

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЛЕДНИКОВ ЧУКОТСКОГО И КОЛЫМСКОГО НАГОРИЙ И ПРОГНОЗ ЭВОЛЮЦИИ ЛЕДНИКОВЫХ СИСТЕМ ЧУКОТСКОГО НАГОРЬЯ

М. Д. Ананичева^{1)*}, *А. М. Карпачевский*²⁾

¹⁾ Институт географии РАН,
Россия, 109017, г. Москва, Старомонетный пер. 29; **Maria_anan@rambler.ru*

²⁾ Географический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова,
Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы 1

Резюме. В статье представлены результаты анализа космических снимков за 2012 год — определены площади и высоты границы питания ледников Чукотского и Колымского нагорий. Дается сравнение с данными магаданского исследователя Р. В. Седова, изучавшего эти ледники в 1970–80х годах. Для большинства ледниковых систем получено значительное сокращение площади. Также сделана оценка эволюции ледниковых систем Чукотского нагорья на период до 2030 г., исходящая из оценок изменения климата на основе сценария RCP 4.5 с использованием ансамбля 31 климатической модели МГЭИК (А-31) и эмпирических формул, связывающих балансовые характеристики ледниковых систем с климатическими характеристиками. Показано в рамках сделанных допущений, что в регионе к 2030 г. сохранится около 11,5% территории, в настоящее время покрытой ледниками, однако сокращение площади неодинаково для различных ледниковых систем: от примерно 40% до полного исчезновения.

Ключевые слова. Чукотка, ледник, ледниковая система, космический снимок, сокращение площади, морфологический тип, температура, осадки, тренд, климатический сценарий, прогноз климата.

CURRENT STATE OF THE KOLYMA AND CHUKCHI GLACIERS AND PROJECTION OF THE EVOLUTION OF CHUKCHI HIGHLANDS' GLACIAL SYSTEMS

M. D. Ananicheva^{1)*}, *A. M. Karpachevskiy*²⁾

¹⁾ Institute of Geography of Russian Academy of Sciences,
29, Staromonetny lane, 109017, Moscow, Russia; **Maria_anan@rambler.ru*

²⁾ Lomonosov Moscow State University, Department of Geography
1, Lenin Gory, 119991, Moscow, Russia

Summary. Results of the analysis of satellite images of 2012 are presented. Square estimates and equilibrium line altitudes are given for Chukchi and Kolyma highland glaciers. These estimates are compared with 1970–80 data by Magadan explorer R. V. Sedov. Significant area reduction is observed for most of the glacier systems. Evolution of the Chukchi highland glacier systems over the period up to 2030 is projected using climate change estimates from the ensemble of 31 IPCC models run under the RCP 4.5 scenario. Empirical relationships between

glacier mass balance components and climate characteristics are also employed. It is shown that about 11.5% of territory presently covered with glaciers in the region will sustain by 2030 under given assumptions. However, reduction will not be uniform. It may range from about 40% to total extinction for different glacier systems.

Keywords. Chukotka, glacier, glacier system, satellite image, area reduction, morphological type, temperature, precipitation, trend, climatic scenario, climate projection.

Введение

В 1965–1982 гг. был опубликован Каталог ледников СССР (69 томов), составленный по данным о ледниках за 1940–70-е гг. (Каталог..., 1965/1982). Это время характеризуется относительной стабильностью в динамике ледников СССР. В арктических широтах это был период похолодания (Panin et al, 2009) или «сравнительно медленного потепления между двумя периодами интенсивного потепления в 1916–1945 и 1976–2000 гг.» (Котляков и др., 2011). В последней работе группой авторов выполнено обобщение и систематизация сведений, приведенных магаданским ученым Р.В. Седовым по ледникам Чукотского и Колымского нагорий. Оледенение этих регионов не было отражено в Каталоге ледников СССР. Самостоятельно проведя экспедиции на Чукотке и в Корякии, побывав практически на всех ледниках Чукотского и Колымского нагорий, Р. В. Седов опубликовал ряд статей и Каталог Мейныпильгинского хребта (Седов, 1988, 1990, 1995, 1996 а, б, 1997 а, б, 2001). Им описаны 182 новых ледников, которые не были охвачены Каталогом.

В статье (Котляков и др., 2011) приведены таблицы с основными характеристиками ледников (площадь, экспозиция склона, высота границы питания) Чукотского и Колымского нагорий, добавлены географические координаты ледников.

Целью данной работы служит оценка современного состояния оледенения этих нагорий по космическим снимкам, сравнение с данными Р.В Седова при одновременном рассмотрении климатических показателей, таких как тренды температуры и осадков за последние 45 лет, а также оценка эволюции ледниковых систем в ближайшем будущем.

Авторы считают необходимым отметить важность мониторинга сравнительно малых ледников и ценность сценарного прогноза их изменений, поскольку такие ледники, с одной стороны являются индикаторами изменения климата, с другой — важными источниками питания рек Чукотки.

Работа выполняется в рамках проекта Арктического совета Adaptation Actions for a Changing Arctic (Действия по адаптации для меняющейся Арктики) для пилотного района морей Берингова, Чукотского и Бофорта, куда входят и прилежащие области суши, в том числе Чукотка. Проект реализует рабочая группа Арктического совета Arctic Monitoring and Assessment Program (АМАР).

Районы исследования

Ледники Колымского нагорья состоят из двух групп: пять располагаются на восточном склоне Колымского нагорья вблизи западного берега Охотского

моря, высота границы питания или нулевого баланса (H_{ELA} , ELA — Equilibrium Line Altitude) от 700 до 1500 м, а 14 каровых ледников расположены в северной части п-ова Тайгонос, высота границы питания от 700 до 1000 м. Поскольку Р.В. Седовым были определены высотные точки верховьев и концов языков ледников, мы смогли рассчитать распределение льда всех ледников по высотным зонам, которое показано для двух ледниковых систем на рис. 1 а, б.

