Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 2, с. 81–86 **http://www.izdatgeo.ru**

УДК 551.32

КОЛЕБАНИЯ ЛЕДНИКА МАЛЫЙ АКТРУ (РУССКИЙ АЛТАЙ) ЗА ПЕРИОД ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ С 1952 ПО 2013 ГОД

В.П. Галахов, С.Ю. Самойлова, А.А. Шевченко, Р.Т. Шереметов*

Институт водных и экологических проблем СО РАН,
656038, Барнаул, ул. Молодежная, 1, Россия; galahov@iwep.ru
** Институт экологии человека СО РАН, 650065, Кемерово, Ленинградский пр., 10, Россия*

Приведены результаты инструментальных наблюдений на леднике Малый Актру (Центральный Алтай, Северо-Чуйский хребет) за 1952–2013 гг. На основе материалов прошлых лет (топографические карты, наблюдения за составляющими баланса и отступанием языка ледника) и полевых исследований 2011–2013 гг. выполнена оценка изменений объема, площади и отступания языка ледника за данный период. Сокращение языка и изменение объема ледника происходило с разной интенсивностью, причем в 1952–1961 и 1983–1990 гг. на фоне продолжающегося отступания языка ледника его объем увеличивался. Скорость изменения объема ледника хорошо согласуется со средней летней температурой ледниковой зоны Алтая. В последние 20 лет темпы деградации ледника значительно увеличились: так, скорость сокращения языка выросла более чем в 3,5 раза, площадь уменьшилась на 12 %. Очевидно, это связано с резким ростом температуры: по данным ГМС Каратюрек, средняя летняя температура за последние 20 лет выросла более чем на градус по сравнению с предыдущим периодом.

Русский Алтай, ледник Малый Актру, отступание языка ледника, изменение объема ледника

FLUCTUATION OF MALY AKTRU GLACIER (RUSSIAN ALTAI) FOR THE PERIOD OF INSTRUMENTAL OBSERVATIONS FROM 1952 TO 2013

V.P. Galakhov, S.Yu. Samoilova, A.A. Shevchenko, R.T. Sheremetov*

Institute of Water and Environmental Problems, SB RAS,
656038, Barnaul, Molodezhnaya str., 1, Russia; galahov@iwep.ru
** Institute of Human Ecology, SB RAS, 650065, Kemerovo, Leningradski av., 10, Russia*

The results of instrumental observations on Maly Aktru glacier (Central Altai, North-Chuisky Ridge) for 1952–2013 have been presented. The changes in the glacier terminus, volume, area, and retreat during the observation period have been estimated based on the materials of the previous years (topographic maps, observation of balance components and retreat of glacier terminus) and field studies in 2011–2013. The terminus reduction and the change in glacier volume occurred with varying intensity. In the periods of 1952–1961 and 1983–1990 the glacier volume increased on the background of the glacier terminus contraction. The rate of volume change correlates well with the average summer temperature of the glacial zone of the Altai. During the last 20 years, the rate of the glacier degradation increased significantly, in particular, the rate of terminus reduction grew by more than 3.5 times and its area decreased by 12 %. Obviously, this is due to a sharp rise in temperature. According to Karaturek hydrometeostation, the average summer temperature over the last 20 years has increased by more than one degree as compared to the previous period.

Russian Altai, Maly Aktru glacier, recession of terminus, the change of glacier volume

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее простым способом наблюдения за колебаниями ледников является фиксация положения конца языка ледника относительно постоянного репера. Однако на интенсивность отступания языков ледников, кроме изменений ледового баланса, сильно влияет скорость реакции ледника, которая может составлять несколько десятилетий [*Хеберли, Хельцле, 1997; Галахов, 2005*]. Поэтому наиболее объективным и информативным показателем колебаний ледников служит изменение их массы или объема [*Hagedorn, 2004*]. Его можно определить с помощью ежегодных наблюдений за балансом ледника либо по изменению площади и высоты поверхности, полученному путем совмещения крупномасштабных топографических карт ледника, составленных в разные годы. На основе инструментальных наблюдений за ледниками бассейна Актру исследованы колебания языка ледника Малый Актру и динамика его объема и проанализирована связь этих процессов с изменениями средней летней температуры ледниковой зоны Алтая.

