

УДК 551.324

Современное состояние ледников Корякского нагорья и оценка их эволюции к середине текущего столетия

© 2012 г. М.Д. Ананичева

Институт географии РАН, Москва

Maria_anan@rambler.ru

Статья принята к печати 22 июня 2011 г.

Баланс массы, высота границы питания, климатическая модель, космический снимок, ледниковая система, площадь ледника, прогноз.

Climate model, equilibrium line altitude, glacier area, glacier systems, mass balance, projection, satellite image.

В гляциологическом отношении Корякское нагорье исследовано недостаточно. На время публикации Каталога ледников СССР в 1982 г. здесь было выявлено 715 ледников, сейчас – только 237. Для исследования использовались космические снимки Landsat MSS, TM и ETM+ и TerraLook ASTER. В этом регионе распространены каменные глетчеры, которые, вероятно, ранее при составлении каталога были приняты за ледники. Проанализировано сокращение площади ледников в зависимости от их морфологического типа и экспозиции. По сравнению с данными аэрофотосъёмки 1950 г. общая площадь ледников уменьшилась на 40–70%. На основе климатического сценария ECHAM 5 (B1) оценена эволюция оледенения Корякского нагорья: к 2049–2060 гг. оледенение здесь сократится лишь незначительно.

Введение

Корякское нагорье находится на северо-востоке Азиатской части России, на побережье Берингова моря между Анадырским заливом и п-вом Камчатка. Протяжённость его – 880 км, ширина достигает 270 км. Высоты находятся в пределах 600–1800 м; высшая точка в центральной части 2562 м (гора Ледяная). Нагорье представляет собой цепь хребтов, гряд и кражей, а также небольших плато высотой 600–1800 м. Горные цепи, несмотря на небольшую

абсолютную высоту, имеют резко расчленённый рельеф альпийского типа, обусловленный четвертичным оледенением, которое отличается здесь горно-долинным характером.

От Срединного хребта Камчатки Корякские хребты отделены узкой перемычкой – Парапольским долом. Корякско-Камчатская складчатая область выделяется геоморфологами в качестве единой структурной системы, хотя Корякское нагорье отличается от горных систем Камчатки (рис. 1) [6].

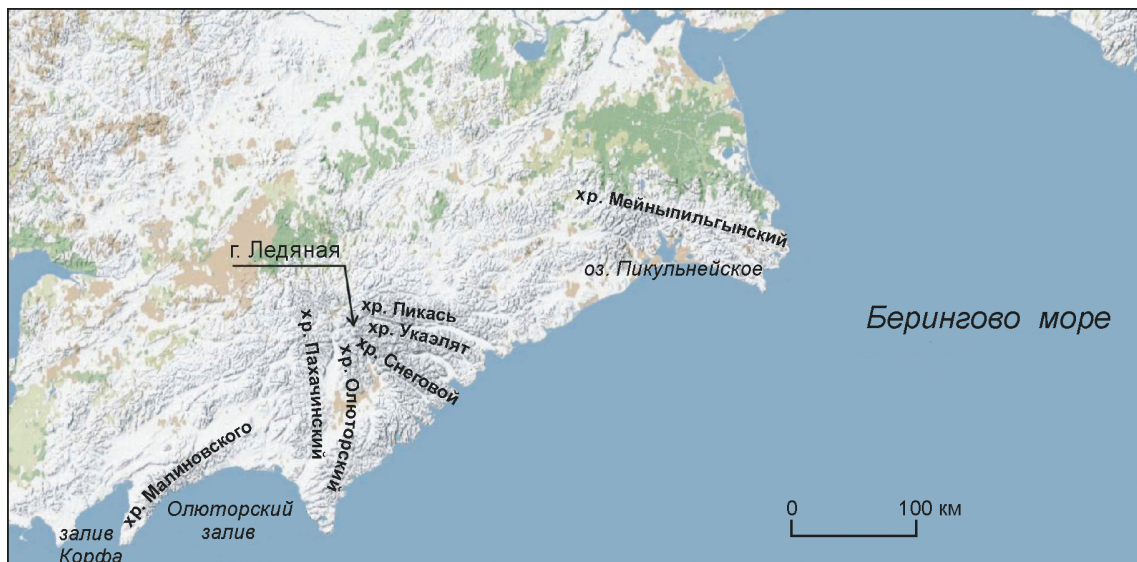


Рис. 1. Схема района исследований
Fig. 1. Study region

Ледники обнаружены здесь геологами в конце 1930-х годов, а в 1955 г. А.П. Васильковский опубликовал результаты камерального подсчёта ледников, основу которого составили данные аэрофотосъёмки. Обнаружен 481 ледник и снежник общей площадью около 185 км². Через три года М.И. Малых, исследовавший район 60–63° с.ш. и 166,5–176,5° в.д., насчитал там 282 ледника, среди которых он выделил долинные и каровые.

В 1961 г. на ледниках Корякского нагорья работал Н.М. Сватков – основной автор раздела о Корякии в Каталоге ледников СССР [4]. Он обнаружил 715 ледников. Позже в этот район исследователи пришли только в 1990-х годах. Они изучали различные геоморфологические объекты, среди которых были и каменные глетчеры [3]. А.А. Галанин в работах, посвящённых каменным глетчерам, отмечает 282 ледника общей площадью 180 км², что совпадает с указанным в конце 1950-х годов М.И. Малых [4].

