

## НОВЫЕ ОЦЕНКИ И ЭЛЕМЕНТЫ ПРОГНОЗА СОСТОЯНИЯ ЛЕДНИКОВ ХРЕБТА ОРУЛГАН

*М.Д. Ананичева\*, А.Н. Кренке-мл.*

Россия, 109017 Москва, Старомонетный пер., д.29, Институт географии РАН. \*[Maria\\_anan@rambler.ru](mailto:Maria_anan@rambler.ru)

**Реферат.** Современное оледенение Орулгана, наиболее высокой северной части Верхоянья, расположено в узкой полосе вдоль главного водораздельного хребта двумя участками северным и южным. Главный фактор существования современного оледенения этого района – климатический, поскольку высоты рельефа не велики (до 2300 м). Одна из задач работы – оценка современного состояния ледников хребта – была решена с помощью анализа снимков ASTER за летний период и соответствующей цифровой модели рельефа. Оцифровка ледников проводилась через визуальную идентификацию границ ледника. Для этих целей были составлены несколько трехцветных композиций из разных каналов спутника ASTER. В ходе этой работы удалось найти и идентифицировать лишь 70% ледников, обозначенных в Каталоге ледников СССР. По-видимому, 30% ледников за 50 лет, прошедших со времени каталогизации, исчезли. Среднее значение степени относительного сокращения площади для ледников Орулгана составила 62%. По четырем ледниковым системам Орулгана значения сокращения таковы: Северный Массив, Западный склон – 53%; Северный массив, Восточный склон – 69,9%; Южный массив, Западный склон – 62,1%; Южный массив, Восточный склон – 72,5%. Отступившие ледники было рассортированы по группам с одним морфологическим типом и экспозицией. Максимально сократили площадь ледники каровых типов Северной и северо-восточной экспозиций. Расчетные оценки будущего состояния оледенения Орулгана при увеличении глобальной температуры на 1,5°C по сравнению с уровнем 1981-2000 гг., а также при реализации сценария RCP4,5 (в 2049-2060 гг. он приводит к близкому значению потепления) показало, что оледенение фактически исчезнет. Выполнено сравнение этих перспективных оценок с прогнозом, сделанным с помощью модели ECHAM 4.

**Ключевые слова.** Ледник, ледниковая система, морфологический тип, экспозиция склона, сокращение площади, космический снимок, прогноз, климатический сценарий, температура, осадки.

# NEW ASSESSMENT AND SOME PREDICTIONS OF GLACIERS' STATE OF ORULGAN RANGE

*M. D. Ananicheva\*, A. N. Krenke-jr.*

Institute of Geography, RAS, 29, Staromonetnyi per., 119017 Moscow, Russia.  
\*[Maria\\_anan@rambler.ru](mailto:Maria_anan@rambler.ru)

**Abstract.** The contemporary glaciation of Orulgan, the highest range of the northern Verkhoyansk area, is located in a narrow strip along the main dividing ridge. It has two sections, the northern and the southern ones. Climate is the main factor ensuring existence of contemporary glaciation in this region, because altitudes are moderate there (up to 2300 m). One of the goals of the paper is an assessment of the glaciers' current state. It was achieved with the analysis of ASTER images for the summer period and the corresponding ASTER GDEM. Deciphering of the glaciers was conducted through visual identification of glacier boundaries. Several three-color tracks of different color channels of the ASTER satellite were composed for this purpose. We have managed to find and identify only 70% of the glaciers outlined in the USSR Inventory of glaciers. Apparently, other 30% of the glaciers have disappeared since the cataloging, i.e. during past 50 years. The mean relative area reduction for glaciers of Orulgan is 62%. Relative area reductions for the fourth glaciers system of Orulgan were assessed as follows: North massif, western slope – 53%: North massif, eastern slope – 69,9%: Southern Massif, western slope – 62,1%: Southern Massif, eastern slope – 72,5 %. All retreating glaciers were sorted out into groups of the similar morphological type and access. Maximum reduction of area referred to cirque glaciers types of the northern and north-eastern aspect. Calculations of the future state of the Orulgan glaciation were made for two potential climates: one corresponding to the 1,5°C rise in the global temperature vs. 1981-2000 level and another one corresponding to RCP4.5 scenario (it leads to the similar level of warming in 2049-2060). The assessment showed that the glaciation will practically disappear in both cases. These results are compared with the projection obtained with ECHAM 4 climate model.

**Key words.** Glacier, glacier system, morphological type, access, area reduction, satellite image, projection, climatic scenario, temperature, precipitation.

## **Введение**

Орулган (продолжение Хараулахских гор) – меридиональная, наиболее высокая северная часть Верхоянья. Высшая точка (2389 н.у.м.) расположена на юге хребта, в верховьях реки Собопол. Центральная и южная части хребта Орулган наиболее приподняты, всюду встречаются ледниковые формы рельефа. Характерны пикообразные вершины, острые гребни, глубокие кары, троговые верховья долин и глубокие ущелья (Пармузин, 1967).

Климат обусловлен высокими широтами, строением рельефа, близостью Северного ледовитого океана, влиянием северо-восточного отрога Азиатского антициклона зимой и арктического фронта – летом. Субмеридиональное простираие самого хребта Орулган, служащего климатическим барьером на пути влагонесущих воздушных потоков, определяет основные особенности оледенения.

Ледники в хребте Орулган были открыты в 40-е годы XX века. Современное оледенение расположено в узкой полосе вдоль главного водораздельного хребта двумя участками (северным, протяженностью около 112 км и южным – 25 км), прерываемыми пониженной частью хребта. Наибольшие высоты горных вершин в пределах ледниковой зоны – 2000 м (в северной части) и 2300 м (в южной). Очевидно, что при таком низком рельефе главный фактор существования современного оледенения этого района – климатический. По данным Каталога ледников СССР, оледенение здесь представлено в основном всеми разновидностями каровых и висячих ледников, и только двумя долинными. Каталог содержит данные по 74 ледникам (Каталог ледников СССР, 1972).