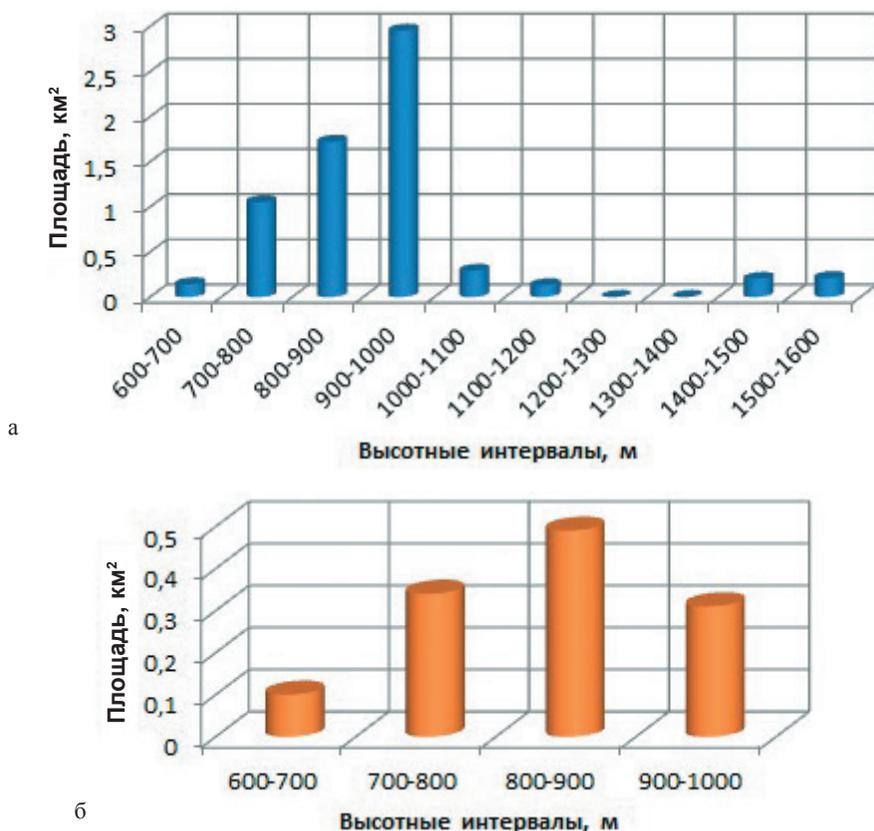


Рисунок 1. Распределение льда по высотным интервалам ледников Колымского нагорья: а) — Ледники Гижигинской губы; б) — Ледники Пенжинской губы

Приведем общую климатическую характеристику региона. Климат горных хребтов Тайгоноса, где расположено оледенение, — континентальный с некоторыми чертами влияния морского (близость к Охотскому морю). Зимой преобладают морской умеренный и морской арктический воздух, высока повторяемость и континентальных арктических воздушных масс, вторгающихся со стороны Якутии и определяющих аномально низкие значения температуры. В целом зима суровая, отрицательные температуры устойчиво длятся 7 месяцев: с первой декады октября до первой декады мая. Несмотря на суровые зимние условия, активная циклоническая деятельность, характерная для региона, вызывает очень резкие колебания температуры. Бывают и оттепели — в основном в прибрежных районах. Летом преобладает морской арктический или морской умеренный воздух. В случаях возникновения блокирующих ан-

тициклонов над южными районами Дальневосточного округа и Якутии регион захватывают континентальные умеренные воздушные массы, с которыми связаны положительные аномалии температуры. Лето в целом прохладное, однако, короткие периоды жаркой погоды случаются почти ежегодно. В целом летний сезон, так же как и зимний, характеризуется достаточно высокой циклонической активностью. Высока повторяемость туманов. Период со среднесуточной температурой выше 10 °С длится чуть больше месяца: с 10 июля по 15 августа. Годовой ход осадков характеризуется бимодальностью: один максимум приходится на январь, второй на август. Средняя годовая температура отрицательная, по данным Р.В. Седова (1997 а): на м/с Гижига –5.4 °С, на м/с Тайгонос –2.6 °С,. Осадки — 284, 484 мм, соответственно. На рис. 2 показано внутригодовое распределение средних месячных значений

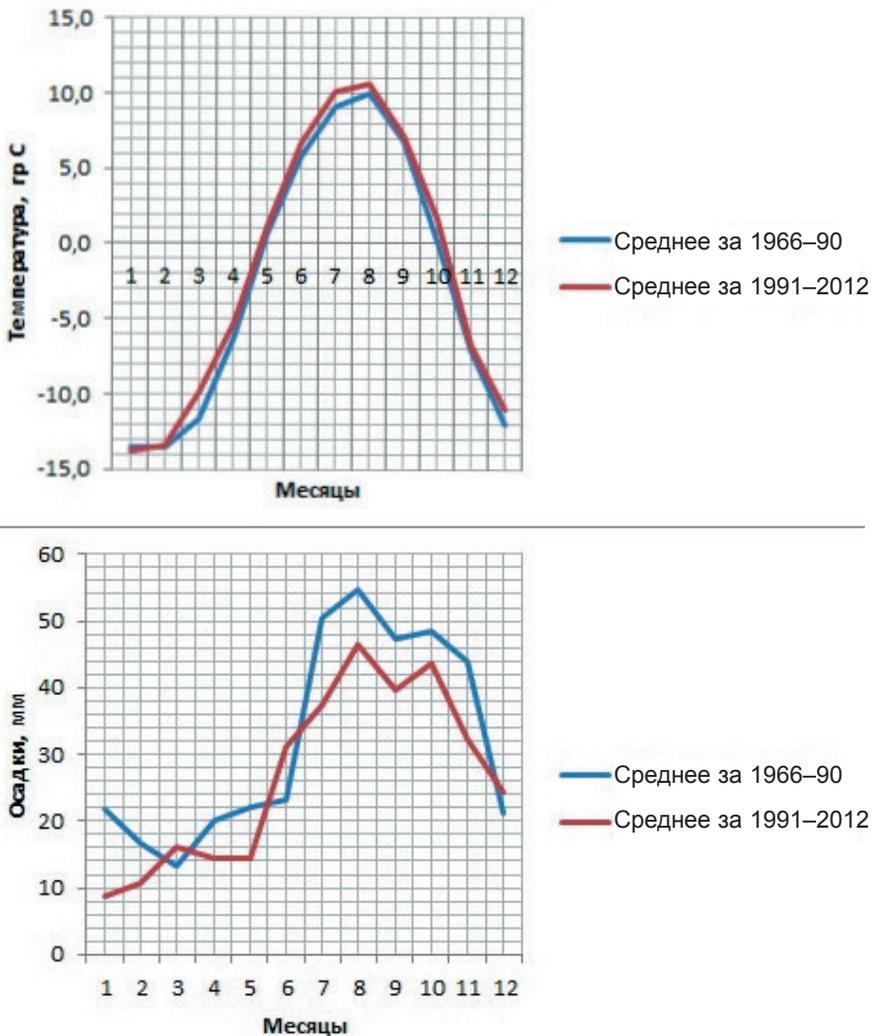
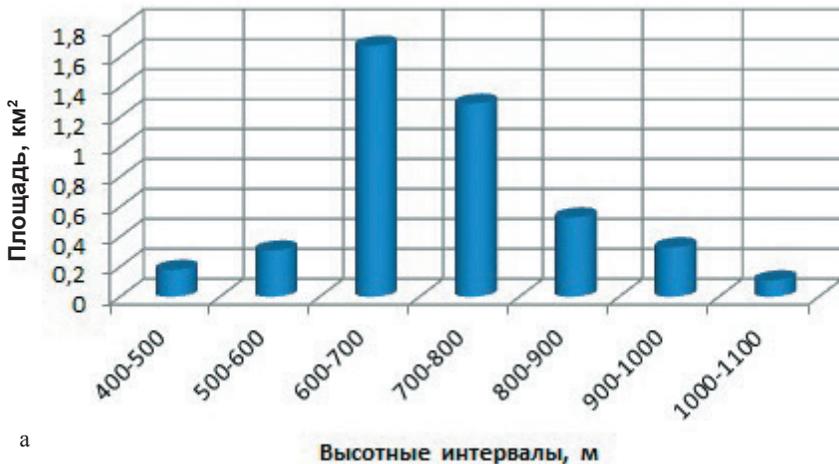


Рисунок 2. Внутригодовое распределение средних месячных значений температуры и сумм осадков для Колымского нагорья (м/с Тайгонос) за два периода 1966–1990 и 1991–2012

