

Оценка площадей, объёмов и высот границы питания ледниковых систем Северо-Востока России по космическим снимкам начала XXI в.

© 2014 г. М.Д. Ананичева

Институт географии РАН, Москва

maria_anan@rambler.ru

Статья принята к печати 5 ноября 2013 г.

Высота границы питания, Каталог ледников СССР, космический снимок, морфологический тип, площадь ледника, экспозиция ледника.

Aspect of glacier, equilibrium line altitude, glacier area, morphological type, space image, the USSR Glacier Inventory.

Выполнено сравнение площади ледников гор Бырранга, Сунтар-Хаята, хр. Черского (2003 г.), Корякского нагорья и Мейныпильгынского хребта (2008 г.), полученной по космическим снимкам, с соответствующими величинами из Каталога ледников СССР (данные 1945–1985 гг.). Рассчитана разность объёмов ледников между состоянием при каталогизации и началом XXI в. С помощью цифровых моделей рельефа по снимкам определены верхняя и нижняя точки современных ледников и рассчитана высота границы их питания на районы гор Сунтар-Хаята, хр. Черского и Мейныпильгынского хребта (северо-восток Корьякии); построены картосхемы высоты границы питания современных ледников для северо-востока Сибири (на 2003 г.) и для севера Корьякского нагорья (на 2008 г.).

Введение

Северная часть Сибири (субарктическая зона Евразии) с гляциологической точки зрения — малоизученный регион, где ледники впервые исследовали во время Международного геофизического года (МГГ) 1957–1958 гг., с тех пор регулярных наблюдений не было. Ледники севера Дальнего Востока (Корьякского нагорья) также частично были обследованы во время МГГ. В области Мейныпильгынского хребта (юг Чукотки) работы проводил Р.В. Седов в 1980–90-х годах [26]. Повышение температуры воздуха и недостаточное количество осадков для питания ледников, по-видимому, сыграли важную роль в изменении состояния ледников в этих регионах. Пространственная картина трендов температур (годовых T_{year} и среднелетних T_{jja}) за период наблюдений до начала 1990-х годов для Северо-Востока России рассмотрена нами раньше [2]. За последние десятилетия положительные тренды T_{year} и T_{jja} сохранились на северо-востоке Сибири, однако некоторые регионы севера Дальнего Востока отличает неоднозначная картина изменения основных параметров климата. Всё это вызывает необходимость оценить изменения ледников этого большого региона с помощью методов дистанционного зондирования, а также попытаться прогнозировать поведение ледниковых систем в ближайшем будущем.

Сравнение площадей ледников, полученных по снимкам Landsat, ASTER и World View-2 со зна-

чениями, представленными в Каталоге ледников СССР (составлялся в 1970–80-х годах), позволило оценить сокращение ледников за период от их каталогизации до начала XXI в. Оценка сделана также для групп ледников, объединённых по морфологическому типу и экспозиции склона.

Исследуемые ледниковые системы

Ледниковые системы, рассматриваемые в этой статье, представлены ледниками разных морфологических типов — от мелких каровых ледников гор Мейныпильгынского хребта, переметных в горах Бырранга до крупных дендритовых в хр. Черского. Расположение изучаемых ледниковых систем показано на рис. 1.

Горы Сунтар-Хаята и хр. Черского. Эти горные системы объединяет их близкое географическое положение во внутренних континентальных областях северо-востока Евразии и принадлежность к Тихоокеанско-Североевразийской гляциологической провинции.

Горы Сунтар-Хаята — наиболее высокие в Верхоянской горной системе. Несколько десятков горных пиков поднимаются выше 2500 м, а наиболее высокий — Мус-Хая — достигает 2960 м. Горные массивы этого хребта характеризуются альпийским рельефом. Кары и цирки сейчас заняты ледниками. Зима в горах длится 8–9 месяцев, хотя температура зимы из-за частых инверсий несколько выше, чем на соседних равнинах и плато. Весна

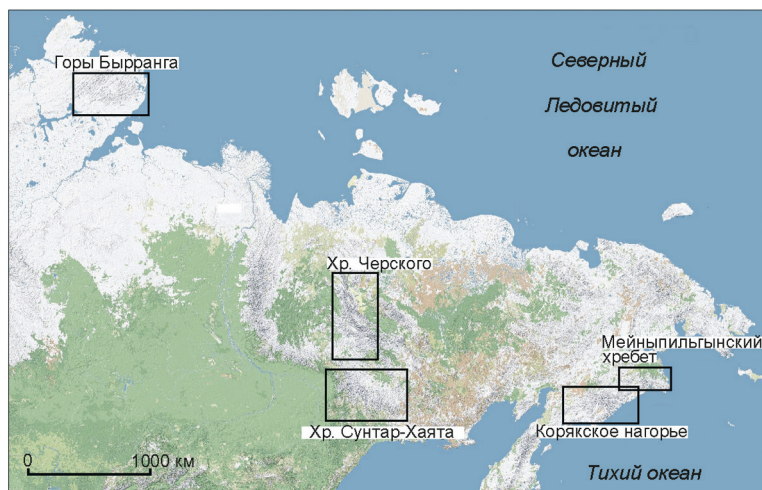


Рис. 1. Районы исследований
Fig. 1. Study regions

начинается в середине мая, но интенсивное таяние снежного покрова происходит только в начале июня. Лето прохладное и непродолжительное. Основная масса осадков приходится на летние месяцы. Количество осадков колеблется от 600 до 800 мм [18], более половины из них выпадает в твёрдом виде. Ледники расположены в высотном диапазоне 1800–3000 м. Более 200 ледников, покрывающих площадь в 210 км², группируются в трёх основных массивах: северном (90 км²), центральном (50 км²) и южном (65 км²) [13]. Главный источник питания ледниковых систем — влага, которая приносится из Тихого океана и Охотского моря. Для северного массива большую роль играют также арктические вторжения.

Хр. Черского занимает центральные районы северо-востока Сибири. Гребень его водораздельных массивов поднимается выше 2300–2600 м. Для наиболее высоких участков хребтов, расположенных на юге и востоке, характерен альпийский рельеф, в Буордахском массиве и на г. Чён развито современное оледенение. Лето в пониженных формах рельефа умеренно тёплое, а в горах — прохладное, с частыми заморозками и снегопадами. Обычно в горах сумма осадков превышает 500–600 мм, а в крайних восточных районах достигает 700 мм/год. Оледенение в горах Северо-Востока России было обнаружено в конце 1930-х годов. По материалам аэрофотосъёмки и первым гляциоморфологическим исследованиям А.П. Васьяковский дал первый комплексный обзор современных ледников этого региона [8], а его оценка размеров ледников мало отличается от последних подсчётов [14]. Наблюдения экспедиции МГГ позволили получить бесценный фактический материал по всесторонней характеристике оледенения. Этому посвящены многие статьи

и монографии М.М. Корейши (1991 г.) и коллектива авторов [10]. Согласно последним оценкам, в пределах хр. Черского сосредоточено около 300 ледников, занимающих 113 км² [3]. Они расположены в высотном диапазоне 1500–3100 м.

Горы Бырранга занимают северную половину п-ова Таймыр; их протяжённость — около 800 км, а ширина достигает 250 км. Они представляют собой систему невысоких горных гряд и платообразных массивов, разделённых межгорными понижениями. Высшая точка гор Бырранга (г. Ледниковая, 1146 м) расположена на северо-восточном хребте. Климат в горах Бырранга суровый: зима продолжительная и холодная — средняя температура января $-30 \div -34$ °C; лето короткое и тоже холодное — средняя температура июля на мысе Челюскин всего $+0,8$ °C. Горы Бырранга получают 250–400 мм осадков в год. Количество их в тёплый и холодный периоды года примерно одинаковое, хотя тёплый сезон продолжается всего два–три месяца. Современное оледенение, насчитывающее около 100 ледников, занимает площадь в 30,5 км², из которой более 3/4 приходится на восемь ледников, относящихся к перемётно-долинным, долинным и карово-долинным [15]. Высотная зона, в которой распространены ледники, одна из самых низких среди горно-ледниковых районов Евразии: средние пределы составляют 600–900 м, высшая отметка одного из ледников — 1090 м, а самая низкая — 500 м над ур. моря.