## **Данные и методы**

Для решения задачи оценки современного состояния ледников хребта Орулган было решено использовать снимки ASTER за летний период и соответствующую цифровую модель рельефа. В летний период хребет практически свободен от снежного покрова, и этот позволяет с помощью комбинаций каналов снимка идентифицировать границы покрывающих его ледников (Kaab et al.,

2002; Miller at al., in press). Цифровая модель рельефа ASTER согласно спецификациям имеет точность в пределах 20 м (ASTER..., 2009) для доверительного интервала в 95%. Указанной точности вполне достаточно для определения примерных верхней и нижней точки ледника. Эти данные необходимы для определения текущей высоты границы питания ледника ( $H_{ELA}$ ).

Однако известно, что для данных ASTER GDEM характерны искажения на пиковых высотах доходящие до ста метров (Akira at al., 2003), поэтому наиболее точной стоит считать определение нижней границы ледника. Таким образом, следует учитывать возможность существенных искажений определения высоты верхней точки ледника, однако, в случае обнаружения таких искажений (существенное расхождение с данными Каталога ледников СССР) можно принять данные Каталога как условно истинные. Это объясняется тем, что верхняя точка ледника практически не может существенно меняться. Нижняя высотная отметка ледника почти во всех случаях должна лежать внутри доверительного интервала для данных ASTER. Данные ASTER, с учетом этих соображений, позволяют оценить многолетнюю динамику ледников (в данном случае более чем за 50 лет) так как речь идет об изменениях в сто и более метров. Оценка многолетней динамики и привязка идентифицированных ледников к прошлым измерениям производится с помощью картосхемы (Каталог ледников СССР, 1972) и соответствующей таблицы, содержащей площадь, верхнюю и нижнюю границу ледника. Картосхема, хотя и не имеет географической привязки и весьма схематична, однако отображает порядок, в котором расположены ледники по сторонам света, это позволяет с высокой точностью определить все относительно крупные ледники и большую часть мелких. Трудности, связанные с идентификацией мелких ледников, вызваны исчезновением многих и них.

Оценка современного состояния ледников в районе хребта Орулган осуществлялась в три этапа:

- ❖ Оцифровка ледников на территории исследований по космическим снимкам;
- ❖ Соотнесение полученных ледников с данными таблицы и картосхемы, идентификация ледников;

- ❖ Составление таблицы содержащей следующие прошлые и текущее состояния ледника: верхнюю (по абсолютной высоте) точку, нижнюю точку, площадь.

Оцифровка ледников проводилась через визуальную идентификацию границ ледника, для этих целей были составлены несколько трехцветных композиций из разных каналов спутника ASTER. Наиболее удачной комбинацией оказалось соотношение четвертого и третьего канала, что подтверждается работой (Kaab et al., 2002).

Соотнесение ледников с данными из Каталога ледников (1972) производилась на основе соотнесения пяти параметров: длин ледников, их площади и положения относительно друг друга, а также бассейна питаемой ими реки и экспозиции склона. Информация о бассейнах рек была получена через использование оцифрованной топографической карты масштаба 1:1 000 000. Работа велась через идентификацию опорных ледников (таких, как ледник Колосова) и последующее соотнесение ледников лежащих между ними с данными таблицы. В ходе работы учитывалась возможность исчезновения или существенно сокращения площадей наиболее мелких ледников, а также вероятность фрагментации крупных.

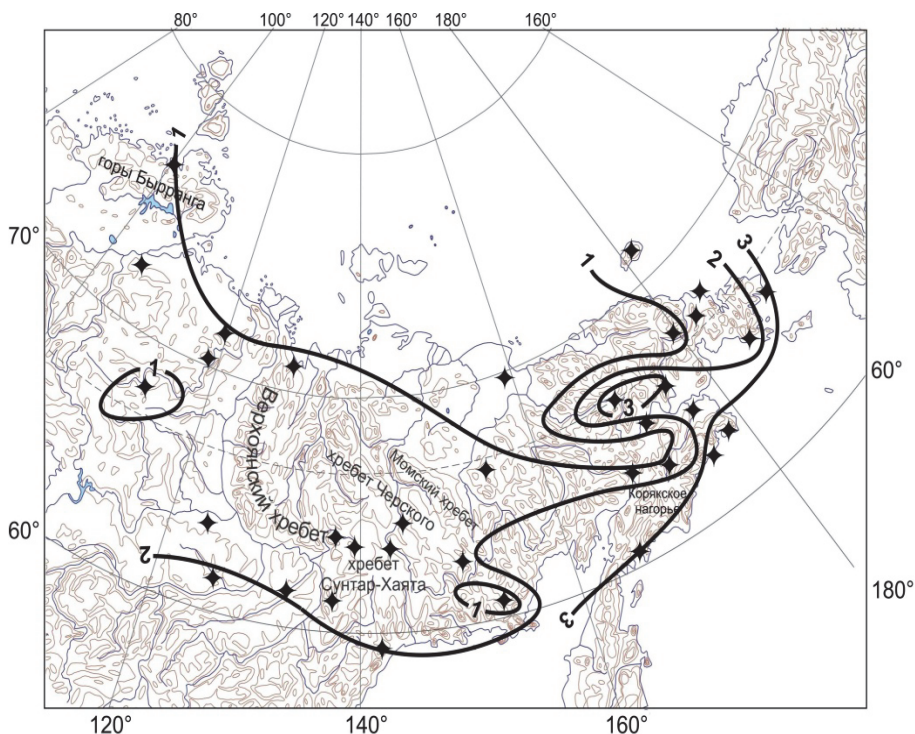
В результате были получены данные о количестве существующих на настоящий момент ледников, их площади, длины, оценки верхней и нижней высотных отметок ледников хребта Орулган.

Для оценки климата региона мы использовали данные наблюдений метеостанций, расположенных в относительной близости от хребта. По имеющимся записям метеопараметров, наблюденных на метеостанциях (средние месячные значения температуры и осадков) мы рассчитали тренды средней летней и средней годовой температуры  $T_{лет}$ ,  $T_{год}$  и осадков твердых и жидких –  $P_{ТВ}$ ,  $P_{ж}$  за 50 лет до 2010 года для региона Северо-востока Азии, куда вошел и хребет Орулган. Использовалась экспоненциальная аппроксимация, как наиболее точно отражающая колебания температуры и осадков за последние 50 лет. Ряды метеопараметров для Орулгана есть лишь длительностью 60-70 лет, в 90% случаев для остальной территории ряды были более 120 лет (с конца 19 века по 2010г). Используются проверенные данные наблюдений

температуры и осадков из базы данных ВНИГМИ МЦД (<http://www.meteo.ru>).