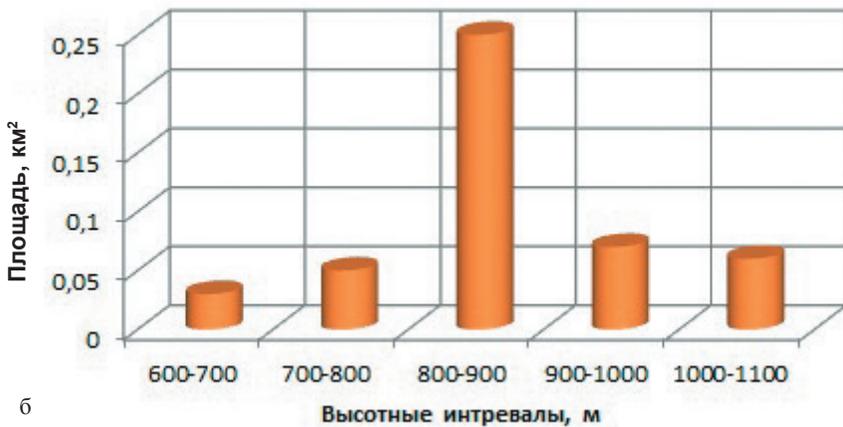
температуры и сумм осадков для Колымского нагорья (м/с Тайгонос) за два периода 1966–1990 и 1991–2012. На рисунке виден некоторый сдвиг температуры в сторону повышения в последний период, что касается осадков, их максимум приходится на конец лета — начало осени, и они уменьшились в 1991–2012 гг. по сравнению с предыдущим периодом; январский максимум для 1991–2012 гг. отсутствует.

Так же были рассчитаны тренды средней летней температуры и твёрдых осадков, важных параметров для ледников, в районе Чукотки: они даны на рис. 5. О них будет сказано ниже.

Ледники Чукотского нагорья, по данным Р.В. Седова, представлены несколькими группами. Первая группа из трех ледников расположена на северо-востоке п-ва Чукотка на хр. Тенианый в заливе Лаврентия, средняя высота границы питания — 500 м. Вторая группа, состоящая из 14 каровых ледников находится в Провиденском горном массиве, высота границы питания здесь — от 400 до 550 м. Третья группа — в заливе Креста Берингова моря на хр. Искатень — состояла из 21 ледника с H_{ELA} от 500 до 1000 м.



а



б

Рисунок 3. Распределение льда по высоте ледников хр. Искатень (Чукотское нагорье): а) Бассейн залива Креста, Берингово море; б) Бассейн Чукотского моря

Четвертая группа из четырех каровых ледников на хр. Пекульней состояла из четырех ледников размером $\sim 0.3 \text{ км}^2$. Средняя H_{ELA} составляла 740 м.

В пятой группе — пять ледников размером от 0.1 до 0.5 км^2 — на Чанталском хребте в бассейне р. Амгуэма со средней H_{ELA} — 1400 м (Седов, 1997 б). Представление о распределении льда ледников хр. Искатень по высотным зонам дает рис. 3.

Климатические условия существования ледников Чукотского нагорья достаточно разнообразны — от субарктический морского (ледники бухты Лаврентия) до субарктического континентального (бассейн р. Амгуэма) и арктического (на крайнем севере). Обильные 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 существуют ледники небольшой площади. Относительно функций распределения средней годовой, средней летней температуры и осадков (холодного и теплого периодов) ст. Островное, имеющий длинный ряд наблюдений (с 1934 — по наст время), можно сказать, что функция плотности распределения осадков близка к нормальной, мода функции распределения температуры смещена в сторону отрицательных аномалий. По наблюдениям на леднике Первенец (№ 4 на хр. Искатень), таяние ледника продолжалось с начала июня до второй декады сентября (Седов и др, 1990). Судя по записям метеостанции Эгвекинот, расположенной в непосредственной близости от хребта Искатень, этот период года характеризуется положительными температурами за 1961–2010 гг., поэтому тип абляции можно считать характерным для ледников этого региона.

Группа ледников в районе гор бухты Провидения находятся по Б.П. Алисову в морском субарктическом климате, но с большим перепадом температуры: летом средняя температура составляет 7.2 °С, а зимой –14.3 °С. Наименьшее количество осадков выпадает в июне и составляет в среднем 28 мм, а наибольшее в ноябре 89 мм. В среднем за год в Бухте Провидения выпадает около 700 мм осадков, что является чертой морского климата. Распределение площади льда ледников этой группы показано на рис. 4.

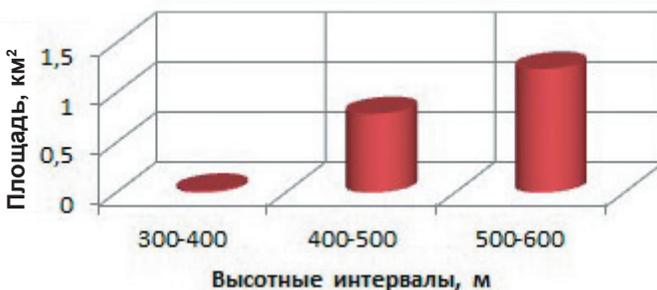


Рисунок 4. Распределение льда по высоте ледников группы Провиденского массива

Несмотря на несколько разные климатические условия, почти все ледники Чукотского нагорья, не относящиеся к прибрежным регионам, находятся в ин-

тервале высот 700–900 м, большинство ледников, расположенных ближе к побережью, относится к более низкому интервалу высот — 500–600 м над у.м.

Ледники Чукотки во многом обязаны своим существованием аккумуляцией снега в результате ветровой активности (Седов, 1996 б), и, соответственно, изменение ветровых условий будет оказывать существенно влияние на эволюцию ледников этого региона.

Тенденции климата в регионе

Параметры климата, важные для динамики ледников (средняя годовая и летняя температуры, суммы осадков, годовые и за холодный период), были рассчитаны для двух периодов — 1961–90 и 1991–2012 гг. по данным метеостанций¹. Первый период соответствует состоянию ледников, оцененному Р.В. Седовым в его уже упомянутых работах, а также является базовым периодом для расчета климатических норм согласно рекомендациям ВМО. Второй период — это последние 25 лет, приходящиеся на период современных изменений климата. Разность средних температур для различных станций dT_{year} и dT_{sum} между этими промежутками времени положительная, обе температуры выросли, средняя годовая — в большем диапазоне значений: dT_{year} — от 0.3 до 3.2 °С для всех станций, средняя летняя — в меньшем: dT_{sum} — от 0.3 до 1.2 °С. Разность между периодами в осадках всюду отрицательная, то есть как годовые, так и осадки холодного периода (а это в подавляющем количестве твердые осадки) уменьшились в результате изменения климата на Чукотке. Холодный период длится с октября по май. Диапазон изменений для различных метеостанций (средние значения): dP_{year} и dP_{solid} — от –5 до –290 мм и от –8 до –200 мм соответственно. Наибольшая разница приходится на метеостанцию Бухта Провидения, находящуюся на побережье.

