

Ледники и ледниковые покровы

УДК 551.324

Изменение площади и объёма ледников Горного Алтая (Россия) с середины XX в. по данным космических съёмок

© 2014 г. Г.А. Носенко, С.А. Никитин, Т.Е. Хромова

Институт географии РАН, Москва
gnosenko@gmail.com

Glacier area and volume changes in the Mountain Altai (Russia) since the mid-twentieth century from space imagery data

G.A. Nosenko, S.A. Nikitin, T.E. Khromova

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow

Статья принята к печати 25 марта 2014 г.

*Горный Алтай, космические снимки, сокращение ледников.
Altay Mountains, shrinkage of glaciers, space images.*

Рассматривается изменение площади и объёма ледников Горного Алтая с начала каталогизации ледников СССР по настоящее время. Для оценки изменений площади ледников использованы данные Каталога ледников СССР и космические снимки со спутников CORONA, ALOS PRISM, Landsat и ASTER. К 2008 г. ледники Катунского, Северо- и Южно-Чуйского хребтов потеряли 172,4 км² площади, или 27,4%. Суммарное сокращение объёма ледников составило 8,9 км³. Объёмы ледников вычислены с помощью корреляционных зависимостей, полученных по данным полевого радиолокационного зондирования алтайских ледников. Сравнение космических снимков 2004 и 2012 гг. с данными середины прошлого века позволило сделать вывод об увеличении скорости сокращения площади ледников в последнее десятилетие в 1,5–2 раза.

The paper examines changes in the area and volume of the Katun river basin glaciers, North and South Chu glaciers of the Altai Mountains since the beginning of the USSR glaciers inventarization to the present. For this purpose, we used USSR Glaciers Inventory data, space imagery – CORONA, ALOS PRISM, Landsat and ASTER. In total, glaciers have lost 172.4 km² (27.4%) of its area.

Ледники отступают во многих горных районах мира, однако вопрос о повсеместном сокращении оледенения до сих пор нуждается в подтверждении, поскольку есть ещё неисследованные районы и существует вероятность, что где-то возможны условия, при которых данный процесс не столь очевиден. Поэтому в настоящее время в разных ледниковых районах планеты продолжают сбор и накопление информации о современном состоянии ледников и происходящих в них изменениях. Продолжающиеся на немногочисленных тестовых ледниках натурные наблюдения играют важную роль для подтверждения существующих трендов, но они не позволяют судить о состоянии ледниковых систем в целом на региональном уровне. Космические снимки, которые в настоящее время широко используются в гляциологических исследованиях, восполняют недостаток информации. Наши предыдущие работы [9, 13] охватывали восточную часть Горного Алтая – Северо- и Южно-Чуйские хребты. С появлением новых снимков мы

получили возможность выполнить исследования для района Катунского хребта и оценить изменения для всей территории Горного Алтая (рис. 1). Мы использовали космические снимки ASTER, ALOS PRISM, CORONA и Landsat, а также данные Каталога ледников СССР.

Район исследований

Горный Алтай – самая высокая часть Алтае-Саянской горной системы. Основная особенность рельефа – сочетание обширных поверхностей выравнивания с высокогорным рельефом альпийского типа. В центральной его части горные хребты и массивы поднимаются до 3000–4000 м. Здесь отмечаются многочисленные и разнообразные формы современного оледенения. Для Центрального Алтая характерно оледенение альпийского типа с преобладанием долинных и карово-долинных ледников с обширными крутопадающими фирновыми бассейнами и менее крутыми ледниковыми языками, расположенными на днищах древних цирков и