Для расчетов современной высоты границы питания все ледники Орулгана были разделены на 4 ледниковые системы: 1 – Северный Массив, Западный склон (ледники 48-73), 2 – Северный массив, Восточный склон (ледники 1-32), 3 – Южный массив, Западный склон (ледники 38-47), 4 – Южный массив, Восточный склон (ледники 33-37).

Методика прогноза развития систем Орулгана дана в соответствующем разделе ниже.



*Рис. 1. Схема трендов средней летней температуры воздуха °C/50 лет (1960-2010 гг.), значками показаны метеостанции, данные которых, использовались при расчете.*

## Результаты

Карты трендов летней температуры воздуха  $T_{лет}$  и твердых осадков  $P_{ТВ}$  за 50 лет (Рис. 1 и 2), как наиболее важных для баланса ледников климатических характеристик, показывает, что потепление летом, во время абляции ледников в районе Верхоянья идет уже длительной время, но интенсивность его не велика – тренд  $T_{лет}$  от  $1^{\circ}\text{C}$  до  $2^{\circ}\text{C}/50$  лет. Однако продолжительность положительного тренда температуры, наряду с недостатком снегового питания (тренд  $P_{ТВ}$  нулевой за 50 лет, см. рис 1б) сказываются на состоянии оледенения здесь, которое представлено небольшими по площади ледниками карово-долинных, каровых, висячих морфрологических типов.

С помощью анализа снимков ASTER на территорию хребта Орулган нам удалось найти и идентифицировать лишь 70% ледников, обозначенных в Каталоге. По-видимому, 30% ледников за 50 лет со времени каталогизации исчезли, или в Каталоге были ошибки, которые исключить нельзя (Ананичева, 2012).

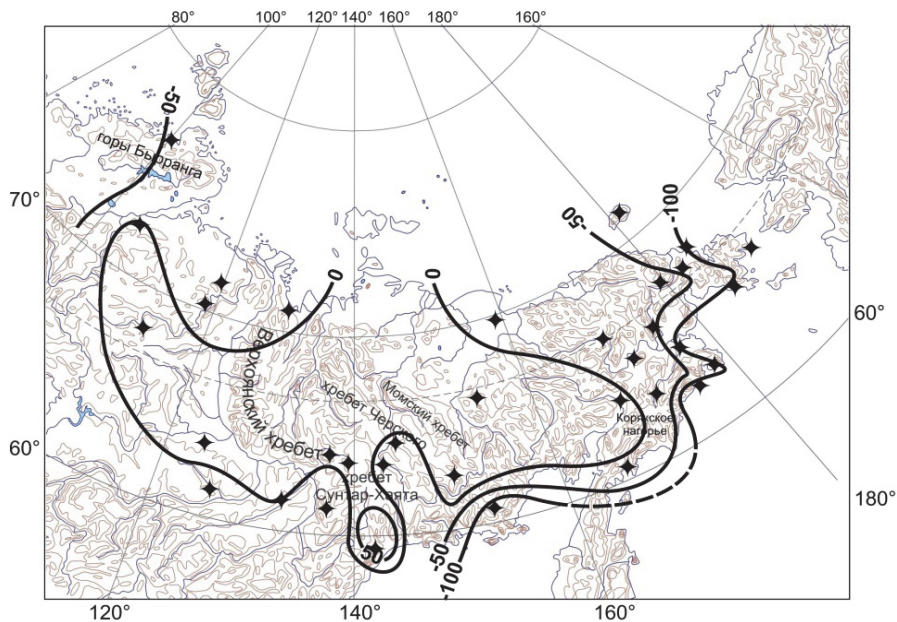
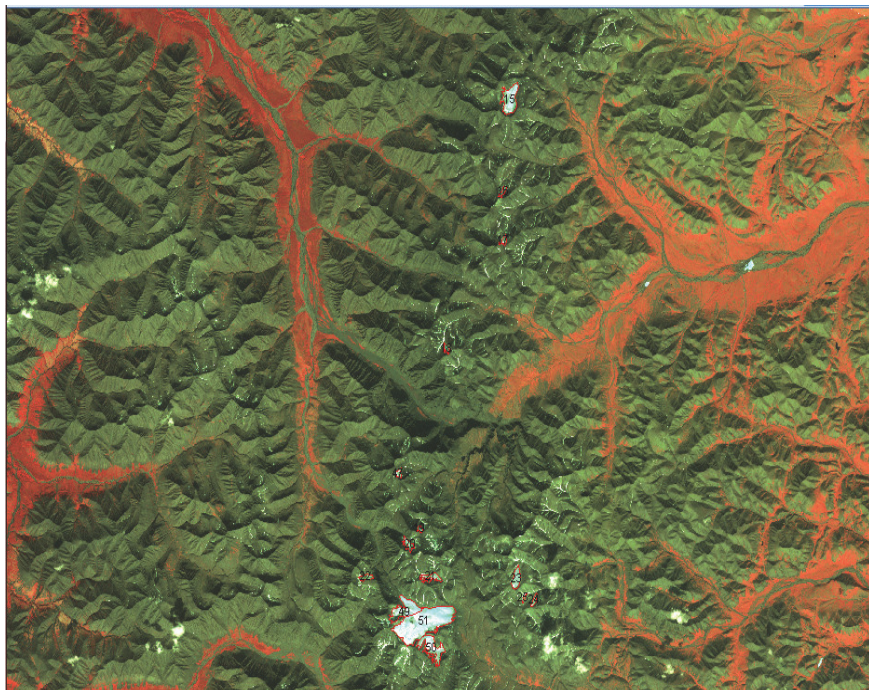


Рис. 2. Схема трендов осадков холодного периода, мм/50 лет (1960-2010 гг.).

На рис. 3 дан фрагмент мозаики снимков ASTER с дешифровкой ледников, цифры – номера ледников по каталогу. Из всех найденных 12 ледников исследовать сравнением с данными каталога нам представляется некорректным, поскольку они больше по площади указанной в Каталоге, все они расположены в северном массиве Орулгана, но в разных его частях.



