DOI: 10.21513/2410-8758-2020-3-42-72 УДК 551.324

ГОРНЫЕ ЛЕДНИКИ СЕВЕРА РОССИИ: ИЗМЕНЕНИЯ ЗА ПОСЛЕДНИЕ ДЕСЯТИЛЕТИЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВАРИАЦИЙ КЛИМАТА

М.Д. Ананичева, Ю.М. Кононов,*

Институт географии РАН,
Россия, 109017, Москва, Старомонетный пер., 29;
*Адрес для переписки: *Maranan@gmail.com*

Реферат. Цель статьи – обзор изменений горных ледников Севера России в континентальной ее части, на фоне меняющегося климата, реакции ледников на колебания, прежде всего, температуры воздуха и количества атмосферных осадков за последние десятилетия. Обзор охватывает реакцию климатических систем Севера России (горы Субарктики и Севера Прибайкалья) на изменения климата конца 20 века и последние десятилетия 21 века. Это системы расположены в горных странах: Полярный и приполярный Урал, Бырранга, Плато Путорана, хребты Орулган, Сунтар-Хаята, Черского, нагорья Чукотки, Колымы и Корякии, а также Верхнеангарского хребта. Судя по полученным картам трендов основных климатических характеристик, важных для оледенения, рост температур с Ю на С за 1966-2019 гг. и уменьшение осадков примерно в этом направлении способствует сокращению площади и массы ледников севера России.

Методы оценки размеров оледенения и их динамики базировались на сравнении данных Каталога ледников СССР и более поздних выпусков каталога (это ледниковые системы Чукотки и Колымы) с результатами дешифрирования космических снимков (Landsat, ASTER, Sentinel-2) и экспедиционных сведений. Большая часть исследуемых ледниковых систем представлена малыми формами оледенения, которым дается определение. Поскольку оценки сокращения ледников даны для разных систем на разные периоды времени, составить точную *единую* картину в этом обзоре не было задачей обзора. Реакция различных по размеру, морфологическому типу и форме залегания, экспозиции ледников не одинакова даже для примерно сходных условий изменения климата. Для каждого района приведены вариации средней летней температуры воздуха и осадков холодного сезона ключевых (ближайших) метеостанций за период от начала положительного тренда температур лета. В условиях длительного изменения климата в сторону потепления, фактор климата стал решающим, что подтверждается данными, приведенными в работе.

Ключевые слова. Ледник, климат, Субарктика, температура, осадки, изменения размеров ледника, тренды.

Введение

Ледник – это поток льда атмосферного происхождения. Под потоком подразумевается твердое тело, движущееся под действием силы массы с сохране-

нием непрерывности и принявшее форму и строение, обусловленные движением. Необходимо отметить, что признаком ледника является содержание в нем «преимущественно льда», Это важно в длительном масштабе времени, что помогает определить границу между «мореносодержащим льдом» и «льдистой мореной», а также каменным глетчером. Эти вопросы возникают в связи с деградацией небольших ледников, таких как, например, на Полярном Урале, Верхне-Ангарском хребте, Чукотке и Колыме.

Ледники образуются в результате выпадения твердых атмосферных осадков и их рекристаллизации на поверхность земли (геоида). Соответственно, они во многом продукт климата – сочетания температур в течение холодного и теплого периодов и количества осадков (снега).

Сокращение ледников (по площади и мощности) в последние десятилетия отмечено во всех частях планеты, что обусловлено без сомнения климатическими изменениями. В последнем докладе SWIPA (AMAP, 2017) говорится: «Многочисленные независимые исследования связывают ледниковые потери массы с потеплением атмосферы (особенно арктической) и океана, подтверждая, что масса наземного льда является чувствительным индикатором изменения климата». Полное исчезновение ледников грозит некоторым районам, находящимся в тропиках, например, в Африке, Южной Америке (Анды), в Индонезии (Rabatel et al., 2013; Prinz et al., 2018 и др.). Особенно такая перспектива ожидает небольшие ледники, площадью не более 1 км^2 (Debeer, Sharp, 2009, Oerlemans et al., 2016, Prinz et al., 2018). Горные ледники разных размеров также сильно сокращаются в умеренных широтах – в Альпах, Пиренеях, в районах Юга России (Huss, Fischer, 2016 и др.).

Горные ледники, находящиеся на территории России, сокращают свою площадь и мощность ледникового тела на протяжении нескольких десятилетий, от региона к региону различаясь лишь началом этих процессов и масштабом. Исключение составляют некоторые забронированные ледники, спускающиеся с вулканов Камчатки.

Ледники средних и больших размеров – это более частые объекты для мониторинга их динамики. Малые ледники, а часто они относятся к так называемым малым формам оледенения (МФО), представляют из себя чувствительные индикаторы изменений регионального климата. В частности, их балансовые показатели указывают на порог перехода его в другое состояние. Например, определенная комбинация климатических параметров может способствовать либо стаиванию ледников в системе, либо началу их роста и продвижения. Помимо климата на состояние небольших ледников в ледниковой системе влияет их вмещающая форма в рельефе, локализация ледников на том или другом склоне хребта, ориентация самих хребтов и др.

Понятие «малые формы оледенения» в терминологию ввел М.В. Тронов в 1954 г. (Тронов, 1954). Оно включало непосредственно ледники, многолетние снежники с ледяным ядром и перелетовывающие снежники. Снежно-ледовые образования составляют единый ряд: сезонные снежники, снежники-перелетки, фирновые ледники – малые ледники. Фирновый ледник – промежуточная фаза между снежником и малым ледником.

В 30-х годах прошлого века во время 2-го Международного полярного года появились сведения о навеянных ледниках на арктических островах и в субарктике (Земля Франса Иосифа, Полярный Урал и др.). Малые формы были также названы эмбриональным оледенением (определение П. А. Шумского, 1955), (это не связано с молодым возрастом), таковые распространены в Азии – это Урал, плато Путорана, горы Бырранга, Верхоянский хребет, Чукотское нагорье, Саяны, Кузнецкий Алатау, Прибайкалье, Забайкалье, хребет Кодар, Корякское нагорье; в Европе – Пиренеи; в Африке – г. Килиманджаро, г. Кения, горы Рувензори; в Америке – вулканы Мексики, Сьерра-Невада в США, хребты Венесуэлы; в Океании – Новая Гвинея.

Этим термином можно обозначить совокупность свойств малых форм оледенения: небольшие размеры, часто наличие фирна или наложенного льда, слабое разделение областей аккумуляции и абляции и пр. Большая часть рассмотренных далее ледниковых систем вмещает в основном небольшие по размеру ледники, различные МФО.

Цель настоящей работы – обзор изменений горных ледников Севера России, в континентальной ее части на фоне меняющегося климата, реакции ледников на колебания, прежде всего, температуры воздуха и количества атмосферных осадков за относительно долгий период времени.

Поскольку для ледников Российской части Арктики крайне недостаточно данных о их балансе массы, в данной работе анализируются такие показатели, зависящие от климата, как изменения размеров ледников.

Использованные методы и материалы

Чтобы оценить общие тенденции изменения важных для ледников климатических параметров, были построены карты трендов годовой ($T_{year,}$°C) и средней летней температуры (T_{sum},°C), а также общих осадков ($P_{year,}$ мм), осадков холодного периода ($P_{cs,}$ мм), (когда температуры весь месяц были устойчиво ниже нуля) и осадков теплого периода (P_{ws}, мм) – остальные месяцы, по имеющимся данным метеостанций. Для их расчета использовался временной отрезок с 1966 года (когда были исправлены показатели осадкомеров на северных станциях РФ) по 2019. Тренды (линейные) определялись по уравнениям регрессии рядов этих параметров с принятыми интервалами ошибок ± 0.1°C для температуры и ±5 мм для осадков.

Также для того чтобы оценить влияние местного климата на изменения ледников были построены графики T_{sum} и P_{cs} (ключевые параметры, связанные с абляцией и аккумуляцией соответственно) по ближайшим к ледниковым системам метеостанциям

Изменения площадей ледников во времени как показатель реакции ледника на климатические колебания оценивались разными методами, в зависимости от наличия доступных материалов, возможности полевых исследований и пр.

Малые ледники *Полярного Урала* изучались как с помощью топопланов, так и с разновременными DGPS съемками (ледник ИГАН), а так же применением космических снимков. В частности, по данным фотогеодезических съё-

мок 1963 г., наземных DGPS-съёмок 2008 и 2018 гг. и космических снимков (материалы спутника Terra, и спутника Sentinel-2, полученные 26 и 27 августа 2018 г.) оценены изменения геодезического баланса ледника ИГАН и размеров 30 ледников с 1953 по 2018 г. (Носенко и др., 2020).

Исследования динамики ледникового покрова горного *массива Бырранга* были основаны на анализе данных дистанционного зондирования (ДДЗ), полученных с борта Космического аппарата *Landsat* при помощи съемочной аппаратуры *Thematic Mapper* и *Thematic Mapper+*. Расположение объектов исследования – ледников за полярным кругом и особенности климата (полярная ночь, облачность и дымка) затрудняют отбор космических снимков территории гор Бырранга. Дополнительные трудности отбора космических снимков заключается в возможности дешифрирования ледников лишь в период максимальной абляции, с конца августа по начало сентября (с 20.08 по 05.09) каждого года. Для уточнения размещения отдельных ледников и коррекции границ применена цифровая модель рельефа (ЦМР или DEM), построенная по данным ETOPO-30 с пространственным разрешением 1 км/пиксель (Ананичева, Капустин, 2010).

Небольшие ледники *плато Путорана* изучались В.А. Сараной (2005), им составлена карта вновь обнаруженных ледников по материалам собственных экспедиций и космических снимков.

Обследование малых форм оледенения Н.В Коваленко, В.В. Поповниным (2005) проводились на северном уступе Ламских гор, вблизи южного берега оз. Лама. Вследствие труднодоступности местных ледников исследования были сконцентрированы только в 3 ледниковых карах: двух с ледниками Мальборо и Привес и в одном с многолетним снежником Струдомс. Изучались геометрия, зоны льдообразования, скорости движения этих ледников с помощью съемки забуренных реек.

Современное состояние ледников *хребта Орулган* было оценено на основе анализа летних снимков ASTER 2010 г. и соответствующей цифровой модели рельефа (ASTER GDEM). Полученные результаты сравнивались с Каталогом ледников СССР, составленным по данным экспедиционных работ и аэрофотосъемки 1960-х гг. Соотнесение ледников с данными из Каталога (Каталог ..., 1972) велось по пяти параметрам: длине ледников, их площади и положению относительно друг друга, а также бассейну питаемой ими реки и экспозиции склона. Информация о бассейнах рек получена с оцифрованной топографической карты масштаба 1:1 000 000. Работа начиналась с идентификации опорных ледников (таких, как самый крупный ледник системы – Колосова) и последующего соотнесения ледников, находящихся между ними, с данными таблицы Каталога (Ananicheva, Karpachevsky, 2015).

Динамика ледников *Сунтар-Хаята* и хребта *Черского* (эти ледники среднего размера от 1 до 8 км^2) оценивалась по снимкам Landsat: были определены площади, длины, характерные высотные точки ледников двух горных стран. С целью наилучшего представления данных для визуального дешифрирования были созданы псевдоцветные синтетические изображения из каналов TM3, TM5, TM7 и TM2, TM4, TM7. Именно это сочетание каналов дает наи-

более точное и контрастное представление о поверхностях, покрытых снегом и льдом, и позволяет точнее отделить ледник от свободной ото льда территории (Ананичева и др., 2006).

Исследование ледников массива Буордах (хребет Черского) были проведены группой ученых (Gurney, et al 2008) и были основаны на картировании, полученном на основе спутниковых снимков Landsat 7 ETM + от августа 2001 г., дополненных данными полевых исследований, полученных в то время.

Работа по оценке изменений геометрии ледников Сунтар-Хаята была продолжена А.А. Галаниным (Галанин и др., 2013). Это исследование было основано на полевой геоморфологической съёмке, выполненной в 2012 г., и пространственном анализе разновременной аэрокосмической съёмки высокого разрешения (0.6-1 м). Им и его аспирантом также были изучены каменные глетчеры района (Лыткин В.М., Галанин А.А. 2016).