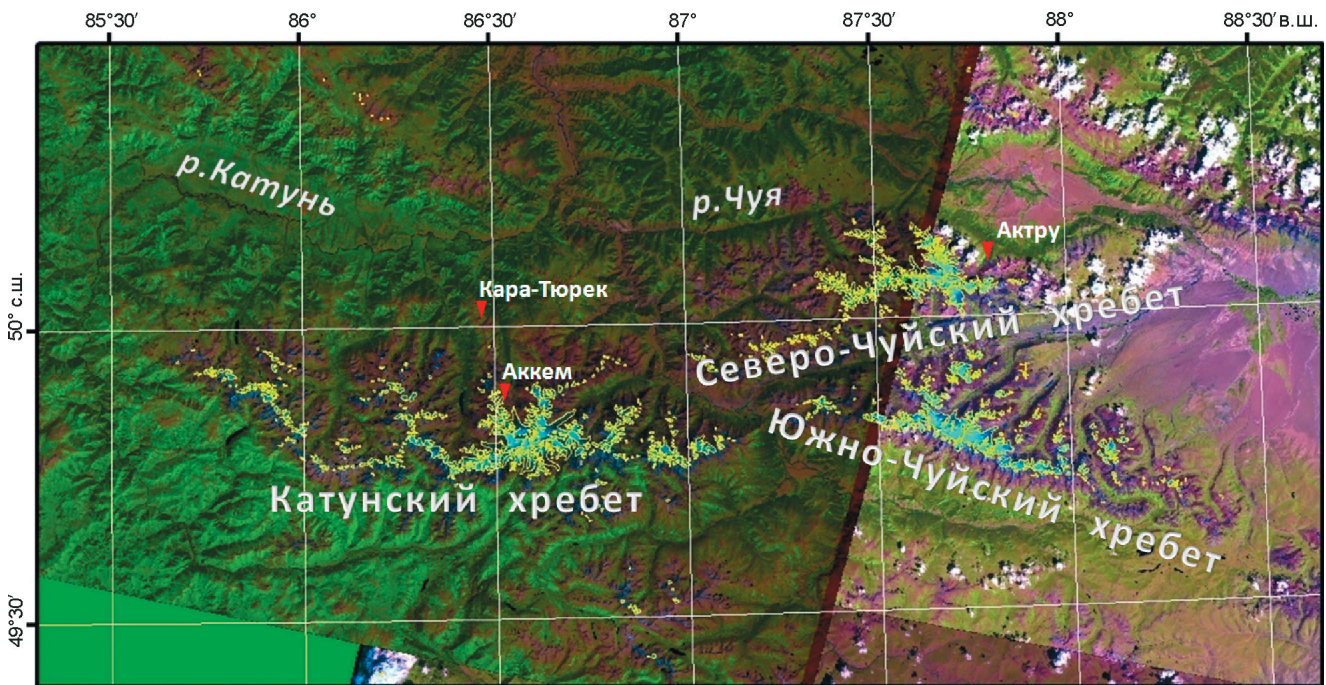


Рис. 1. Район исследований — ледники Горного Алтая на космических снимках

Fig. 1. Research area — Glaciers of Gorny Altai on satellite images

трогов. Ледники по территории распределены неравномерно и группируются вокруг наиболее высоких горных вершин и массивов [1, 5, 6, 11].

Климат Алтая определяется тремя основными факторами: 1) положением в умеренных широтах Северного полушария (49–52° с.ш.); 2) господством западного переноса воздушных масс с Атлантики; 3) влиянием в зимнее время мощного азиатского антициклона с малооблачной морозной погодой. Средние летние температуры воздуха на метеостанции (ГМС) Аккем (2050 м) составляют 8,2 °С. Среднегодовые суммы осадков на ГМС Кара-Тюрек, Аккем и Актру, расположенных ближе всего к ледниковой зоне, составляют 470–540 мм. Количество осадков уменьшается с запада на восток. Высота границы питания на ледниках возрастает с 2200 до 3200 м. По расчётам [4], аккумуляция на высоте границы питания ледников уменьшается с 400 до 100 г/см².

Используемые данные и методы обработки

Предварительный анализ имеющихся материалов космической съёмки на территорию Катунского хребта показал, что её единовременное 100%-е покрытие обеспечивают космические снимки CORONA (сентябрь 1968 г.) с геометрическим разрешением 3 м и ALOS PRISM (13 августа 2008 г.) с разрешением 2,5 м. Поэтому они были исполь-

зованы при создании двух разновременных слоёв границ ледников — 1968 и 2008 гг. — для оценки изменений, произошедших за этот период. Съёмки ASTER 2000–2012 гг. охватывали всю территорию, но не обеспечивали её единовременное покрытие. Поскольку они уже прошли предварительную обработку в архиве NASA LP DAAC (Land Processes Distributed Active Archive Center), где были орторефлектифицированы в картографической проекции UTM WGS 84, мы применяли эти изображения в качестве основы для трансформирования и совмещения разновременных снимков CORONA, ALOS PRISM и Landsat, а также источника получения дополнительной информации о состоянии ледников.

Векторизация границ ледников выполнена вручную с использованием программы GLIMSView по чёрно-белым панхроматическим снимкам ALOS PRISM и CORONA. Съёмка проведена в безоблачную погоду в конце периода абляции до начала выпадения нового снега, поэтому погрешностями дешифрирования, обусловленными влиянием облачности и сезонного снежного покрова, можно пренебречь. В тех случаях, когда дешифрирование границ ледников осложняли тени от горного обрамления, применялась функция выравнивания контраста программы ENVI 4.3. При определении положений ледоразделов (особенно для ледников массива горы Белуха) использовалась цифровая мо-

Таблица 1. Сокращение ледников Катунского хребта в зависимости от их площади с 1952 по 2008 г.

Площадь ледника, км ²	S_{1952} , км ²	S_{1968} , км ²	S_{2008} , км ²	$S_{1952} - S_{2008}$, км ² /%	$S_{1968} - S_{2008}$, км ² /%	Число ледников
0,5–1	47,9	39,7	29,4	18,5/38,6	10,3/25,8	57
1–2	59,5	46,7	35,8	23,7/39,8	10,8/23,2	34
2–5	68,5	64,3	51,9	16,6/24,2	12,3/19,2	18
> 5	62,8	73,3	67,79	–5,0/–7,9	5,5/7,5	6
<i>Итого</i>	238,7	223,9	185	53,7/22,5	38,9/17,4	115
< 0,5	42,8	40,6	22,9	19,9/46,5	17,7/43,5	206
<i>Всего</i>	281,5	264,5	207,95	73,6/26,1	56,6/21,4	322

дель рельефа ASTER GDEM V2. Величина погрешности $RSME_{xy}$ при совмещении ALOS PRISM и ASTER не превышала 6,7 м. Ошибка при оцифровке положений границ ледников, обусловленная погрешностью регистратора, составила $\pm 3,3\%$. Аналогичная погрешность при совмещении снимков CORONA и ASTER равна $\pm 3,6\%$. Ошибка, обусловленная субъективным фактором, принята равной $\pm 1,7\%$ с учётом опыта предыдущих работ [9, 12].

На поверхности ледников Горного Алтая широко распространён моренный покров. На отдельных ледниках его площадь колеблется от 3 до 20% и может быть причиной ошибок, возникающих при определении положения их границ. Выполненное нами ранее сравнение результатов дешифрирования границ ледников по снимкам ASTER и данным наземных измерений показало, что наличие моренного покрова дополнительно вносит $\pm 0,3\%$ в погрешность при оценке изменений площадей ледников [10]. С учётом более высокого пространственного разрешения снимков CORONA и ALOS PRISM можно принять эту величину как максимально возможную. В результате, с учётом погрешности от совмещения со снимками ASTER, итоговая величина среднеквадратичной погрешности при подсчёте площадей составила $\pm 3,7\%$ для снимков ALOS PRISM и $\pm 4,0\%$ для снимков CORONA.