Методика определения современного распространения ледников Корякии

Обширность территории Корякского нагорья, требования к достаточно высокому пространственному разрешению снимков, а также особенности сезонного интервала, пригодного для космосъёмки ледников, определили наш выбор – для исследования применяли данные со спутников Landsat и Terra: снимки Landsat MSS, TM и ETM+ и TerraLook ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, http://asterweb.jpl.nasa.gov/TerraLook_capabilities.asp). Отдельные единовременные снимки не покрывали всю область распространения ледников, поэтому отбирались серии снимков. Не всегда можно было получить снимки, соответствующие целям исследований: в одних случаях часть изучаемой территории была покрыта облаками и/или дымкой; в других не позволял точно ограничить контуры ледников свежеснеженный снег. Если съёмка велась на закате или восходе солнца, то провести правильные контуры ледников было невозможно из-за теней, отбрасываемых на ледник окружающими вершинами. Для улучшения изобразительных свойств снимков на предварительном этапе дешифрирования мы использовали различные приёмы компьютерной обработки изображений, среди которых – усиление контрастности, а также радиометрическая и текстурная фильтрация. Создавались также композитные изображения из нескольких изображений в узких спектральных каналах, в частности изображения, близкие к естественным, а также синтезированные в красном и ближнем инфракрасном диапазонах.

Среди вспомогательных источников информации – цифровые модели рельефа (ЦМР), созданные

на основе данных SRTM-2, трансформированных в Универсальную поперечную проекцию Меркатора в 58 и 59 зонах. При наложении космических синтезированных изображений на псевдотрёхмерные изображения рельефа, полученные по ЦМР, визуально дешифрировались границы ледников, приуроченных к отдельным формам ледникового рельефа. Для дешифрирования использовались программы Arc View 3.3 с модулями Image Analysis, Spatial Analyst, 3D Analyst. Площади определяли по контурам отдельных шейп-файлов, а цифровое оконтуривание ледников проводили вручную.

Состояние ледников Корякского нагорья в начале XXI в. по космическим снимкам

Регион Корякского нагорья, расположенный на севере Дальнего Востока России, в гляциологическом отношении исследован мало. Сведения о ледниках в основном базировались на материалах топографического картографирования. Информация Каталога ледников СССР получена измерительно-расчётными методами по картам и с помощью аэрофотосъёмки. Согласно Каталогу, в Корякии насчитывалось 715 ледников [4].

На снимках мы обнаружили только 237 ледников. При этом рассматривались снимки одних и тех же участков ледников в разные годы, но в один и тот же сезон, который определяли по наиболее интенсивному таянию снега и льда (конец июля – начало сентября с предпочтением последней декады августа). И если хотя бы в один из периодов наблюдения (год) на территории не фиксировались следы оледенения, то, следовательно, ледник, существовавший ранее на этом месте, растаял, а все последующие образования – не более чем снежники.

Согласно данным А.А. Галанина [3], в исследуемом нами районе есть несколько участков, где развиты каменные глетчеры (рис. 2), однако ни один из них в достаточной мере не изучен. По косвенным признакам дешифрирования можно предположить, что в ряде случаев это действительно каменные глетчеры, представляющие собой особые образования из обломочного материала, сцементированного льдом в единое тело. Поверхность каменного глетчера сложена обломочным материалом, который перекрывает лёд и не позволяет определить площадь ледяного массива внутри глетчера. Большую разницу между числом ледников в Каталоге и обнаруженных на снимках можно объяснить тем, что Н.М. Сватков относил каменные глетчеры и снежники к ледникам, так как работал с топокартами, составленными не им, а другими исследователями при съёмках 1945–1950 гг. Период открытого льда на ледниках Корякии очень короткий, бурение на ледниках не проводилось, поэтому вполне вероят-

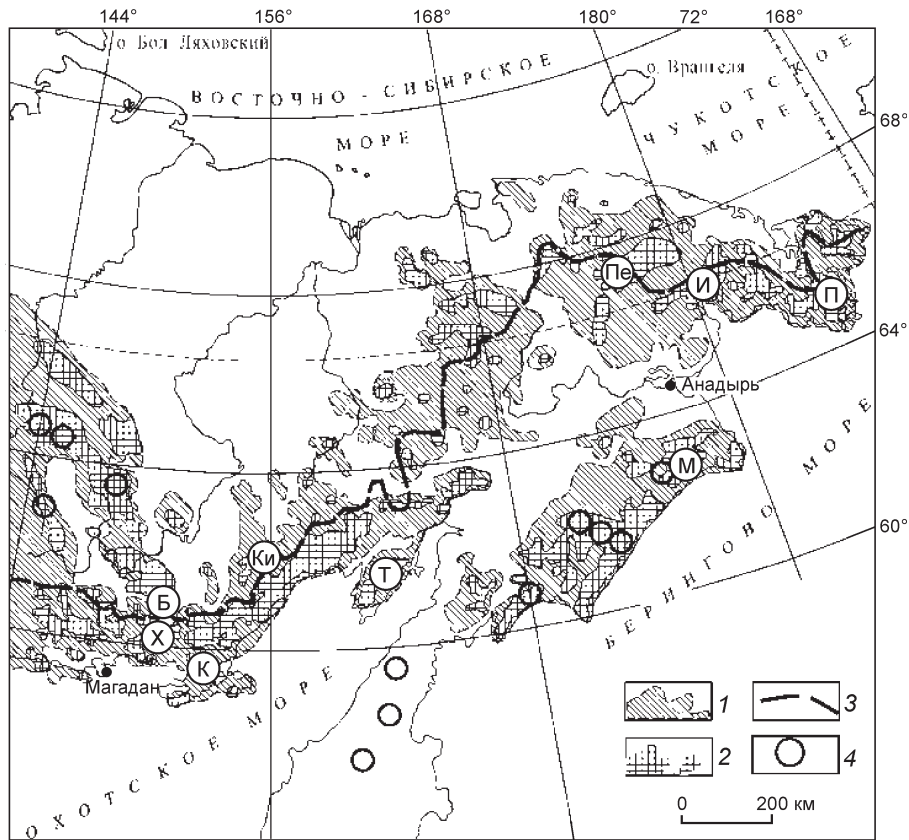


Рис. 2. Районы распространения разных типов каменных глетчеров и ледников на северо-востоке Азии, по А.А. Галанину [3]:

1 – районы распространения активных и отмерших каменных глетчеров преимущественно присклонового, реже карового типов; 2 – районы современного оледенения по данным предшествующих исследователей; 3 – главный водораздел и граница между Арктической и Тихоокеанской гляциологическими областями; 4 – районы обнаружения и полевого изучения каменных глетчеров: Б – Бахапчинские горы; И – хр. Искатень; К – п-ов Кони; М – Мейныпильгынский горный массив; П – Провиденский горный массив; Пе – хр. Пикульней; Х – хр. Хасынский; Ки – Килганский горный массив; Т – Тайнынотский хребет

Fig. 2. Extent of various types of rock glaciers and glaciers in Northeastern Asia according to A.A. Galanin [3]:

1 – regions of spreading active and dead rock glaciers of mostly near-slope, rarely of corrie types; 2 – regions of contemporary glaciations by the data of previous researches; 3 – the main watershed and the boundary between Arctic and Pacific glaciological provinces; 4 – regions where rock glaciers were found and studied *in situ*: Б – Bakhpchinskies Mountains; И – Iskaten Range; К – Koni Peninsula; М – Meinypelgynsky Mountain Massif; П – Providensky Mountain Massif; Пе – Pikulnei Range; Х – Khasynsky Range; Ки – Kilgansky Mountain Massif; Т – Nainynotsky Range

но, что на топокартах отмечено гораздо больше ледников, чем их было на самом деле.

Оценка современного состояния ледников горных систем позволяет определить тенденции изменения оледенения и его темпы. Полученные материалы можно использовать для подтверждения (валидации) прогноза, сделанного независимым методом (например, гидродинамическим), а зная масштаб изменений площади, покрытой льдом, получить представление о доле ледникового стока в общем речном стоке, поскольку уменьшение площади сопровождается соответствующим изменением объёма льда в ледниках. Анализ снимков и сравнение данных с материалами Каталога позволили сделать следующие оценки:

число ледников	237
площадь ледников, км ² :	
по Каталогу (1950-АФС)	176,6
по снимкам 2003 г.	54,4
среднее изменение площади ледника dS :	
абсолютное, км ²	0,54
относительное, %	66,5

В целом оледенение Корякского нагорья сократилось катастрофически – величина ΔS составляет 69%. На снимках от многих ледников остались лишь области аккумуляции и часть канала стока льда, языки полностью или частично стаяли. Однако нельзя исключать и ошибки значений площади ледников на дату составления Каталога, если учесть резкий рост числа ледников за счёт каменных глет-

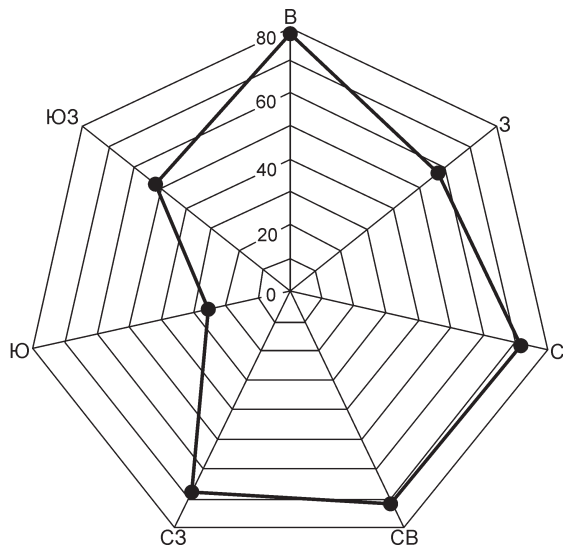


Рис. 3. Распределение отступивших ледников по экспозиции, %

Fig. 3. Spreading of the retreated glaciers by aspect, %

черов и снежников. Поэтому оценку сокращения площади на 69% относительно 1950 г. для этого региона мы считаем предварительной и требующей проверки. Н.М. Сватков изучал несколько ледников вокруг горы Ледяной *in situ* [9, 10]. Если предположить, что площади льда определены правильно (за ледник не был принят снег), то для данных ледников отступление составило 40–50%. Это также достаточно большая величина, но она уже более реальная.

Анализ сокращения площади отступивших ледников по группам (одинаковый морфологический тип и экспозиция) показал, что максимально уменьшились размеры ледников восточной, северной и северо-восточной экспозиций (рис. 3). Это согласуется с характером потепления на хр. Черского, где максимально сократились также ледники северных и северо-восточных экспозиций. Известно, что наибольшее потепление на территории России происходит вдоль пояса 55–60° с.ш., севернее и южнее него рост температуры не столь заметен, но всё равно есть [7, 8]. Более частые и интенсивные зимние циклоны не только повышают температуру воздуха, но одновременно приносят сюда больше осадков. И если на европейской территории эти осадки всё чаще превращаются из снега в дождь, то в более холодных регионах заметно растёт количество твёрдых осадков [12]. Осадки на Корякском нагорье поступают с юга и юго-востока, поэтому ледники этих экспозиций отступили меньше, чем обращённые на север и запад.