Помимо разностей за определенные периоды, были оценены тенденции изменения климата по трендам тех же параметров климата, важных для баланса ледников — температуры (средней годовой T_{year} и средней летней T_{sum}) и осадков (годовых P_{year} и за холодный период P_{solid}), а также построены графики колебаний средней годовой и летней температуры для 2-х метеостанций (Мыс Шмидта и Островное) (Рис. 5 а, б, Рис. 6 а, б). Тренды T_{year} и T_{sum} для всего полуострова Чукотка за последние, если быть точными, 46 лет (1966–2012) положительные и изменяются от 1 до 2 °С/46 лет от побережья в глубину полуострова. Рост температур сказался на увеличении таянья за счет интенсификации абляции и удлинения периода с положительными температурами. Тренды осадков P_{year} и P_{solid} сходны в том, что оба отрицательны в прибрежных регионах и положительны в континентальных между заливом Креста и Анадырским лиманом. Но по абсолютным величинам они несколько различаются: P_{year} от –100 (большая часть п-ова Чукотка) до +100 мм/46 лет (на плоскогорье в районе Анадырского лимана), P_{solid} от –110 до +100 мм/46 лет, при этом большая часть Чукотки характеризуется трендом –50 мм/46 лет.

Таким образом, климатические процессы, происходящие на территории Чукотки, не способствуют развитию и распространению оледенения. Со вре-

¹ Источник данных - сайт ВНИИГМИ-МЦД в г. Обнинске, www.meteo.ru

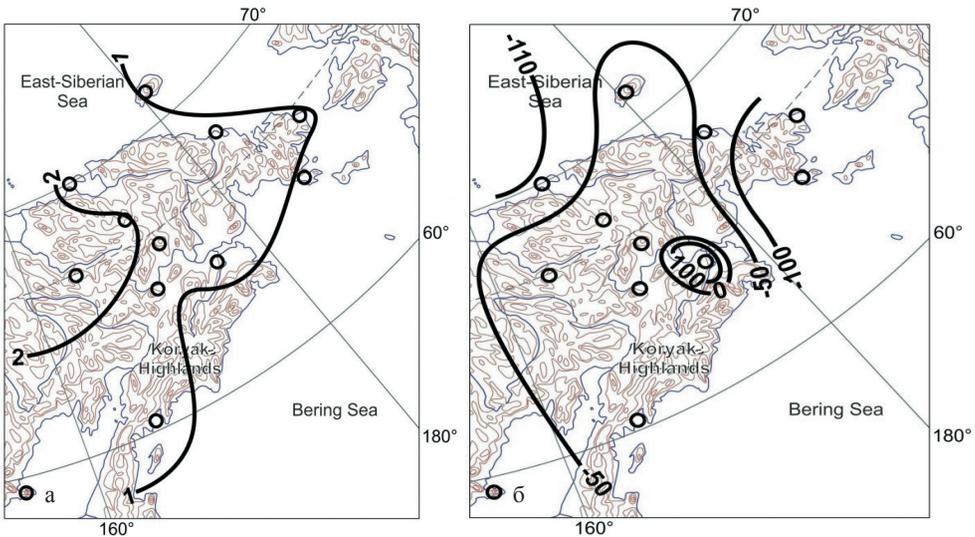


Рисунок 5. Тренды средней летней температуры (а) и осадков холодного периода (б), рассчитанные по метеостанциям на территории Чукотки за 1966–2012 гг. (кружками показано расположение метеостанций)

мени оценки состояния ледников Чукотского и Колымского нагорий — конец 1980-х гг. — прошло более 25 лет, которые, судя по выше приведенным данным, относятся уже к периоду современного потепления в регионе. Этим и обоснована задача оценки современного состояния оледенения.

Методика определения площадей и высот ледников

Для определения параметров ледников были использованы покрывающие территорию распространения ледников снимки высокого разрешения (SPOT) на август 2012 года, любезно предоставленные в рамках программы AMAP (Arctic Monitoring Assessment Program), а также LandSat-7 на этот же период, находящиеся в открытом доступе.

Высота концов языков и верховий ледников определялась по цифровой модели рельефа (ЦМР) — ASTER GDEM, составленной по данным съемки за 2011 г. Снимки были сделаны при ясной погоде, их затененность незначительная.

Проверка точности регистрации снимков не представляется возможной из-за отсутствия наземных точек. Оцифровка ледников проводилась в ГИС-пакете ArcGIS 10.1 посредством визуальной идентификации границ ледника. Для этих целей было составлено несколько трехцветных композиций из разных каналов спутника. Использовались ортотрансформированные снимки, приведенные в проекцию UTM, зоны 59, 60. Это применяемая в геодезии и картографии система координат, разделяющая Землю на 60 вытянутых в меридиональном направлении зон шириной 6 градусов (максимальная ширина зоны 800 км) и отображающая их по отдельности в равноугольной поперечно-цилиндрической проекции Меркатора. Цифровая модель рельефа ASTER GDEM имеет точность (ширина 95%-го доверительного интервала) в пределах 20 м в плане и 30 м по высоте (Hirano *et al.*, 2003).

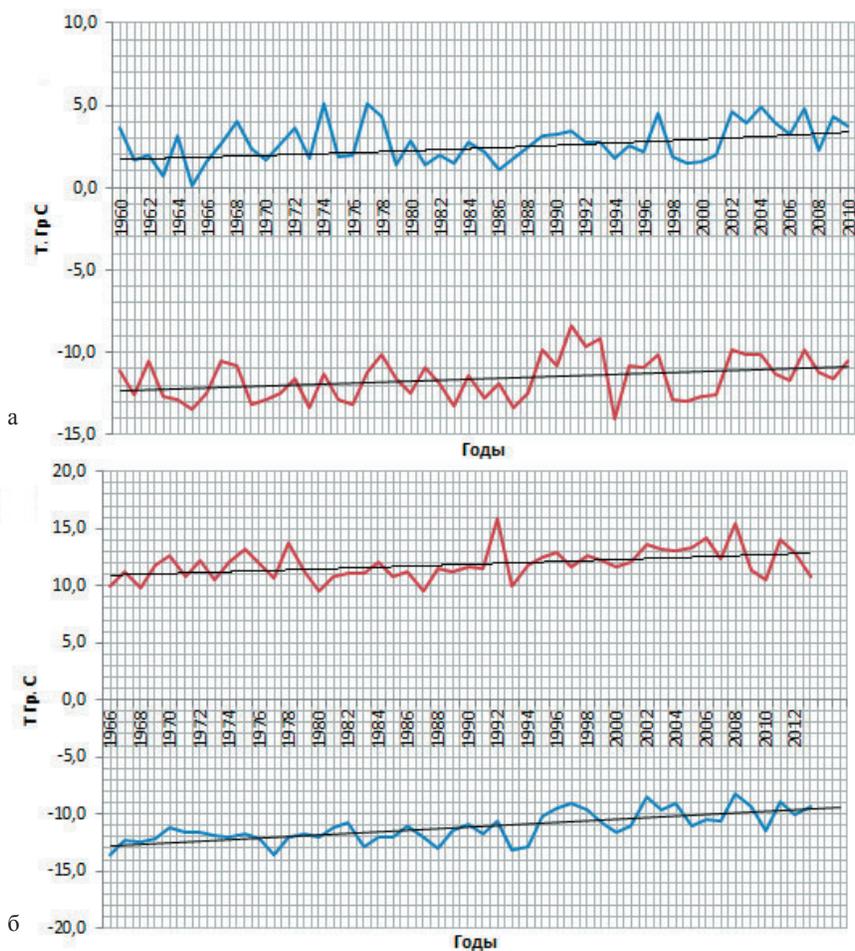


Рисунок 6. Колебания средней годовой и летней температуры для двух метеостанций — Мыс Шмидта (а) и Островное (б)

К сожалению, в работах Р.В. Седова нет индивидуальных схем ледников, они представлены на схемах точками, и хотя впоследствии были определены координаты, поэтому не удалось полностью соотнести ледники, найденные на снимках, с данными таблиц в работе (Котляков и др., 2011), поскольку эти координаты не совпадают с конкретными ледниками на снимке. Полученные *предварительные* результаты требуют дальнейшей работы по снимкам более высокого разрешения, это входит в планы на ближайшее будущее.