Данные Каталога ледников СССР использовались в качестве исходной информации для количественной оценки изменений ледников Горного Алтая за полувековой период. Оценку величины погрешности при сравнении данных Каталога с результатами обработки космических снимков ранее мы выполнили на примере ледников Северо- и Южно-Чуйского хребтов. Она не превысила 5,8% [12]. Для анализа изменений климатических условий использовались ряды наблюдений среднемесячных температур и осадков за последние десятилетия на ГМС Кара-Тюрек (2600 м), Аккем (2050 м) и Актру (2025 м).

Результаты и обсуждение

Оценка изменений площади ледников. По данным Каталога ледников СССР, при составлении которого использовались аэрофотоснимки 1952 г., на Катунском хребте зафиксировано 336 ледников общей площадью 281,5 км² (без учёта ледников меньше 0,1 км²) [3]. Результаты дешифрирования снимков CORONA показали, что к 1968 г. число ледников сократилось до 322. При этом 14 ледников суммарной площадью 2,1 км² исчезли, а площадь оставшихся сократилась до 264,6 км². К 2008 г., по результатам обработки снимков ALOS PRISM, на Катунском хребте осталось 313 ледников общей площадью 208 км² (ещё девять ледников суммарной площадью 1,36 км² на снимках не обнаружены). Таким образом, если использовать данные Каталога, то с 1952 по 2008 г. площадь всей ледниковой системы Катунского хребта сократилась на 73,3 км² (26,1%). Вклад каждого конкретного ледника в эту цифру зависит от его размеров. Для оценки этого вклада подсчитано распределение сокращения по пяти группам ледников (табл. 1).

В пределах исследуемой территории наблюдается значительная изменчивость в отступании ледников (вплоть до полного исчезновения) в зависимости от их морфологического типа, размера и локальных особенностей условий питания. Как уже отмечалось, вклад ледников разных размеров в общую величину сокращения оценён по группам, для каждой из которых определено сокращение в км² и %. Из табл. 1 и рис. 2 видно, что максимально сократились ледники, относящиеся к группе с площадью менее 0,5 км² (43,5%), минимально – к группе с площадью более 5 км² (7,5%); на 23,2% сократились ледники площадью 1–2 км, что соответствует изменению ледниковой системы в целом – 21,4%.

Из табл. 1 следует, что сравнение с Каталогом не вполне адекватно характеризует изменение площади ледников за прошедший период, так как для ледников с площадью больше 5 км² величина

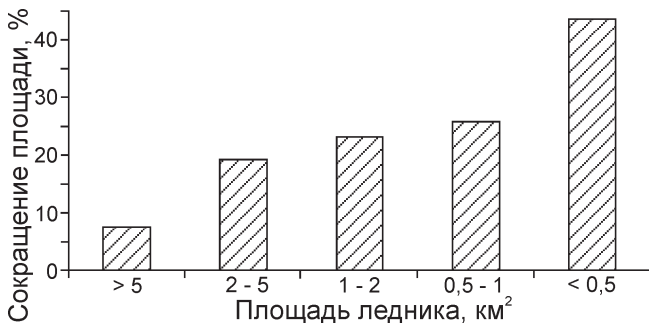


Рис. 2. Сокращение площади ледников Катунского хребта разного размера с 1968 по 2008 г.

Fig. 2. Shrinkage of glaciers of different sizes in the Katun Ridge for the period 1968–2008

на сокращения получилась с отрицательным знаком, хотя наземными наблюдениями подтверждается непрерывное уменьшение их площади [7]. Возможные причины этого – неоднородность используемых массивов данных или различия в методах определения границ ледников. Доля таких ледников в общей площади и величина отклонений слишком велики, чтобы ими пренебрегать. Поэтому на первом этапе исследований для корректной оценки и анализа происходящих изменений были использованы результаты обработки данных 1968 и 2008 гг. по снимкам CORONA и ALOS PRISM. Они обеспечивают однородные массивы исходных данных и достаточно представительный 40-летний интервал наблюдений (см. табл. 1).

Оледенение Катунского хребта представлено шестью морфологическими типами ледников, которые по-разному отреагировали на изменения климата, произошедшие за 40 лет (табл. 2). Максимальное относительное сокращение площади наблюдаются у висячих, карово-висячих и каровых ледников – более 40%. Меньше всех сократились долинные ледники – 13,2%. При их относительно небольшом числе, они составляют более 50% всей площади оледенения и среди них находятся самые крупные ледники Катунского хребта: Сапожникова (21,45 км²), Родзевича (13,81 км²), Братьев Троновых (13,39 км²). Однако в абсолютном выражении именно у них, благодаря крупным размерам, наблюдаются максимальные сокращения площади, достигающие нескольких квадратных километров (табл. 3). В среднем, долинный ледник уменьшился на 0,5 км², в то время как каровый ледник потерял 0,1 км². При необходимости организации мониторинга состояния ледниковой системы наземными методами относительное сокращение площади можно использовать в качестве критериев опре-

Таблица 2. Сокращение числа (числитель) и площади ледников (знаменатель), км², Катунского хребта в зависимости от их морфологического типа с 1968 по 2008 г.