Анализ температур воздуха по метеостанциям, которые можно отнести к району Корякского нагорья (Илирней, Марково, Анадырь, Бухта Провидения, Березово, Беренгийская, Каменское, Ямск; все станции

находятся на высоте ниже 500 м над ур. моря, <http://www.meteo.ru>), показал наличие положительных трендов (рассчитывались линейные тренды) за последние 30 лет. Размах значений невелик: от 1,5 до 0,2 °С/год за 30 лет как для годовой T_{year} , так и для летней T_{jja} температур воздуха. Тренды указывают на давно протекающее потепление в этом регионе, но столь катастрофическое сокращение размеров ледников можно объяснить лишь резким снижением количества выпадающих твёрдых осадков, которые служат основой аккумуляции ледников, либо неправильными оценками размеров ледников при составлении Каталога. Большинство рядов наблюдений общих осадков на метеостанциях региона за последние 30 лет демонстрируют отрицательные тренды: от –60 до –250 мм/год. Правда, есть несколько прибрежных станций, по данным которых отмечаются слабые положительные тренды. Таким образом, можно сделать вывод, что питание ледников этого региона в целом сократилось за время современного потепления (последние несколько десятилетий).

Как и в других горных районах Северо-Востока России, в Корякии резко уменьшилась площадь карово-долинных и долинных типов ледников; в данном случае к отступившим добавились ещё асимметричные кары, характерные для горного плато. Относительное отступление ледников по морфологическому типу выглядит следующим образом, %:

асимметричный каровый	75,0
долинный	73,7
карово-долинный	70,8
сложно-долинный	65,4
каровый	64,7
карово-висячий	62,5
присклоновый	48,5
присклоновый каровый	40,0
цирковый	36,9
висячий	30,0

Таким образом, самое катастрофическое отступление ледников среди изучаемых горных систем Российской Субарктики характерно для Корякского нагорья (69%, или, по крайней мере, 40% с 1950 г.), далее идёт оледенение хр. Черского (30% с 1970 г.), меньше сократились ледники гор Сунтар-Хаята (20% с 1945 г.) и Бырранга (17% с 1967 г) [2].

Расчёт возможного изменения оледенения Корякского нагорья в будущем

Гидродинамические методы расчёта изменений размеров и режима отдельных ледников не применимы к горным ледниковым системам. В первую очередь это связано с отсутствием необходимого набора данных для каждого ледника, а на Северо-Востоке Сибири и на Камчатке их около 1800.

Используемый нами методический подход предусматривает расчёт балансовых и гипсографических

Изменения основных характеристик ледниковых систем Корякского нагорья к середине XXI в. (2040–2069 гг.) (в числителе – базовый период, в знаменателе – прогнозный)

Ледниковая система	Изменение $H_{ГП}$ (от базового* до прогнозного периода), м	Высотный диапазон оледенения системы, м	Площадь оледенения, км ² (%)	Абляция–аккумуляция на $H_{ГП}$, мм	Баланс***, см/год
Хр. Пикась–хр. Укаэлят	–200**	970/1200	33,7/****	1500/2050	–19,58/399,0
Хр. Укаэлят–Снеговой	343	960/600	18,9/9,04 (47,6)	1750/2250	2,36/106,6
Бассейн р. Ватына	–56	720/880	11,3/****	710/1450	75,04/111,8
Бассейн р. Аниваям–бухта Мачевна	83	500/120	3,9/2,97 (76,1)	2400/2650	5,50/6,25
Бассейн Мачевана–Апука	142	880/1000	1,93/1,92 (99,5)	1850/2100	5,45/–27,13
Бассейн р. Апукаваям	–225	980/1320	15,8/****	620/1480	30,37/14,5
Бассейн Олюторского залива	293	1070/500	6,8/2,8 (41,2)	720/2920	12,19/0,35
Бассейн залива Корфа	108	740/520	12,22/10,1 (55,8)	460/2310	17,51/13,8

*Базовый период для климата (1960–1991), состояние ледников определено по космическим снимкам 2003 г. **Минус означает опускание высоты границы питания. ***Баланс рассчитывался как разность аккумуляции и абляции. ****Площадь, покрытая ледниковым льдом, может увеличиться, см. пояснения в тексте.

характеристик ледниковой системы в базовый период (современность, 1960–1992 гг., совпадающий с базовым периодом использованного климатического сценария) и в прогнозный период для относительно недалёкого будущего – 2049–2060 гг.

Базовый период. Ледники Корякского нагорья разделены на восемь ледниковых систем в соответствии со следующим определением А.Н. Кренке: «Ледниковые системы – множество ледников, объединяемые общими связями с подстилающей поверхностью, атмосферной циркуляцией и совместным влиянием на климат, сток и рельеф». В основу выделения положены данные Каталога ледников в СССР [4]; список систем приведён в таблице.

Для каждой ледниковой системы определяют среднюю высоту границы питания E_{LA} , а также максимальные H_{max} и минимальные H_{min} высотные отметки ледников в системе. Значение E_{LA} находилось по пересечению построенных по климатическим данным профилей вертикальной аккумуляции C и абляции A . Величину H_{max} мы получали из данных Каталога ледников СССР для ледников, обнаруженных с помощью космических снимков; H_{min} – исходя из гипотезы Гефера–Куровского о вдвое большем отступании концов ледников по сравнению с E_{LA} [2]. Более точные оценки современных высот концов ледников планируется получить с использованием ЦМР. Гипотеза Гефера–Куровского проверена путём подсчёта E_{LA} предлагаемым способом (как среднее арифметическое между верхней и нижней отметками ледника) с определённым значением E_{LA} *in situ* по ледникам гор Сунтар-Хаята и хр. Черского (северо-восток Сибири), по которым такие данные есть. Отклонения для гор Сунтар-Хаята составляют от 3,2 до 7,7% или в абсолютных значениях от 30 до 65 м, для хр. Черского – от 7,5 до 10%, а в абсолютных величинах – от 70 до 120 м.