*Рис. 3. Фрагмент мозаики снимков ASTER с дешифровкой ледников, цифры – номера ледников по Каталогу ледников СССР (1972).*

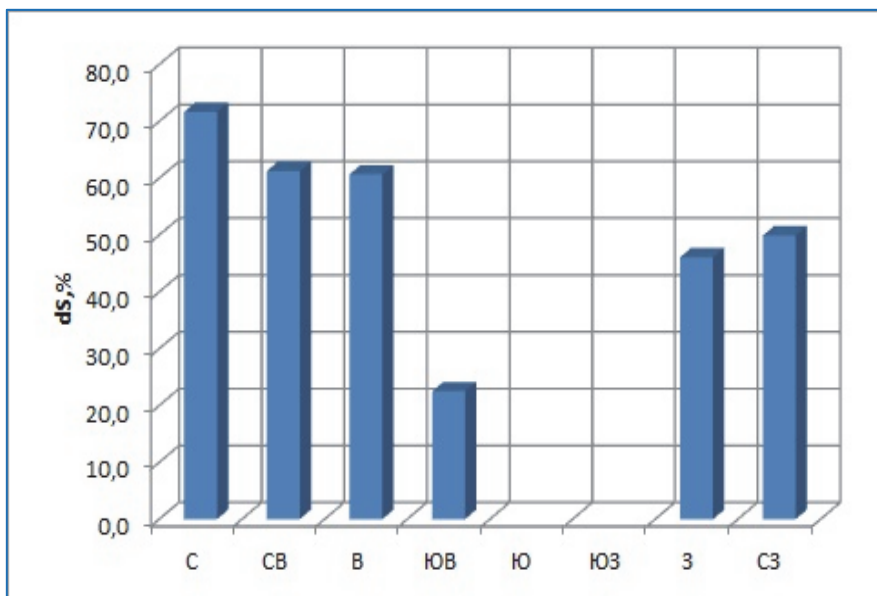
Среднее значение степени относительного сокращения площади для ледников Орулгана составила 62%, ледники уменьшились более чем наполовину, поэтому допускать, что 12 ледников увеличили свою площадь – не корректно, скорее всего, это либо ошибка Каталога, либо невозможность точно дешифрировать контуры этих конкретно ледников по данным снимкам. Среди четырех ледниковых систем Орулгана, относительное сокращение составило: Северный Массив, Западный склон – 53%, Северный массив, Восточный склон – 69,9%, Южный массив, Западный склон – 62,1%, Южный массив,



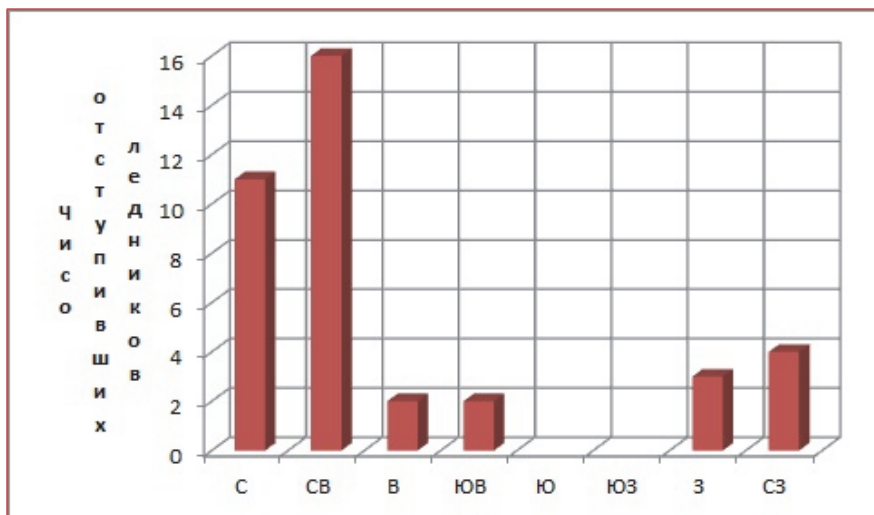
Восточный склон – 72,5%. Наименьшее уменьшение площади характерно для 1-й ледниковой системы, получающей больше осадков в результате западной циркуляции (осадки с Атлантики); системы же, находящиеся на подветренном макросклоне, потеряли больше своей площади, покрытой льдом.

Отступившие ледники мы сортировали по группам с одним морфологическим типом и экспозицией, чтобы понять какие из этих групп «пострадали» больше всего.

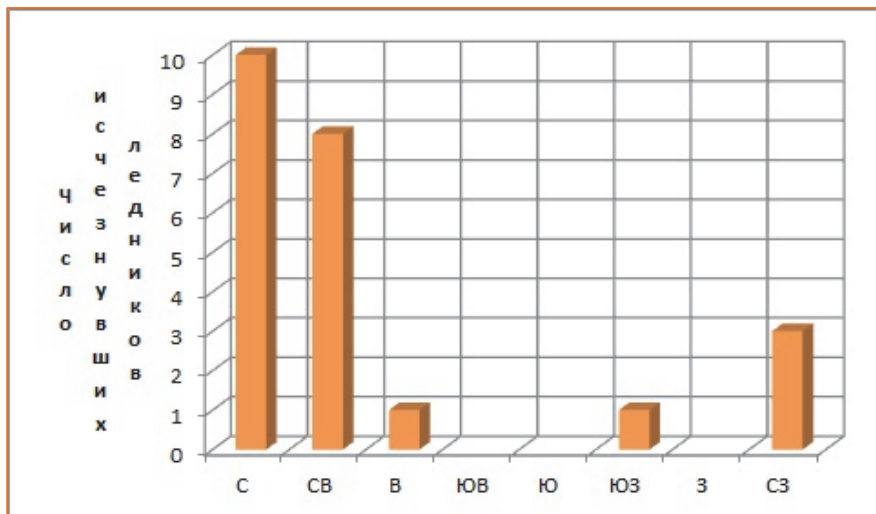
Как видно из рисунков 4 и 5, больше всего уменьшили свою площадь (отступили) ледники северных и восточных экспозиций. И по числу ледников лидирует в сокращении площади группы обращенных на север и северо-восток. Даже если учесть, что в Орулгане преобладают ледники северных экспозиций, факт их массового сокращения (и исчезновения) отражает климатическую тенденцию – потепление Арктики в последние десятилетия



*Рис. 4. Степень уменьшения площади ледников среди групп с одинаковой экспозицией.*



