 124 p. [In Russian].
28. Muravyev Ya.D., Salamatin A.N. Prediction of a estimates of the dynamics of ice masses in the volcano-tectonic valleys of the Klyuchevskoy volcano. *Volcanology and Seismology*. 1993, 4: 43–53. [In Russian].
29. Kotlyakov V.M., Muraviev A.Ya., Nikitin S.A., Nosenko G.A., Rototaeva O.V., Khromova T.E., Chernova L.P. Glacier Revival and Advances in the Period of Global Warming. *Doklady Akademii nauk*. Doklady Earth Sciences. 2018, 481 (2): 1113–1118. Doi: 10.1134/S1028334X18080305.
30. *Atlas snezhno-ledovykh resursov mira*. World Atlas of Snow and Ice Resources: V. 1. Ed. V.M. Kotlyakov. Moscow: Russian Academy of Sciences, 1997: 392 p.