Профили A строились по средней температуре летних месяцев T_{jja} . Параметры формулы связи могут меняться в зависимости от набора зон льдообразования (холодный, тёплый ледник). Температуры в нижних высотных уровнях определяли по данным метеостанций. Градиент T_{jja} колеблется от 0,4 до 0,6 °C/100 м и зависит от местоположения станции – на побережье или в пределах континента. Обычно изменения T_{jja} по высоте на неледниковой поверхности в интервале высот системы определяют по данным ближайших метеостанций; для больших высот – по удалённым станциям или градиенту, близкому к сухоадиабатическому (0,74 °C/100 м) с ростом высоты и сухости климата. В значения T_{jja} вносилась поправка T_g на выхолаживание ледником воздуха над ним для каждого высотного интервала по следующей формуле [14]:

$$T_g \text{ (или } T_{jja/g}) = 0,85T_{jja} - 1,2.$$

При расчёте абляции использовалась формула $A = 1,33(T_{jja} + 9,66)^{2,83}$, опробованная для прогноза развития ледниковых систем Камчатки [2]. Поскольку по исследуемому району данные по абляции ледников и температуре, измеренные в одно и то же время, отсутствуют, значение A мы находили по оригинальной формуле связи средней летней температуры с абляцией на E_{LA} , указанной ранее. В работе [1] приведена подробная методика прогноза развития ледниковых систем, которая получила дальнейшее развитие в данной работе. Остановимся более детально на новых положениях этой методики.

Вертикальные профили аккумуляции строились по данным об осадках на метеостанциях (величина осадков пересчитывалась в твёрдые на средней для всей горной системы высоте E_{LA} , исходя из того, что на этой высоте величины A и C равны). В исследу-

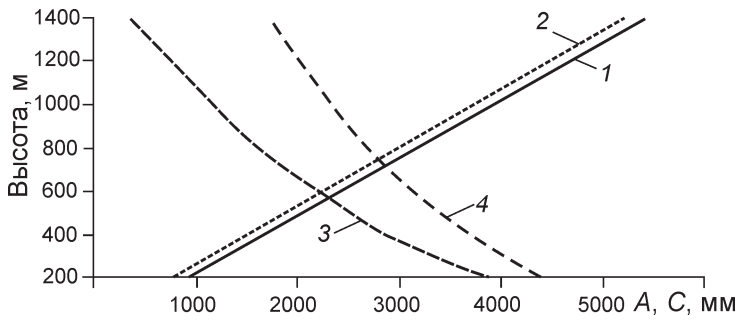


Рис. 4. Пример балансовых кривых (бассейн залива Корфа):

1 – аккумуляция для базового периода C ; 2 – прогнозируемая аккумуляция C_{pr} ; 3 – абляция для базового периода A ; 4 – прогнозируемая абляция A_{pr}

Fig. 4. Examples of mass balance vertical profiles (Basin of Korf Inlet):

1 – accumulation for baseline period C ; 2 – projected accumulation C_{pr} ; 3 – ablation for baseline period A ; 4 – projected ablation A_{pr}

дуемом регионе метеостанции находятся на побережье (к востоку от Корякского нагорья) и в низких предгорьях – до 500 м (к западу), поэтому крайне важно было установить значения аккумуляции на высоких уровнях. С этой целью использовались рассчитанные значения осадков независимым методом специально для данного района. Параметры аккумуляции взяты с карты А.Ю. Михайлова на высоте границы питания для каждой выделенной ледниковой системы [5]. На нижних уровнях аккумуляция получена путём умножения величины твёрдых осадков по профилю на коэффициент концентрации K_c , зависящий от морфологического типа ледников, преобладающих в системе (от 1,4 до 1,8). Коэффициент отражает концентрацию снега на ледниках, связанную с лавинами, переотложением со склонов, метелевым переносом. Балансовые профили для отдельных систем Корякского нагорья на базовый и прогнозный периоды приведены на рис. 4.

Чтобы понять, как распределяются площади, покрытые льдом, в горной системе по высоте при изменении площади оледенения, мы составили гипсографические схемы ледников для каждой системы. Метод построения дифференциальных гипсографических схем предусматривает суммирование площади по высоте над уровнем моря по 200-метровым интервалам для всех входящих в систему ледников. При этом учитывается каждый ледник. Мы использовали топокарты, схемы ледников в Каталоге, данные о высшей и низшей точках ледника, а также о высоте фирновой линии. Ошибки при построении схем ледниковых систем минимальны, поскольку некоторое округление формы ледника (ледники аппроксимировались геометрическими фигурами) суммируется для всего их множества в системе по интервалам. Схемы ледников в Каталоге для Корякского нагорья построены по топокартам 1950-х годов, поэтому для уточнения формы ледника и его площади мы использовали данные о ледниках, полученные по космическим снимкам Landsat и ASTER, датированным 2003 г. Примеры гипсографических схем даны на рис. 5.

Прогнозный период. Для прогноза или реконструкции ледников в те же балансовые вертикальные про-

фили вводятся параметры климатического сценария: твёрдые осадки – в расчёт C , прогнозная температура – в расчёт A . В данной работе применялся прогностический сценарий модели Института Макса Планка (ECHAM 5, scenario B1). Разрешение модели – $2,1^\circ \times 2,1^\circ$ в географических координатах. На данный момент это – самая частая сетка выходных параметров для AOGCM (Atmosphere-Ocean Global Circulation Model). Параметры и описание модели даны в открытом доступе на сайте Института Макса Планка <http://www.mpimet.mpg.de/en/wissenschaft/modelle/echam/echam5.html>. Обоснование выбора именно этой модели изложено в работе [13]. На район Корякского нагорья попадает 21 ячейка модели.