© В.П. Галахов, С.Ю. Самойлова, А.А. Шевченко, Р.Т. Шереметов, 2015

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Горно-ледниковый бассейн Актру расположен в восточной части горного узла Биш-Иирду на северном склоне Северо-Чуйского хребта Алтайской горной области (рис. 1). В бассейне залегает семь ледников, основная площадь которых расположена в высотном интервале 3400–3200 м. Средняя многолетняя температура по гидрометеостанции (ГМС) Актру равна –5,2 °С, среднее количество осадков в бассейне оценивается примерно в 1000 мм, из них 75 % выпадает в теплый период [*Галахов, 1987*].

Малый Актру – долинный ледник в южной части бассейна. Современная площадь ледника около 2,5 км^2, область питания его залегает на высоте 3200–3100 м, язык спускается до отметок 2340 м.

ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Наблюдения за колебаниями языка ледника. Начало наблюдений за колебаниями языков ледников на Алтае связано с именем В.В. Сапожникова. В конце XIX–начале XX вв. им было зафиксировано положение концов наиболее крупных ледников, в том числе ледника Малый Актру (1911 г.). Наиболее длинный ряд наблюдений за языком ледника Малый Актру приводится в монографии В.П. Галахова и Р.М. Мухаметова [*1999*]. В 1998 г. топографическая съемка конца языка этого ледника была выполнена А.Г. Редькиным, она опубликована в работе [*Галахов, 2005, с. 120*]. Повторные топографические съемки в 2001 и 2004 гг. проведены А.Н. Назаровым [*Галахов, 2005, с. 121–122*]. В качестве реперной высотной отметки в обоих случаях использовалось устье р. Малая Актру. В 2011–2013 гг. сотрудниками Института водных и экологических проблем и Института экологии человека СО РАН выполнялись топографические работы на ледниках бассейна Актру: топографическая съемка конца ледника Малый Актру с привязкой к опорному реперу на площадке ГМС Актру и геодезическому знаку с высотной отметкой 1784,3 м, расположенному примерно в 10 км на северо-восток от метеостанции Актру. Кроме того, была выполнена планово-высотная привязка устья р. Малая Актру, репера под языком ледника Малый Актру (от которого проводились топосъемки 1998, 2001, 2004 гг.) и временного репера под языком ледника Левый Актру для оценки его отступания.

Съемка выполнялась с помощью одночастотной (L1) геодезической системы Leica SR20 с привязкой к опорным точкам в Балтийской системе высот. Обработка результатов измерений производилась с помощью поставляемого вместе с GPS

Рис. 1. Местоположение объекта исследований.

программного обеспечения GeoOffice, которое позволяет впоследствии экспортировать данные в системы GIS и CAD. Все последующие расчеты выполнялись в среде ArcGis.

Все имеющиеся материалы наблюдений за отступанием языка ледника Малый Актру представлены в табл. 1.

Наблюдения за изменением объема ледника. В основе оценки – материалы инструментальных наблюдений за ледниками бассейна Актру в период Международного гидрологического десятилетия (МГД, 1966–1975 гг.), дальнейшего продолжения МГД – Международной гидрологической программы (МГП) и Программы наблюдений за колебаниями ледников.

Топографическая съемка ледниковой поверхности. Наиболее старые мелкомасштабные карты (1:25 000) бассейна Актру датированы 1961 г. Они построены на основе топографической привязки аэрофотосъемки, проводившейся с 1952 г. В 1978 г. Р.М. Мухаметовым совместно с сотрудниками МГУ была выполнена фототеодолитная съемка ледника Малый Актру. Обработка материалов съемки проводилась в МГУ под руководством Ю.Ф. Книжникова. Материалы аэрофотосъемки и фототеодолитной съемки позволили Р.М. Мухаметову построить карту изменения поверхности ледников Малый Актру и Купол с 1952 по 1978 г. [*Галахов, 1999*]. Карта поверхности ледника Малый Актру на 1978 г. приводится в Атласе снежно-ледовых ресурсов мира. Повторные фототеодолитные съемки ледников Малый Актру и Купол были выполнены Р.М. Мухаметовым в 1983 г. [*Атлас..., 1997*] и в 1990 г. Последняя опубликована после его смерти в приложении к монографии [*Галахов, 2005*].

Привязка, проецирование всех имеющихся картографических материалов, а также последующие расчеты выполнены в среде ArcGis с использованием модулей 3D и Spatial Analyst.