*Рис. 5. Число отступивших ледников, сортированным по группам с одинаковой экспозицией.*

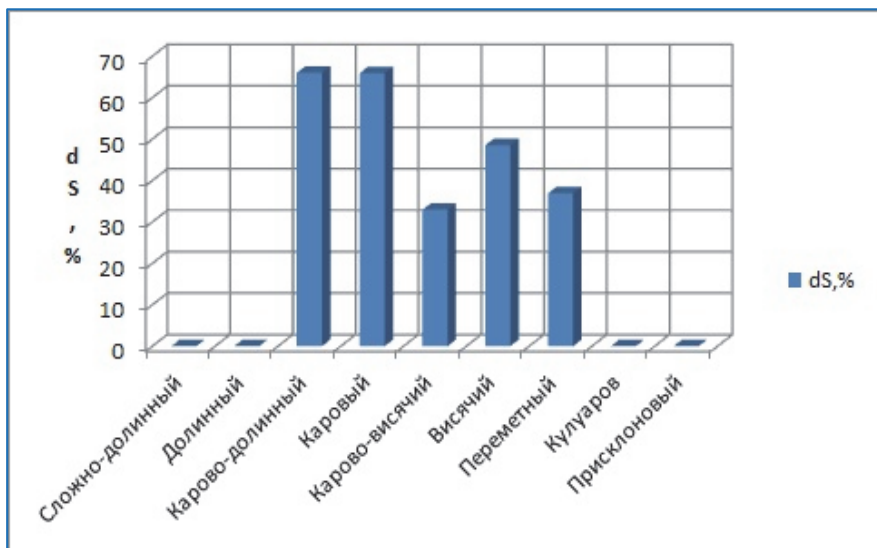


*Рис. 6. Число исчезнувших ледников, сортированным по группам с одинаковой экспозицией.*

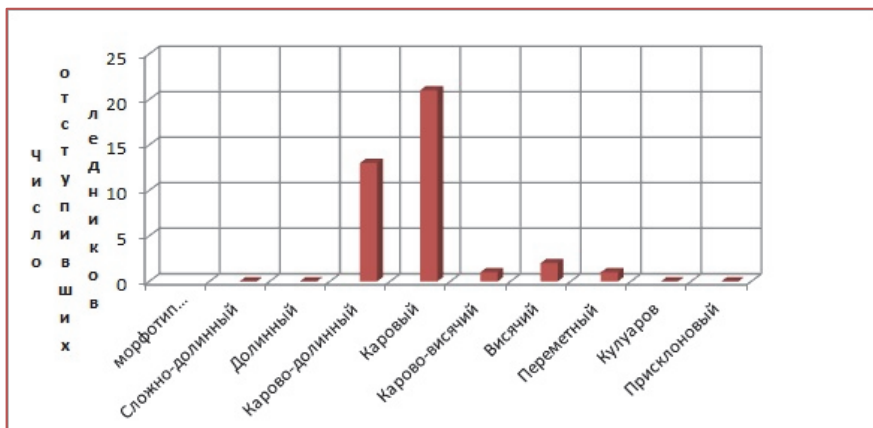
Та же картина (рис. 6), естественно, – с исчезнувшими ледниками, максимальное их число принадлежит группам Северной и Северо-восточной экспозиции.

Что касается степени сокращения площади среди ледников с одинаковым морфологическим типом, то, как показано на рис. 7, 8, 9, максимум отступления приходится на кары и карово-долинные ледники (по числу) и каровые и висячие – по его относительной степени в %. Из исчезнувших – каровые резко преобладают по числу, что объясняется их небольшим размером и неглубоким залеганием в цирковых формах рельефа.

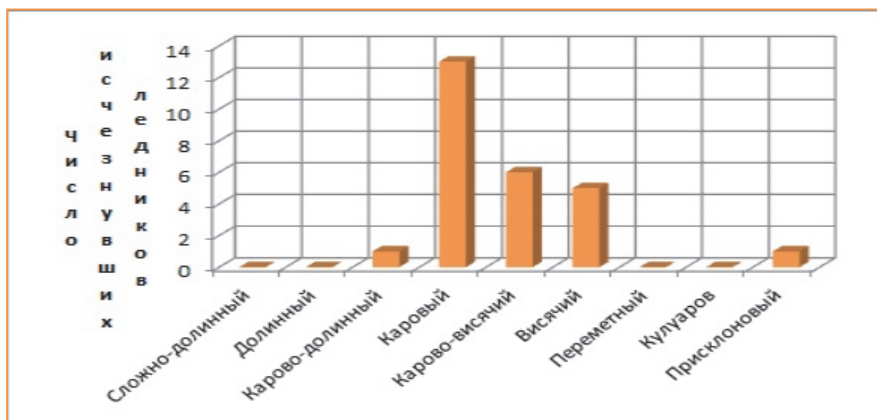
С помощью высотной модели рельефа ASTER GDEM мы получили отметки рельефа – высшую и низшую точку ледника, применив подход Гефера-Куровского (Кренке, 1982) к определению высоты границы питания. Мы рассчитали также подъем  $H_{ELA}$  ледников Орулгана к настоящему времени для каждого ледника. В среднем для всего региона он составил 120 м по сравнению со временем каталогизации ледников (Каталог ледников СССР, 1972).



*Рис. 7. Степень уменьшения площади ледников среди групп с одинаковым морфологическим типом.*



*Рис. 8. Число отступивших ледников, сортированным по группам с одинаковым морфологическим типом.*



*Рис. 9. Число исчезнувших ледников, сортированным по группам с одинаковым морфологическим типом.*

Учитывая ошибки использования ASTER GDEM в районах с горным рельефом, а также ошибки определения высшей и низшей точки ледника в Каталоге (они не даны), эта оценка носит приблизительный характер.