Среди выходных параметров модели использовались важные для балансовых расчётов ледниковых систем среднемесячная температура воздуха, в частности средняя летняя температура T_{jja-pr} и общее количество осадков P_{tot-pr} (прогнозируемые). Величину P_{tot-pr} мы пересчитывали в твёрдые осадки P_{sol-pr} и определяли их долю в общих осадках для оценки аккумуляции по методу Э.Б. Богдановой, использовавшемуся в других наших работах, например в [1]. Модельные T_{jja} на исследуемый район колеблются от 6,7 до 10,6 °C в зависимости от места (в северных районах Корякского нагорья температура выше, чем в южных), сумма общих осадков P_{tot} прогнозируется от 400 до 700 мм/год (максимум в центре и на востоке региона). Эти параметры заданы для точек с низкой абсолютной высотой местности. Мы подготавливали глобальный климатический сценарий к использованию на региональном уровне путём интерполяции между среднезвешенными по ячейке значениями с учётом рельефа и вставляя полученные параметры модели в балансовые схемы (вертикальные профили A и C), построенные по климатическим характеристикам именно Корякского горного региона.

Допуская, что зависимость доли твёрдых осадков от высоты в ближайшем будущем будет такой же, как и сейчас, строились новые профили аккумуляции. Прогностические оценки ЕЛА получались также при пересечении кривых A_{pr} и C_{pr} (см. рис. 4, кривые A_{pr} и C_{pr}). Высоту концов ледников H_{end} , необходимую для

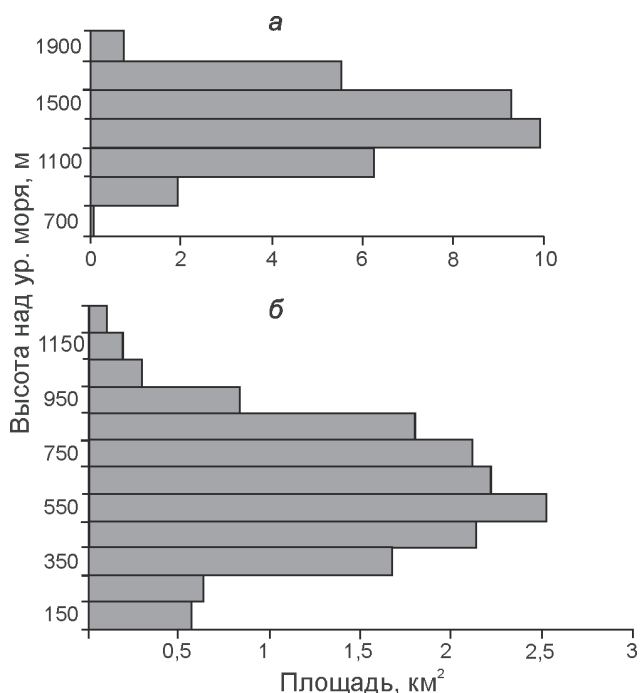


Рис. 5. Примеры гипсографических схем для ледниковых систем:

а – система Пикась–Укаэлят; *б* – бассейн залива Корфа

Fig. 5. Examples of hypsographic schemes for glacier systems:

a – system of Pykas'-Ykaelyat; *b* – Basin of Korf Inlet

расчётов изменения площади при развитии того или иного сценария, рассчитывали по формуле, исходя из ранее упомянутой гипотезы Гефера–Куровского о вдвое большем отступании концов ледников по сравнению с ELA; детали см. в [1].

Изменение доли сокращения площадей по отношению к базовому периоду по высотным интервалам между концом и началом ледниковой системы мы рассчитывали на основе нелинейной зависимости; функция распределения ледниковых площадей по высоте при реализации сценария потепления получена путём использования эмпирических данных. Для ледниковых систем Корякского нагорья характерны кары и разные подтипы каровых ледников, поэтому мы проанализировали результаты повторных съёмки по высоте трёх ледников-каров (Полярный Урал) [11]. Это – единственные данные повторных съёмки каровых ледников, которые нам удалось найти. Ледники Полярного Урала и Корякского нагорья – небольшие, климат в этих районах холодный, осадков мало.

Функция распределения по высоте средней разности площади каровых ледников до потепления и после параметризуется параболой, адаптированной для условий Корякской ледниковой системы (преобладающий тип ледников – каровые).

Используемый методологический подход позволил нам получить новые (прогнозные) характери-

сти системы: высотный диапазон; площадь; ELA_{pr} , A_{pr} и C_{pr} , а также значения баланса на тот срез времени, на который использовались выходные параметры сценария (см. таблицу). Важное условие подхода – представление о том, что на этот период времени изменившиеся ледниковые системы уже находятся в состоянии равновесия с климатической системой. Существуют два подхода учёта времени отклика ледников на изменения климата – статический и объёмный. Первый из них разработан достаточно давно для оценки вклада ледников в изменение уровня моря [19]. По существующим в настоящее время ледникам рассчитываются изменения в балансе массы и их площадном распространении. Модель такого отклика разработана Х. Орлемансом [16]. В дальнейшем были попытки учесть динамический отклик и смоделировать время отклика ледников как по площади, так и по объёму [17, 18].

Второй подход – учёт объёма ледника, т.е. отклик за время, которое ледник приспособливает свои состояние и форму к изменениям климата, – характеризуется соотношением масштабов толщины ледника к абляции [15]. Время ответа даётся в уравнении

$$t = H / -B_T,$$

где H – масштаб толщины (scale of thickness) ледника; $-B_T$ – величина абляции (scale of ablation).

В случае нашей ледниковой системы индивидуальная геометрия ледников усредняется, и мы судим о времени приспособления по этому соотношению, имея в виду средние значения абляции и толщины ледников. Абляция ледников Корякского нагорья – от 2000 до 3000 мм, мощность 60–130 м, следовательно, характерное время приспособления этих систем колеблется от 30 до 60 лет. (Для ледников умеренных и субарктических широт, по [15], время отклика составляет 15–60 лет). Поскольку наш прогноз рассчитан для ледников Субарктики на интервал времени 2049–2060 гг., это время как раз приходится на стадию приспособления ледников к условиям нового климата.