В горах Сунтар-Хаята в 1956 г. была организована экспедиция, работавшая по программе МГГ, которая провела широкий комплекс гляциологических наблюдений в Северном массиве гор, и в частности на опорном леднике № 31. С 2001 по 2013 годы (не во все годы) сотрудники ИГ РАН, в том числе авторы этой статьи, проводили полевые работы на леднике № 31, изучались различные характеристика этого и соседних ледников *in situ*, привлекались уже снимки высокого разрешения из сервиса Bing (Мавлюдов, Ананичева, 2016). Японские исследователи также принимали участие в метеорологических и гляциологических наблюдениях на этом леднике (Takahashi et al., 2011; Shirakawa, et al., 2016).

Возвращаясь к малым формам оледенения (МФО), важно отметить, что не все они еще даже открыты в пределах территории России, описаны в статьях и каталогах. Так, ледники, МФО *Верхнеангарского хребта* были обнаружены в 2017-18 гг. Г. Ю. Пакиным, в дальнейшем исследованы им и другими сотрудниками в экспедиции ИГРАН в 2019 г. (Ананичева и др., 2019а). Динамика некоторых МФО изучена в сравнении их современных размеров, полученных в результате дешифрирования снимков с сервиса Bing и Sentinel-2, с теми, что выявлены по снимкам миссии CORONA (1967 г), (Ананичева и др, 2019б). Во время экспедиций был подробно исследован каровый ледник Огдында-Маскит, забурены рейки, установлены температурные логгеры в долине ледника. Предполагается повторная экспедиция в этот район в 2021 г.

К МФО также относятся ледники *Чукотки и Колымы.* Они изучались во время 2-х экспедиций на ледники Чукотского нагорья (2017-2018 гг.). Также был проведен анализ космических снимков за разные периоды времени в комбинации с цифровыми моделями рельефа. Цель работы со снимками – оценка основных параметров ледников Чукотки и Колымы – размеров и объемов, и их изменение во времени. За полевые работы была сделаны GPS съемка достижимых ледников (бассейны бухты Лаврентия и Залива Креста), и съемка с помощью цифровой камеры квадрокоптера. Характеристики ледников Колымского и Чукотского нагорья были определены по космическим снимкам Sentinel-2, разрешение 10 м. (Ананичева, Карпачевский, 2016; Ananicheva et al., 2019, подана в печать).

Последняя ледниковая система, которая рассматривается в данной работе – *Корякское нагорье*, ледники которой относятся как к МФО, так и имеют средние размеры, В этот район предполагается экспедиция в 2020 г., чтобы помимо прочего проверить на местности полученные оценки площадей и высотных точек ледников по космическим снимкам. Получены на сегодня лишь предварительные результаты дешифрирования и анализа космических снимков (Sentinel-2A/B, 2019 г. и Ресурс-П, 2018 г.) с целью определить гляциологические характеристики ледников Корякского нагорья, такие как их площади, длины, пр. Высоты нижней и верхней точек ледников, границ питания определялись по детальным цифровым моделям рельефа 2016-2018 гг., полученных с сервиса Arctic DEM. Анализировались ледники большой группы северной части и меньшей по количеству ледников – южной части нагорья.

Оценка климатических изменений и динамики ледников Севера России

В целом, значения трендов годовых температур (рассчитаны по станциям, прилегающим к горным районам оледенения, рис. 1 и 2) увеличиваются с юга на север, от Субарктики до арктических широт. Изменения летних температур (T_{sum} – обычно характерна для периода с июня по август или для расположенных южнее ледниковых систем – с июня по сентябрь) также увеличиваются к арктическим широтам, кроме того, они растут с континента на Камчатский п-ов и Корякию. Величины трендов осадков имеют более сложную картину: P_{year} уменьшаются с юга на север, на крайнем севере континента вплоть до п-ва Чукотка, имеют отрицательные значения, P_{cs} отрицательны в горных районах уже умеренных широт, и еще более уменьшаются к континентальной Арктике, P_{ws} на большей части континента положительны, а имеют отрицательные значения на краевых его участках, в наиболее высоких широтах.

Тенденции увеличения температур с Ю на С и уменьшения осадков примерно в этом направлении не способствует развитию оледенения севера России.

Карты направленности изменения температур (тренды) показаны на рис. 1а, б, осадков – на рис. 2а, б, с.

Основные индикаторы изменения климата в Арктике, охватывающие период 1971-2017 гг., демонстрируют фундаментальные изменения среди девяти ключевых элементов арктической системы. Повышение температуры воздуха вызывает увеличение влажности, осадков, расхода воды в реках, повышении высоты границы питания горных ледников и потери массы наземного льда (Box et al., 2019). Таким образом, динамика современных ледников является индикаторам изменения климата в масштабе временного периода в несколько десятилетий.

Данные наблюдений за балансом массы ледяного покрова в Арктике указывают на стабильность или рост с 1971 года до середины 1980-х годов, за которыми последовал сильный рост потерь наземного льда. В этот 47-летний период (1971-2017 гг.) Арктика являлась важнейшим глобальным источником

наземного льда, на который приходилось 48% вклада в повышение уровня океана в течение 2003-2010 гг. (AMAP, 2017) и 30% от общего повышения уровня океана с 1992 года (Box et al., 2019). После Гренландии наибольший вклад в этот процесс вносят такие арктические регионы как Аляска, Канадская Арктика и Российская высокая Арктика.

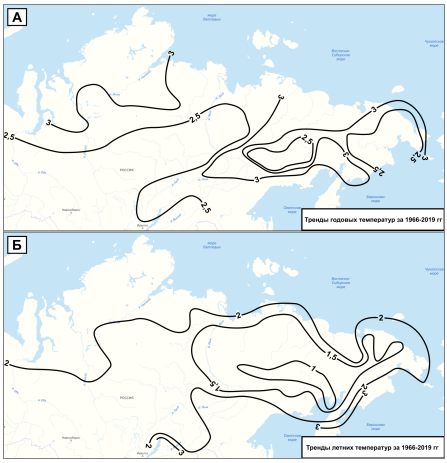


Рисунок 1. Тенденции изменения средней годовой температуры (T_{year}) – **а** и средней летней температуры – **б** за период 1966-2019, °C

Figure 1. Trends of mean annual temperature (T_{year}) –**a** and mean summer temperature –**b** for the period 1966-2019, °C

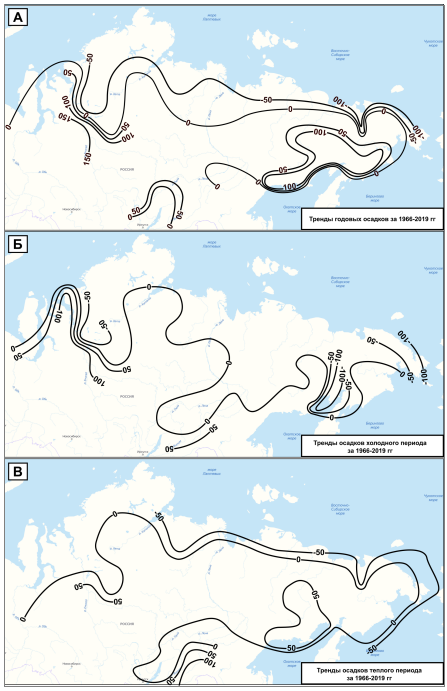


Рисунок 2. Тенденции изменения общих осадков (P_{year}) – **а**, осадков холодного периода (P_{cs}) – **б**, и осадков теплого периода (P_{ws}) – **в** за период 1966-2019, мм

Figure 2. Trends of total precipitation (P_{year}) –a, precipitation of the cold period ($P_{cold\ period}$) –b, and precipitation of the warm period ($P_{warm\ period}$) – for the period 1966-2019, mm

В этой же работе приведены данные связи T_{ws} (для каждого региона) и осадков P_{cs} с потерей массы льда, рассчитанные с помощью реанализа NCEP/NCAR (табл. 1).

Таблица 1. Сравнение баланса массы наземного льда с температурой теплого сезона и выпадением осадков в холодное время года по регионам (Box et al., 2018)

Регион	Коэффициент корреляции. баланс массы vs $T_{\text{regional WS}}$	Коэффициент корреляции. баланс массы vs $P_{\text{regional CS}}$	Коэффициент множественной корреляции. баланс массы vs $T_{\text{regional WS}}$ и $P_{\text{regional CS}}$
Гренландия	−0.612	−0.038	0.620
Аляска	−0.715	0.281	0.744
Канадская Арктика	−0.760	0.087	0.760
Скандинавия	−0.674	0.627	0.823
Шпицбереген	−0.633	0.032	0.656

Как видно из таблицы, во-первых, баланс ледниковой массы сильно меняется в зависимости от теплого сезона. Связь осуществляется через простую взаимосвязь градусо-дней таянья, но также связана с нисходящей длинноволновой радиацией и снижением поверхностного альбедо, обусловленным повышенным таяньем. Из сравниваемых регионов баланса массы ледников, ледниковый щит Гренландии демонстрирует самую сильную корреляцию с региональным теплым сезоном, за ним следуют баланс ледяной массы в Канадской Арктике и на Шпицбергене. На изменчивость баланса ледниковой массы в Скандинавии в большей степени влияет изменчивость осадков.

Включение сумм осадков в регрессионный анализ предполагает преобладающее влияние климата теплого сезона на баланс массы. Существует устойчивая картина большей корреляции величины отрицательного баланса массы с $T_{\text{regional ws}}$ и меньшей положительной корреляции баланса массы величины с $P_{\text{regional cs}}$.

Эти связи показывают, как влияют климатические характеристики на баланс массы крупных ледниковых образований. Они в определенной степени характерны и системе «горные ледники - климат».

Хибины

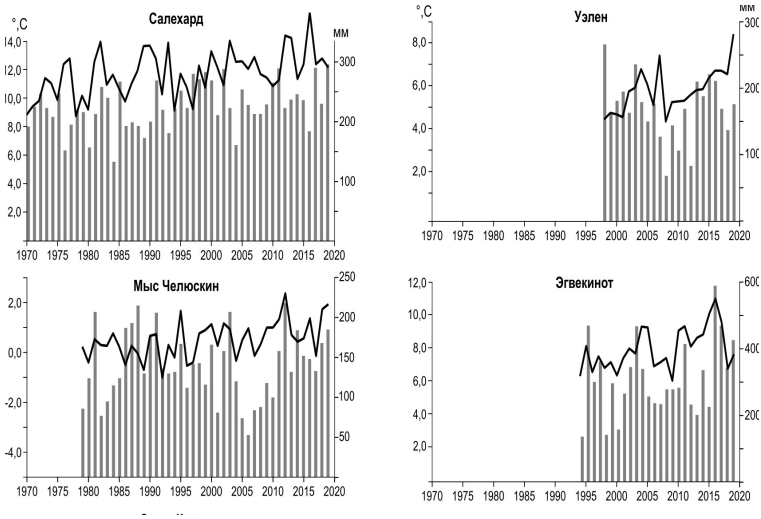
В этом горном массиве на Кольском полуострове было обнаружено четыре маленьких ледника общей площадью 0...1 км^2 (Каталог.., 1966), расположенных на 600 м ниже снеговой линии, питание они получали за счет метелевого переноса, располагаясь в нишах подветренных склонов. В настоящее время их существование не подтверждено.

Полярный и приполярный Урал

Современное оледенение севера Урала представлено различными МФО, ледниковые образования здесь имеют площадь менее 0.5 км^2. В Каталоге ледников СССР (1950-60е гг.) обозначен 91 ледник площадью 20.8 км^2 (наиболее крупный из них – ледник ИГАН распространялся на 1.25 км^2 и относился к карово-долинному морфологическому типу).

В конце 1940-1950х годов здесь было открыто несколько десятков новых ледников и было доказано, что это не реликты древнего оледенения, а полноценные ледники. К концу 1980-х гг. было известно о 143 уральских ледниках, площадью 28.7 км^2 (Долгушин, Осипова, 1989), включая ледники площадью менее 0.1 км^2, которые не вошли в Каталог. За период с 1959 по 1975 баланс ледников ИГАН и Обручева был слабо отрицательным (-1.1 г см$^{-1}$ в год).