Морфологический тип	1968 г.	2008 г.	ΔS , %
Долинные	37/143,31	37/124,37	13,2
Карово-долинные	80/67,96	79/50,81	25,2
Каровые	147/36,07	142/21,63	40,0
Карово-висячие	18/4,63	17/3,03	34,6
Висячие	38/5,50	35/3,08	44,0
Котловинные	2/7,03	2/5,02	28,5
<i>Всего</i>	322/264,5	312/207,9	21,4

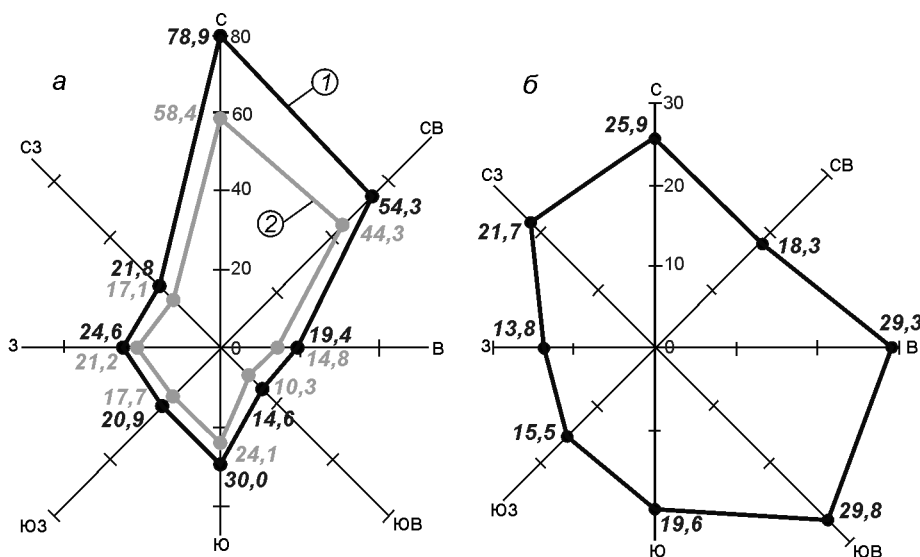
деления степени репрезентативности ледника для конкретной ледниковой системы. В данном случае для Катунского хребта из табл. 1 и 2 следует, что такими могут оказаться карово-долинные ледники площадью 2–3 км², величина относительного сокращения которых ближе всего к сокращению ледниковой системы в целом.

Распределение площади ледников по экспозициям (рис. 3, а), по-видимому, отражает общий характер условий питания ледников, обусловленный сложным взаимодействием западного и юго-западного переноса воздушных масс и орографией этой горной страны. Явно выраженная асимметрия в распределении площади ледников связана с различиями в рельефе северного и южного макросклонов Катунского хребта – наличием разветвлённой сети высоких и протяжённых северных отрогов, обеспечивающих необходимый для существования ледников субстрат и перехват влаги. Распределение сокращения площадей ледников по экспозициям (см. рис. 3, б) показывает, что минимальные сокращения наблюдаются на ледниках, ориентированных навстречу влагонесущим потокам. Ледники северной и северо-восточной экспозиций, находящиеся в ветровой тени, максимально уменьшили свою площадь.

Рассмотренные показатели характеризуют изменение площади ледниковой системы Катунского хребта в целом. Однако она имеет значительную протяжённость – более 130 км – в широтном направлении, и неоднородность условий существования ледников обусловлена не только сложной орографией, но и высотой рельефа. Наиболее высокая, восточная его часть, где находится массив горы Белуха (4506 м), служит серьёзным препятствием для влагонесущих воздушных потоков, что способствует формированию здесь мощного узла оледенения. Благодаря материалам съёмки ASTER 2012 г. на этот участок хребта, мы получили до-

Таблица 3. Сокращение площади наиболее крупных долинных ледников массива г. Белуха с 1968 по 2012 г.

Номер ледника в Каталоге WGMS	Название ледника	S_{1968} , км ²	S_{2008} , км ²	S_{2012} , км ²	$\Delta S_{1968-2008}$, %	$\Delta S_{2008-2012}$, %
SU5A15105391	Сапожникова	21,45	20,20	20,12	5,8	0,4
SU5A15104205	Родзевича	13,81	12,83	12,67	7,1	1,2
SU5A15104013	Гейлера	10,22	9,29	9,08	9,1	2,0
SU5A15103122	Большой Берельский	7,52	6,64	6,18	11,7	6,2
SU5A15103116	Малый Берельский	6,89	5,85	5,65	15,1	2,8
SU5A15104189	Братьев Троновых	13,39	12,98	12,48	3,1	2,0

Рис. 3. Сокращение площади ледников Катунского хребта (км²) в зависимости от их экспозиции с 1968 по 2008 г.:

а – распределение площади ледников по экспозициям в 1968 (1) и 2008 г. (2); б – сокращение площади ледников разной экспозиции, %

Fig. 3. Shrinkage of glaciers in the Katun Ridge depending on their exposure for the period 1968–2008, km²: а – distribution of glaciers area on expositions in 1968 (1) and 2008 (2); б – distribution of glaciers area reduction on expositions, %

полнительную возможность оценить динамику границ ледников этого района.

Для 60 ледников, попавших в зону перекрытия трёх одновременных космических снимков, определено положение концов ледников на три срока – 1968, 2008 и 2012 г. (рис. 4) и выполнена оценка изменения площади ледников, которая составила соответственно 145,43, 122,29 и 118,33 км². Поскольку в подсчёт попадают крупные долинные ледники массива горы Белуха, показатель сокращения в этом районе за 1968–2008 гг. (15,9%) существенно отличается от общего по всему Катунскому хребту за эти годы (21,4%). Дополнительный временной интервал с 2008 по 2012 г., когда площадь этих ледников сократилась ещё на 2,7%, позволяет сравнить среднегодовые скорости её изменения. Если за 1968–2008 гг. скорость сокращения площади ледников составила 0,58 км² (0,40%) в год, то за последние четыре года она увеличилась до 0,99 км² (0,68%) в год – более чем в полтора раза. Такой рост скорости сокращения свидетельствует об ускорении процессов таяния ледников, которое отмечается в последнее десятилетие и в других горных районах – на Кавказе, Полярном Урале, горах Сунтар-Хаята [2, 10, 14].