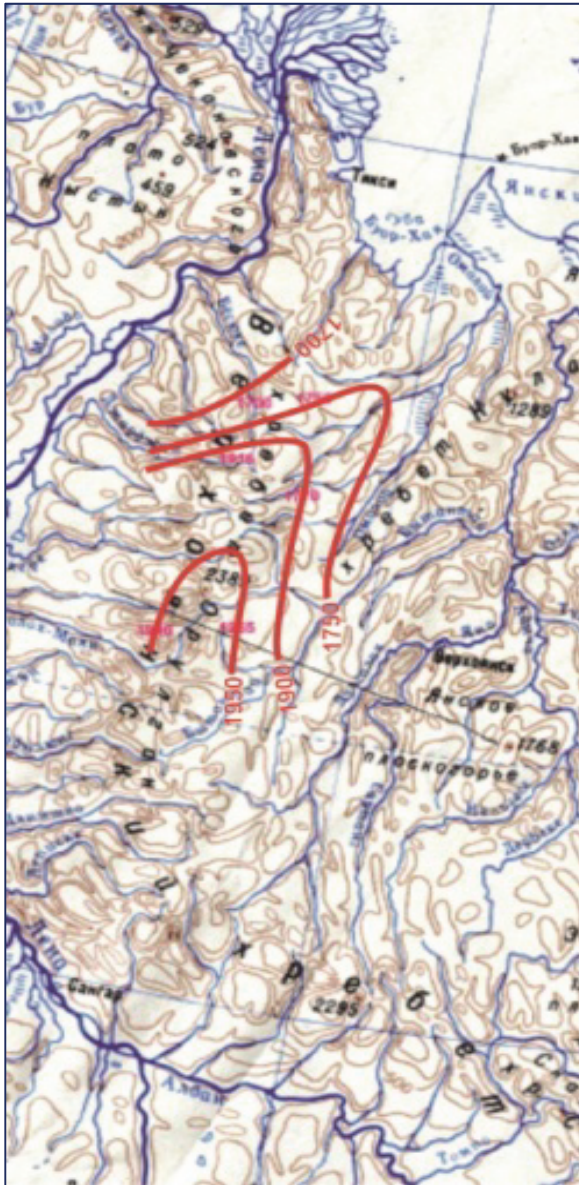


Рис. 10. Картограмма современной  $H_{ELA}$  ледников Орулгана, рассчитанная по высотам, полученным по ASTER GDEM.

На картосхеме (рис. 10) показаны изолинии  $H_{ELA}$  ледников Орулгана, рассчитанные по высотам, полученным по ASTER GDEM; они закономерно меняются от 1700 м до 2000 м н.у.м. с севера к центру оледенения, вокруг самого большого ледника Колосова. Ошибка определения может составлять до 50-70 м.

Оценки  $H_{ELA}$  ледников важны для моделирования режима ледников в отсутствии прямых измерений, последние получить крайне дорого и не реально для ледников изучаемого района. Более точно значения  $H_{ELA}$  можно определить по космическим снимкам, содержащим подробную информацию о поверхности ледника, которыми для данного района мы не располагали.

### **Оценка эволюции оледенения к середине XXI века**

В этом разделе кратко излагается опыт построения схемы изменения морфологии и режима ледниковых систем на основе сценария изменений климата, по которому определяются средние для ледниковых систем или их частей значения  $H_{ELA}$ , зависящие от эволюции нижней поверхности хионосферы (термин С.В. Калесника, (1963)) на дату конкретного сценария. Полученные результаты следует рассматривать в первую очередь в методическом плане. Ценность самого прогноза ввиду неопределённости такого рода сценариев изменения климата, учитывающих лишь изменения состава атмосферы по разным, в несколько раз различающимся вариантам, достаточно условна.

Методика оценки эволюции ледниковых систем описана в наших статьях (Ананичева, Кренке, 2005; Ананичева, Капустин, 2010; Ананичева и др, 2012; Ананичева, 2012), в данной работе нам пришлось внести в нее определённые изменения, вызванные спецификой климатического сценария.

В качестве температурного сценария была взят массив температур, полученных Институтом глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, соответствующий  $+1,5^{\circ}\text{C}$  к средней глобальной температуре 1981-2000 гг. (Семенов и др., 2013). Значения осадков, соответствующие этой добавке, рекомендованы и любезно предоставлены ГГО им. А.И. Воейкова из сценария поколения RCP, в частности, RCP4.5 (Xie, Arkin, 1998). Эти параметры даны для территории России и стран ближнего зарубежья в узлах сетки  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ; центры ячеек – в «полградусных» точках. Используемый сценарий осадков – «среднемодельный» – т.е.

получен осреднением результатов расчетов по 31 глобальным моделям циркуляции атмосферы, которые участвуют в проекте сравнения глобальных климатических моделей СМIP5 и используют современные сценарии антропогенного воздействия на климатическую систему.

Прогноз развития оледенения состоял из двух блоков – построение балансовых кривых абляции и аккумуляции, и расчет  $H_{ELA}$  и, если возможно, – высот концов ледников для базового («современность») и прогнозного (2040-69 гг.) периодов.

Для построения базовой схемы вертикального распределения балансовых компонент ледниковых систем на современность нами были использованы имевшиеся климатические данные, в основном середины и конца XX века. Период охвата мало отличается от принятого в модели базового периода реанализа (1960-90 гг.) по сравнению с полученными в модели изменениями за последующие 80 лет. Наш базовый период приблизительно соответствует состоянию оледенения, отражённому в Каталоге ледников СССР (1972), охватывая отчасти время, предшествовавшее его составлению.

Для двух крупных ледниковых систем (Северо-запад и юго-восток Орулгана) по данным имеющихся метеостанций построены вертикальные профили аккумуляции и абляции. Помимо рядов метеопараметров станций использовались значения средних высот границы питания, взятых по каталогам или снятых с карт их полей (Кренке, 1982; Ананичева, Кренке, 2005). В Северо-восточной Сибири, где ледники холодные, преобладает наложенное питание, и значительная часть талой воды повторно замерзает, а потом вновь тает на поверхности. В этом случае правомерно использование *регионального* варианта глобальной формулы связи абляции с летней температурой (Корейша, 1991):

$$A = 0,1(T_{л} + 7,0)^3 \text{ г см}^{-2} \quad (1)$$

Где  $A$  – абляция,  $T_{л}$  – средняя температура воздуха над поверхностью льда за июнь, июль и август.

Температура над поверхностью льда как для базового, так и для прогнозного периодов вычислялась по кривой летней температуры над безлёдной поверхностью  $T_6$  по формуле Н.В. Давидович (1983):

$$T_{л} = 0,85 T_6 - 1,2 \quad (2)$$

Расчет профилей *аккумуляции* состоял в преобразовании вертикального распределения твердых осадков с помощью коэффициента концентрации.