Из ледников этого региона, по данным Каталога ледников СССР, составленном по материалам аэрофотосъёмок 1953 и 1960 гг., на Приполярный Урал приходилось 48 ледников. В августе 2002 г. Институтом географии РАН в этот регион была организована экспедиция, обследовавшая ледник Гофмана (наибольший в Приполярном Урале) на Саблинском хребте и ледник Манарага в районе горы Народной (1894 м над у. м.). Последний ледник уже перестал существовать, на его месте образовалось озеро (Глазовский и др., 2005). Недавние исследования в Полярном Урале показали, что оледенение устойчиво сокращается. 30 исследованных ледников Полярного Урала потеряли в среднем 23% своей площади в период с 1960-х годов по 2008 г. Скорость сокращения площади в 2000-2008 гг. возросла по сравнению с периодом 1981-2000 гг. А по сравнению с периодом 1953-2000 гг. средняя годовая скорость сокращения площади ледников увеличилась вдвое. С начала 21 века ледники Полярного Урала потеряли 27.7% площади. Это согласуется с трендами температур и осадков: T_{year} растет здесь от 2.5 до 3.0°С за расчетный период, T_{sum} – на 2.°С, осадки зимнего периода убывают с трендом от 50 мм до нуля к п-ву Ямал, общие имеют нулевой тренд (см. рис. 1 и 2). Судя по данным метеостанции Салехард (рис. 3), потепление началось в конце 1960-х гг. и к настоящему времени T_{sum} возросла на ~4°С, зимние осадки в среднем за этот период равнялись 150-200 мм, в отдельные годы достигая 250-270 мм. Таким образом, длительный режим (50 лет) потепления в период абляции ледников и невысокие величины осадков обусловили значительное таянье ледников Севера Урала. Они сохранились во многом благодаря формам рельефа – карам и ориентации по отношению к потоку влагонесущих воздушных масс (С и СЗ).



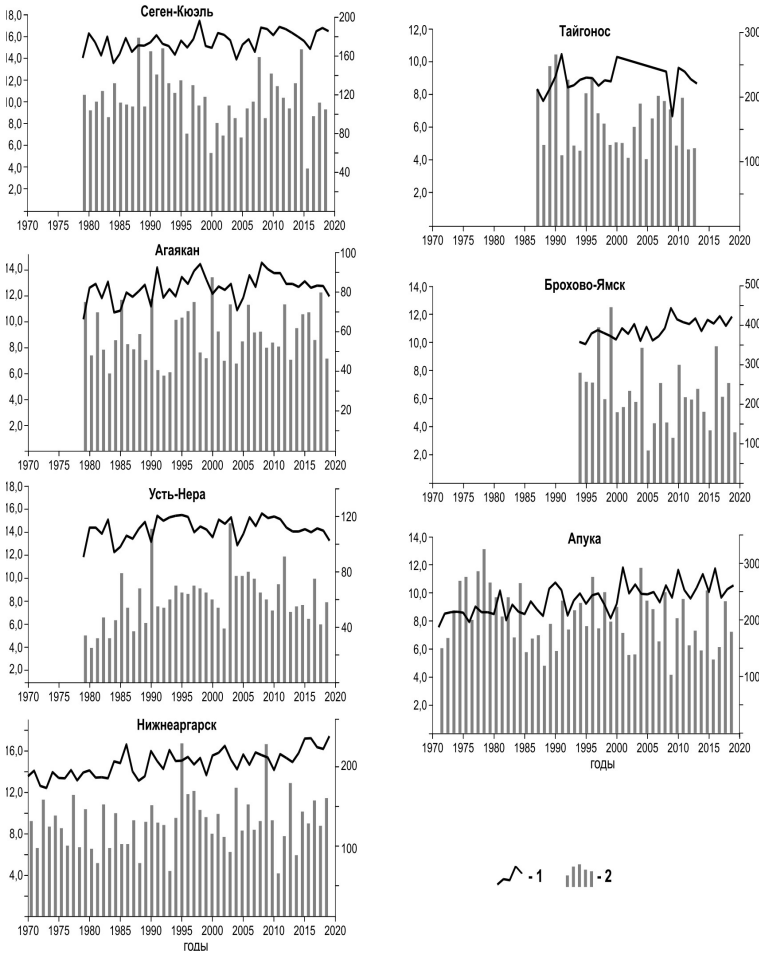


Рисунок 3. Графики температуры воздуха теплого сезона (Tsum) – **1**, и осадков холодного периода (Pcs) – **2** для ключевых (ближайших метеостанций) для каждой ледниковой системы, приведенной в этой работе за период с начала положительного тренда Tsum

Figure 3. Graphs of air temperature (T_{sum}) – **1**, and cold season precipitation ($P_{cold\ season}$) – **2** for the key (nearest weather stations) for each glacial system presented in this work, from the beginning of the positive trend of T_{sum}

В настоящее время ледник ИГАН остаётся самым большим по площади на Полярном Урале, хотя за два последних десятилетия потеря площади была в 2 раза больше по сравнению с периодом 1953-2000 гг. (Носенко и др. 2020).

Горы Бырранга, п-ов Таймыр.

Эта ледниковая система по размерам приближается к уральской – она состоит из 96 ледников общей площадью 305 км², из которой более 3/4 приходится на восемь ледников, относящихся к переметно-долинным, долинным и карово-долинным морфологическим типам. Остальные ледники – это малые присклоновые, каровые, карово-висячие (Каталог…, 1980). Ледники расположены довольно компактно в наиболее возвышенной северо-восточной части этой горной страны. Начиная с 1967 г. (время экспедиционной работы в этом

районе ААНИИ под руководством Л.С. Говорухи (1971)) по 2003 г., наибольшие потери площади в абсолютных величинах (км^2) понесли долинные и переметные типы в основном северных экспозиций как самые крупные по размерам ледники (2-4.5 км^2 по данным 1967 г.), схема ледников Бырранга дана на рис 4. В среднем эти ледники уменьшились по площади от 0.1 до 0.7 км^2. Каровые, карово-долинные, карово-висячие, присклоновые отступили от 0.01 до 0.1 км^2, будучи по площади от 0.1 до 1.0 км^2 (по данным АФС-1967). В относительных величинах, наибольшая разница характерна карам, долинным и карово-долинным ледникам, средним и малым по площади. К 2003 году по нашим расчетам оледенение гор Бырранга с 1967 года уменьшилось примерно на 17%. К настоящему времени сокращение площади ледников Бырранга превысило 20-25%, если учесть климатические тенденции последних лет (Ананичева, Капустин, 2010). По данным станции Мыс Челюскин, тренд T_{sum} стал устойчиво положительным с 1979 г. и составил к 2019 г 1.3° С, по ней же определены вариации сезонных температур (T_{spring}, T_{sum}, T_{fall} и T_{winter}).

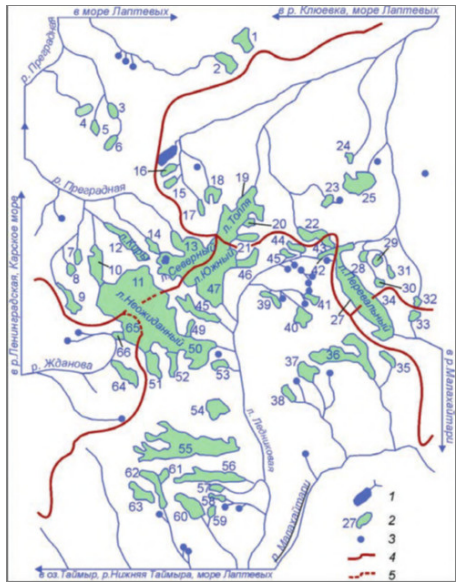


Рисунок 4. Схема расположения ледников в горах Бырранга (Говоруха, 1971)
1 – озеро и водоток; 2 – ледник и его номер; 3 – ледник площадью менее 0.1 км^2; 4 – водораздел; 5 – ледораздел
Figure 4. Location of glaciers in the Byrranga mountains (Govorukha, 1971)
1 - lake and watercourse; 2 - glacier and its number; 3 - a glacier with an area of less than 0.1 km2; 4 - watershed; 5 – ice divide

Из графика (см. рис. 5) видно, что рост годовой температуры идет за счет зимних и межсезонных температур, примерно начиная с конца 1990х гг. Летние температуры увеличились незначительно, но некоторый рост имеет место. Температуры весны и осени влияют на увеличение длины сезона абляции. Осадки, как $P_{year,}$ так и $P_{cold\ season}$, имеют отрицательные тренды, по абсолютной величине в среднем малы – 100 мм, а в отдельные годы достигают 200 мм. Эти тенденции обуславливают сокращение ледников Бырранга, находящихся на крайнем севере Российской континентальной Арктики.

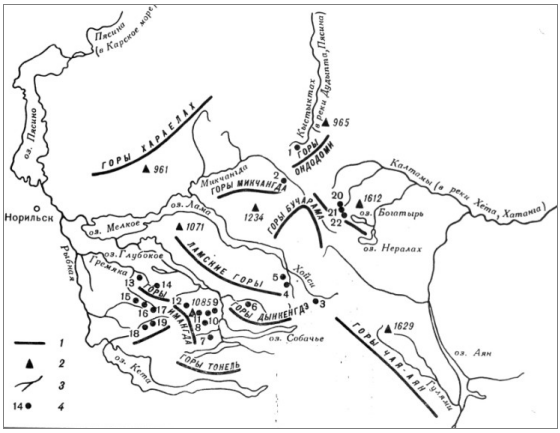


Рисунок 5. Колебания сезонных температур за 1966-2019 гг. Метеостанция Мыс Челюскин.
Figure 5. Fluctuations in seasonal temperatures for 1966-2019. Cape Chelyuskin weather station.

Плато Путорана

На конец 20-го – начала 21-го вв. оледенение плато, наиболее высокой части Среднесибирского плоскогорья, представлено 67 небольшими ледниками общей площадью 7.18 км^2, оно является самостоятельной ледниковой системой Субарктики. На плато Путорана можно выделить несколько очагов оледенения, приуроченных к наиболее расчленённым и возвышенным участкам: горный массив Имангда в западной части (26 ледников), район Ламских гор (13 ледников), горы Хараулах на крайнем западе плато (6 ледников), рис.6.

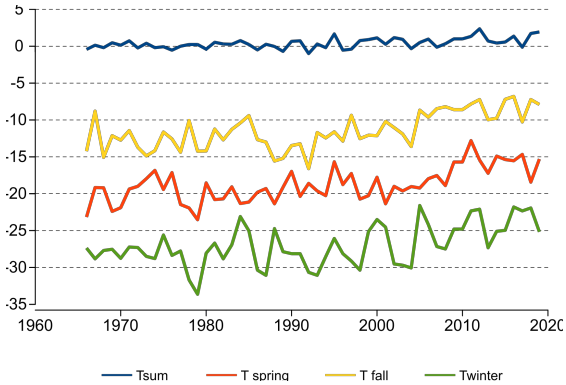


Рисунок 6. Схема ледников плато Путорана из Каталога ледников СССР
Цифрами обозначены: 1 – хребты, 2 – вершины с высотами в м, 3 – реки, 4 – ледники с номерами по Каталогу
Figure 6. Scheme of glaciers of the Putorana plateau from the Catalog of Glaciers of the USSR.
The numbers denote: 1 - ridges, 2 - peaks with elevation, m, 3 - rivers, 4 - glaciers with Catalog numbers

На конец 1980-х здесь было известно о 22 ледниках, общей площадью 2.54 км^2. Они маленькие, крутые, без дифференциации и области аккумуляции, и расхода (Долгушин, Осипова, 1989), т.е. относящиеся к МФО.