Результаты и интерпретация прогноза. Полученные характеристики для базового и прогнозного периодов (их набор аналогичен набору в работе [1]) представлены в таблице для восьми ледниковых систем, на которые мы разделили регион Корякского нагорья. В данной работе рассматривались ледники, описанные в Каталоге [4]. Северо-восточная часть региона – Мейньпильгынский хребет, находящийся между Корякским нагорьем и Чукоткой, не включён в данное исследование. Названия наших ледниковых систем отнесены к группам ледников, которые находятся в пределах упоминаемых в Каталоге речных бассейнов или частей горных хребтов.

Как видно из таблицы, в базовый период ELA колеблется от 1070 м (север хр. Малиновского) до 500 м (ледники, питающие талым стоком водотоки, впадающие в бухту Мачевна). В среднем она составляет около 900 м для ледниковых систем, расположенных в основном узле оледенения — в районе горы Ледниковой на стыке нескольких высоких хребтов. При реализации сценария развития климата согласно ЕСНАМ 5 (В1), максимальный подъём ELA (от 300 до почти 400 м) в результате потепления затронет ледники, расположенные на южных склонах хр. Укаэлят и на хр. Снеговом, а также на хр. Малиновского (южная, континентальная часть Корякского нагорья). Однако в трёх системах граница высоты питания снизится (на 200–220 м). К ним относятся ледники, расположенные в долинах, открытых потокам, идущим с Северного Ледовитого океана (бассейны рек Пикасьваам, Укаэлят), и спускающихся с разных хребтов во внутреннюю часть региона (бассейн р. Апука, имеющий выход в южную часть Берингова моря). Это можно объяснить преваляцией аккумуляции в этих районах над абляцией, т.е. повышением количества твёрдых осадков на фоне недостаточного роста температур тёплого периода, а также переотложением и большей сохранностью осадков в этих протяжённых долинах, зажатых между высокими хребтами. Возможное увеличение площади ледниковой системы может составить примерно 1/5 часть базового периода, если исходить из гипотезы Гефера–Куровского.

В таблице в графе «площадь оледенения» приведены площади ледников для базового периода по данным выполненного нами анализа космических снимков на 2003 г. Площадь оледенения на эту дату составляла около 105 км². На прогнозируемый период времени площадь оледенения сократится до 87,5 км², т.е. уменьшится на 17–18% её современного состояния. Максимальные потери приходятся на упомянутые ранее ледниковые системы, у которых будет наибольший сдвиг ELA по высоте. Более 50% площади потеряют также ледники самого южного участка оледенения Корякского нагорья — бассейна залива Корфа.

Что касается компонентов баланса массы и самого баланса, то здесь картина достаточно однообразная. И в базовый период баланс в основном был положительный, за исключением ледников, расположенных между хребтами Пикась и Укаэлят, и для периода 2049–2060 гг. баланс будет положительным и не слишком большим по абсолютной величине (исключение составит тот же район между хребтами Пикась и Укаэлят). Отрицательный баланс будет характерен для северных участков оледенения. В целом можно сказать, что с точки зрения массообмена ледники Корякии будут достаточно уравновешены по отношению к новому климату.

Выводы и обсуждение

Впервые с 1950-х годов по космическим снимкам 2003 г. определены площади и количество существующих ледников Корякского нагорья. При сравнении данных по ледникам, которые были дешифрованы по снимкам и имелись в Каталоге, установлено их несоответствие как по числу ледников, так и по их площадям. Вместо 715 ледников, указанных в Каталоге, судя по снимкам, в Корякии сейчас существует 237 ледников, которые имеют значительно меньшую площадь по сравнению с данными Каталога. Значительное отступление едва ли можно объяснить только происходящими климатическими изменениями. Однако тенденция к уменьшению осадков и росту температур тёплого периода пока отмечается на большинстве прилегающих к региону метеостанциях.

Исследование изменения площади ледников по морфологическим типам и экспозициям показало, что наибольшее сокращение характерно для ледников карово-долинных и долинных северных, северо-восточных и северо-западных экспозиций. Это — преобладающие морфологические типы и экспозиции ледников региона.

Продолжено развитие подхода к оценке эволюции оледенения горных систем Евразийской Субарктики. В нашем случае ледниковые системы состояли в основном из небольших ледников — разного вида каровых. Поэтому для прогноза перераспределения льда по высоте мы использовали новую эмпирическую кривую, характеризующую разницу (около 20 лет) между съёмками площадей льда по высотным зонам за период до потепления и после по трём каровым ледникам. Она представляет собой смещённую кверху по оси ординат (высота над уровнем моря) параболу. Исходя из прежних разработок, для каждой ледниковой системы (а их в Корякии выделено восемь) по климатическим характеристикам построены базовые вертикальные профили компонент баланса и гипсографические кривые распределения площади для ледников, существующих в настоящее время и определённых по космическим снимкам. Это позволило ориентировочно оценить ряд важных гляциологических характеристик на период 2049–2060 гг. при условии развития климата по сценарию модели ЕСНАМ 5 (В1) и принятия нескольких допущений, изложенных в работе.

Несмотря на довольно «тёплый» в целом сценарий, получена достаточно разнообразная картина изменений гляциологических характеристик для разных ледниковых систем исследуемого региона. По-видимому, в данном случае фактор осадков — решающий, поскольку Корякское нагорье находится в районе в целом с низким количеством осадков, муссоны сюда почти не доходят. Алеутский же минимум в отличие от исландского в летнее полугодие не сохра-

няется. Для трёх систем сокращение оледенения не будет, а их ЕЛА даже опустится за счёт осадков, пять систем будут демонстрировать сокращение площади и подъём ЕЛА на 100–400 м. В общем, площадь ледников Корякского нагорья уменьшится всего на 17% по сравнению с нынешней величиной.