На данном этапе можно сравнить полученные площади и высоты нижней и верхней точек ледников, а, следовательно, и высоты границ питания как среднее арифметическое между этими точками, по методу Гефера-Куровского (Кренке, 1982).

Результаты анализа спутниковых снимков

В ходе исследования удалось обнаружить и дешифровать на снимках 2012 года более 50 ледников в районе Чукотского нагорья и 19 — в Колымском нагорье. Результаты анализа космических снимков даны в табл. 1.

Таблица 1. Данные по ледникам Чукотского и Колымского нагорий по спутниковым снимкам и Каталогу ледников

Название ледниковой системы	Кол-во ледников по каталогу	Кол-во ледников по снимкам	Площадь ледников по каталогу, км ²	Площадь ледников по снимкам, км ²	Доля оставшейся площади, %	Площадь, занятая ледниками к 2012, км ²	Высота границы питания, каталог, м	Высота границы питания, снимки, м
Хребет Искатень	21	27	8.65	3.68	42.5	3.68	760	505
Хребет Пекульней	4	5	1.2	0.08	6.7	1.2	740	1100
Ледники в районе бухты Провидения	14	16	1.17	2.3	50.8	2.3	640	550
Ледники в районе бухты Лаврентия	3	6	0.3	1.6	-	1.6	-	510
Колымское нагорье	19	19	3.61	2.41	66.7	2.41	900	915
ВСЕГО	60	73	14.93	10.07				

В целом, тенденция очевидна — ледники уменьшились в размерах по сравнению с оценками конца 1980-х годов. Особенно существенно сократились площади небольших ледников хребта Пекульней, осталось не более 7% от площади, указанной Р.В. Седовым. Остальные ледниковые системы сократились гораздо меньше, доля оставшейся площади от 66% (Колымское нагорье) до ~ 40% (хр. Искатень Чукотского нагорья). Это согласуется с оценками, сделанными для находящегося южнее Мейныпильгинского хребта за этот же период (Ананичева и др., 2012).

Высота границы питания сдвинулась вверх или осталась примерно на том же уровне: в среднем для системы хр. Пекульней — возросла на 400 м, для Колымского нагорья, где оледенение максимально сохранилось — на 15 м, последнее значение находится в пределах ошибки метода.

Сравнение данных, полученных по космическим снимкам и Каталогу ледников, составленному Р.В. Седовым по материалам аэрофосъемки и своих натуральных наблюдений, правомерно: во-первых, ледники, описанные этим автором, включены в мировой каталог данных (Cogley, 2009, Pffeifer et al., 2014), во-вторых, по данным Г.А. Носенко (соавтор работы Shahgedanova M. et al., 2010), который сравнил площади ледников Алтая по космоснимкам и аэрофото-материалам, легшие в основу Каталога, расхождение между оценками не превысило 5%.

Оценка эволюции ледников Чукотского нагорья

Задача оценки возможного развития ледников Чукотки сводилась к построению балансовых схем для каждой ледниковой системы по климатическим данным, единственно доступным для этого мало исследованного с гляциологической точки зрения региона, а затем использованию в этих схемах результатов климатического моделирования, основанного на определенном сценарии: в данном случае, на период времени до 2030 г., то есть на сравнительно близкое будущее. Различные аспекты методики оценки эволюции ледниковых систем описаны в наших статьях, например в (Ананичева и др., 2012, Ананичева, Кренке, 2007).

Для прогнозирования дальнейшего изменения морфологии и режима ледниковых систем Чукотки были использованы выходные данные (температура воздуха и осадки), рассчитанные по ансамблю климатических моделей А-31, использованному при подготовке Пятого оценочного отчета МГЭИК (Катцов, Говоркова, 2013). Расчеты были проведены на период времени 2011–2030 г. с использованием сценария поколения RCP, конкретно RCP4.5 (Hirano et al., 2003). Используемый сценарий осадков и температуры — «среднемодельный» — т.е. получен осреднением результатов расчетов по 31 глобальным климатическим моделям, которые участвуют в проекте сравнения климатических моделей CMIP5 и используют современные сценарии антропогенного воздействия на климатическую систему (Towards..., 2007). Параметры даны для территории России и стран ближнего зарубежья в узлах сетки $1^\circ \times 1^\circ$. Они получены и любезно предоставлены авторам ГГО им. А.И. Воейкова.

В качестве базового периода, относительно которого рассматриваются бу-

душие изменения, используется период 1981–2000 гг. Выходные параметры климатического моделирования осреднялись по площади, занимаемой ледниковыми системами Чукотского нагорья, для использования в расчетах.

Прогноз развития оледенения состоял из двух блоков — построение балансовых кривых абляции и аккумуляции, и расчет H_{ELA} и, если возможно, высот концов ледниковых языков — для *базового* («современность»), использованы климатические данные за 1966–2000 гг. и *прогнозного* (до 2030 гг.) периодов.

Для построения *базовой схемы* вертикального распределения балансовых компонент ледниковых систем на настоящее время были использованы имевшиеся климатические данные, в основном середины и конца XX века. Период охвата мало отличается от принятого в модели базового периода.

К сожалению, климатические данные имеются лишь для станций, расположенных не выше 400 м над у.м. Поэтому, для построения верхних частей профиля были использованы выходные данные реанализа — CRU TS3.22: Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) Version 3.22 высокого разрешения (сетка 0.5×0.5 градусов), произведенного Отделом исследований климата (CRU) Университета Восточной Англии (Harris et al., 2014)¹. В данных реанализа используется рельеф, приближенный к реальному.

Для четырех ледниковых систем (бассейн р. Амгуэма, ледники хребтов Искатень, Пекульней и Провиденский массив) по данным имеющихся метеостанций (нижние точки профилей средней летней температуры T_{sum} и твердых осадков P_{solid}) и по данным реанализа CRU (верхние точки T_{sum} и P_{solid}) были построены вертикальные профили этих параметров. Территориально эти ледниковые системы показаны на схеме, представленной Р.В. Седовым (Рис. 7)

Чтобы перейти к балансовым характеристикам ледниковых систем, были использованы приемы, описанные в работе Ananicheva, et al. (2010).

Для расчета *абляции* был принят региональный вариант (для холодных регионов) глобальной формулы связи абляции с летней температурой на высоте границы питания, подробно описанной в (Кренке, 1982):

$$A = 0.1(T_{sum} + 7.0)^3, \text{ (г} \cdot \text{см}^{-2}\text{)}, \quad (1)$$

где A — абляция, T_{sum} — средняя температура воздуха над поверхностью льда за июнь, июль и август. Коэффициенты в этой эмпирической формуле калиброваны по серии инструментальных измерений абляции на H_{ELA} у ледников Северо-восточной Сибири (Корейша, 1991).