Различия в динамике границ шести наиболее крупных ледников массива горы Белуха демонстрируют влияние на этот процесс особенностей их строения и экспозиции (см. табл. 3, рис. 4). Все эти ледники относятся к долинному типу, а диапазон сокращения их площади за весь период наблюдений весьма велик – от 5,1 до 17,9%. Площади ледников сокращаются в основном за счёт отступления языков ледников. Наибольшие величины отступления характерны для Большого и Малого Берельских ледников. Области их питания представляют собой крутостенные цирки, расположенные в «ветровой тени» массива горы Белуха, поскольку основные влагонесущие потоки приходят с запада. Дополнительный отрицательный эффект создаёт их южная экспозиция, увеличивающая интенсивность процессов таяния.

Ледник Братьев Троновых находится в более благоприятных условиях, благодаря ориентации на запад и наличию обширной области питания – Западного плато Белухи. Язык ледника покрыт мощным моренным чехлом, замедляющим таяние. Отступление ледника за прошедшие 44 года невелико, всего 0,91 км² (5,1%). На втором месте –

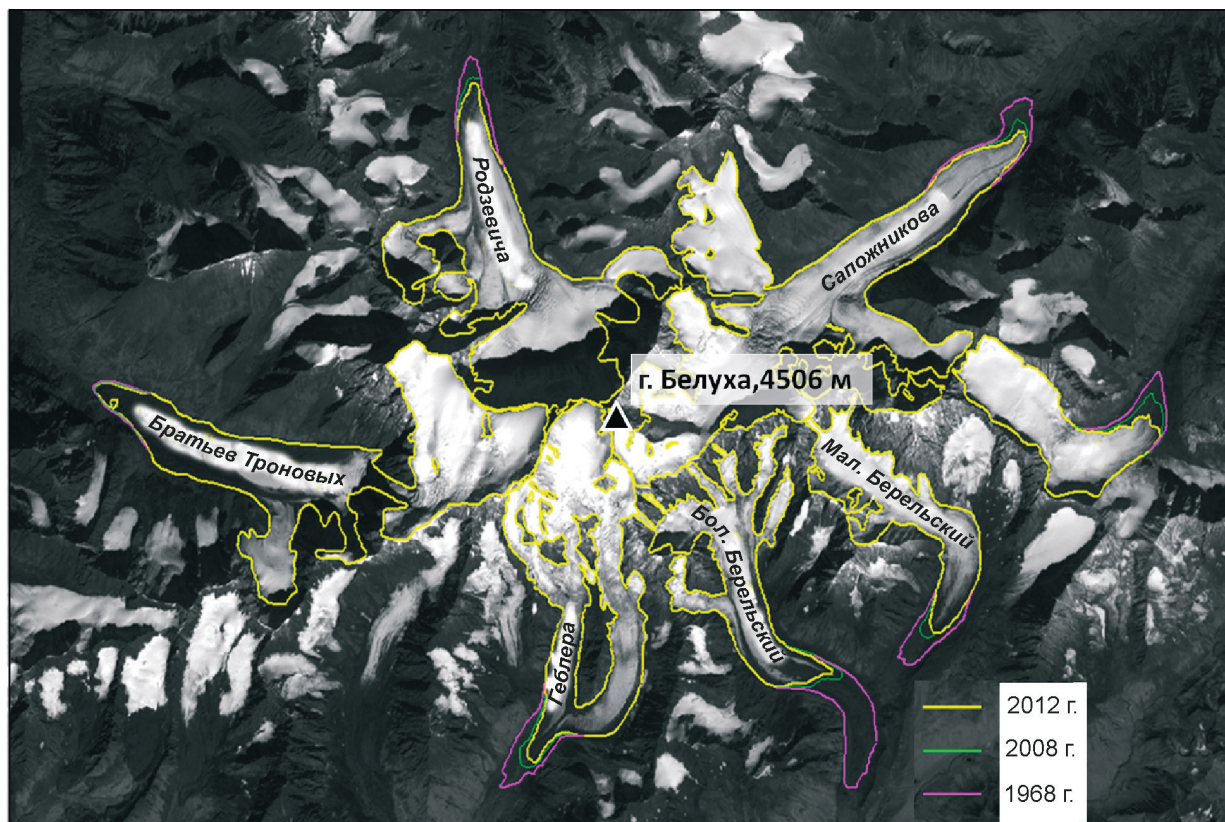


Рис. 4. Изменение положений границ наиболее крупных ледников массива горы Белуха с 1968 по 2012 г.
Fig. 4. Changing the boundaries of the largest glaciers on the Belukha Massif from 1968 to 2012

1,25 км² (6,2%) – ледник Сапожникова, для которого характерна самая большая площадь питания по сравнению с остальными ледниками массива. Он расположен на высотах от 3000 до 4000 м и примыкает к плато Белухи с востока. Это обстоятельство, по-видимому, можно считать основным фактором его устойчивости в условиях современных изменений климата.

У ледника Родзевича, ориентированного на север, областью питания фактически служит 1000-метровая стена Белухи, которая обеспечивает регулярное поступление снежных масс на дно цирка и защищает его с юга от прямого солнечного воздействия. Эффективность этого «механизма» определила относительно невысокую скорость сокращения в предыдущие десятилетия, однако в последние годы скорость возросла почти вдвое (см. табл. 3). Морфология и ориентация на юг неблагоприятны для ледника Геблера, и у него также отмечается двукратное увеличение скорости сокращения площади за последние годы.

Если принять во внимание то обстоятельство, что площадь ледника Сапожникова в 1968 г. по снимкам CORONA составляла 21,45 км² вместо

13,2 км² по данным Каталога ледников СССР на 1952 г., то можно предположить, что он был измерен в Каталоге неверно, и вернуться к оценке возможности использования данных Каталога в качестве исходной информации для расширения временного интервала, используемого для оценки произошедших изменений. В группу ледников площадью более 5 км², к которой относится ледник Сапожникова, входит всего шесть ледников. В 1968 г. их площадь составляла около 28% всей площади ледников Катунского хребта. При сравнении данных Каталога для других ледников этой группы с данными 1968 г. столь значительных несоответствий не установлено. Если учесть, как было показано ранее, устойчивость ледника Сапожникова к сокращению, то можно принять в качестве допущения неизменность его площади в период с 1952 по 1968 г. и ввести в расчёты соответствующую поправку. Увеличение площади ледника на 8,4 км² позволяет устранить очевидное несоответствие, возникшее в табл. 1 при оценке сокращения в группе ледников площадью более 5 км².