Корякское нагорье принадлежит Камчатско-Курильской горной провинции, локализовано в направлении с северо-востока на юго-запад и достигает высот 2562 м над ур. моря. Из-за муссонной циркуляции здесь только два сезона — длинный холодный период (с октября по май) и короткий тёплый. В холодный период, когда континент

сильно охлаждается, данный регион под влиянием северо-восточного ответвления азиатского антициклона попадает в область высокого давления. Относительно высокие средние температуры июля (до 13 °С, а в отдельные дни до 28–30 °С) наблюдаются во внутренних областях. На побережье гораздо холоднее — не более 5–7 °С. Осадков в этом регионе выпадает от 600 до 1000 мм. Современные ледники обнаружены геологами в конце 1930-х годов. В 1955 г. А.П. Васковский описал снежники и ледники, оценённая им площадь оледенения составила около 180 км². Другой исследователь — М.И. Малых — в районе 60–60° с.ш. и 166,5–176,5° в.д. установил 282 ледника, среди них были как долинные, так и каровые. Н.М. Сватков проводил полевые работы на ледниках Корякского нагорья в 1961 г. и описал 715 ледников. Он — автор раздела о Корякском нагорье в Каталоге ледников СССР [16]. В 1990-х годах здесь изучались различные геоморфологические объекты, в частности каменные глетчеры [9], в работах о которых А.А. Галанин останавливается на ледниках, количество которых близко к указанному М.И. Малых [16]. По нашим оценкам [1], сейчас здесь насчитывается 237 ледников. Они расположены в широком диапазоне высот: от крайне низкой отметки в 100 м (бассейн залива Корфа) до 2000 м над ур. моря.

Мейныпильгынский хребет (северо-восток Корякского нагорья) протягивается в субширотном направлении и представляет собой основную гряду северо-восточной части Корякского нагорья. По обоим берегам р. Ваамычгын, в южной части хребта расположены горные массивы, где и развито оледенение этого района. Оно образует дугу, протяжённостью 75 км, вокруг крупнейшего озера региона — Пекульнейского. Основное оледенение сосредоточено в южной части хребта (Накепейлакский массив) и на стыке с главным водоразделом хребта (Мейныпильгынский массив). Эти массивы представляют собой непротяжённые хребты, высотой от 1000 до 1300 м над ур. моря, самая высокая отметка рельефа — 1484 м. Рельеф расчленён, характерны кары со скальными стенками, в которых и расположены ледники и снежники. Климат района достаточно суровый, хотя отдельные территории подвержены влиянию муссонов. Характерен резкий переход от умеренно-морского к холодному континентальному климату. Зима (начало октября — конец мая) — суровая, с сильными ветрами и метелями; средняя температура воздуха $-10 \div -4$ °С (данные по метеостанциям, расположенным на высоте от 50 до 300 м над ур. моря,

период наблюдений — 1950–2000 гг.). Количество осадков варьирует в пределах 300–750 мм/год, и выпадают они в основном в виде снега. Устойчивый снежный покров, толщиной до 1 м, образуется в конце октября. Лето (начало июня — конец августа) характеризуется резкими колебаниями суточных температур днём, что определяется удалённостью от побережья; средняя температура воздуха летом 11,5–10,0 °С. Впервые ледники здесь исследованы А.П. Васковским, который выделил хребет из Корякского нагорья и описал здесь 46 ледников [8]. Детально ледники этого хребта изучены путешественником и энтузиастом Р.В. Седовым (Магадан), и их Каталог был издан в Материалах гляциологических исследований [26], где описано 116 ледников, площадью около 44 км², расположенных в диапазоне высот от 300 до 1100 м над ур. моря.

Методы исследования

Основу исследований ледниковых образований горных областей северо-востока Евразии составляло определение параметров этих объектов (ледники и снежники) по данным дистанционного зондирования Земли (ДДЗ) из космоса. В открытом доступе находятся материалы многолетних съёмок спутников Landsat, использующих съёмочную аппаратуру среднего разрешения MSS (Multispectral Scanner), TM (Thematic Mapper) и ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus). Пространственное разрешение многоканальных данных меняется от 60 до 30 м/пиксель. Данные ETM+ имеют также панхроматический канал с разрешением 15 м/пиксель. Эти снимки легли в основу анализа состояния ледников северо-востока Сибири, гор Бырранга и частично северо-востока Корякии. Для региона Корякского нагорья и Мейныпильгынского хребта мы использовали также снимки ASTER, разрешением 15 м/пиксель. В 2010 г. проведены также пробные исследования на основе данных высокого разрешения (2 м/пиксель) со спутника WorldView-2. Нам удалось воспользоваться этими снимками для определения состояния ледников Мейныпильгынского хребта.

Для определения современного распространения ледников северо-востока Сибири необходимы снимки, когда ледниковый лёд свободен от снежного покрова, а это очень короткий период — с конца июля до начала сентября, т.е. не больше 1,0–1,5 месяцев. Кроме того, определённые проблемы возникают и на этапе отбора ДДЗ. Так, часть исследуемой территории может быть покрыта облачностью и/или дымкой, а свежевывалившийся снег не позво-

ляет точно ограничить контуры ледников; иногда съёмка на закате или восходе осложняет их выделение из-за глубоких теней, отбрасываемых на ледник окружающими вершинами. Чтобы решить эти проблемы, усиливают контрастность, радиометрическую и текстурную фильтрации. Для уточнения границ и площадей ледников мы использовали методы интерактивного дешифрирования и редактирования данных в ГИС-приложениях. В «ручном» режиме добавлялись площади ледников, попавшие в затенённые и замороженные участки. При дешифрировании границ моренного покрова, безусловно, есть большой элемент субъективизма. В работах разных исследователей приведённые экспертные оценки точности такого дешифрирования составляют около 3–4% [30, 32].

Каменные глетчеры, которые широко распространены в Корьякском нагорье, имеют обломочный чехол в 0,5–1 м и выше [9], поэтому необходимо было установить их и исключить из числа объектов, которые приняты за ледники при составлении Каталога ледников СССР. Цель нашей работы – идентифицировать настоящие ледники. Этому способствовали ДДЗ сверхвысокого разрешения, полученные со спутника WorldView-2. Вспомогательными источниками служили цифровые модели рельефа (ЦМР) – SRTM 2 (до 60° с.ш.) и ASTER-GDEM. Эти ЦМР, согласно спецификациям, имеют точность в пределах 20 м [28] для доверительного интервала 95%. Указанной точности достаточно для определения примерных верхней и нижней точек ледника (эти данные необходимы для расчёта высоты границы питания ледника; см. далее).

Современное состояние ледников в рассматриваемых регионах оценивалось в три этапа: 1) оцифровка ледников на территории исследований по космическим снимкам; 2) сравнение данных по полученным ледникам с данными таблицы и картосхемы из Каталога ледников СССР, идентификация ледников исходя из данных Каталога ледников СССР; 3) составление таблицы, содержащей значения площади, высот верхней (по абсолютной высоте) и нижней точек по космическим снимкам.

Оцифровку ледников вели через визуальную идентификацию границ ледника. Для этого составляли несколько трёхцветных композиций из разных каналов спутников. Для ASTER, например, наиболее удачна комбинация 4-го и 3-го каналов, что подтверждается работой [31]. Сравнение параметров ледников с данными Каталога проводилось на основе анализа пяти параметров: длины ледников, их площади и положения относительно

друг друга, а также бассейна питаемой ими реки и экспозиции склона. Другие подробности методики идентификации и расчёта характеристик ледников исследуемых регионов даны в работах [6, 7]. Пример дешифрирования ледников (горы Бырранга) показан нами в работе [6].