С момента первых наблюдений проведенных в 1972 года и до 2000 года ледники плато Путорана претерпели незначительные изменения, особенно это

касается навеянных ледников, принадлежащих к склоновой группе. Ледники, лежащие в ледниковых карах, испытали наибольшую деградацию: у края ледников сформировались поверхностные морены, образовались небольшие ледниковые озера, некоторые ранее известные каровые ледники № 2, 7, 8, 9, 10, 18 исчезли. На их месте сейчас располагаются маломощные ледяные тела, раздробленные на отдельные части выходами коренных пород и присыпанные с поверхности мореной, которые по всем признакам можно отнести к группе многолетних снежников. Ледники стали интенсивно сокращаться после 2000 года. За последнее десятилетие их площадь и мощность визуально изменились: в среднем ледники потеряли от 10 до 15% своей массы (Сарана, 2003).

Тренды T_{year} и T_{sum} для плато Путорана положительные от 2.5 до 3.0°С за расчетный период и от 1.5 до 2.0°С – соответственно. Тренды осадков холодного периода и года нулевые, т.е. питание для поддержания ледников уменьшается, а температуры абляционного периода растут.

Исследования во время экспедиции и по космическим снимкам Е.И. Успенской (устное сообщение) и ее руководителя Н.В Коваленко (2008), показывают, что за последние полтора десятка лет границы МФО (ледников) № 30 и 31 в Ламских горах существенно преобразились. Они практически сравнялись по площади: соответственно 0.082 и 0.083 км² к 2016 г. и 0.062 км² и 0.060 км² к 2018 г. Таким образом, № 31 утратил 33% площади за 14 лет, но его контуры «сжимались» более или менее равномерно по всему периметру. Площадь ледника № 30, однако, по отношению к 2004 г. сократилась сильнее, чем у его соседа, – на 45%. В целом современная деградация этих образований происходит непрерывно, а за 45 лет после 1973 г. опорные ледники № 31 и 30 стали меньше в 2.4 и 2.7 раз, соответственно. Это естественно, поскольку тренды годовой температуры за расчетный период здесь осуществляются за счет тренда T_{spring}, (максимальный) и $T_{sum,}$ что способствует удлинению периода абляции и его интенсивности.

Ледники хребта Орулган

По данным Каталога ледников СССР, оледенение Верхоянья представлено в основном всеми разновидностями каровых и висячих ледников и только двумя долинными. Каталог содержит данные по 74 ледникам общей площадью 17.38 км^2. Самый крупный из них – ледник Колосова, переметный – был площадью 4.22 км^2.

Потепление летом во время абляции ледников в районе Верхоянья отмечается уже длительное время, тренд T_{sum} составляет от 1.5 °С до 2.0° С за 1966-2019, T_{year} – от 2.0 до 3.0°С, тренды осадков – нулевые, к северу понижаются до минус 50 мм.

По данным станции Сеген-Кюэль (западное Верхоянье) потепление стало выраженным с 1979 г., тренд 1.8°С с этого времени, осадки $P_{cold\ season}$ малы, в среднем менее 100 мм в год (см. рис. 3).

Анализ космических снимков на территорию хр. Орулган позволил найти и идентифицировать лишь 70% ледников, приведённых в Каталоге. Это – ледники № 2-9, 12-29, 33-58, 62, 63, 65-67, 73, 74 общей площадью около 12

км^2. Ледники № 1, 10, 11, 30-32, 59-61, 68-72 за 50 лет со времени каталогизации исчезли из-за потепления климата и небольших размеров ледников (естественные причины), не исключены и ошибки при составлении Каталога.

Среди четырёх ледниковых систем хр. Орулган, относительное сокращение с 1967 по 2010 гг. составило: северный массив, западный склон – 53%; северный массив, восточный склон – 69.9%; южный массив, западный склон – 62.1%; южный массив, восточный склон – 72.5%. Минимальное уменьшение площади характерно для первой ледниковой системы, получающей, по-видимому, больше осадков с Атлантики; системы же, находящиеся на подветренном макросклоне, потеряли больше своей площади. Больше всего отступили (уменьшили свою площадь) ледники северных и восточных экспозиций. Максимум отступания характерен для каровых и карово-долинных ледников, которые лидируют и по числу ледников, а каровые и висячие – по его относительной степени отступания в процентах.

Современные изменения климата Субарктики, таким образом, значительным образом обусловливают отрицательный баланс массы горных ледников хребта Орулган. Питание не компенсирует увеличение их таяния, и ледники, по-видимому, стали интенсивно таять спустя некоторое время после начала выраженного тренда T_{sum}, т.е. к концу 1980х. А со времени каталогизации оледенение хребта сократилось по площади более чем на половину (Ananicheva, Karpachevsky, 2015).

Горы Сунтар-Хаята и хребет Черского

Этот регион Северо-востока Сибири до сих пор считаются недостаточно исследованным с точки зрения климата и оледенения, в особенности это касается хребта Черского. В последнее время, помимо оценок изменения размеров, геометрии ледников гор Сунтар-Хаята появились также работы по расчету поверхностного баланса, например (Zhang et al., 2017), эта работа основана на связи абляции с климатическими характеристиками. Последние десятилетия и в этом крупном регионе Сибири также отмечается потепление, выраженное в положительных трендах температур. Судя по картам на рис. 1, тренды T_{year} – от 2.5 до 3°С за расчетный период увеличиваются с З на В, к центру Восточной Сибири, T_{sum} растут от 1.5 да 2°С – с Ю на С, к арктическим широтам, тренды осадков P_{year}, $P_{cs,}$ P_{ws} – нулевые.

В задачу исследования (Ананичева и др., 2006) входила оценка изменения размеров ледников Сунтар-Хаята и Черского по данным сравнения космических снимков *Landsat* (2003 г.) и каталога ледников СССР. Анализировались следующие параметры: длина, площадь ледника, расстояние от конца ледника да переднего фронта «свежей» конечной морены, а также определялись изменения форм ледников, их дезинтеграция или слияние. Определение площади ледников на район Сунтар-Хаята в Каталоге ледников СССР в подавляющем большинстве случаев сделано по данным аэрофотосъемки 1945 г., в отдельных случаях использовались данные М.М. Корейши 1959 г. (Корейша, 1963) и экспедиции ИГРАН в 1970 г. Мы проанализировали изменение площадей (dS) для тех ледников, величина которых была определена по АФС-1945 и 1970-х

гг. и снимкам 2003 г., по группам – единый морфологический тип ледника и его экспозиция, табл. 2.

Таблица 2. Сокращение площади ледников Сунтар-Хаята

А) с 1945 гг. до 2003 г.								
Морфологический тип	**Экспозиция**							
	С	**СВ**	**В**	**ЮВ**	**Ю**	**ЮЗ**	**З**	**СЗ**
Сложно-долинный	0.41/1/13.7	0.43/2/16					0.7/2/27.5	0.22/2/8.2
Долинный	0.12/5/9.5	0.21/7/20.2		0.1/1/6.3	0.16/1/0		0.48/1/26.7	0.25/9/17.9
Карово-долинный	0.2/6/27.5	0.16/10/17.5			0.87/1/87		0.33/1/33	0.12/10/15.4
Каровый	0.11/6/29.6	0.27/7/31.2					0.08/3/13.8	0.18/14/33.6
Карово-висячий	0.18/13/27.5	0.24/3/69.1		0/1/0			0.16/1/20	0.17/5/36.7
Висячий	0.17/7/33.6	0.26/4/49.7	0.23/1/76.7			0/1/0		0.1/5/39
Перемет-ный			0.45/2/44.2					
Б) с 1970-х гг. до 2003 г.								
Сложно-долинный	1.09/1/14.5							
Долинный	0.46/2/11.4	0.56/2/31						0.35/3/10.4
Карово-долинный	0.71/1/47.3		0.18/1/20.0				0.19/1/38	0.11/1/18.3
Каровый								
Карово-висячий	0.27/1/67.5	0.13/3/24.5	0.11/1/36.7					
Висячий							0.1/1/50.0	0.17/1/34
Перемет-ный			0.48/1/34.3					0.0/1/0

Примечание. В ячейках таблицы приведены через разделитель три характеристики: среднее для данной группы отступание (км^2), количество ледников в группе и относительное отступание в % от площади, приведенной в каталоге

Большинство ледников Сунтар-Хаята имеют северную экспозицию, преобладают долинные и каровые морфологические типы. Начиная с 1945 г., наибольшие потери площади в абсолютных величинах (км^2) понесли сложно-долинные и долинные типы различных экспозиций как самые крупные по размерам ледники. В среднем по группе площади уменьшились от 0.9 до 0.45 км^2.

По нашим оценкам, общая площадь ледников в 2003 г. гор Сунтар-Хаята составляла 162.2 км^2, из которых 155.5 км^2 получены по измерениям космических снимков. Поправка в 6.7 км^2 рассчитана из соотношения площади всех ледников в Каталоге к площади ледников, которые были охвачены снимками. Тем самым площадь оледенения Сунтар-Хаята в 2003 г. оказалась меньше суммарной площади ледников по данным Каталога (различные даты съемок) на 37.2 км^2 или на 19.3%.

По данным А.А. Галанина и др. (2013), группа которого работала только на ледниках Северного массива Сунтар-Хаята, в районе горы Мус-Хая, к 2012 году площадь оледенения массива г. Мус-Хая сократилась примерно на 36%

по сравнению с данными М.М Корейши, представленными в каталоге ледников СССР, 1945 г. Из-за абляции поверхность ледника № 31 в краевой части понизилась на 50-70 м. С некоторой долей приближения можно сказать, что все оледенение могло сократиться на 36% к этому времени, поскольку Северный массив по количеству ледников и их величине занимает промежуточное место между Южным и Центральным массивами. Полевые исследования в 2013 г (Мавлюдов, Ананичева, 2016) показали, что все ледники Северного массива гор Сунтар-Хаята в 2011-2013 гг. имели отрицательный баланс массы, поскольку вся их поверхность к концу летнего сезона находилась в области абляции, а высота границы питания располагалась у верхней кромки ледников, т.е. на высоте около 2700 м н.у.м. (рис. 7).

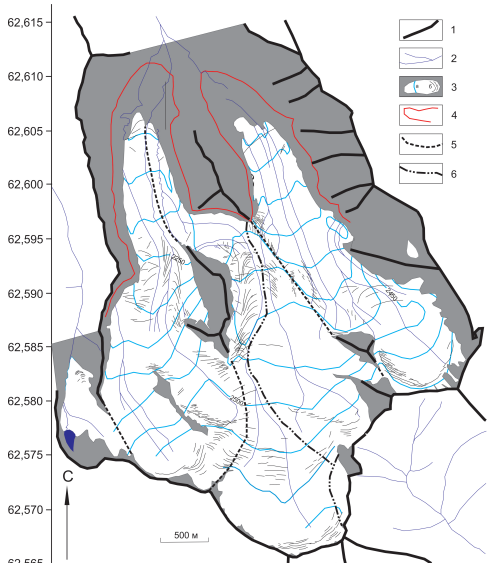


Рисунок 7. Ледники Северного массива гор Сунтар-Хаята

а – ледники по состоянию на 1945 г. б – современное состояние ледников. 1 – горные хребты и гребни, 2 – водные объекты: а – водотоки, в том числе на ледниках, б – озера, 3 – ледники: а – горизонтали на поверхности льда, б – трещины, 4 – граница морен малого ледникового периода, 5 – границы между ледниками, 6 – границы водоразделов на леднике № 30, 7 – номера ледников, 8 – ледниково-подпрудные озера, существовавшие ранее, 9 – направление стока воды через гребни хребтов при больших размерах ледников, 10 – современное направление течения льда на ледоразделах

Figure 7. Glaciers of the Northern Massif of the Suntar-Khayata

a – glaciers in 1945, б – modern state of glaciers. 1 – mountain ranges and ridges, including nunataks, 2 – water bodies: a –streams, b – lakes, 3 – glaciers: a – contour lines, b – crevasses, 4 – a boundary of the LIA moraine, 5 – boundaries between glaciers, 6 – watershed boundaries on Glacier № 30, 7 – number of glaciers, 8 – glacier-dammed lakes previously existed, 9 – direction of water drainage through ridges at larger glacier size, 10 – present time direction of ice movement over ice divides

С периода максимума последнего оледенения, предположительно, малого ледникового периода (МЛП), понижение поверхности ледников достигает 102-117 м на ледниках № 30 и 31. За время с МЛП ледники № 28-31 потеряли около 0.38 км^3 льда.