В окончательном виде результаты изменения площади за этот период даны в табл. 4. Однако это

Таблица 4. Сокращение объёма (числитель) и площади (знаменатель) ледников Катунского, Северо- и Южно-Чуйского хребтов с 1952 по 2008 г.

Параметры	Катунский хребет	Северо- и Южно-Чуйский хребты
$V_{1952}, \text{ км}^3 / S_{1952}, \text{ км}^2$	15,02/289,9	17,37/336,0
$V_{1968}, \text{ км}^3 / S_{1968}, \text{ км}^2$	13,67/264,5	Нет свед.
$V_{2004}, \text{ км}^3 / S_{2004}, \text{ км}^2$	Нет свед.	13,17/254,5
$V_{2008}, \text{ км}^3 / S_{2008}, \text{ км}^2$	10,80/208,0	12,70/245,1
$\Delta V_{1968-2008}, \% / \Delta S_{1968-2008}, \%$	20,5/21,4	Нет свед.
$\Delta V_{1952-2004}, \% / \Delta S_{1952-2004}, \%$	Нет свед.	24,1/24,4
$\Delta V_{1952-2008}, \% / \Delta S_{1952-2008}, \%$	28,1/28,3	26,9/27,1

не означает, что площади ледников других размеров, хотя и в меньшей степени, лишены погрешностей. Аналогичная ситуация была рассмотрена на примере данных Каталога по Северо- и Южно-Чуйским хребтам, где при сравнении с данными аэрофотосъёмки 1952 г. погрешность не превысила 5,8% [13]. Учитывая существующие сходства в исходных материалах и методах их обработки для данных Каталога на эти районы, можно допустить такую же величину погрешности и для ледников Катунского хребта.

Временной интервал оценки сокращения для Северо- и Южно-Чуйских ледников был ограничен 2004 г. в связи с отсутствием более поздних кондиционных космических снимков ASTER. К 2004 г. сокращение ледников площадью менее 0,1 км² составило здесь 24,4% [9]. Для удобства сравнения с Катунскими ледниками продлим временной интервал до 2008 г. Его увеличение на относительно небольшой промежуток времени – 4 года – позволяет использовать для этой цели линейную интерполяцию с помощью среднегодовой скорости сокращения за предыдущий период. За прошедшие 52 года её величина составила 1,57 км² в год. Если учесть, что в последнее десятилетие наблюдается её ускорение как минимум в 1,5 раза, то к 2008 г. Северо- и Южно-Чуйские ледники должны были сократиться ещё на 9,42 км².

Как отмечалось ранее [9], ошибки определения площадей в Каталоге резко возрастают для ледников размерами менее 0,5 км². В то же время это – самая многочисленная группа ледников, составляющая 64% всех ледников Катунского и 51% всех ледников Северо- и Южно-Чуйского хребтов. Их вклад в общую площадь ледников этих хребтов примерно одинаков и составляет около 15%. Погрешности определения их площадей в Каталоге могут существенно влиять на относительное сокращение площади всех ледников. Чтобы оценить

этот вклад, мы выполнили расчёт без учёта ледников этой группы. Для Катунского хребта сокращение без учёта ледников площадью менее 0,5 км² составило 22,5%, а для Северо- и Южно-Чуйского хребтов – 21,0%. Расчёты, выполненные с учётом ледников всех групп, показали, что с 1952 по 2008 г. ледники Катунского хребта сократились на 28,3%, а Северо- и Южно-Чуйских хребтов – на 27,1% (см. табл. 4). Таким образом учёт ледников площадью менее 0,5 км² добавляет к величине относительного сокращения площади порядка 6%.

Оценка изменений объёма ледников. Полученные значения площадей ледников использованы для расчёта их объёмов в соответствующие годы. Для этого применены корреляционные зависимости между площадью и объёмом ледников, полученные по данным наземного радиолокационного зондирования на 131 леднике в трёх основных хребтах Центрального Алтая. В Катунском хребте прозондирован 41 ледник, в Северо-Чуйском – 43 ледника, в Южно-Чуйском – 47 ледников. Общая площадь исследованных ледников составила 30,6% всей рассматриваемой площади оледенения. Корреляционные зависимости получены для долинных, карово-долинных, каровых, карово-висячих и висячих ледников. Кроме того, получена общая зависимость для всех прозондированных ледников [8]. Все они были аппроксимированы соотношениями в виде степенных функций (рис. 5). Высокая степень корреляции фактических и расчётных данных позволила с помощью этих зависимостей определить объёмы льда в ледниках и детализировать их распределение по отдельным хребтам и морфологическим типам. Так, в долинных ледниках сосредоточено 59% льда, в карово-долинных – 21%, в каровых – 11%, во всех остальных – 9%. С помощью этих зависимостей подсчитан также объём ледников в 1952 г. по данным Каталога. Результаты расчётов показали, что к 2008 г. ледники Катунского хребта потеряли 4,22 км³ (28,1%) льда (см. табл. 4). Объём ледников Северо- и Южно-Чуйских ледников за этот же период сократился на 4,67 км³ (26,9%).