Оценки отступления ледников северо-востока Сибири проверялись при полевых исследованиях в начале 2000-х годов в районе ледника № 31 северного массива гор Сунтар-Хаята специалистами Института географии РАН совместно с сотрудниками Технологического института Китами (Япония). В сезон 2006/07 г. работы были приостановлены и возобновлены только летом 2012 г. Они были организованы Японским институтом окружающей среды JAMSTEC и Институтом мерзлотоведения СО РАН (г. Якутск). От Института географии РАН в полевых работах участвовал только один человек в течение месяца. За это время была сделана съёмка положения ледников северного массива гор Сунтар-Хаята. Установлено, что ледники сокращаются нарастающими темпами. За период с МГГ (1957–1958 гг.) до 2001 г. сокращение составило 120–150 м [2], с 2001 по 2012 г. ледники отступили примерно на столько же (рис. 2). На космическом снимке 2004 г. видно, что граница ледника в это время проходила между границами в 2001 и 2012 гг. Это подтверждает техническую правильность наших данных.

Оценка изменений ледников Северо-Востока России

Площадные изменения в целом. В настоящее время большинство ледников на северо-востоке Сибири сократили свои площади. Причина – потепление климата, продолжающееся до настоящего времени. Именно в этих регионах отмечаются высокие положительные тренды температуры, особенно весной и осенью [2]. Согласно [27], для северо-востока Сибири характерно снижение осадков в виде снега в 1989–2006 гг. (период потепления в Северной Евразии) по сравнению с 1951–1986 гг. (устойчивый климат) на 30–40%, хотя средняя за зиму толщина снежного покрова не изменялась. На севере Дальнего Востока – в Корьякии – отмечалась другая тенденция: там выпадало на 20–30% больше осадков в период потепления вследствие более интенсивной деятельности циклонов в Арктике [27].

Согласно Н.К. Кононовой [17], в Северном полушарии продолжительность блокирующих процессов (меридиональной циркуляции северной группы) в последнее десятилетие увеличивается.

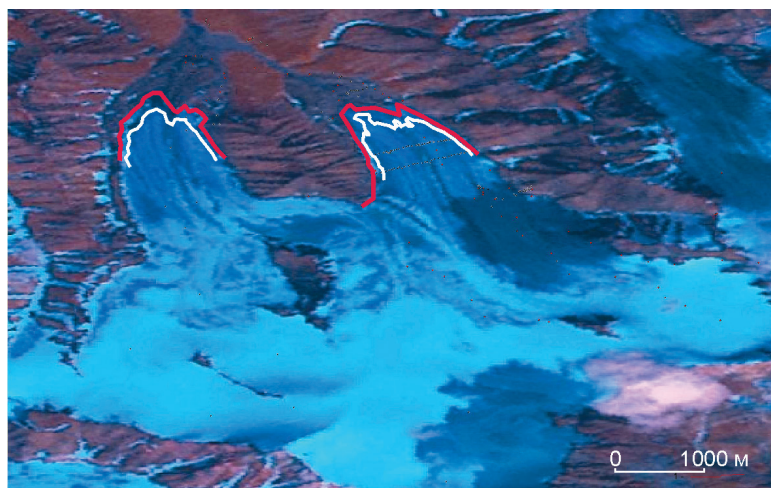


Рис. 2. Ледники № 31 (правый) и № 29 (левый): красная линия — контур ледника в 2001 г.; белая линия — то же, в 2012 г.

Fig. 2. Contours of glaciers № 31 (right) and № 29 (left): red line — in 2001; white line — in 2012

При этом режиме зимой вторжение воздушных масс из Арктики направлено в Восточную Сибирь, через дельту р. Лена, или на Чукотку. Это вторжение образуется в задней части южного циклона, достигая и охватывая Дальний Восток и Камчатку. Частота этих циклонов также возрастает. Часть Чукотки, которая находится ближе к океанскому побережью, получает твёрдые осадки. Отрог сибирского антициклона, связанный с Арктикой, простирается с её другой стороны, принося холодную и ясную погоду. Часто летом арктические вторжения проходят через п-ов Таймыр, тогда как весь район Чукотки находится под воздействием южных циклонов. Таким образом, сейчас север Дальнего Востока находится под более активным влиянием воздушных масс, приходящих из Северного Ледовитого океана, чем раньше.

В 2003 г. площадь оледенения *гор Сунтар-Хаята* оценивалась в 162,2 км², из которых 155,5 км² были определены по снимкам Landsat, остальная часть рассчитана пропорционально всей площади ледников на основе Каталога ледников СССР. По сравнению с 1945 г. (199,4 км²) к 2003 г. площадь ледников здесь сократилась на 37,2 км² (около 20%); результаты расчётов даны в работе [5]. Согласно расчётным данным А.А. Галанина, сокращение ледников массива Мус-Хая за период 2010–2011 гг. составляет 35% по сравнению со съёмкой 1945 г. (сообщение А.А. Галанина).

Ледники *хр. Черского* сократили площадь на 48 км² по сравнению с более поздним временем — 1970 г. Этот факт можно объяснить более интенсивным потеплением, происходящим в центре данного региона, и меньшим питанием (твёрдыми осадками) ледников по сравнению с горами Сунтар-Хаята: см. рис. 3, где показаны изменения T_{jja}

и твёрдых осадков для региона северо-востока Сибири за два периода — до потепления и после начала потемнения, а также работы [4, 27].

В 2003 г., по нашей оценке, оледенение *гор Бырранга*, данные для которых относятся к 1967 г., сократилось приблизительно на 15% [6]. К настоящему времени уменьшение площади ледников гор Бырранга, по-видимому, превысило 20% с учётом трендов температуры (2–3 °С/30 лет для средней летней температуры по метеостанциям, находящимся к югу от гор), а также последних данных экспедиции в горы Бырранга В.А. Сараны [24].

При оценке состояния ледников *Корякского нагорья* мы столкнулись с проблемой большой разницы между данными о числе ледников в Каталоге [16] и результатами дешифрирования космической съёмки. Для Корякского нагорья в Каталоге приводится 715 ледников, датированных 1950 г. (автор Н.М. Сватков). Ледники идентифицировались по топографическим картам, составленным главным образом на основе аэрофотосъёмки. Однако, согласно космическим снимкам, покрывающим регион полностью, мы нашли только 237 ледников. Как отмечено ранее, в этом регионе широко распространены каменные глетчеры, которые находятся непосредственно в высотном поясе настоящих ледников [9]. Мы считаем, что, скорее всего, именно каменные глетчеры были приняты за ледники при составлении топографических карт и далее описаны Н.М. Сватковым. Такой же вывод делает исследовавший этот регион А.А. Галанин: «В Мейныпильгинском хребте большинство гляциальных образований относятся к типу комплексных каменных глетчеров со смешанным питанием. Они А.П. Васьковским и Р.В. Седовым закартированы как ледники» (сообщение А.А. Галанина).

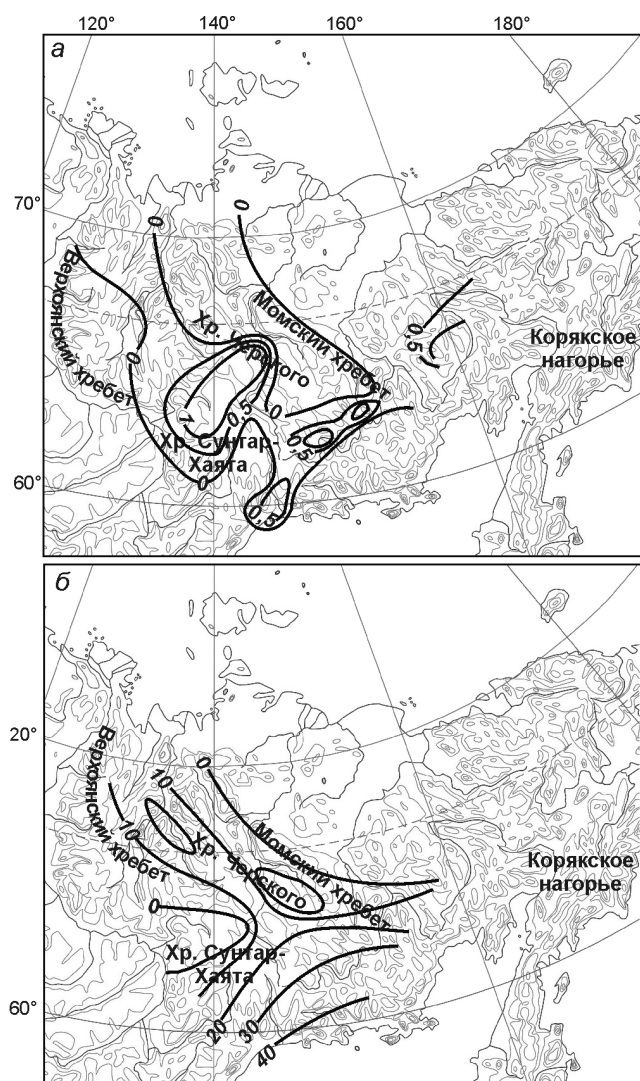


Рис. 3. Изолиниями показаны различия средних летних температур (°C) (а) и сумм твёрдых осадков (%) (б) между периодами 1961–1992 и 1930–1960 гг. для северо-востока Сибири