По данным метеостанции Агаякан, расположенной непосредственно в макро долине, в основании которой находятся ледники Северного массива Сунтар-Хаята, потепление в районе началось в начале 1960-х, но для T_{sum}

стало выражено спустя 10 лет, тренд ~2°С до 2019 г, P_{cs} в среднем всего 50-60 мм по абс. величине. Эти параметры обуславливают динамику существенного таяния ледников Массива (см. рис. 3).

Очаги оледенения *хребта Черского* разбросаны на обширной территории, на С, СВ и СЗ склонах расположено 90% ледников (из которых 13% забронированы моренным чехлом) за исключением массива Буордах, откуда ледники растекаются в разных направлениях (Долгушин и др., 1989).

Сведения о площадях ледников хребта Черского, помещенные в Каталоге ледников СССР, датированы съемкой 1970 г. Поэтому табл. 3 включает значения потери площади ледников различных морфологических типов и экспозиции ледников с 1970 г по 2003 г.

Таблица 3. Сокращение площади ледников хребта Черского с 1970-х гг. до 2003 г.

Морфологический тип	Экспозиция						
	С	СВ	В	ЮВ	ЮЗ	З	СЗ
Дендритовый	1.2/1/10						
Сложно-долинный	0.44/5/23.1	0.84/2/55.4	1.98/1/55				0.79/3/11.6
Долинный	0.21/9/16.4	0.37/2/49.4	0.67/2/52	0.12/2/14.3		0.12/2/13.5	0.5/3/38.4
Карово-долинный	0.14/4/18.3	0.64/1/71.1	0.48/1/60				
Каровый	0.11/19/27.7	0.8/1/21.3	0.04/2/27.5	0.13/2/26.5	0.08/1/11.4		0.35/2/62.5
Карово-висячий	0.08/3/25						0/1/0
Висячий	0.06/5/25	0.16/1/53.3					0.05/1/50.0

Примечание. В ячейках таблицы приведены через разделитель три характеристики: среднее для данной группы отступание (км^2), количество ледников в группе и относительное отступание в % от площади, приведенной в каталоге

Здесь, в системе Черского, оледенение в основном представлено каровыми, долинными и висячими ледниками, в целом больших по размеру ледников меньше, чем в горах Сунтар-Хаята, однако есть несколько довольно крупных – дендритового и сложно-долинного морфологических типов (Обручева, Сумгина, Мельникова). Масштаб отступания ледников соответствует их размеру и интенсивности потепления в течение последнего тридцатилетия. Преобладающая экспозиция ледников – северная и северо-западная. В абсолютном выражении долинные и сложно-долинные ледники этой экспозиции потеряли максимум площади – от 0.84 до почти 2 км^2. Наибольшая потеря площади у каровых ледников характерна для тех, которые открыты СЗ и СВ направлению (0.7-0.8 км^2), что согласуется с данными карт трендов.

Космические снимки на этот район охватывают около половины всех ледников, они занимали площадь 84.2 км^2. В 2003 г. это площадь уменьшилась на 23.4 км^2 (28%) и составила 60.8 км^2. Если предположить, что масштаб отступания всего оледенения Черского был таким же, то его площадь к 2003 г. сократилась до 113 км^2 по сравнению с 156 км^2 в 1970 г. Метеостанция Усть-Нера (Черский) как и Агаякан показывает, что T_{sum} начала расти, но незначительно с конца 1970-х, а осадки холодного периода были еще меньше, в среднем 40-50 мм.

Результатом исследований (Gurney at al., 2008) по снимкам Landsat от августа 2001 г. и полевым исследованиям был задокументировано 80 ледников. Авторами были обозначены самые последние максимальные размеры ледников, которые, как они полагают, относятся к МЛП (ок. 1550-1850 гг. Н. Э.). С тех пор площадь ледников уменьшилась примерно на 14.8 км (около 17%). Из 80 перечисленных в работе ледников 49 претерпели заметное отступление от своего последнего максимального размера.

Север Прибайкалья

В этом районе находятся недавно открытые МФО: ледники и другие криосферные объекты, расположенные в Северо-Байкальском нагорье, на Верхнеангарском хребте. Этот регион включен в данный обзор, поскольку там обнаружены *новые ледники*, относящиеся к холодным МФО. Рельеф района представляет собой среднегорье альпинотипного типа, сильно расчлененное и труднопроходимое (поэтому небольшие ледники не были изучены ранее), высота вершин 2200-2400 м н.у.м., перевалов 1800-2200 м. Ему характерно повсеместное распространение многолетней мерзлоты.

Об изменениях климата в этом районе можно судить по трендам температуры и осадков (1966-2019): тренды T_{year} 2.5°C, T_{sum} изменяются от 3.0°C до 2.0°C от Байкала на СВ, тренды P_{year} от 0 до 50 мм от Байкальской котловины, а P_{cs} имеет обратное направление – сказывается влияние котловины. Тренд P_{ws} – нулевой (рис 1, 2). По данным близлежащей метеостанции Нижнеангарск, потепление началось в середине 1960-х, T_{sum} с 1965 по 2019 возросла на более чем 3.5°C; при среднем количестве P_{cs} 70-80 мм, изредка выпадало до 150-200 мм (рис.3). Таким образом, направления климатических параметров способствует таянью небольших каровых ледников и других МФО.

Ледники Верхнеангарской ледниковой группы располагаются в цирке северной, северо-восточной экспозиции и могут быть “остатками” последнего оледенения. Под “остатками” имеется в виду весь ледниковый комплекс, лежащий на многолетнемерзлом грунте, часто под чехлом из снега и фирна. Пример – Ледник Огдында-Маскит (рис. 8). Температура льда, измеренная в трещине ледника, оказалась близкой к температуре поверхностного слоя мерзлого грунта, что объясняет одно из условий существования ледников в зоне умеренного пояса на высотах всего 1800-2000 м.

К “эмбриональным” ледникам, способным возникать, расти, развиваться, относятся каровые ледники Горбатенький, Кичера и Юрьева. Они располагаются в цирках боковых долин 2-го порядка, открытых на восток и занимают ложе ледников предыдущей стадии оледенения.

Общая площадь ледника Огдында-Маскит по снимку CORONA (1970-е) – 0.218, км^2, его современная площадь – общая/открытой части по снимку Bing/Sentinel-2 0.198/0.082 км^2 соответственно. Такие же данные для ледника Юрьева – по снимку CORONA общая площадь 0.1 км^2, современная – 0.051.

Как видим, изменение площади ледника Огдында-Маскит за 50 лет незначительно ~ 10%, ледника Юрьева же 50%, он почти не имеет поверхностного

моренного чехла, что сказалось на большем стаивании. Во время экспедиции летом 2019 г. было установлено, что ледник Кичера практически весь растаял.

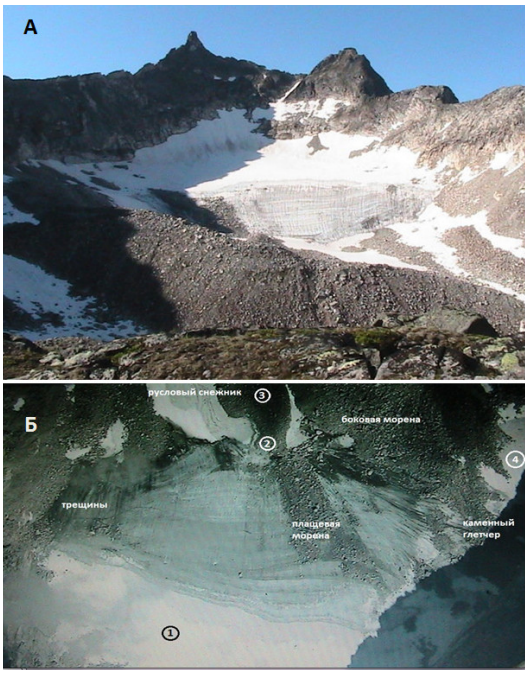


Рисунок 8. Каровый ледник Огдында-Маскит, 16 июля 2018, автор фотографии – Г.Ю. Пакин – А, Спутниковый снимок л. Огдында-Маскит (источник – ресурс Bing) — Б
Цифрами обозначены точки замера температуры: 1– бергшрунд, 2 – нижний край ледникового языка. 3– шурф конечной морены, где измерялась температура, 4 – многолетний снежник.

Figure 8. Ogdynda-Maskit Glacier, corrie by morphological type, July 16, 2018, the author of the photo is G.Yu. Pakin - A, Satellite image l. Ogdinda-Maskit (source –Bing resource) - B.
The numbers indicate the temperature measurement points: 1-bergrushrund, 2-lower edge of the glacial tongue, 3- a terminal moraine pit where temperature was measured, 4-perenniual snow patch.

Существование ледников на высотах 1800-2000 м значительно ниже снеговой линии обеспечивают, помимо форм ледникового рельефа, многолетнемерзлый грунт в качестве субстрата и достаточное количество твердых осадков: преобладают метелевый и лавинный тип питания. Климат (изменения температур и осадков за 2-ю половину 20-го века и начала 21-го) в целом не способствует сохранению ледников. Большую роль в сохранении ледниковых образований также играет степень бронированности каменным чехлом и длительность наличия сезонного снега на поверхности ледника (Ананичева и др., 2019б).

Чукотское и Колымское нагорья

К МФО также относятся ледники и другие наземные криосферные объекты, расположенные в пределах этих нагорий

Чукотское нагорье, на котором расположены ледники, простирается от Чаунской губы до мыса Дежнева и представлено системой средневысотных хребтов. Рельеф Чукотки в основном не альпийского типа, наряду с плоскими

вершинами гор, наиболее высокие массивы и гряды обладают ледниковыми формами: карами, сквозными долинами, зандровыми полями (рис. 9).

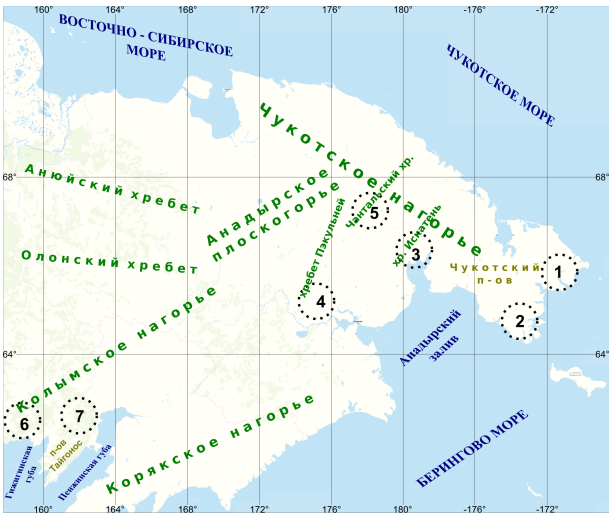


Рисунок 9. Схема расположения ледниковых групп Чукотки и Колымы.
Цифры означают: 1 – Группа из трех ледников, северо-восток п-ва Чукотка на хр. Тенианый, залив Лаврентия, 2 – Группа из 14 ледников, Проведенский горный массив, 3 – Группа из 21 ледника, хр. Искатень, залив Креста, 4 – Группа из четырех ледников, хр. Пекульней, 5 – Группа из пяти ледников, Чантальский хр., бассейн р. Амгуэма, 6 – Группа из пяти ледников, восточный склон Колымского нагорья, западный берег Охотского моря, 7 – Группа из 14 ледников, п-ов Тайгонос, Тайнынотский хр.

Figure 9. Scheme of the Chukotka and Kolyma glacier groups
The numbers indicate: 1 - A group of three glaciers, northeast of the Chukotka Peninsula on the Tenianyi Range., Lavrentiya Bay, 2 - A group of 14 glaciers, the Provedensky Massif, 3 - A group of 21 glaciers,. Iskaten Range, Cross Bay, 4 - A group of four glaciers, Pekulnei Range., 5 - A group of five glaciers, Chantal Range, basin of the Amguema River., 6 - A group of five glaciers, the eastern slope of the Kolyma Highlands, the western coast of the Sea of Okhotsk, 7 - A group of 14 glaciers, Taygonos Peninsula, Tainynotsky Range.