Заключение

Выполненные исследования позволили оценить изменения площади и объёма ледников Горного Алтая с 1952 по 2008 г. Площадь ледников сокращалась в течение всего этого периода. К 2008 г. ледники Катунского, Северо- и Южно-Чуйского хребтов потеряли 172,4 км² своей площади. Суммарное для этих ледников сокращение объёма составило 8,9 км³, или 27,4%. Сравнение космических снимков 2004 и

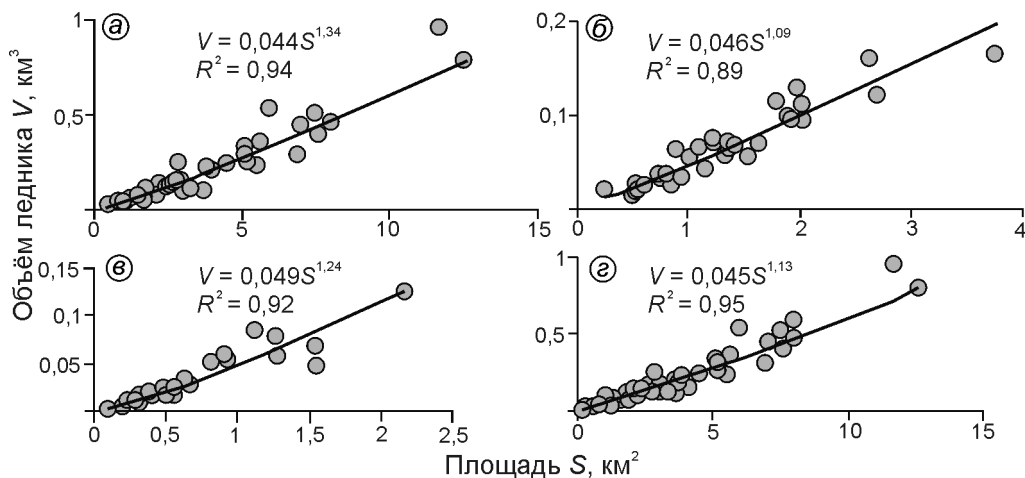


Рис. 5. Корреляционные зависимости между площадями S и объёмами V ледников разных морфологических типов. R^2 – достоверность аппроксимации; типы ледников: a – долинные; $б$ – карово-долинные; $в$ – каровые; $г$ – все типы
Fig. 5. Correlation between the glaciers area S and volume V of different morphological types. R^2 – approximation accuracy; types of glaciers: a – valley; $б$ – cirque-valley; $в$ – corrie; $г$ – all types

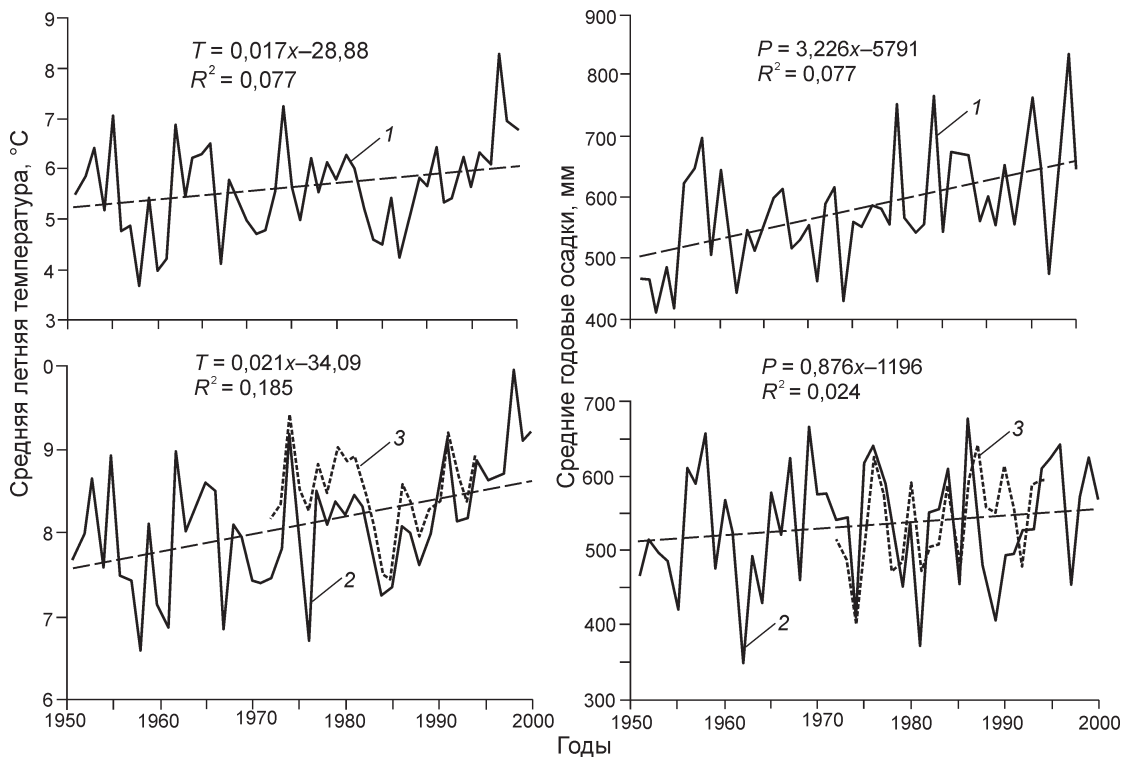


Рис. 6. Изменения средних летних температур воздуха и средних годовых осадков по данным метеостанций: 1 – Кара-Тюрк (2600 м); 2 – Аккем (2050 м); 3 – Актру (2025 м)
Fig. 6. Changes of average summer temperatures and annual precipitation according to meteorological stations. 1 – Kara-Turek (2600 m); 2 – Akkeem (2050 m); 3 – Aktru (2025 m)

2012 г. с данными середины прошлого века позволя-
 ет сделать вывод об увеличении скорости сокра-
 щения ледников в последнее десятилетие в 1,5–2 раза.