Fig. 3. Isolines indicate differences of summer temperature (°C) (a) and solid precipitation sum (%) (b) between 1961–1992 and 1930–1960 for North-East of Siberia

Результаты расчётов для ледников Корякского нагорья приведены в работе [1]. Отступление здесь составило 69%, что спорно, поскольку нельзя исключить ошибки измерения площадей в Каталоге, а также увеличение количества ледников за счёт каменных глетчеров и снежников. Площадь настоящих ледников была, по-видимому, также завышена, поэтому мы считаем, что эти результаты требуют проверки. Автор Каталога по Корякскому нагорью изучил несколько ледников вокруг г. Ледающая во время полевых исследований [25]. Безусловно, в этом случае площадь ледников была

измерена точно (снежное обрамление не вошло в расчёт площадей самих ледников). Сокращение площади этих ледников составило 40–50% (к 2003 г.), что по-прежнему довольно большая величина, но более реалистичная.

Последняя ледниковая система, представленная в данной работе, – *Мейныпильгинский хребет*, который представляет собой северо-восточное продолжение Корякского нагорья. В изучаемом регионе, судя по динамике положительных трендов T_{year} и T_{jja} , потепление наблюдается в течение последних 50 лет. На прибрежных метеостанциях тренд T_{jja} равен 1,2–1,8 °C/50 лет, по данным внутренних метеостанций – около 1 °C/50 лет. За последние 30 лет эта тенденция несколько ниже – 0,8–1,3 °C/30 лет.

Мы вычислили разницу между площадями ледников этого региона в Каталоге и по космоснимкам (2008 г.) для шести ледниковых систем, выделенных Р.В. Седовым, автором Каталога ледников этого региона [26], чтобы оценить пространственное распределение сокращения ледников по протянувшемуся с юго-запада на северо-восток хребту (табл. 1) [7]. Меньше всего сократилась площадь ледниковых систем 1 и 6, расположенных в западной части региона. Ледниковая система 6 находится ближе к берегу, ледниковая система 1 – к западу от основного хребта, она открыта для воздушных масс, которые приносят твёрдые осадки. Ледники бассейна оз. Пекульнейского также характеризуются небольшим сокращением площади, а район открыт для вторжения воздушных масс из Арктики [17]. Наибольшее сокращение ледников наблюдается в основном хребте, в бассейнах притоков р. Ваамычгын (№ 4, 5, см. табл. 1).

Изменения площади ледников по экспозиции и морфологическому типу. Мы проанализировали степень уменьшения площади ΔS всех отступивших ледников по морфологическим типам и экспозиции. Эти данные доступны в Каталоге ледников СССР для каждого ледника. Экспозиция ледника в определённой степени указывает на влияние климатических факторов, т.е. внешних условий. С морфологическим типом ледника связаны его внутренние свойства, определяющие значения ΔS в условиях изменения климата. Определялись следующие характеристики: среднее значение для каждой группы ΔS (км²); число ледников в группе; относительное отношение $\Delta S/S$ (%).

Большая часть ледников *гор Сунтар-Хаята* имеет северную экспозицию, преобладают долинны ледники и цирки (кары). С 1945 г. (58 лет)

Таблица 1. Сокращение площади ледниковых систем в Мейныпильгынском хребте с 1980-х годов по 2008 г.

| Ледниковая система (в скобках дан её номер) | Площади S , км ² | | Разница, ΔS , км ² | Относительная разница ΔS , % |
|---|----------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| | по данным Каталога ледников СССР | по данным ASTER+ World View-2 | | |
| Бассейны рек: | | | | |
| Находка, Ичгуйгыней, Кельмыввем (1) | 3,24 | 2,73 | 0,51 | 13,5 |
| Яноанайвеем, Кайкытгывеем, Накепейлак (6) | 7,27 | 5,18 | 2,09 | 23,6 |
| Гытгыппокыткываям, Черной (2) | 4,31 | 2,61 | 1,70 | 31,7 |
| Бассейны притоков р. Ваамычгын | | | | |
| левых (4) | 15,84 | 9,43 | 6,41 | 45,6 |
| правых (5) | 11,67 | 7,60 | 4,07 | 39,5 |
| Бассейн оз. Пекульнейское (3) | 2,25 | 1,62 | 0,63 | 22,5 |
| <i>Всего</i> | 44,6 | 29,17 | 15,4 | 29,4 |

максимальное сокращение площади характерно для долинных и висячих ледников разной экспозиции. В среднем, площади ледников данной группы сократились с 0,9 до 0,45 км². Индивидуальные потери среди ледников этих морфологических типов превышают 1 км². Меньшие по площади ледники (каровые и карово-висячие) потеряли соответственно меньшую площадь; максимальная потеря площади характерна для ледников северо-восточной и северо-западной экспозиций. В среднем потеря по этой группе ΔS находится в пределах 0,2 км². Карово-долинные и висячие ледники этих экспозиций оказались более чувствительны к потеплению. Сложно-долинные и долинные ледники пострадали меньше.

Оледенение *хр. Черского* представлено в основном каровыми, долинными и висячими ледниками. Здесь меньше ледников больших размеров, чем в горах Сунтар-Хаята. Однако отмечается ряд относительно крупных ледников дендритового и сложно-долинного типов, площадью более 10 км². Преобладающие экспозиции ледников — северная, северо-восточная и северо-западная. Именно ледники этих экспозиций и сократились больше, чем ледники других экспозиций, что хорошо согласуется с интенсивностью потепления, которое длится последние 35 лет. Летние температурные аномалии в центральной части *хр. Черского* достигают +1 °C по сравнению с периодами стабильного климата (1930–1960 гг.) и потепления (1961–1992 гг.) (см. рис. 3, а) [4]. Относительное сокращение площади велико и среди ледников южной, восточной и западной экспозиций для всех морфологических типов, но особенно для карово-долинных и каровых ледников.

Анализ групп ледников *гор Бырранга* показывает, что с 1967 г. наименьшие потери в абсолютных значениях характерны для карово-долинных и перемётных типов в основном северной и северо-западной экспозиций. В относительных величинах (процентах) самая большая потеря площади характерна для кулуаров и каровых ледников средних и малых размеров. Те ледники, которые ориентированы на юго-восток и восток, «пострадали» больше всего. Сокращение площади можно объяснить климатическими тенденциями в регионе: линейные тренды среднегодовой температуры, по данным прибрежных и островных метеостанций западной части региона, составляют около 1 °C/50 лет, но в течение последних десяти лет тренд T_{year} резко вырос (4–5 °C/10 лет). Значение T_{year} увеличивается за счёт зимних, весенних и осенних температур. Тренды сумм общих осадков P_{year} были положительными (30–45 мм/50 лет).