Доля твёрдых осадков для каждого месяца, а затем и в годовом выводе, определялась по методу Э.Г. Богдановой (Богданова, 1976) в зависимости от средней месячной температуры и высоты и затем использовалась для расчёта вертикальных кривых твёрдых осадков в абсолютном выражении. Затем, в зависимости от преобладающего морфологического типа ледников в ледниковой системе, вводился коэффициент концентрации (Кренке, 1982), учитывающий метелево-лавинный перенос снега или его снос со склонов.

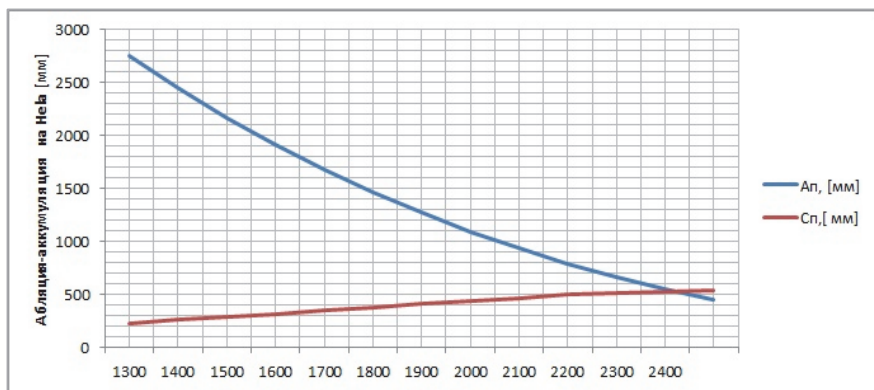
Следующим этапом было построение *прогнозных* кривых  $A_{\Pi}$  и  $C_{\Pi}$  для климата 2040 – 2069 гг. на базе полученных кривых  $A$  и  $C$  для современного периода. Для расчета абляции было сделано допущение, что температурный сдвиг, данный в модели для узлов ячейки, в которой располагается ледниковая система, распространяется для всего её диапазона высот. Если ледниковая система охватывалась несколькими ячейками, мы брали средневзвешенное значение сдвига. Для 1-й системы (табл. А) прогнозные значения температуры составляли на средней высоте 900 м н. у. м.  $12,7^{\circ}\text{C}$ , для 2-й – на 810 м –  $10,8^{\circ}\text{C}$ .

*Абляция*  $A_{\Pi}$  рассчитывалась по той же формуле (1), но температура была использована прогнозная (на 2 м от поверхности реального рельефа), высотный температурный градиент полагался таким же, как в базовый период, поэтому за основу взяты градиенты температуры из работы М.М. Корейши (1991), а также из атласа (Аэроклиматический атлас Северного полушария, 1963). Высота рельефа была рассчитана средним взвешенным осреднением высотных точек сценария, попадающих в область ледниковой системы.

Для расчета *аккумуляции* на прогнозный период мы допустили, что высотный градиент осадков остался неизменным по сравнению с базовым периодом. В сценарии осадков даны общие осадки ( $\text{мм сут}^{-1}$ ), поэтому сначала мы рассчитали твердые осадки  $P_{\text{ТВ}}$  по доле твердых осадков годовом количестве, полагая, что эта доля будет не сильно отличаться от той, что будет в прогнозный период.



В результате применения градиентов осадков, которые М.М.Корейша измерял до высот 2500м (Корейша, 1963), к прогнозному значению  $P_{тв}$  на поверхности земли, были получены вертикальные кривые твердых осадков, а при умножении на коэффициент концентрации были рассчитаны  $C_{п}$  для двух ледниковых систем на 2040-69 гг. (см пример профилей на Рис. 11).



*Рис. 11. Профили абляции-аккумуляции ледников для прогнозного периода. Северо-запад Орулгана.*

Высотные отметки их пересечения с прогнозными кривыми  $A_{п}$  приняты за искомую среднюю высоту границы питания для ледниковой системы –  $H_{ELA/п}$ . В случаях её смещения выше самой высокой точки области аккумуляции ледников ( $H_{в}$ ) в системе, соответствующее оледенение должно исчезнуть. В остальных случаях принято, что после приспособления оледенения к новому климату в соответствии с методом определения этой высоты по Геферу (Калесник, 1963), высотный перепад между началом ледников и  $H_{ELA/п}$  равен высотному перепаду между  $H_{ELA/п}$  и концом ледника.

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 (Johanneson at al., 1989).

Ледники хребта Орулган по данным Каталога ледников СССР (1972) находились в высотных интервалах 1500 – 2250 м на севере и 1520 – 2280 м на юге.

Для обеих крупных ледниковых систем Орулгана, исходя из сценария, пересечение высотных профилей абляции и аккумуляции произошло за пределами высших точек рельефа ( $H_{ELA/n}$ : 2400 м для Северо-запада, и 2460 м для Юго-востока), что означает, что при таком сочетании температур и осадков, как принято в сценарии, небольшие по размеру ледники Орулгана не имеют возможности сохраниться.

Как видно из таблицы, к настоящему времени наибольшему сокращению в целом подверглась юго-восточная часть Орулгана (изменение площади ледников 56% по сравнению с Каталогом ледников СССР). Северо-восток региона потерял более 40% своей ледниковой площади. А высоты границы питания поднялись на 70 и 100 м соответственно.

При дальнейшем росте температуры, исходя из сценария ко второй половине XXI столетия, твердые осадки не смогут компенсировать убыль массы ледников за счет абляции, ледники фактически исчезнут. Абляция на  $H_{ELA}$  резко снизится, а при исчезновении ледников будет естественно равно нулю.

Таблица А

### Изменения основных характеристик ледниковых систем Орулгана к 2010 и 2040-2069 гг.

Название ледниковой системы	Подъем $H_{ELA}$ м		Площадь оледенения, км <sup>2</sup> , %			Абляция– аккумуляция на $H_{ELA}$ , мм	
	К настоящему времени	От базового периода к прогнозу	Базовый период, км <sup>2</sup>	К 2010 г, км <sup>2</sup> (%)	Прогнозный период*, км <sup>2</sup> (%)	Базовый период	Прогнозный период
1. Северо-запад	70	500	10,9	6,4 (41,2)	~0	710	400
2. Юго-восток	100	570	5,0	2,2 (56,0)	~0	700	550

\*Примечание: без 12 ледников, о которых в тексте упомянуто выше.