Охлаждающее влияние ледника рассчитывалось по эмпирической формуле Н. В. Давидович, пояснения приведены в статье Ananicheva, et al. (2010):

$$T_{gl} = 0.85 T_{sum} - 1.2, \text{ }^\circ\text{C}, \quad (2)$$

где T_{gl} — температура над ледником.

¹ <http://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/4a6d071383976a5fb24b5b42e28cf28f>

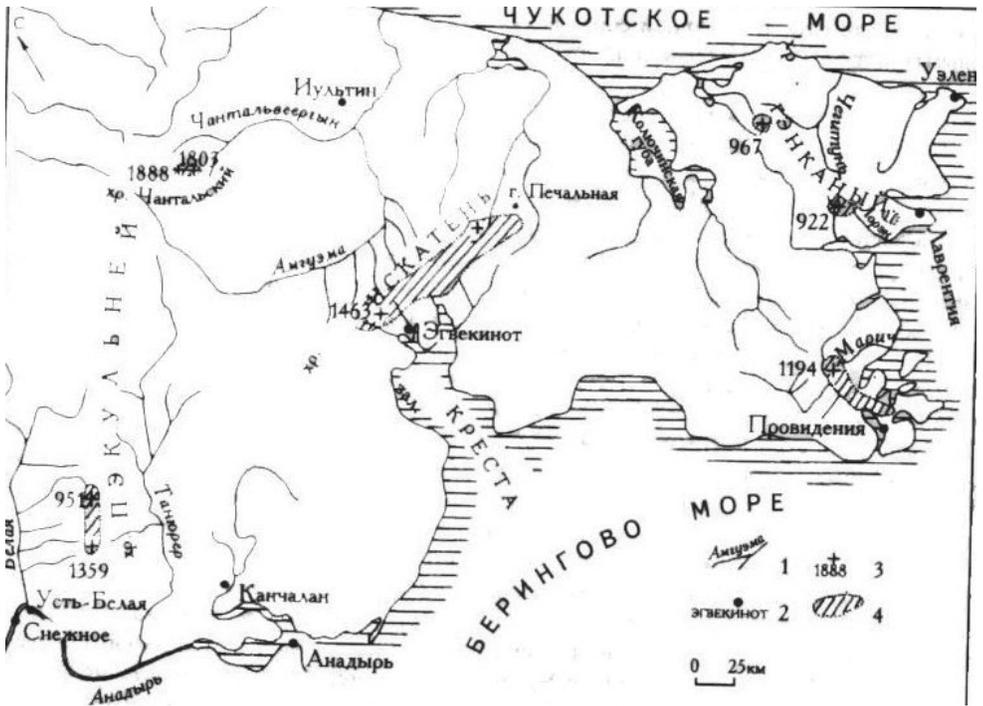


Рисунок 7. Схема оледенения Чукотского нагорья (Автор — Р. В. Седов, 1997):
 1 — реки, 2 — поселки (метеостанции), 3 — вершины и их отметки, 4 — районы оледенения

Для расчета *аккумуляции* (C) вводился *коэффициент концентрации* снега на ледниках к величине твердых осадков, измеренных над поверхностью вне ледников — K_c , который определен с учетом преобладающего в системе морфологического типа ледников (Кренке, 1982): от 1.6–1.9 (различные кары) до 1.4 (долинные). K_c учитывает накопление снега на ледниках за счет его перетолжения со склонов, лавинного сноса, метелевого переноса и пр. Аккумуляция на ледниках вычислялась умножением твердых осадков на коэффициент концентрации.

Распределение ледников по морфологическим типам в районе хр. Искатень, где их наибольшее разнообразие, следующее: 19% карово-висячих, 62% — каровых, 14% карово-долинных, 5% долинных (Седов, 1988). В остальных системах преобладают каровые ледники. Твердые осадки рассчитывались по методу Э. Г. Богдановой, с учетом преобладающего в системе морфологического типа ледников (Кренке, 1982). Распределение ледников по морфологическим типам в районе хр. Искатень, где их наибольшее разнообразие, следующее: 19% карово-висячих, 62% — каровых, 14% карово-долинных, 5% долинных (Седов, 1988). В остальных системах преобладают каровые ледники.

Зная распределение площади, занятой льдом в каждой ледниковой системе по высотным интервалам, можно оценить величины абляции и аккумуляции в объемах, отнесенным к этим высотам (Рис. 8). Ледники бассейна

р. Амгуэмы в конце 80-х годов, характеризовались превышением аккумуляции над абляцией, ставили лишь языки на нижних высотных интервалах, то же, но в меньшей степени относилось к ледникам хр. Искатень. Оледенение хребта Пекульней уже тогда было сокращающимся, судя по балансу объёмов абляции и аккумуляции, распределённым по высотным зонам. Эти же тенденции сказались при оценке эволюции ледников Чукотки на ближайшее будущее.

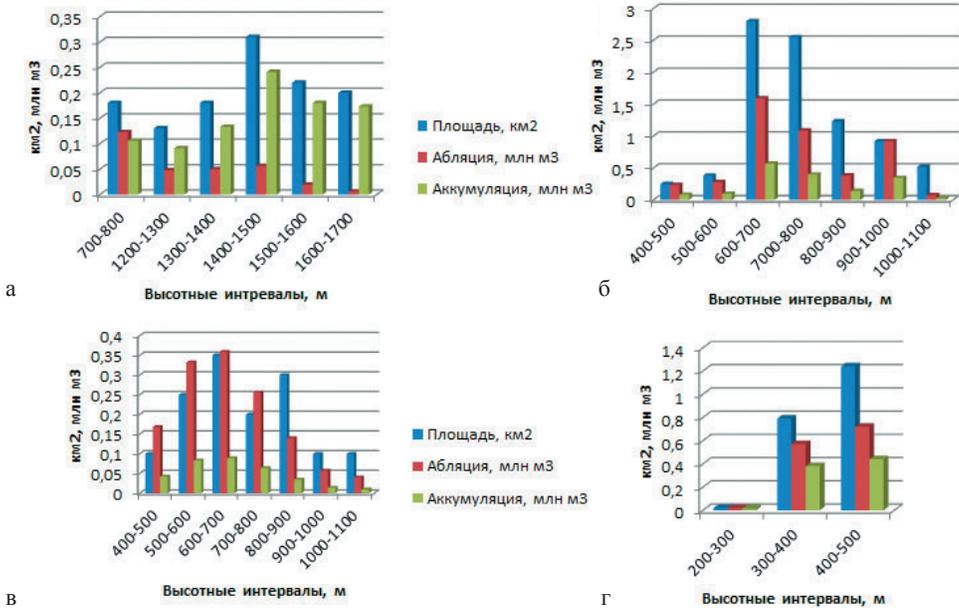


Рисунок 8. Распределение современных объемов абляции и аккумуляции ледниковых систем Чукотского нагорья по высоте Бассейн а) р. Амгуэмы, б) Хребт Искатень, в) Хребт Пекульней, г) район бухты Провидения

Для *оценки эволюции систем* к 2030 г. необходимо ввести данные об изменениях климата, полученные по ансамблю А-31 (сценарий RCP4.5) в построенные для базового периода балансовые схемы. Для этого были осреднены значения высоты точек рельефа по исследуемым районам, осадки и средние летние температуры, являющиеся выходными данными модельного сценария. Поскольку оценка эволюции ледников дается на ближайшее будущее, было использовано допущение, что высотные градиенты T_{sum} и P_{solid} останутся такими же, как в базовый период, и использовались градиенты осадков, полученные М.М. Корейшей до высот 3000 м в горах Северо-восточной Сибири (Корейша, 1991). Для районов относительно крупного оледенения на Чукотском нагорье — в хребте Искатень и бассейне р. Амгуэмы были проверены значения градиентов осадков в результатах моделирования до высот ~900 м (это максимальная высота, доступная в результатах моделирования). Они оказались близкими к тем, которые дает М.М. Корейша для этого диапазона.