В *Корякском нагорье* максимально сократились ледники, имеющие северо-восточную экспозицию. Это согласуется с потеплением в пределах *хр. Черского*, где ледники северных румбов также максимально сократились. В России наибольшее потепление отмечается вдоль широтного пояса 55–60° с.ш., на севере и юге повышение температуры не столь выражено, но тоже существует [23]. Линейные тренды за последние 30 лет в этом регионе изменяются от 1,5 до 0,2 °C/30 лет как для T_{year} , так и для T_{jja} . Количество осадков варьирует: на прибрежных метеостанциях — 200–300 мм; в предгорьях — 600 мм; в горах — до 1000 мм. В последние десятилетия на прибрежных метеостанциях (Хатырка, Беринговская) значение P_{year} уменьшается (тренд P_{year} на метеостанции Хатырка равен

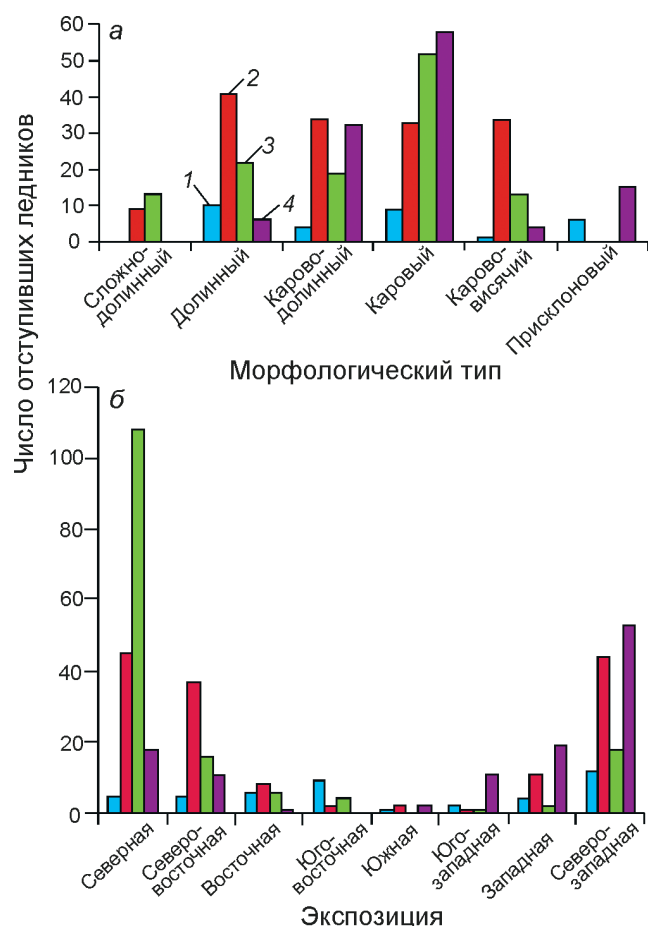


Рис. 4. Число отступивших ледников в группах одного морфологического типа (а) и одной экспозиции склона (б): 1 – горы Бырранга; 2 – хр. Сунтар-Хаята; 3 – хр. Черского; 4 – Мейныпильгинский хребт

Fig. 4. Number of glaciers in the groups sorted by the same morphological type (a) and by the same aspect (b): 1 – Byrranga Mountains; 2 – Suntar-Khayata Range; 3 – Chersky Range; 4 – Meinypylginsky Range

500 мм/20 лет). В горах осадки распределяются сложнее, однако метеостанций на большой высоте в этом регионе нет. На юге Корякского нагорья (по данным метеостанции Корф) в последние десятилетия количество осадков увеличилось. Тренды указывают на длительное потепление в этом регионе, но масштабы сокращения ледников можно объяснить и снижением количества выпадающих твёрдых осадков (кроме того, возможно и завышение площадей ледников в Каталоге).

В пределах *Мейныпильгинского хребта* ледники северной, северо-восточной и северо-западной экспозиций потеряли меньше площади (20–30%), по-видимому, вследствие большего питания. Сильнее всего сократились по площади (70%) ледники восточной экспозиции. Если ана-

лизировать потери ледников по типам, то наибольшие площади (45%) потеряли висячие и долинские ледники; каровые ледники сохранились лучше (25–30%). Такая же ситуация характерна и для ледников гор Бырранга [6].

Мы также провели исследования *по числу* ледников, потерявших площадь, в группах одного морфологического типа и одной экспозиции (в расчёт не брались спорные данные по Корякскому нагорью). На рис. 4 показано распределение числа ледников в этих группах для изучаемых регионов. Чаще всего здесь встречаются каровые и карово-долинские ледники северо-восточной и северо-западной экспозиций. В большинстве случаев они сократились максимально. Северная и северо-восточная экспозиции отступивших ледников больше характерны для северо-востока Сибири – ледников гор Сунтар-Хаята и хр. Черского, северо-западная экспозиция – для севера дальневосточных регионов из-за преобладающих потоков влаги. В связи с вы-раженным потеплением климата в Арктике ледники, ориентированные на север, северо-восток и северо-запад сократились значительно.

Расчёты объёмов льда

Изменение объёмов льда. Получив площади современных ледников S , мы перешли к расчёту объёмов льда V , чтобы оценить, насколько изменились объёмы льда ледниковых систем за период от времени каталогизации до начала XXI в. Рассчитать объём льда по площади ледника при отсутствии данных о его мощности можно по формуле $V = aS^r$. Коэффициенты a и r в этой формуле выведены многими авторами, но они применимы для конкретных условий [11, 12, 21, 29]. В работе [22] предлагаются коэффициенты к этой формуле для расчёта объёма горных ледников с учётом их морфологического типа. Они получены по данным об объёмах льда, которые в свою очередь основаны на прямых измерениях мощности ледников с помощью радиолокационного зондирования. Автором этого исследования с 1988 по 2001 г. было прозондировано около 200 ледников на Центральном Алтае. Полученные данные позволили уточнить ранее опубликованные формулы. Мы рассчитали объёмы всех изучаемых ледников Северо-Востока России по приведённым в работе [22] коэффициентам к формуле $V = aS^r$ для ледников долинного ($a = 0,435$, $r = 0,94$), карово-долинного ($a = 0,464$, $r = 0,89$), карового и карово-висячего ($a = 1,244$, $r = 0,91$) морфологических типов. Суммарные объёмы для ледниковых систем даны в табл. 2.

Таблица 2. Рассчитанные по формулам С.А. Никитина площади ледников и объёмы льда для изучаемых ледниковых районов

| Район и годы оценок | Площадь S , км ² | | Объём V , км ³ | | Разница площадей ΔS | | Разница объёмов ΔV | | $\Delta V/\Delta S$ |
|--|-------------------------------|------------|-----------------------------|------------|-----------------------------|-------|----------------------------|-------|---------------------|
| | по КATALOGУ | по снимкам | по КATALOGУ | по снимкам | км ² | % | км ³ | % | |
| Хр. Сунтар-Хаята, 1945–2003 гг. | 199,4 | 162,2 | 9,33 | 7,62 | 37,2 | 18,7 | 1,7 | 18,33 | 0,045 |
| Хр. Черский, 1970–2003 гг. | 156 | 113 | 6,64 | 5,21 | 43 | 27,6 | 1,4 | 21,54 | 0,033 |
| Горы Бырранга, 1967–2003 гг. | 29,2 | 24,8 | 0,78 | 0,51 | 4,4 | 15,1 | 0,2 | 34,62 | 0,045 |
| Корякское нагорье, 1950–2008 гг. | 176,6 | 54,4 | 8,2 | 3,41 | 122,2 | 69,2 | 4,7 | 58,41 | 0,038 |
| Мейныпыльгинский хребет, 1980–2008 гг. | 44,6 | 29,17 | 2,48 | 1,99 | 15,4 | 34,60 | 0,4 | 19,76 | 0,032 |
| <i>Всего</i> | 605,8 | 383,57 | 27,43 | 18,74 | 225,2 | — | 8,7 | — | 0,038 |

Сокращаются ледники в основном за счёт тонких краевых частей в начальный период таяния, далее становится тоньше всё тело ледника. Заметим, что средняя мощность ледников Алтая, согласно [22], равна 52 м. Если анализировать значение $\Delta V/\Delta S$ в %, то можно предположить, что оно указывает на преобладание определённого типа ледников. Значительная разница этих величин, характерная для гор Бырранга, показывает, что большинство отступивших ледников были достаточно мощными (относительная разница объёма льда выше разницы для площади). В Мейныпыльгинском хребте, наоборот, при большой степени сокращения площади, степень уменьшения объёма льда невелика. Это говорит о том, что скорее всего сократились каровые ледники небольшой мощности (см. табл. 2). Для пяти крупных ледниковых систем северо-востока Сибири в начале XXI в. свободными от ледникового льда по сравнению со временем каталогизации стали 225,2 км², при этом около 9 Гт льда превратилось в талую воду.