Сокращение каждого конкретного ледника за-
 висит от сочетания факторов рельефа и климата,

определяющих его строение, размер, высотный диа-
 пазон и ориентацию относительно влагонесущих
 воздушных потоков. Даже для крупных долинных
 ледников массива горы Белуха он лежит в диапазо-
 не 3,1–15,1 km^2 за период с 1968 по 2012 г. Анализ

распределения сокращения ледников по размерам и морфологическим типам позволяет предположить, что к наиболее репрезентативным для данной ледниковой системы относятся долинные или карово-долинные ледники с площадью от 1 до 5 км².

Средняя летняя температура и суммы осадков за последние десятилетия по данным ГМС Кара-Тюрек (2600 м), Аккем (2050 м) и Актру (2025 м), расположенных в непосредственной близости от ледниковой зоны, непрерывно возрастают (рис. 6) [15]. Аналогичная ситуация наблюдается в настоящее время и в других горных районах (Кавказ, Полярный Урал, невулканические районы Камчатки), где рост летних температур не компенсируется увеличением осадков. Вероятно, и в данном случае рост летних температур — определяющий фактор сокращения ледников Горного Алтая.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ-РГО №13-05-41195 и Международного проекта GLIMS, в рамках которого получены материалы современной космической съёмки.

Литература

1. Атлас снежно-ледовых ресурсов мира. М.: изд. Российской академии наук, 1997. 392 с.
2. Галанин А.А., Лыткин В.М., Федоров А.Н., Кадота Т. Сокращение ледников гор Сунтар-Хаята и методические аспекты его оценки // Лёд и Снег. 2013. № 4 (124). С. 30–42.
3. Каталог ледников СССР. Т. 15. Вып. 1. Ч. 4. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 79 с.
4. Кренке А.Н. Массообмен в ледниковых системах на территории СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 288 с.
5. Нарожный Ю.К. Ресурсная оценка и тенденции изменения ледников в бассейне Актру (Алтай) за последние полтора столетия // МГИ. 2001. Вып. 90. С. 117–125.
6. Нарожный Ю.К., Никитин С.А. Современное оледенение Алтая на рубеже XXI века // МГИ. 2003. Вып. 95. С. 93–101.
7. Нарожный Ю.К., Никитин С.А., Бородавко П.С. Ледники горного узла Белухи (Алтай): массообмен, динамика и распределение запасов льда // МГИ. 2006. Вып. 101. С. 117–127.
8. Никитин С.А. Закономерности распределения ледниковых льдов в Русском Алтае, оценка их запасов и динамики // МГИ. 2009. Вып. 107. С. 111–120.
9. Носенко Г.А., Хромова Т.Е., Муравьев А.Я., Нарожный Ю.К., Шахгеданова М.В. Использование исторических данных и современных космических изображений для оценки изменений ледников на Алтае // Лёд и Снег. 2010. № 2 (110). С. 19–25.
10. Носенко Г.А., Хромова Т.Е., Роттаева О.В., Шахгеданова М.В. Реакция ледников Центрального Кавказа в 2001–2010 гг. на изменения температуры и осадков // Лёд и Снег. 2013. № 1 (121). С. 26–34.
11. Тронов Б.В. Каталог ледников Алтая // Изв. РГО. 1925. Т. 57. Вып. 2. С. 107–159.
12. Paul F., Barrand N.E., Baumann S., Berthier E., Bolsh T., Casey K., Frey H., Joshi S.P., Kononov V., Bris R. Le, Moe N.L., Nosenko G., Nut C., Pope A., Racoviteanu A., Rastner P., Raup B., Scharer K., Steffen S., Winsvold S. On the accuracy of glacier outlines derived from remote-sensing data // Annals of Glaciology. 2013. № 54 (63). P. 171–182. doi:10.3189/2013AoG63A296.
13. Shahgedanova M., Nosenko G., Khromova T., Muraveyev A. Glacier shrinkage and climatic change in the Russian Altai from the mid 20th century: An assessment using remote sensing and PRECIS regional climate model // Journ. of Geophys. Research. 2010. V. 115. D16107. doi:10.1029/2009JD012976.
14. Shahgedanova M., Nosenko G., Bushueva I., Ivanov M. Changes in area and geodetic mass balance of small glaciers, Polar Urals, Russia, 1950–2008 // Journ. of Glaciology. 2012. V. 58. № 211. P. 953–964.
15. Surazakov A.B., Aizen V.B., Aizen E.M., Nikitin S.A. Glacier changes in the Siberian Altai Mountains, Ob river basin (1952–2006) estimated with high resolution imagery // Environmental Research Letters. № 2. 045017. 2007. 7 p.

Summary

During the period from 1952 to 2008, glaciers of Mountain Altai were investigated that allowed estimating current changes in their areas and volumes. Areas of glaciers shortened during the whole this period. By 2008, glaciers of the Katun, North and South Chu ranges did lost 172.4 km² of their area, or 27.4%. Total decrease of their volumes amounted to 8.8 km³. Comparison between space images of 2004 and 2012 with data for a middle of the last century made it possible to make a conclusion that for the last decade the rate of the glacier shortening increased by a factor 1.5–2. Contraction of each individual glacier depends on a combination of both the relief and climate factors which determine its structure, size, altitude range, and orientation relative to air flows carrying moisture. For the period from 1968 to 2012, even for large valley glaciers of the mountain Belukha massif the contraction falls within the range 3.1–15.1 km². Analysis of distribution of the glacier contraction by sizes and morphological types allows the supposition that the valley or corrie-valley glaciers with their areas from 1 to 5 km² are the most representative ones for this glacier system. Data of meteorological stations Kara-Tyurek (2600 m), Akkem (2050 m), and Aktru (2025 m) located in the immediate vicinity to this glacier zone show continuous rise of summer air temperatures and the precipitation increasing. Nowadays, similar situations take place in other mountain regions (Caucasus, Polar Urals, non-volcanic areas of the Kamchatka Peninsula) where summer temperature rise is not compensated by increase of precipitation. It is probable that in such case the summer temperature rise is the main factor of shortening of the Mountain Altai glaciers.