Поэтому по прогнозным значениям T_{sum-pr} и $P_{solid-pr}$, отнесенным к средней высоте территории ледниковой системы, мы с помощью указанных градиентов построили вертикальные профили этих параметров для периода до 2030 г. Далее была рассчитана абляция A_{pr} по формуле (1) и получены значения C_{pr} , пересчетом из твердых осадков с использованием коэффициента концентрации (это принятое название в гляциологии) снега на ледниках. Точка пересечения балансовых кривых означает новую (прогнозируемую к 2030 гг.) высоту границы питания (Рис. 9).

В случаях её смещения выше самой высокой точки области аккумуляции ледников в системе, соответствующее оледенение должно исчезнуть.

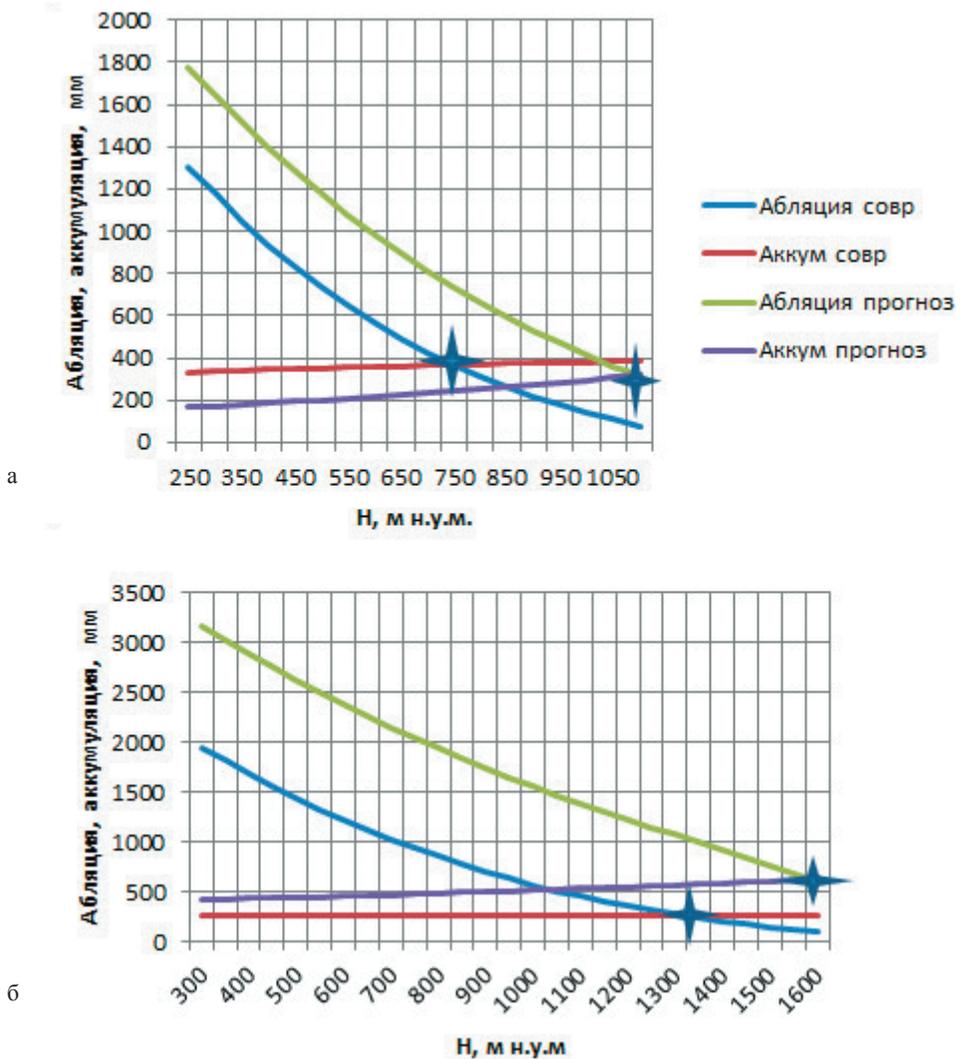


Рисунок 9. Примеры балансовых профилей для базового и прогнозного периодов для: а) ледниковой системы хребта Искатень, б) хребта Пекульней

Результаты оценки эволюции ледниковых систем Чукотского нагорья показаны в табл. 2.

Таблица 2. Изменения основных характеристик ледниковых систем Чукотского нагорья к 2012 г. (оценка по космическим снимкам) и к 2030 гг. (оценка по сценарию)

Ледниковые системы Чукотского нагорья	Сдвиг высоты границы питания H_{ELA} , м		Площадь оледенения, км ² , %			Абляция — аккумуляция на H_{ELA} , Мм		Высота границы питания, H_{ELA} , м н.у.м.		
	К 2012 г.	От базового к прогнозному периоду	Базовый период, км ² (Данные каталога)	К 2012 г., км ² (% от значения базового периода)	Прогнозный период, км ² (% от значения базового периода)	Базовый период	Прогнозный период	Базовый период	К 2012 г.	Прогнозный период
Бассейна р. Амгуэмы	–	300	1.22	н/д	0.73 (59.8)	386	570	1000	1100	1400
Хребет Искатень	50	300	8.65	3.68 (42.5)	0.52 (6.1)	250	670	760	700	1050
Хребет Пекульной	350	400	1.4	0.1 (7.1)	~0	233	640	740	1150	1550
Район бухты Провидения	120	250	2.8	1.17 (41.8)	0.38 (13.6)	580	680	520	645	800
ВСЕГО			14.07		1.62 (11.5)					

Из таблицы видно, что ледниковые системы Чукотского нагорья к 2030 году, исходя из принятого модельного сценария (А-31, RCP4.5), сократятся по площади не одинаково. Полностью исчезнут небольшие ледники хребта Пекульней, уже к настоящему времени сдвиг вверх H_{ELA} этой системы максимальный среди других изучаемых систем (410 м), а площадь, занятая льдом, всего 0.1 км². Ледники хребта Искатень (Залив Креста) и бухты Провидения к 2030 г. потеряют большую свою часть, останется лишь 6.1 и 13.6% площади соответственно, сдвиг H_{ELA} к тому времени достигнет 350 м. Лучше всего сохранятся ледники бассейна р. Амгуэма, находящиеся на северо-востоке Чукотки — останется почти 60% площади, но оледенение там небольшое, и к 2030 «доживет» лишь ~0.7 км² площадного распространения ледников. Всего, исходя из наших построений и принятого сценария, сохранится к 2030 г. ~ 11.5% территории, покрытой ледниками. Абляция, равная аккумуляции на высоте границы питания, будет к 2030 году варьировать от 230 до 680 мм от системы к системе.