Чтобы оценить ошибку при использовании формул С.А. Никитина [22], мы сравнили расчёт объёма по прямым измерениям с помощью сейсморазведочной аппаратуры для ледника № 31 [18] с величиной, полученной по формуле $V_{31} = 0,17$ км³ (детальный расчёт дан ниже).

Расчёт по данным сейсмических исследований.

Все расчёты проводились по данным, представленным в работе [18] в виде следующих рисунков: 1) схематический план ледника с изолиниями абсолютных высот его поверхности (через 5 м) и расположением рек вдоль продольного профиля, где определялась толщина льда (16 рек); 2) рисунок продольного профиля с толщиной льда под рейками; 3) рисунки двух поперечных профилей с абсолютными высотами ложа ледника. Все ис-

ходные данные (горизонтальные и вертикальные параметры ледника в метрах) получены с помощью графического редактора по координатам пиксел. Последовательность действий была следующей (автор — А.Ю. Михайлов, Институт географии РАН):

1) построение линий 16 поперечных профилей в точках расположения рек, нормальных к продольному профилю;

2) определение длины поперечных профилей, расстояний между ними и абсолютных высот на концах ледника и в точках рек (три точки);

3) определение высот двух промежуточных точек и их расстояний до начальных точек ($x = 0$), выбранных на одном крае ледника (на более низком);

4) по значениям высот и расстояний для пяти точек рассчитываются коэффициенты интерполяционного полинома 4-го порядка, с помощью которых определяются средние высоты поверхности вдоль поперечных профилей (средняя высота равняется определённому интегралу от полинома вдоль поперечного профиля, делённому на его длину);

5) по данным о толщине льда вдоль продольного профиля и двух поперечных профилей находится абсолютная высота ложа в трёх точках. Дополнительно определяли глубины одной—двух промежуточных точек. Выбор этих точек и высоты ложа под ними основывался на: а) соображениях подобия двум известным профилям (верхняя часть ложа ледника подобна верхнему профилю, нижняя — нижнему); б) положении минимума по отношению к точкам с рейками; в) учёте особенностей поверхности ледника (положение основного минимума высоты поверхности, а также точки перегиба вблизи более высокого края ледника); г) подгонке высоты ложа для дополнительных точек по графику полинома 4-го порядка, построенного по пяти точкам. Подгон этой высоты выполнялся

из соображений гладкости искомой функции (отсутствие второго экстремума поверхности ложа внутри линии поперечного профиля). С помощью полученных полиномов рассчитывается средняя высота ложа аналогично расчёту поверхности ледника (см. пункт 4);

б) объём льда между соседними профилями находится по формуле объёма усечённой прямоугольной пирамиды:

$$V_i = \frac{\pi}{3} \Delta L_i (S_i + \sqrt{S_i S_{i+1}} + S_{i+1}); S_i = L_i \Delta H_i,$$

где ΔL_i — расстояние между профилями; S_i и S_{i+1} — соответственно площади поверхности льда вдоль вертикальной плоскости через соседние поперечные профили; L_i — длина соответствующего профиля; ΔH_i — разность средних абсолютных высот поверхности ледника и ложа для i -го профиля;

7) объёмы V_i в итоге суммируются (всего 15). К сумме добавляются: а) дополнительный объём льда, не учтённый в результате поворота продольного профиля на 19° в точке № 1, который вычислялся через объём сектора в 19° фигуры вращения (цилиндр с радиусом, равным расстоянию от точки № 11 до дальнего края ледника, с высотой, равной ΔH для данного сектора); б) объём верхнего края ледника, примерно равный половине объёма прямоугольной призмы — $L \times \Delta H \times \Delta L$, где ΔL — среднее расстояние от последнего профиля до края ледника (этот объём составляет примерно 0,4% всего объёма).

В результате расчёта по сейсмическим данным объём ледника № 31 в горах Сунтар-Хаята получился равным $2,17 \cdot 10^8 \text{ м}^3$ ($0,217 \text{ км}^3$). Объём ледника, вычисленный как произведение средней ширины, толщины и длины ледника, т.е. $\bar{L} \times \bar{\Delta H} \times \sum_{i=1}^{16} \Delta L_i$, равен $0,203 \text{ км}^3$, что отличается на 1,4% от детального расчёта. Таким образом, разница значений объёма льда, полученного по формуле С.А. Никитина и прямыми измерениями, составляет около 20%, что вполне приемлемо. Эта величина может иметь практическое применение и быть контрольной для других оценок.

Поля современной границы питания

Ещё в 1982 г. А.Н. Кренке сделал успешную попытку решить проблему целостной характеристики массообмена оледенения (ледниковых систем на территории СССР) [19] с помощью гляциоклиматического подхода. Он широко использовал такие гляциологические характеристики, как высота границы питания H_{ELA} и её пространственное

распределение. Опора метода — ледниковые системы, а не один индивидуальный ледник. Это позволяет абстрагироваться от некоторых локальных особенностей ледников как целых единиц. Ледниковые системы — это определённое множество ледников, объединённое общими связями с окружающей средой, внутренними взаимосвязями и характеризующееся общими свойствами, суммарными и не сводимыми к сумме свойств отдельных компонентов системы.

Пространственные распределения H_{ELA} строились на основе осреднения этого параметра по группам ледников, в результате получались «фоновые» поля, отражающие влияние непрерывно и закономерно меняющейся H_{ELA} . Тогда использовались данные Каталога ледников СССР, в основу которого положены результаты аэрофотосъёмок 1950–60-х годов. К настоящему времени площади ледников, как было уже сказано, существенно изменились. Поэтому возникла задача оценить изменение пространственного распределения H_{ELA} тех же ледниковых систем, которое произошло в период климатических колебаний, и сравнить его с полями, построенными А.Н. Кренке, насколько это возможно, учитывая разницу в масштабах полей H_{ELA} .

В расчётных оценках современных значений H_{ELA} ледниковых систем мы использовали гипотезу определения H_{ELA} как среднее арифметическое между высшей и низшей точками ледника (ледниковой системы), так называемый метод Куровского [19]. Гипотеза о применимости метода Куровского не только к отдельным ледникам, но и к ледниковым системам первого уровня предлагается нами впервые. Для проверки ошибки такого предположения мы сравнили значения H_{ELA} , определённые непосредственно по съёмкам на местности, и наши расчётные. Относительная ошибка вычислялась как разность H_{ELA}^{insitu} и $H_{ELA}^{Куровский}$, отнесённая к высотному диапазону ледниковой системы. В среднем, для хребтов северо-востока Сибири ошибка не превышает 11%, она чувствительна к качеству определения H_{ELA}^{insitu} и к количеству ледников с измеренной H_{ELA} . Средняя ошибка для ледников разных систем гор Сунтар-Хаята колеблется от 3,2 до 7,6% (30–50 м), для ледников хр. Черского — от 7,5 до 13,5% (70–130 м). Для Мейныпильгынского хребта отклонения в среднем составляют 4,4% (23 м).

Чтобы определить H_{ELA} ледников, для которых получены новые оценки площади, мы использовали ЦМР с максимальным разрешением (30 м) — SRTM и ASTER-GDEM. Модели совмещались с шейп-файлами (содержащим контуры ледников),