Климатические условия Чукотского нагорья достаточно разнообразны – от субарктический морского (ледники бухты Лаврентия) до субарктического континентального (бассейн р. Амгуэма) и арктического (на крайнем севере). Осадки в течение всего года, в частности, в период аккумуляции, в значительной степени определяют существование ледников. Важную роль играют сильные ветра в зимний сезон, которые формируют мощный метелевый перенос, благодаря которому ледники небольшой площади получают питание.

Значения трендов температуры (рис. 1 а, б) T_{year} увеличиваются от 2.5 до 3.0 °C к арктическим широтам, тренды T_{sum} меньше – от 1.5 до 2.0°C в этом же направлении. Тренды осадков P_{year} и P_{cs} сходны в том, что оба отрицательны в прибрежных регионах, тренды P_{year} положительны в континентальных между заливом Креста и Анандырским лиманом (рис. 2 а, б).

По данным станции Уэлен (Север Чукотки), потепление в теплый период в этой области произошло позже чем в Сибири. С конца 1990-х, T_{sum} возросла на 2°C, осадки холодного в среднем были 100 мм, а по станции Эгвекинот (Юг Чукотки, метеостанция прибрежная), T_{sum} возросла на 2.5°C, осадки здесь в среднем 100-150 мм, и они увеличиваются (см рис. 3).

Ледники Чукотского нагорья, по данным Р. В. Седова (1997), представлены несколькими группами (см. рис. 9). Со времени его работ и составления каталога, прошло более 30 лет, и задача оценить современное состояние ледников этого района стала очевидной. Первые попытки измерить площади ледников по снимкам Landsat-7, которые были доступны в 2016 г. (начало работ по оценке ледников Чукотского нагорья) привели к сомнению в точности результатов.

Поскольку ледники имеют малый размер, и космические снимки невысокого разрешения могут давать ошибки в этом случае, необходимо было проверить *in situ* их состояние. В экспедиции 2017 г. на ледники группы залива Лаврентия было выяснено, что все они уже находятся в состоянии перехода к каменным глетчерам (Ананичева и др., 2017).

Появившиеся недавно космические снимки более высокого разрешения, 10 м, Sentinel-2 позволили гораздо точнее измерить площади ледников Чукотки и Колымы на 2017 год. Погрешность оценок площадей мы оценили в 5-11%, сравнив измерения по снимкам с треками GPS сьемки ледников групп Залива Креста, которые мы обследовали во 2-ой экспедиции на Чукотку – в августе 2018 г.

К 2005 году (определение по снимкам Landsat-8) наибольшее отступание в среднем для ледниковой системы характерно для небольших ледников бассейна р. Амгуэмы, и Залива Креста (за счет роста T_{sum}), в последнем районе находится наибольшее количество ледниковых объектов среди ледников Чукотки. Наименьшим отступанием к этому времени отличаются ледники группы бухты Проведения. В период 2005-2017 (Sentinel-2), сокращение шло равномерно для всех групп (рис. 10).

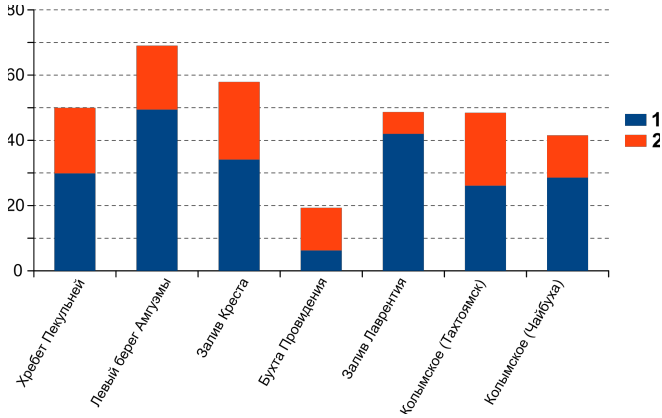


Рисунок 10. Сокращение площади (%) ледников Чукотки и Колымы за разные периоды *1 – 1980-2005, 2 – 2005-2017*

Figure 10. Reduction in the area of the Chukotka and Kolyma glaciers for different periods,% 1– 1980-2015, 2 – 2005-2017

Ледники *Колымского нагорья* расположены в основном в пределах п-ва Тайгонос (14 ледников, по данным Р. В. Седова, 1997), рельеф представлен Тайнынотским хребтом, который протянулся на 170 км с юго-запада на северо-восток. Рельеф хребта среднегорный, характерны крутые осыпные склоны, встречаются ледниковые формы. Также пять ледников им были обна-

ружены на восточном склоне Колымского нагорья вблизи западного берега Охотского моря.

Климат Колымской области, где расположено оледенение, континентальный с некоторыми чертами влияния морского (близость к Охотскому морю). T_{year} на метеостанции Тайгонос -2.7°C, T_{sum} +8.7°C за 1966-2013, осадки: P_{year} 376 мм, $P_{cold\ season}$ 176 мм. Тренд T_{sum} по данным этой станции положительный с конца 1980-х. По станции Ямск (Брохово), относящейся к району ледников собственно Колымского нагорья, потепление началось позже, в 1990-х, и с этого времени T_{sum} возросла на 1.6°C, осадки P_{cs} от 80 до 100 мм в среднем (см. рис.3).

Значения трендов температуры в этом районе меньше, чем на соседней Чукотке: T_{year} и T_{sum} 2.0°C, величины трендов осадков P_{year} и P_{cs} оба меняются от нуля до -50мм за 1966-2019. Ледники Колымского нагорья, судя по рис. 9, уменьшились в меньшей степени, чем таковые – на Чукотском.

В работе (Ananicheva et al., 2020, находится на рецензии) были рассчитаны также объемы ледников Чукотки Колымы, получены формулы эмпирической связи площади с объемами ледников.

Корякское нагорье

Эта горная страна расположена на северо-востоке Азиатской части России, на побережье Берингова моря между Анадырским заливом и п-ом Камчатка. Ледники по Каталогу ледников СССР насчитывают 715 ледников (В 1961 г. на ледниках Корякского нагорья в районе горы Ледяной, работал Н. М. Сватков, автор Каталога). Протяжённость его – 880 км, ширина достигает 270 км. Высоты находятся в пределах 600–1800 м; высшая точка в центральной части – 2562 м н у м. (гора Ледяная). Горные цепи, несмотря на небольшую абсолютную высоту, имеют резко расчленённый рельеф альпийского типа.

В этот район исследователи пришли только в 1990-х годах. Они изучали различные геоморфологические объекты, среди которых были и каменные глетчеры (Галанин, 2005). А. А. Галанин в работах, посвящённых каменным глетчерам, отмечает 282 ледника с общей площадью 180 км^2, что близко к указанному в конце 1950-х годов М. И. Малых (Каталог ..., 1982).

Климат муссонный, зима не очень холодная, но продолжительная. Ледники Корякского нагорья получают питание с Берингова моря и Тихого океана. Тихоокеанский циклон приносит в первой половине зимы обильные осадки, годовое количество которых в разных частях нагорья от 400 до 3000 мм (Долгушин, Осипова, 1989).

Абс. величины трендов T_{year} увеличиваются от 2.5 до 3.0°C к Камчатскому полуострову, а T_{sum} меняются от 2.0 до 3.0°C за 1966-2019 гг. Тренды осадков P_{year} увеличиваются от нуля на прибрежных участках до +100 мм вглубь континента, такой же направление у P_{ws}, отрицательные тренды характерны для P_{cs} – от нуля до -50 мм. По данным метеостанции Апука (прибрежная) потепление здесь в летний период идет давно, с начала 1970-х гг., изменения с тех пор на 2.5°C, P_{cs} – до 150 мм в абс. выражении.

При анализе космических снимков, были выделены три группы объектов: ледники с открытым льдом (3 тип), ледники, покрытые каменным чехлом (2 тип), и, возможно, объекты, относящиеся к каменным глетчерам (1 тип). Из-за большой степени покрытости ледников каменным/моренным чехлом существовала неопределенность в отношении точности дешифрировании их размеров, поэтому определялась максимальные и минимальные их значения. Максимальное значение – это учет еще покрытой моренным чехлом части ледника. Среднее отступание (уменьшение площади) ледников 3го типа от времени, указанном в Каталоге ледников СССР для северной части составило 0.42-0.35 км^2, для южной части 0.42-0.40 км^2, 2го типа – 0.18-0.13 км^2 и 0.15-0.13 км^2, и 1 типа (глетчеры) – 0.9-0.7 и 0.5-0.4 км^2, соответственно. Соотношение *средних* площадей этих трех типов кратно примерно трем, т. е площади ледников 1 типа меньше 2-го в три раза, а площади 2-го типа меньше в три раза площадей 3-типа.

Для ледников с открытым льдом анализировалось отступание по экспозиции, большинство характеризуется С, СВ или СЗ румбами, их сокращение площади – 0.43-0.33 км^2, ледники других экспозиций, их заметно меньше, сократились на 0.35-0.30 км^2. Эти тенденции согласуются с климатическими условиями – больший рост летних температур и уменьшение твердых осадков (рис. 11).

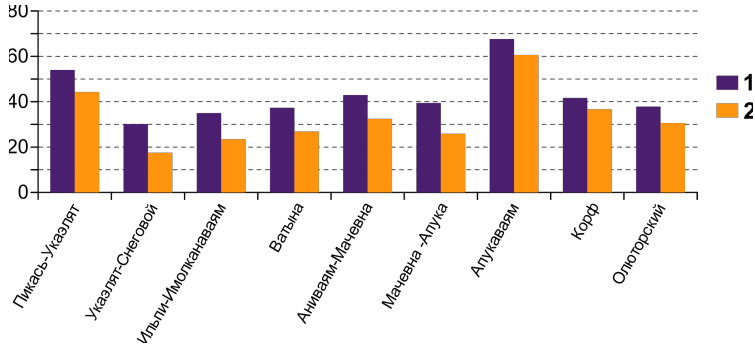


Рисунок 11. Сокращение площадей (%) ледников Корякского нагорья по бассейнам к 2017 г, *1 – максимальное значение, 2- минимальное значение (пояснения в тексте).*

Figure 11. Reduction in the area (%) of the glaciers of the Koryak Upland by the basins, 2017, *1 - the maximum value, 2 - the minimum value (explanation is in the text).*

Целью экспедиционных исследований, которые планируются в конце августа 2020 г., является изучение реакции на изменение климата каровых ледников берегового Пылгинского хребта Корякского нагорья, которые можно отнести к типу субполярных высокоширотных с морским климатом, а некоторые – к типу слабо континентальных.

Обсуждение и выводы

Обзор охватывает реакцию климатических систем Севера России на изменения климата конца 20 века и первые десятилетия 21 века. Судя по полученным картам трендов основных климатических характеристик, важных для

оледенения, рост температур с Ю на С за 1966-2019 гг. и уменьшение осадков примерно в этом направлении способствует сокращению площади и массы ледников севера России. Большая часть из них – это небольшие каровые ледники и другие, так называемые малые формы оледенения, чувствительные к колебаниям в основном регионального климата. Они пострадали больше всего за последнее время. Учитывая тот факт, что Арктика и Субарктика – регионы, в которых наиболее выражено современное потепление, крайне важно с гляциологической точки зрения оценивать реакцию ледников, находящихся в пределах этой территории. В данном обзоре показана оценка сокращения площадей ледников, поскольку этот параметр был рассчитан для всех ледниковых изучаемых систем. Для многих были определены подъем высоты границы питания (Орулган, Чукотка, Колымское и Корякское нагорье), рассчитаны объемы ледников (Сунтар-Хаята, Чукотка и Колыма), но эти данные не вошли в данный обзор (их можно найти в соответствующих указанных публикациях), как и отдельные сведенья о расчете баланса массы ледников.

Изученные МФО на Чукотке были по большей части покрыты каменным чехлом, выходы льда мы видели по бортам и во фронтальной части объектов. Однако во время полевых исследований у авторов не было возможности бурения и радиолокации, соответственно, трудно сказать точно – каково содержание льда в них, какого размера ледяное ядро.