Радиолокационная съемка ледника. Оценка объема ледника Малый Актру ранее осуществлена С.А. Никитиным [*Галахов, 1987; Никитин и др., 1997*] с помощью радиолокационного зондирования. Первые подобные работы проводились в период МГД [*Галахов, 1987*].

Однако радиолокационная аппаратура была несовершенна, не приспособлена к прохождению труднодоступных участков, точность определения толщины в точке зондирования составляла ±5 м. В дальнейшем, по мере разработки портативной аппаратуры и уменьшения ошибки определения толщины ледника в точке, ледники бассейна Актру были исследованы повторно с топографической привязкой профилей зондирования и с бóльшим покрытием профилями площади ледников [*Никитин и др., 1997*]. Эти материалы приведены в табл. 2.

Таблица 1. **Сокращение языка ледника Малый Актру за период инструментальных наблюдений с 1961 по 2013 г. (по [*Галахов, 1999*], с дополнениями за 1991–2013 гг.)**

Период	Изменение за период, м	Изменение за год, м	Исследователь
1961–1962	8,0	8,0	И.Я. Олейник
1962–1963	4,1	4,1	Он же
1963–1964	5,0	5,0	»
1964–1965	4,0	4,0	»
1965–1966	+3,2	+3,2	»
1966–1967	1,2	1,2	»
1967–1968	2,5	2,5	»
1968–1969	1,1	1,1	»
1969–1970	3,0	3,0	»
1970–1971	7,0	7,0	»
1971–1972	2,0	2,0	»
1972–1973	3,0	3,0	»
1973–1974	8,5	8,5	»
1974–1975	5,0	5,0	М.А. Душкин
1975–1976	1,0	1,0	Он же
1976–1977	3,6	3,6	Р.М. Мухаметов
1977–1978	10,5	10,5	Он же
1978–1979	+1,0	+1,0	В.И. Шуров
1979–1980	1,0	1,0	Р.М. Мухаметов
1980–1981	2,0	2,0	В.И. Шуров
1981–1982	6,0	6,0	Он же
1982–1983	8,5	8,5	»
1983–1984	5,2	5,2	»
1984–1985	6,3	6,3	»
1985–1986	8,0	8,0	Р.М. Мухаметов
1986–1987	11,3	11,3	Он же
1987–1988	5,2	5,2	»
1988–1989	3,6	3,6	»
1989–1995	37,5	7,5	»
Итого (1961–1995)	**159,9**	**4,7**	
1991–1998	73,6	10,5	А.Г. Редькин
1998–2001	52,6	17,5	А.Н. Назаров
2001–2004	121,0	40,3	Он же
2004–2012	118,8	14,9	Р.Т. Шереметов, А.А. Коломийцев, А.А. Шевченко
2012–2013	13,0	13,0	Р.Т. Шереметов, А.А. Коломийцев, А.А. Шевченко
Итого (1991–2013)	**379,0**	**17,2**	

Таблица 2. **Материалы радиолокационного зондирования ледника Малый Актру**

Период зондирования	Площадь ледника, км^2	Объем ледника, км^3
1979–1982	2,85	0,264
1995–1996	2,84	0,245

Балансовые наблюдения. Наряду с материалами топографических и радиолокационных съемок поверхности ледника Малый Актру имеются данные о его ежегодном ледовом балансе за период МГД [*Галахов, 1987*] и частично МГП (1981–1986 гг.) [*Галахов, 2001*]. Составляющие ледового баланса ледника Малый Актру за период 1962–1999 гг. можно найти также в статье Ю.К. Нарожнего [*2001*]. Сравнение величин ледовых балансов по расчетам В.П. Галахова и Ю.К. Нарожнего показало их полную идентичность. С середины 1990-х гг. наблюдения за составляющими ледового баланса выполнялись эпизодически. Тем не менее данные о балансе ледника Малый Актру, а также ледников Водопадный и Левый Актру в 1988–2009 гг. опубликованы в "Glacier Mass Balance Bulletin". Эта информация, а также данные о балансе за 2012 г. представлены на сайте World glacier monitoring service [*2014*]. За 2010–2011 гг. данные отсутствуют.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Колебания языка ледника Малый Актру. Для того чтобы оценить отступание языка ледника в различные периоды времени, данные наблюдений сведены в табл. 3. Материалы предыдущих исследований (топографические съемки 1961, 1998, 2001, 2004 гг.) и съемки 2013 г. позволили получить плановую картосхему изменений положения языка ледника Малый Актру за последние 50 лет (рис. 2).