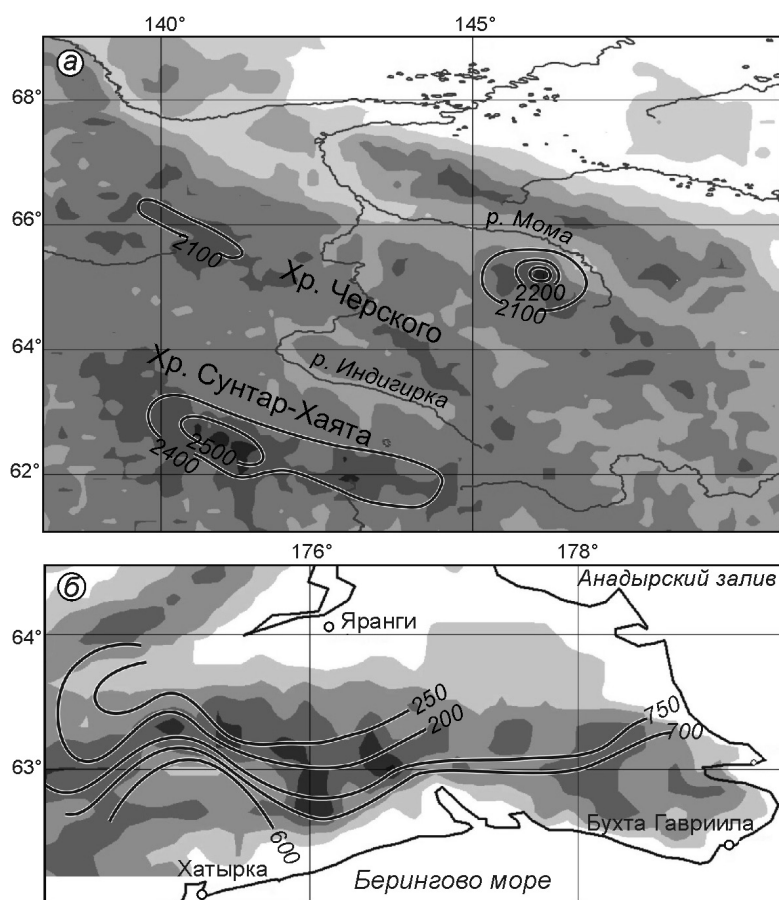


Рис. 5. Современная высота границы питания ледниковых систем Сунтар-Хаята (а) и Мейныпильгинского хребта (б).

Изолиниями показаны высоты границы питания, определённые по космическим снимкам и ЦМР (пояснения см. в тексте)

Fig. 5. Contemporary equilibrium line altitude for glacier systems of Suntar-Khayata (a) and Meynypilginsky Range (b).

Isolines indicate the ELA, determined by satellite images and DEM (explanations are in the text)

и по ним определялась высшая и низшая точка ледника. Среднее арифметическое из этих значений считалось по гипотезе Куровского — H_{ELA} . Высшая точка ледника соответствовала данным из Каталога ледников, поскольку считалась неизменной, так как ледник, отступая, меняет лишь своё нижнее положение в рельефе. На данный момент расчёты современной H_{ELA} сделаны для ледниковых систем гор Сунтар-Хаята и хр. Черского, а также Мейныпильгинского хребта на северо-восток Корякии. Средняя ошибка определения высшей точки для первого региона — 3,7%, для второго — 7%.

Мы рассчитали H_{ELA} для каждого ледника, а потом осреднили значения по каждой ледниковой системе. Эти величины легли в основу карт высоты границы питания на момент космической съёмки: 2003 г. — для гор Сунтар-Хаята и 2008 г. — для Мейныпильгинского хребта (рис. 5). Ошибки определения высотных точек по ASTER-GDEM (даже после ручной чистки артефактов) для каждого ледника (и соответственно H_{ELA}) уменьшаются при осреднении по всей ледниковой системе. Значения фирновой линии в Каталоге ледников также неточны, но посчитать ошибку невозможно,

поскольку отсутствуют точные данные о методе определения её высоты.

На карте гор Сунтар-Хаята (см. рис. 5, а) изолиниями на фоновом изображении отмывкой рельефа показаны средние для ледниковых систем значения H_{ELA} . В статье А.Н. Кренке и Л.П. Черновой [20], где приведена карта H_{ELA} на Северо-Восток СССР, для гор Сунтар-Хаята поле изолиний ограничивается одной изолинией 2400 м, точность проведения изолиний составляет 200 м. По нашим расчётам, H_{ELA} для современного состояния колеблется от 2400 до 2500 м. Таким образом, высота границы питания ледниковых систем (не отдельных ледников) в этом районе изменилась к 2003 г. незначительно (изменения в пределах 100 м) несмотря на отступление ледников и уменьшение площади приблизительно на 20%. Современная высота границы питания ледников хр. Черского также мало изменилась.

На карте H_{ELA} для Мейныпильгинского хребта (см. рис. 5, б) изолинии высоты границы питания, построенные интерполяцией с учётом рельефа между точками (значениями H_{ELA} , средними для ледниковых систем), меняют значение от 600 м (южная

часть региона, ближе к побережью) до 850 м (северо-восточная, континентальная часть). Изменения составили от 100 до 150 м по сравнению с данными Каталога ледников СССР. В статье [20] приведено поле H_{ELA} для Корякского нагорья со значениями изолиний от 400 до 1600 м. Если их экстраполировать на север, до Мейныпильгынского хребта (который служит северо-восточной частью Корякского нагорья), то можно предположить, что высота границы питания в этом регионе несколько повысилась, что логично, так как отступление ледников в районе хребта значительно: за 30 лет площадь сократилась приблизительно на 30%.

Выводы

Сравнение оценок сокращения площади ледниковых систем севера Сибири и Дальнего Востока (рис. 6) позволяет утверждать, что диапазон уменьшения площади ледников в относительных величинах с середины XX в. до 2000-х годов колеблется от 15 до 70%. Сокращение ледников возрастает в направлении с севера Центральной Сибири к северной части Дальнего Востока. Ключевые факторы — рост величины средней годовой температуры и, что более важно, средней летней температуры. Последняя значительно увеличилась за последние несколько десятилетий. Кроме того, эти системы представлены небольшими ледниками, расположенными относительно низко. Наша новая оценка может рассматриваться как первый шаг к обновлению Каталога ледников СССР (теперь — России).

Рассчитаны объёмы льда ледников по состоянию на даты составления Каталога и проведения космической съёмки. За этот период суммарно для пяти изучаемых систем площадь, покрытая льдом, сократилась на 225,2 км², а объём льда — на 8,7 км³ (около 9 Гт), т.е. $\Delta V/\Delta S = 0,04$. Для сравнения: по данным С.А. Никитина, все ледники Алтая за период 1952–2003 гг. сократились на 64,6 км², объём льда уменьшился на 3,7 км³, т.е. $\Delta V/\Delta S = 0,06$. По соотношениям, рассчитанным для изучаемых ледниковых систем (см. табл. 2), видно, что ледники Алтая более мощные по сравнению с системами северо-востока Азии.

Впервые построены карты современной высоты границы питания для нескольких различных по климату районов. Для гор Сунтар-Хаята и хр. Черского, несмотря на сокращение ледников, в среднем для ледниковых систем изменения положения H_{ELA} невелики по сравнению с данными Каталога (или мало отличаются от них). Более существенны изменения для Мейныпильгынского хребта, что в

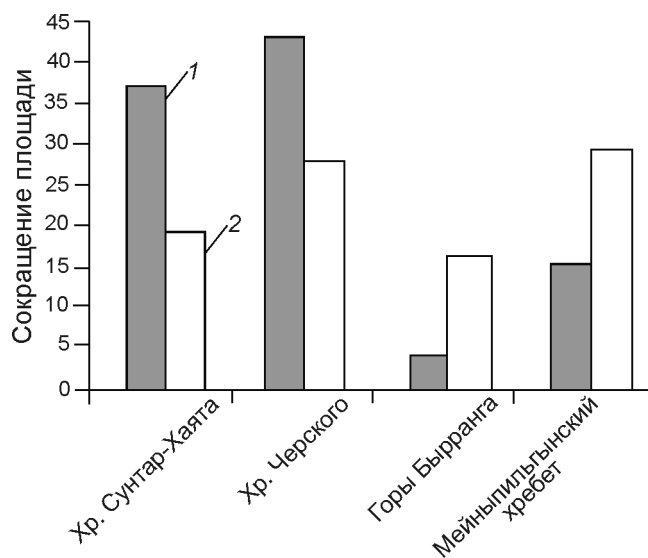


Рис. 6. Сокращение площади ледников всех изучаемых систем (1 — в км², 2 — в %):

хр. Сунтар-Хаята — с 1945 г.; хр. Черского — с 1970 г.; горы Бырранга — с 1967 г.; Мейныпильгынский хребет — уточнено в 1980-х годах

Fig. 6. Total reduction of glacier areas all glacier regions (1 — км², 2 — %):

Suntar-Khayata Range — since 1945; Chersky Range — 1970; Byrranga Mountains — 1967; Meinypylginsky Range — revised in 1980-s

основном объясняется климатическими факторами — на фоне повышения температуры, увеличивающей абляцию ледников, твёрдых осадков недостаточно для компенсации этого процесса.