Эти объекты имеют признаки движения – трещины, бергшрунды, бугристый рельеф, формирующиеся поверхностные морены и др. Область аккумуляции в них достаточно сложно выделить, питание поступает за счет метелевого переноса, сноса снега со склонов, в результате схода лавин. Р. В. Седов был на всех ледниках, которые указаны в его статьях, он обозначил эти МФО как живые ледники, сомнение высказал лишь в отношении ледников группы бухты Лаврентия, это было подтверждено в ходе нашей экспедиции в 2017 г.

Горные ледники Севера России по большей части труднодоступны, экспедиции туда крайне ресурсо- и энергозатратны, поэтому исследователями используются в основном космические снимки и ЦМР, однако найти такие снимки также трудно из-за погодных условий съемки (облачность) в теплый период года (он очень короткий, месяц-полтора), когда ледники не покрыты снегом.

Поскольку оценки сокращения ледников даны для разных систем на разные периоды времени, составить точную *единую* картину не представляется возможным. Это дело будущей работы. Кроме того, реакция ледников, различных по размеру, морфологическом типу, форме залегания, экспозиции не одинакова даже для примерно сходных условий изменения климата. Известно, что горный ледник – продукт рельефа и климата, но в условиях длительного изменения климата в сторону потепления, фактор климата стал решающим, что подтверждается данными, приведенными в данной работе.

Авторы осознают, что вопрос, являются ли континентальные небольшие ледники более устойчивыми или более чувствительными к климатическим изменениям все еще достаточно дискуссионный, решение его может быть достигнуто путем сбора и анализа новых данных, и поэтому он крайне актуален.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы госзадания № 0148-2019-0004, АААА-А19-119022190172-5, при поддержке гранта РФФИ №19-05-00822.

Также большое спасибо проф. С.М. Семенову и рецензентам за ценные советы.

Список литературы

Ананичева М.Д., Капустин Г.А., Корейша М.М. 2006. Изменение ледников гор Сунтар-Хаята и хр. Черского по данным Каталога ледников СССР и космическим снимкам 2001-2003 гг. — Материалы гляциологических исследований, вып. 101, с. 163-169.

Ананичева М.Д., Капустин Г.А. 2010. Оценка изменений ледников гор Бырранга по космическим снимкам и Каталогу ледников СССР. — Лёд и снег, вып. 3(111), с. 19–24.

Ананичева М.Д., Карпачевский А.М. 2016. Современное состояние ледников Чукотского и Колымского нагорий и прогноз эволюции ледниковых систем Чукотского нагорья. — Фундаментальная и прикладная климатология, № 1, стр. 64-83.

Ананичева М.Д., Маслаков А.А., Антонов Е.В. 2017. Деградация объектов криосферы в районе залива Лаврентия, Восточная Чукотка. — Арктика и Антарктика. № 3. с.17-29.

Ананичева М.Д., Пакин Г.Ю., Кононов Ю.М. 2019(а). Байкальская ледниковая система, новые находки. — Лед и снег, вып. 59(1), с. 135-144.

Ананичева М.Д., Пакин Г.Ю., Энтин А.Л. 2019(б). Исследования Верхнеангарской группы ледников. — Лёд и Снег, вып. 59(3), с.423-432.

Галанин А.А. 2005. Каменные глетчеры – особый тип современного горного оледенения северо-востока Азии. — Вестник ДВО РАН, № 5, с. 59–70.

Галанин А.А., Лыткин В.М., Федоров А.Н., Кадота Т. 2013. Сокращение ледников гор Сунтар-Хаята и методические аспекты его оценки. — Лёд и Снег, вып. 53(4), с. 30-42.

Глазовский А.Ф., Носенко Г.А., Цветков Д.Г. 2005. Ледники Урала: современное состояние и перспективы. — Материалы гляциологических исследований, вып. 98, с. 207–214.

Говоруха Л.С. 1971. Современное состояние оледенения гор Бырранга. — Известия ВГО, т. 103, вып. 6. с. 510–516.

Долгушин Л.Д., Осипова Г.Б. 1989. Ледники. — М, Мысль, 447 с.

Каталог ледников СССР: т.17, Лено-Индигирский район; вып. 5, Нижняя Лена; ч. 2. Хребет Орулган. 1972. — Л., Гидрометеоиздат, 67 с.

Каталог ледников СССР: т.1, Хибинские горы. 1966, — Л., Гидрометеоиздат, 50 с.

Каталог ледников СССР: т. 16, Ангаро-Енисейский район; вып. 1, Енисей; ч. 2, горы Бырранга. 1980. — Л., Гидрометеоиздат, 68 с.

Каталог ледников СССР: т. 20, Камчатка; ч. 1, Корякское нагорье. 1982. — Л., Гидрометеоиздат, 75 с.

Коваленко Н.В. 2008. Современное состояние малых ледников Кузнецкого Алатау и плато Путорана. — Вестник МГУ, сер. 5. География, № 3, с. 67-72.

Коваленко Н.В., Поповнин В.В. 2005. Современное состояние малых форм оледенения на северном уступе Ламских гор (плато Путорана). — Материалы гляциологических исследований, вып. 98, с. 214-219.

Корейша М.М. 1963. Современное оледенение хребта Сунтар-Хаята. — М., Изд-во АН СССР, 170 с.

Лыткин В.М., Галанин А.А. 2016. Каменные глетчеры хребта Сунтар-Хаята. — Лёд и Снег, вып. 56(4), с. 511-524.

Мавлюдов Б.Р., Ананичева М.Д. 2016. Ледники северного массива гор Сунтар-Хаята: современное состояние и динамика с конца 1950-х годов. — Лёд и Снег, вып. 56(3), с. 345-357.

Носенко Г.А., Муравьев А.Я., Иванов М.Н., Синицкий А.И., Кобелев В.О., Никитин С.А. 2020. Реакция ледников Полярного Урала на современные изменения климата. — Лёд и Снег, вып. 60(1), с.42-57.

Сарана В.А. 2003. Современное состояние ледников плато Путорана. — Материалы гляциологических исследований, вып. 95, с. 137-142.

Сарана В.А. 2005. Современное состояние оледенения плато Путорана. – Дис. … канд. геогр. наук. – М., 166 с.

Седов Р.В. 1997. Ледники Чукотки. — Материалы гляциологических исследований, вып. 82, с. 213-217.

Тронов М. В. 1954. Вопросы горной гляциологии. – Географиз, 34 с.

Шумский П.А.1955. Основы структурного ледоведения. — М., Изд-во АН СССР, 492 с.

AMAP, 2017. Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA) 2017. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). — Oslo, Norway. xiv + 269 p. — Available at: //www.amap.no/documents/doc/snow-water-ice-and-permafrost-in-the-arctic-swipa-2017/1610

Ananicheva M.D., Karpachevsky A. 2015. Glaciers of the Orulgan Range: assessment of the current state and possible development for the middle of the 21st century. — Environmental Earth Sciences, vol. 74, issue 3, pp. 1985-1995.

Ananicheva M.D., Belozerov E.A., Kononov Yu.M. 2020. Contemporary state of glaciers of Chukotka and Kolyma highlands. Bulletin of Geography. Physical Geography Series (на рецензии).

Box J.E., Colgan W.T., Christensen T.R., Schmidt N.M., Lund M., Parmentier F.-J.W., Brown R., Bhatt U.S., Euskirchen E.S., Romanovsky V.E., Walsh J.E., Over-

land J.E., Wang M., Corell R.W., Meier W.N., Wouters B., Mernild S., Mård J., Pawlak J., Olsen M.S. 2019. Key indicators of Arctic climate change: 1971–2017. — Environmental Research Letters, vol. 14, issue 4, id. 045010.

Debeer C.M., Sharp M.J. 2009. Topographic influences on recent changes of very small glaciers in the Monashee Mountains, British Columbia, Canada. — Journal of Glaciology, vol. 55, issue 192, pp 691–700.

Dolgushin L. D., Osipova G.B. 1989. Ledniki [Glaciers]. — M., Mysl., 447 p.

Gurney S.D., Popovnin V.V., Shahgedanova M., Stokes C.R. 2008. A glacier inventory for the Buordakh Massif, Cherskiy Range, Northeast Siberia, and evidence for recent glacier recession Arctic. — Antarctic and Alpine Research, vol. 40, pp. 81–88.

Huss M., Fischer M. 2016. Sensitivity of very small glaciers in the Swiss Alps to future climate change. — Frontiers in Earth Science, vol. 4, id. 34.

Oerlemans J., Anderson B., Hubbard A., Huybrechts Ph.,Johannesson T., Knap W.H., Schmeits M., StroevenA.P., van de Wal R.S.W., Wallinga J., Zuo Z. 2016. Modelling the response of glaciers to climate warming. — Climate Dynamics, vol. 14, issue 4, pp. 267–274.

Prinz R., Heller A., Ladne M., Nicholson L.I., Kaser G. 2018. Mapping the Loss of Mt. Kenya,s Glaciers: An Example of the Challenges of Satellite Monitoring of Very Small Glaciers. — Geosciences, vol. 8, issue 5, pp. 174–188.

Rabatel A., Francou B., Soruco A., Gomez J., Caceres B., Ceballos J.L., Basantes R., Vuille M., Sicart J.-E., Huggel C., Scheel M., Lejeune Y., Arnaud Y., Collet M., Condom T., Consoli G., Favier V., Jomelli V., Galarraga R., Ginot P., Maisincho L., Mendoza J., Menegoz M.,Ramirez E., Ribstein P., Suarez W., Villacis M., Wagnon P. 2013. Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. — The Cryosphere, No 7, pp. 81– 102.

Shirakawa T., Kadota T., Fedorov A., Konstantinov P., Suzuki T., Yabuki H., Nakazawa F., Tanaka S., Miyairi M., Fujisawa Y., Takeuchi N., Kusaka R., Takahashi S., Enomoto H., Ohata T. 2016. Meteorological and glaciological observations at Suntar-Khayata Glacier No. 31, east Siberia, from 2012-2014. — Bulletin of Glaciological Research, vol. 34, pp. 33-40.

Takahashi S., Sugiura K., Kameda T., Enomoto H., Kononov Yu., Ananicheva M., Kapustin G. 2011. Response of glaciers in the Suntar–Khayata range, Eastern Siberia, to climate change. — Annals of Glaciology, vol. 52, issue 58, pp. 185-192.

Zhang Y., Enomoto H., Ohata T., Kadota T., Shirakawa T., Takeuchi, N. 2017. Surface mass balance on Glacier No. 31 in the Suntar-Khayata Range, eastern Siberia, from 1951 to 2014. — Journal of Mountain Science, vol. 14, issue 3, pp. 501-512.

Статья поступила в редакцию: 25.05.2020 г. *После переработки: 24.08.2020 г.*

MOUNTAIN GLACIERS OF THE RUSSIAN NORTH: CHANGES OVER THE PAST DECADES UNDER CLIMATE VARIATIONS

M.D. Ananicheva, Yu.M. Kononov,*

Institute of Geography RAS,
29, Staromonetnyi, 109017, Moscow, Russia;
*Correspondence address: *Maranan@gmail.com*

Abstract. The purpose of the paper is to review the changes in the mountain glaciers of the Russia North, in its continental part under changing climate, the reaction of glaciers onto fluctuations, primarily air temperature and precipitation over recent decades. The review covers the reaction of climatic systems of the Russian North (Russian Subarctic and North of Baikal region) to climate changes of the late 20th century and the last decades of the 21st century. These are systems located in mountainous countries: the Polar and Subpolar Urals, Byrranga, the Putorana Plateau, the Orulgan, Suntar-Khayata, Chersky ranges, and the highlands of Chukotka, Kolyma and Koryakia. Judging by the obtained trend maps of the main climatic characteristics important for glaciation, the temperature increase from S to N in 1966-2019 and a decrease in precipitation in approximately this direction contribute to a reduction in the area and mass of glaciers in Russian North.