В работах (Ананичева, Кренке, 2007; Ananicheva, et al., 2010) был дан прогноз развития оледенения на изучаемый регион по модели ЕСНАМ 4. Согласно этому климатическому сценарию, на севере хребта  $T_{л/п}$  должна вырасти на 3,7°C, а на юге – на 3,5°C,

твёрдые же осадки ( $P_{\text{тв/л}}$ ) также возрастут благодаря усилению циклоничности и достаточно низким температурам (несмотря на потепление) – на 46% и 21% соответственно.  $H_{\text{ELA/л}}$  в соответствии со прогнозными балансовыми кривыми поднимется на севере на 250 м от 1700 до 2050 м, а на юге при меньшем росте осадков – на 500 м и сменит позицию – от 2000 до 2500 м, тем самым окажется выше верхнего предела оледенения (2280 м). Таким образом, несмотря на некоторое различие параметров сценариев, результаты оценки развития ледниковых систем не сильно отличаются. Используемый нами в этой работе сценарий предоставляет такое сочетание летней температуры и зимних осадков, при котором результат наименее благоприятен для ледников Орулгана.

### **Выводы**

1. Недавние и современные изменения климата Субарктики приводят к отрицательному балансу массы горных ледников Орулгана. Рост их питания не компенсирует рост их таяния.

2. На малых ледниках расчёты по различным моделям приводят к выводу о возможном исчезновении целых ледниковых систем, которые они образуют. В том числе вероятно полное исчезновение оледенения хребта Орулган к середине XXI века.

3. Анализ точности определения контуров и концов ледников Орулгана по космическим и аэрофотоснимкам приводит к выводу о приблизительности оценок величины, но не знака их изменений.

### **Благодарности**

Выражаем благодарность главе Главной геофизической обсерватории проф. В.М. Катцову и директору Института Глобального климата и экологии Госкомгидромета и РАН проф. С.М. Семенову за предоставление сценария осадков по 31 МОЦАО, проект CMIP5 и массива данных температур ИГКЭ, а также консультации. Спасибо А.Н. Кренке, д.г.н., ИГ РАН – за прочтение статьи и ценные советы, а также Г.А. Носенко, к.г.н. ИГ РАН – за помощь в предоставлении снимков территории изучаемого региона.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ананичева М.Д. 2012. Современное состояние ледников Корякского нагорья и оценка их эволюции к середине текущего столетия. Лед и снег. №1 (117). С. 15-24.
2. Ананичева М.Д., Кренке А.Н. Гляциологический прогноз. Горное оледенение (на примере Северо-Востока России и Камчатки). 2007. В кн.: Оледенение Северной Евразии в недавнем прошлом и ближайшем будущем. –М.: Наука. С. 277-293.
3. Ананичева М.Д., Кренке А.Н. 2005. Эволюция высот климатической снеговой линии и границы питания ледников на Северо-востоке Сибири в XX веке. Материалы гляциологических исследований (МГИ). Вып. 98. С. 225-233.
4. Ананичева М.Д., Капустин Г.А., Михайлов А.Ю. 2012. Ледники Мейньпильгынского хребта: современное состояние и прогноз эволюции ледниковых систем. Лед и снег. № 2 (118). С. 40-560.
5. 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.
6. Аэроклиматический атлас Северного полушария. 1963. Под ред. И.Г.Гутермана и И.В. Ханевской. –Л.: Гидрометеоздат. 213 С.
7. Богданова Э.Г. 1976. Способ расчета доли твердых, жидких и смешанных осадков в их месячной норме. Материалы гляциологических исследований (МГИ). Вып. 26. С. 202-207.
8. Давидович Н.В. 1983. Охлаждающее воздействие горных ледников умеренных широт. Изв. АН СССР. Сер. геогр. №5. С. 74-82.
9. Калесник С.В. 1963. Очерки гляциологии. –М.: Учпедгиз. 182 С.
10. Каталог ледников СССР. 1972. Т. 17. Вып. 5. Ч. 2. Хребет Орулган. –Л.: Гидрометеоздат. 67 С.
11. Корейша М.М. 1963. Современное оледенение хребта Сунтар-Хаята. Результаты исслед. по программе МГГ. Гляциология. №11. –М.: Наука. 98 С.
12. Корейша М.М. 1991. Оледенение Верхоянско-Колымской области. Результаты исследований по программе МГГ. –М.: Изд-во РАН. 141 С.
13. Кренке А.Н. 1982. Массообмен в ледниковых системах на территории СССР. –Л.: Гидрометиздат. 288 С.
14. Пармузин. Ю.П. Северо-Восток и Камчатка: очерк природы. –М.: Мысль, 1967. – 368 с.
15. Семенов С.М., Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Попов И.О., Титкина С.Н. 2013. Распределение приповерхностной температуры на территории России и соседних стран при заданном уровне глобального потепления. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. 25. –М.: ИГКЭ. (В печати).
16. Ananicheva M.D., Krenke A.N., Barry R.G. 2010. The Northeast Asia mountain glaciers in the near future by AOGCM scenarios. The Cryosphere. V. 4. P. 435-445.
17. 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.

18. Akira H., Welch R., Lang H. 2003. Mapping from ASTER stereo image data: DEM validation and accuracy assessment. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. V. 57. P. 356-370.
19. Johannesson T., Remond D., Waddington E. 1989. Timescale for adjustment of glaciers to changes in mass balance. *Journal of Glaciology*. V. 5. P. 355-369.
20. Kaab A., Huggel C., Paul F., Wessels R., Raup B., Kieffer H., Kargel J. 2002. Glacier monitoring from ASTER imagery: accuracy and applications. *Proceedings of E ARSeL-LISSIG-Workshop Observing our Cryosphere from Space*. Bern, March 11 – 13, 4EARSelProceedings. №. 2. P. 43-52.
21. Miller P.E., Kunz M., Mills J.P., King M.A., Murray T., James T.D., Marsh S.H. Assessment of glacier volume change using ASTER-based surface matching of historical photography. (In press)
22. Xie P., Arkin P.A. 1998. Global monthly precipitation estimates from satellite-observed outgoing longwave radiation. *J. Climate*. V.11. P.137-164. (Updated).