Благодарности. Большое спасибо А.Ю. Михайлову за расчёт объёма ледника № 31 по данным М.М. Корейши и Г.А. Капустину, который безвременно ушёл от нас, за совместную работу по оценке площадей ледников, что отражено в наших публикациях. Мы благодарны создателю Каталога на один из исследуемых регионов — Р.В. Седову за огромную проделанную им работу. Спасибо Ю.Я. Мачарету за консультации по выбору метода подсчёта объёмов ледников и А.Н. Кренке за ценные советы.

Литература

1. Ананичева М.Д. Современное состояние ледников Корякского нагорья и оценка их эволюции к середине текущего столетия // Лёд и Снег. 2012. № 1 (117). С. 15–24.
2. Ананичева М.Д., Давидович Н.В., Мерсье Ж.-Л. Изменения климата северо-востока Сибири за последнее столетие и отступление ледников Сунтар-Хаята // МГИ. 2003. Вып. 94. С. 216–225.
3. Ананичева М.Д., Давидович Н.В., Кононов Ю.М., Корейша М.М., Т. Ямада, Ш. Такахаши, Т. Шираива. Ледники северного массива Сунтар-Хаята: изменения со времени МГГ// МГИ. 2003. Вып. 95. С. 86–93.

4. Ананичева М.Д., Кренке А.Н. Эволюция высот климатической снеговой линии и границы питания ледников на северо-востоке Сибири в XX веке // МГИ. 2005. Вып. 98. С. 225–232.
5. Ананичева М.Д., Капустин Г.А., Корейша М.М. Изменение ледников гор Сунтар-Хаята и хр. Черского по данным Каталога ледников СССР и космическим снимкам 2001–2003 гг. // МГИ. 2006. Вып. 101. С. 163–169.
6. Ананичева М.Д., Капустин Г.А. Оценка изменений ледников гор Бырранга по космическим снимкам и Каталогу ледников СССР // Лёд и Снег. 2010. № 3 (111). С. 19–24.
7. Ананичева М.Д., Капустин Г.А., Михайлов А.Ю. Ледники Мейнхильгынского хребта: современное состояние и прогноз эволюции ледниковых систем // Лёд и Снег. 2012. № 2 (118). С. 47–57.
8. Васковский А.П. Современное оледенение Северо-Востока СССР // Материалы по геологии и полезным ископаемым Северо-Востока СССР. Вып. 9. Магадан: Изд-во «Советская Колыма», 1955. С. 71–91.
9. Галанин А.А. Каменные глетчеры – особый тип современного горного оледенения северо-востока Азии // Вестн. ДВО РАН. 2005. № 5. С. 59–70.
10. Граве Н.А., Гаврилова М.К., Гравис Г.Ф., Катасонов Е.М., Клюкин Н.К., Корейша М.М., Корнилов Б.А., Чистотин Л.В. Промерзание земной поверхности и оледенение хребта Сунтар-Хаята (Восточная Якутия). М.: Наука, 1964. 143 с.
11. Ерасов Н.В. Метод определения объема горных ледников // МГИ. 1968. Вып. 14. С. 307–308.
12. Журавлев А.Б. Корреляционный метод оценки запасов льда в ледниках // МГИ. 1985. Вып. 52. С. 241–249.
13. Каталог ледников СССР. Т. 17. Вып. 3. Ч. 1; Вып. 7. Ч. 3; Т. 19. Ч. 3. Хребет Сунтар-Хаята. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 72 с.
14. Каталог ледников СССР. Т. 16. Вып. 1. Ч. 2. Горы Бырранга. Л.: Гидрометеиздат, 1980. С. 52–70.
15. Каталог ледников СССР. Т. 17. Вып. 7. Ч. 2. Ч. 4; Т. 19. Ч. 4. Хребет Черского. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 78 с.
16. Каталог ледников СССР. Т. 20. Ч. 1. Корякское нагорье. Л.: Гидрометеиздат, 1982. С. 26–65. 75 с.
17. Кононова Н.К. Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б.Л. Дзердзеевскому / Отв. ред. А.Б. Шмакин. М.: Воентехиниздат, 2009. 372 с.
18. Корейша М.М. Оледенение Верхоянско-Колымской области: Результаты исследований по программе МГГ. М.: Междувед. геофиз. комитет при Президиуме АН СССР, 1991. 141 с.
19. Кренке А.Н. Массообмен в ледниковых системах на территории СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 488 с.
20. Кренке А.Н., Чернова Л.П. Ледниковые системы Северо-Востока СССР // Изв. РАН. Сер. геогр. 1980. № 1. С. 17–33.
21. Мачерет Ю.Я. Радиозондирование ледников. М.: Научный мир, 2006. 389 с.
22. Никитин С.А. Закономерности распределения ледниковых льдов в Русском Алтае, оценка их запасов и динамики // МГИ. 2009. Вып. 107. С. 87–97.
23. Попова В.В. Современные изменения температуры приземного воздуха на севере Евразии: региональные тенденции и роль атмосферной циркуляции // Изв. РАН. Сер. геогр. 2009. № 6. С. 59–69.
24. Сарана В. А. Гляциологические заметки по экспедиции на Восточный Таймыр в 2007 г. // Новости МПГ 2007/08. 2008. № 14. С. 10–11.
25. Сватков Н.М. Современное оледенение хребта Малиновского // МГИ. 1965. Вып. 15. С. 111–119.
26. Седов Р.В. Каталог ледников Северо-Восточной части Корякского нагорья: Т. 19. Северо-Восток. Ч. 1. Мейнхильгынский хребет / Под ред. Д.Г. Цветкова // МГИ. 2001. Вып. 91. С. 195–224.
27. Шмакин А.Б. Климатические характеристики снежного покрова Северной Евразии и их изменения в последние десятилетия // Лёд и Снег. 2010. № 1 (109). С. 43–58.
28. ASTER Global DEM Validation Summary Report Prepared by ASTER GDEM Validation Team: METI/ERSDAC NASA/LPDAAC USGS/EROS In cooperation with NGA and Other Collaborators, June 2009. 28 p.
29. Bahr D.B., Meier M.F., Peckham S.D. The physical basis of glacier volume & area scaling // Journ. of Geophys. Research. 1997. № 102 (B9) P. 20355–20362. doi:10.1029/97JB01696.
30. Bolch T., Kamp U. Glacier mapping in high mountains using DEMs, Landsat and ASTER Data // Grazer Schriften für Geographie und Raumforschung. 2006. V. 41. P. 37–48.
31. Hirano A., Welch R., Lang H. Mapping from ASTER stereo image data: DEM validation and accuracy assessment // ISPRS Journ. of Photogrammetry & Remote Sensing. 2003. V. 57. P. 356–370.
32. Paul F., Kääb A., Maisch M., Kellenberger T.W., Haeberli W. The new remote-sensing-derived Swiss glacier inventory: I. Methods // Annals of Glaciology. 2002. V. 34. P. 355–361.

Summary

The paper compares remotely sensed glacier inventories of the Byrranga, Suntar-Khayata, and Chersky ranges (2003), Koryak Highland and Chukotka mountains (2008) with data from the Inventory of Glaciers of the USSR (1945–1985). We studied changes in glacier area since the Inventory, which was primarily based on aerial photos and field research. The glaciers have been classified by orientation (aspect) and morphological type. Overall the glacierization of the Chersky Range (1970–2003), Suntar-Khayata (1945–2003), Byrranga (1967–2003), Koryak Highland (1950–2003) and Meynypilginsky Range (1984–2008) reduced by about 30, 20, 15, 60 (debatable value) and 25% respectively due to summer temperature rise. Calculation of glacier volumes for the dates indicated in the USSR Glacier Inventory and satellite imagery: during this period in sum for 5 studied glacier regions the area, covered by ice, has decreased by 225.2 km², and ice volume – by 8.7 Gtg. Construction of spatial patterns (maps) of current ELA for 3 different by climate mountain regions – the Suntar-Khayata Mountains– Chersky Range, and Meynypilginsky Range (North Far East), showed that despite of retreat of the glaciers, the mean ELA change for the first studied region is not large compared with the data from the Glacier Inventory (100 m), and significant for the second (100–150 m).