Methods for assessing the size of glaciation and their dynamics were based on a comparison of data from the Catalog of Glaciers of the USSR and later catalog issues (these are the Chukotka and Kolyma glacial systems) with the results of decoding satellite images (Landsat, ASTER, Sentinel-2) and expeditionary information. Most of the studied glacial systems are represented by small forms of glaciation, which are defined. Since estimates of glacier reduction are given for different systems for different periods of time, it was not the task of the review to compile an accurate single picture. The glacier reaction of varying size, morphological type, bedding, aspect is not the same even for approximately similar climate conditions. For each region, variations in mean summer air temperature and cold season precipitation of key (nearest) weather stations for the period from the onset of a positive trend in summer temperatures are given. Under conditions of prolonged climate change towards warming, the climate factor has become the most importrant, which is confirmed by the data presented in this work.

Keywords. Glacier, climate, Subarctic, temperature, precipitation, changes in the glacier size, trends.

References

Ananicheva M.D., Kapustin G.A., Korejsha M.M. 2006. Izmenenie lednikov gor Suntar-Hayata i hr. Cherskogo po dannym Kataloga lednikov SSSR i kosmicheskim snimkam 2001-2003 gg. [Changes in the glaciers of the Suntar-Khayat mountains and Chersky ridge according to the data of the USSR Glacier Catalog and satellite imagery 2001-2003]. *Materialy glyaciologicheskih issledovanij — Materials of glaciological studies*, vol. 101, pp. 163-169.

Ananicheva M.D., Kapustin G.A. 2010. Ocenka izmenenij lednikov gor Byrranga po kosmicheskim snimkam i Katalogu lednikov SSSR. [Assessment of changes in the glaciers of the Byrranga Mountains from satellite images and the Catalog of Glaciers of the USSR]. *Led i sneg — Ice and snow*, vol. 3 (111), pp. 19-24.

Ananicheva M.D., Karpachevsky A.M. 2016. Sovremennoe sostoyanie lednikov Chukotskogo i Kolymskogo nagorij i prognoz evolyucii lednikovyh sistem Chukotskogo nagor'ya [The current state of the glaciers of the Chukchi and Kolyma highlands and the forecast of the evolution of glacial systems of the Chukchi Highlands]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya — Fundamental and Applied Climatology*, vol. 1, pp. 64-83.

Ananicheva M.D., Maslakov A.A., Antonov E.V. 2017. Degradaciya ob"ektov kriosfery v rajone zaliva Lavrentiya, Vostochnaya Chukotka [Degradation of cryosphere objects in the area of Lawrence Bay, Eastern Chukotka]. *Arktika i Antarktika — Arctic and Antarctic*. no. 3. pp.17-29.

Ananicheva M.D., Pakin G.Yu., Kononov Yu.M. 2019(a). Bajkal'skaya lednikovaya sistema, novye nahodki [Baikal glacier system, new findings]. *Led i sneg — Ice and snow*, vol. 59 (1), pp. 135-144.

Ananicheva M.D., Pakin G.Yu., Entin A.L. 2019(b). Issledovaniya Verhneangarskoj gruppy lednikov [Studies of the glaciers located on the Verkhneangarsky mountain range]. *Led i sneg — Ice and snow*, vol. 59 (3), pp. 423-432.

Galanin A.A. 2005. Kamennye gletchery – osobyj tip sovremennogo gornogo oledeneniya severo-vostoka Azii [Stone glaciers – a special type of modern mountain glaciation in northeast Asia]. *Vestnik DVO RAN — Vestnik FEB RAS*, no. 5. p. 59–70.

Galanin A.A., Lytkin V.M., Fedorov A.N., Kadota T. 2013. Sokrashchenie lednikov gor Suntar-Hayata i metodicheskie aspekty ego ocenki [Reducing the glaciers of the Suntar-Khayat mountains and methodological aspects of its assessment]. *Led i sneg — Ice and snow*, vol. 53 (4), pp. 30-42.

Glazovsky A.F., Nosenko G.A., Tsvetkov D.G. 2005. Ledniki Urala: sovremennoe sostoyanie i perspektivy [Glaciers of the Urals: current status and prospects]. *Materialy glyaciologicheskih issledovanij — Materials of glaciological studies*, vol. 98, pp. 207–214.

Govorukha L.S. 1971. Sovremennoe sostoyanie oledeneniya gor Byrranga [The current state of glaciation of the Byrranga Mountains]. *Izvestia VGO — VGO news*, vol. 103. no. 6. pp. 510-516.

Katalog lednikov SSSR: t. 17, Leno-Indigirskij rajon; vyp. 5, Nizhnyaya Lena; ch. 2. Hrebet Orulgan. 1972. [Catalog of glaciers of the USSR: Vol. 17, Leno-Indigirsky District; issue 5, Lower Lena; Part 2. Ridge Orulgan]. 1972. Leningrad . Gidrometeoizdat, 67 p.

Katalog lednikov SSSR: t.1, Khibinskiye gory. 1966, [Catalog of glaciers of the USSR: vol. 1, Khibiny mountains. 1966]. Leningrad. Gidrometeoizdat, 50 p.

Katalog lednikov SSSR: t. 16, Angaro-Enisejskij rajon; vyp. 1, Enisej; ch. 2, gory Byrranga. 1980. [Catalog of glaciers of the USSR: vol. 16, Angara-Yenisei region; issue 1, Yenisei; Part 2, Byrranga Mountains]. 1980. Leningrad. Gidrometeoizdat, 68 p.

Katalog lednikov SSSR: t. 20, Kamchatka; ch. 1, Koryakskoe nagor'e. 1982. [Catalog of glaciers of the USSR: t. 20, Kamchatka; Part 1, Koryak Highlands]. 1982. Leningrad. Gidrometeoizdat, 75 p.

Kovalenko N.V. 2008. Sovremennoe sostoyanie malyh lednikov Kuzneckogo Alatau i plato Putorana [The current state of small glaciers of the Kuznetsk Alatau and Putorana plateau]. *Vestnik MGU, ser. 5, Geografiya, — Bulletin of Moscow State University, ser. 5, Geography*, no. 3, pp. 67-72.

Kovalenko N.V., Popovnin V.V. 2005. Sovremennoe sostoyanie malyh form oledeneniya na severnom ustupe Lamskih gor (plato Putorana) [The current state of small forms of glaciation on the northern ledge of the Lam Mountains (Putorana plateau)]. *Materialy glyaciologicheskih issledovanij — Materials of glaciological studies*, vol. 98, pp. 214-219.

Koreisha M.M. 1963. Sovremennoe oledenenie hrebta Suntar-Hayata [Modern glaciation of the Suntar-Khayat ridge]. Moscow, 170 p.

Lytkin V.M., Galanin A.A. 2016. Kamennye gletchery hrebta Suntar-Hayata [Stone glaciers of the Suntar-Hayat ridge]. *Led i sneg — Ice and snow*, vol. 56 (4), p. 511-524.

Mavlyudov B.R., Ananicheva M.D. 2016. Ledniki severnogo massiva gor Suntar-Hayata: sovremennoe sostoyanie i dinamika s konca 1950-h godov [Glaciers of the northern massif of the mountains of Suntar-Khayat: current status and dynamics since the late 1950s]. *Led i sneg — Ice and snow*, vol. 56 (3), p. 345-357.

Nosenko G.A., Muravyov A.Ya., Ivanov M.N., Sinitsky A.I., Kobelev V.O., Nikitin S.A. 2020. Reakciya lednikov Polyarnogo Urala na sovremennye izmeneniya klimata [The reaction of the glaciers of the Polar Urals to modern climate change]. *Led i sneg — Ice and snow*, vol. 60 (1), pp. 42-57.

Sarana V.A. 2003. Sovremennoe sostoyanie lednikov plato Putorana [Current state of the glaciers of the Putorana plateau]. *Materialy glyaciologicheskih issledovanij — Materials of glaciological studies*, vol. 95, p. 137-142.

Sarana V.A. 2005. *Sovremennoe sostoyanie oledeneniya plato Putorana* [Current state of glaciation of the Putorana plateau]. PhD's thesis. Moscow, 166 p.

Sedov R.V. 1997. Ledniki Chukotki [Chukotka Glaciers]. *Materialy glyaciologicheskih issledovanij — Materials of glaciological studies*, vol. 82, p. 213-217.

Shumsky P.A. 1955. *Osnovy strukturnogo ledovedeniya* [Fundamentals of structural ice science], Moscow, 492 p.

Tronov M.V. 1954. *Problemy gornoy glyatsiologii*. [Problems of mountain glaciology]. Geografiz, 34 p.

Ananicheva M.D., Karpachevsky A. 2015. Glaciers of the Orulgan Range: assessment of the current state and possible development for the middle of the 21st century. — Environmental Earth Sciences, vol. 74, issue 3, pp. 1985-1995.

Ananicheva M.D., Belozerov E.A., Kononov Yu.M. 2020. Contemporary state of glaciers of Chukotka and Kolyma highlands. Bulletin of Geography. Physical Geography Series (на рецензии).

Box J.E., Colgan W.T., Christensen T.R., Schmidt N.M., Lund M., Parmentier F.-J.W., Brown R., Bhatt U.S., Euskirchen E.S., Romanovsky V.E., Walsh J.E., Overland J.E., Wang M., Corell R.W., Meier W.N., Wouters B., Mernild S., Mård J., Pawlak J., Olsen M.S. 2019. Key indicators of Arctic climate change: 1971-2017. — Environmental Research Letters, vol. 14, issue 4, id. 045010.

Debeer C.M., Sharp M.J. 2009. Topographic influences on recent changes of very small glaciers in the Monashee Mountains, British Columbia, Canada. — Journal of Glaciology, vol. 55, issue 192, pp 691-700.

Gurney S.D., Popovnin V.V., Shahgedanova M., Stokes C.R. 2008. A glacier inventory for the Buordakh Massif, Cherskiy Range, Northeast Siberia, and evidence for recent glacier recession Arctic. — Antarctic and Alpine Research, vol. 40, pp. 81-88.

Huss M., Fischer M. 2016. Sensitivity of very small glaciers in the Swiss Alps to future climate change. — Frontiers in Earth Science, vol. 4, id. 34.

Oerlemans J., Anderson B., Hubbard A., Huybrechts Ph., Johannesson T., Knap W.H., Schmeits M., Stroeven A.P., van de Wal R.S.W., Wallinga J., Zuo Z. 1998. Modelling the response of glaciers to climate warming. — Climate Dynamics, vol. 14, issue 4, pp. 267-274.

Prinz R., Heller A., Ladne M., Nicholson L.I., Kaser G. 2018. Mapping the Loss of Mt. Kenya,s Glaciers: An Example of the Challenges of Satellite Monitoring of Very Small Glaciers. — Geosciences, vol. 8, issue 5, pp. 174–188.

Rabatel A., Francou B., Soruco A., Gomez J., Caceres B., Ceballos J.L., Basantes R., Vuille M., Sicart J.-E., Huggel C., Scheel M., Lejeune Y., Arnaud Y., Collet M., Condom T., Consoli G., Favier V., Jomelli V., Galarraga R., Ginot P., Maisincho L., Mendoza J., Menegoz M.,Ramirez E., Ribstein P., Suarez W., Villacis M., Wagnon P. 2013. Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. — The Cryosphere, No 7, pp. 81-102.

Shirakawa T., Kadota T., Fedorov A., Konstantinov P., Suzuki T., Yabuki H., Nakazawa F., Tanaka S., Miyairi M., Fujisawa Y., Takeuchi N., Kusaka R., Takahashi S., Enomoto H., Ohata T. 2016. Meteorological and glaciological observations at Suntar-Khayata Glacier No. 31, east Siberia, from 2012-2014. — Bulletin of Glaciological Research, vol. 34, pp. 33-40.

Takahashi S., Sugiura K., Kameda T., Enomoto H., Kononov Yu., Ananicheva M., Kapustin G. 2011. Response of glaciers in the Suntar–Khayata range, Eastern Siberia, to climate change. — Annals of Glaciology, vol. 52, issue 58, pp. 185-192.

Zhang Y., Enomoto H., Ohata T., Kadota T., Shirakawa T., Takeuchi, N. 2017. Surface mass balance on Glacier No. 31 in the Suntar-Khayata Range, eastern Siberia, from 1951 to 2014. — Journal of Mountain Science, vol. 14, issue 3, pp. 501-512.