Логическое подтверждение прогноза может быть сделано, если проследить эволюцию систем от периода каталогизации (конец 1980-х) к настоящему времени — 2012 г. (фактические данные, определенные по снимкам) и прогнозу на 2030 г.: значения площади, покрытой льдом, закономерно меняются, постоянно уменьшаясь.

Время приспособления оледенения к изменениям климата для каждой ледниковой системы зависит от соотношения объёма и скорости массообмена ледников: она оценивается по соотношению характерной толщины ледников и абляции их концов (Johannesson *et al.*, 1989). В случае ледников Чукотского нагорья это время составляет ~10–15 лет, т.е. к 2030 гг. оледенение может прийти в равновесие с текущим климатом.

Заключение

Исследуемый регион отличается недостатком гляциологической информации. Данные дистанционного зондирования дали возможность получить более точную картину современного состояния ледников.

Сравнение данных снимков и каталога, составленного Р.В. Седовым в 1990-хх гг. показало, что небольшие ледники хребта Пекульней сократились радикально, осталось не более 7% площади от указанной Р.В. Седовым. Доля оставшейся площади других систем — от 66% (Колымское нагорье) до ~ 40% (хр. Искатень Чукотского нагорья).

Расчет по «среднемодельному» климатическому сценарию (А-31, RCP4.5) к 2030 г. позволил определить степень дальнейшего сокращения площади ледников этих систем и повышения высоты границы питания.

Судя по компонентам баланса массы ледников, как для базового, так и для прогнозного периодов, ледниковые системы находятся в разной степени соответствия с текущим и ожидаемым климатом. Изменения знака баланса массы ледников происходят при климатических сдвигах. При определенных условиях эволюция оледенения может быть в равновесии с климатом. В ба-

зовый период среди рассматриваемых ледниковых систем только оледенение бассейна р. Амгуэмы приближалось к такому состоянию. Остальные системы уже были в состоянии реакции на сдвиг климата в сторону потепления. К 2030 году оледенение хребта Искатень и Проведенского массива сильно сократится, а ледники хр. Пекульней исчезнут, максимально сохранятся ледники Чанталъского хребта (бассейн реки Амгуэмы).

Мониторинг малых ледников и оценки сценарного прогноза их изменений представляются важной и актуальной задачей, поскольку такие ледники являются индикаторами регионального изменения климата, важны как источники питания рек, а значит, занимают значительное место в режиме горных экосистем и имеют значение для местного населения и его жизнедеятельности.

Благодарности

Авторы благодарят Секретариат программы АМАР за предоставление спутниковых снимков высокого разрешения.

Список литературы

Ананичева М. Д., Кренке А. Н. 2007. Гляциологический прогноз. Горное оледенение (на примере Северо-Востока России и Камчатки).— В книге: Оледенение Северной Евразии в недавнем прошлом и ближайшем будущем.— Москва, Наука, с. 277–293.

Ананичева М. Д., Капустин Г. А., Михайлов А. Ю. 2012. Ледники Мейны-пильгынского хребта: современное состояние и прогноз эволюции ледниковых систем.— Лед и снег, № 2 (118), с. 40–50.

Каталог ледников СССР. 1965/1982.— М., Л., Гидрометеиздат.

Катцов В. М., Говоркова В. А. 2013. Ожидаемые изменения приземной температуры воздуха, осадков и годового стока на территории России в 21-м веке: результаты расчетов с помощью глобальных климатических моделей (СМIP5).— Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, вып. 569, с. 76–98.

Корейша М. М. 1991. Оледенение Верхоянско–Колымской области. Результаты исследований по программе МГГ.— М., Издательство Межведомственного геофизического комитета, 143 с.

Котляков В. М., Хромова Т. Е., Зверкова Н. М., Чернова Л. П., Носенко Г. А. 2011. Две новые ледниковые системы на северо-востоке Евразии.— Доклады академии наук, том 437, № 1, с. 1–6.

Кренке А. Н. 1982. Массообмен в ледниковых системах на территории СССР.— Л., Гидрометеиздат, 288 с.

- Седов Р.В. 1988. Ледники хребта Искатень.— Материалы гляциологических исследований (МГИ), вып. 62, с. 129–133.
- Седов Р.В., Туренко С.А., Иванкий А.А. 1990. Баланс массы ледника Первенец на Чукотском нагорье.— МГИ, вып. 69, с. 78–81.
- Седов Р.В. 1992. Ледники Чантальского хребта.— МГИ, в. 75, с. 102–107.
- Седов Р.В. 1995. Ледники и снежники гор охотского побережья.— МГИ, вып. 79, с. 139–144.
- Седов Р.В. 1996 а. Ледники Провиденского горного массива.— МГИ, вып. 80, с. 142–145.
- Седов Р.В. 1996 б. Роль ветра в колебаниях ледников Чукотки.— МГИ, вып. 84, с. 184–186
- Седов Р.В. 1997 а. Ледники полуострова Тайгонос.— МГИ, вып. 82, с. 218–221.
- Седов Р.В. 1997 б. Ледники Чукотки.— МГИ, в. 82, с. 213–217.
- Седов Р.В. 2001. Каталог ледников северо-восточной части Корякского нагорья. Т. 19. Северо-Восток. Ч. 5. Мейныпильгинский хребет.— МГИ, вып. 91, с. 151–162
- Ananicheva M. D., Krenke A. N. and Barry R. G. 2010. The Northeast Asia mountain glaciers in the near future by AOGCM scenarios. *The Cryosphere*, vol. 4, p. 435–445
- Cogley J. G. 2009. A more complete version of the World Glacier Inventory, *Annals of Glaciology*, 50(53), p. 32–38.
- Harris I., Jones P. D., Osborn T. J. and Lister D. H. 2014. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations — the CRU TS3.10 Dataset. *Int. J. Climatol.*, 34, p. 623–642. doi:10.1002/joc.3711.
- Hirano Akira, Welch Roy, Lang Harold. 2003. Mapping from ASTER stereo image data: DEM validation and accuracy assessment. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. 57, p. 356–370. Johannesson E. T., Raymond C. F. and Waddington E. D. 1989. Timescale for adjustments of glaciers to changes in mass balance. *J. Glaciol.*, 35(121), p. 355–369.
- G. N. Panin, I. V. Solomonova, T. Yu. Vyruchalkina. 2009. Climatic trends in the middle and high latitudes of the Northern Hemisphere. *Water Resources*, vol. 36, issue 6, p. 718–730.
- Pfeffer Tad et al. 2014. The Randolph Glacier Inventory: a globally complete inventory of glaciers. *Journal of Glaciology*, vol. 60, No. 221, p 37–552.
-

Shahgedanova M., Nosenko G., Khromova T. and Muraveyev A. 2010. Glacier shrinkage and climatic change in the Russian Altai from the mid-20th century: An assessment using remote sensing and PRECIS regional climate model. *Journal of Geophysical Research*, 115. D16107. ISSN 0148–0227.

Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts, and response strategies. 2007. IPCC Expert Meeting Report, 19–21 September, 2007, Noordwijkerhout, The Netherlands. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/supporting-material.htm>.

Статья поступила в редакцию 27.11.2015. После переработки — 17.01.2016