Такое незначительное уменьшение площади, прогнозируемое в результате реализации модели ЕСНАМ 5 в качестве климатического сценария, скорее всего, показывает, что отличия в состоянии ледников по снимкам и Каталогу (уменьшение площади примерно на 50–70% за 50 лет), по-видимому, связаны с неточностями определения площадей в Каталоге — их завышением из-за трудности отделения снега от ледяной поверхности.

В любом случае предстоящее незначительное изменение площади ледников Корякии может говорить о том, что к 2003 г. оледенение вступило в фазу равновесия с современным климатом, который претерпевал изменения в последние десятилетия.

Литература

1. Ананичева М.Д. Горы Сунтар-Хаята и хребет Черского // Оледенение Северной и Центральной Евразии в современную эпоху. М.: Наука, 2006. С. 198–204.
2. Ананичева М.Д. Поля гляциологических характеристик для сценария ЕСНАМ 4: Северо-восточная Сибирь и Камчатка // МГИ. 2009. № 107. С. 81–87.
3. Галанин А.А. Каменные глетчеры — особый тип современного горного оледенения северо-востока Азии // Вестн. ДВО РАН. 2005. № 5. С. 59–70.
4. Каталог ледников СССР: Т. 20. Ч. 1 Корякское нагорье. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 75 с.
5. Кренке А.Н., Михайлов А.Ю. Взаимосвязь циркуляции атмосферы, рельефа и оледенения на Северо-Востоке СССР в настоящем и прошлом согласно гидродинамическим расчётам // Материалы метеорол. исследований: Вып. 10. М.: изд. Междувед. геофиз. комитета при АН СССР, 1986. С. 7–17.
6. Магидович И.П., Магидович В.И. Очерки по истории географических открытий: Т. 5. М.: Просвещение, 1986. 223 с.
7. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М., 2008. <http://climate2008.igce.ru/>
8. 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.
9. Сватков Н.М. Современное оледенение хребта Малиновского // МГИ. 1965. Вып. 15. С. 111–119.
10. Сватков Н.М., Цветков Д.Г. Исследование ледников центральной части Корякского нагорья // Тепловой и водный режим снежно-ледниковых толщ. М.: Наука, 1965. С. 31–65.
11. Цветков Д.Г. Фотогеодезический мониторинг ледников Полярного Урала // Оледенение в Северной и Центральной Евразии в современную эпоху. М.: Наука, 2006. С. 126–134.
12. Шмакин А.Б. Климатические характеристики снежного покрова Северной Евразии и их изменения в последние десятилетия // Лёд и снег. 2010. № 1. С. 43–58.
13. Ananicheva M.D., Krenke A.N., Barry R.G. The Northeast Asia mountain glaciers in the near future by AOGCM scenarios // The Cryosphere. 2010. V. 4. P. 435–445.
14. Davidovich N.V., Ananicheva M. D. Prediction of possible changes in glacio-hydrological characteristics under global warming: south-eastern Alaska, USA // Journ. of Glaciology. 1996. V. 42. № 142. P. 407–412.
15. Johannesson T., Raymond C.F., Waddington E.D. Timescale for adjustments of glaciers to changes in mass balance // Journ. of Glaciology. 1989. V. 35. № 121. P. 355–369.
16. Oerlemans J., Fortuin J.P.F. Sensitivity of glaciers and small ice caps to Greenhouse warming // Science. 1992. № 258. P. 115–117.
17. Raper S.C.B., Braithwaite R.J. The potential for sea level rise: new estimates from glacier and ice cap area and volume distributions // Geophys. Research Letters. 2005. V. 32. № 7. L05502, doi:10.129/2004GL021981
18. Van de Wal R.S.W., Wild M. Modelling the response of glaciers to climate change by applying the volume-area scaling in combination with a high resolution GCM // Climate Dynamics. 2001. № 18. P. 359–366.
19. Warrick R.A., Oerlemans J. Sea level rise // Climate change — The IPCC Scientific Assessment / Ed. J.T. Houghton, G.J. Jenkins, J.J. Ephraums. Cambridge, Cambridge University Press, 1990. P. 358–405.

Summary

The Koryak Upland, located in Russian Far East, has so far been poorly studied in terms of glaciology. The information contained in the USSR Glacier Inventory (1982) was obtained by analysis of topographic maps and aerial photography. On the publication date, the Inventory of Koryak Upland included 715 glaciers. To study of the current state of Koryak glaciers, we used satellite imageries — Landsat, Terra/Aqua (EOS AM-1) and ASTER. Deciphering the scenes showed that a significant portion of the glaciers melted away since the mid-1970's until now. We have found only 237 glaciers. Some glaciers are appeared to be *rock glaciers*, filled with detrital material, cemented by ice in a single body. They might be taken for real glaciers while categorization. The analysis of the retreat (reduction in area) of Koryak glaciers by groups with the same morphological type and the same aspect was conducted. The total retreat of the glaciers of this region varied from 40 (for those measured in situ) to 70% (mean total) as compared to aerial photography surveys (1950). This is the most intense reduction among the studied glacier systems of the Russian Subarctic. It can be explained by the changes in atmospheric circulation due to climate change, the Koryak Upland dries out while the increasing of annual air temperatures. Significant reduction of the glacier area was an incentive for us to undertake a work to assess the evolution of the glaciers in the near future. We used a GCM — ECHAM5 (B1) as the climatic scenario. The projection method has got further development: we have estimated the evolution of glacier systems in which the prevailing type is corries (relatively small cirque glacier). The results show a diverse picture of glacier reduction by area, but in general the glacierization will not disappear for the period 2049–2060, reducing the extent by only 17% of the contemporary state.