Изменение объема льда ледника Малый Актру. Прежде чем перейти к результатам, рассмотрим вопрос перевода изменений объема ледника Малый Актру в результирующую баланса. Ледниковый коэффициент (отношение площади фирнового бассейна к площади языка) ледника Малый Актру в среднем до 1996 г. составляет 1,5. Изменение объема вещества в леднике за периоды наблюдений происходит на языке ледника (измеренная плотность глетчерного льда равна 0,9 г/см^3). Плотность сезонного снега к концу периода абляции в фирновом бассейне (также на основе измерений) можно принять 0,45–0,50 г/см^3 [*Галахов, 1987*]. Кроме сезонного снега, изменение высоты поверхности ледника может происходить вследствие уплотнения фирна и постепенного перехода его в молодой лед (плотность 0,7 г/см^3) и собственно таяния фирна в годы с отрицательным балансом ледника. Таким образом, для перевода изменения объема ледника Малый Актру в изменение ледового баланса был принят коэффициент 0,8 (среднее с учетом площади языка ледника и фирнового бассейна, а также таяния собственно фирна, плотность которого существенно выше плотности сезонного снега [*Галахов, 1987*]). Материалы инструментальных наблюдений позволили выделить периоды топографических съемок (опубликованные карты) и оценить за эти периоды изменение объемов вещества в леднике Малый Актру (см. табл. 3).

Таблица 3. **Изменение объема ледника Малый Актру в 1952–1990 гг. по данным топографических съемок**

Период	Изменение толщины ледника, м	Изменение объема, км^3	Источник
1952–1978	+3,2	+0,009	[*Галахов, 1999*]
1978–1983	–0,5	–0,0015	[*Арефьев, 1996*]
1978–1990	+0,9	+0,0026	Съемка Р.М. Мухаметова в 1990 г.

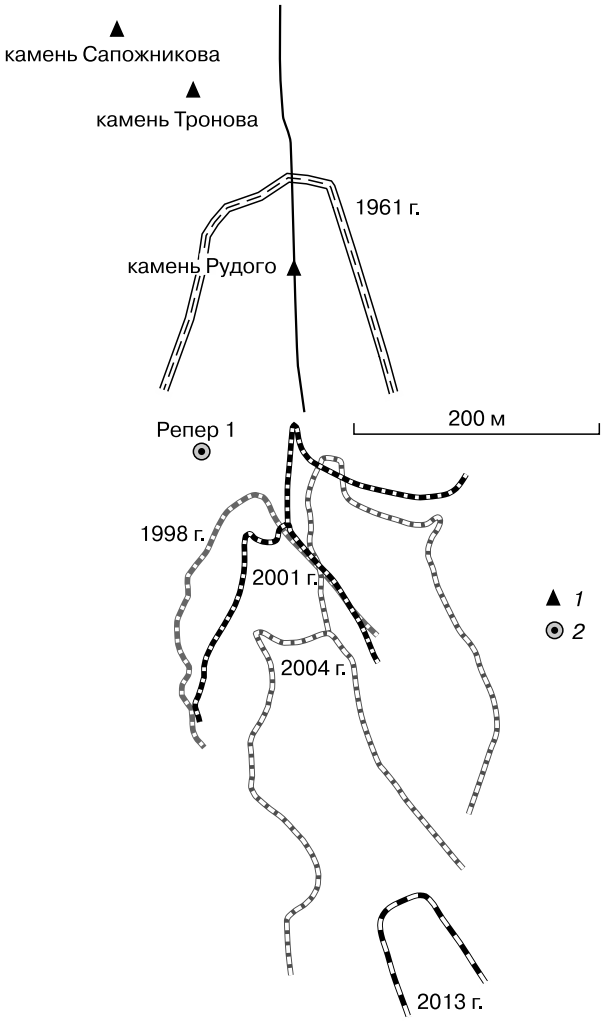

Рис. 2. Положение языка ледника Малый Актру в соответствующем году относительно основных реперов долины (по [*Галахов, 2005*], с дополнениями за 2013 г.).

Реперы: *1* – заложенные предыдущими исследователями; *2* – заложенный авторами при проведении топографических работ в 2013 г.

Таблица 4. **Скорость изменения ледового баланса ледника Малый Актру за период инструментальных наблюдений**

Период наблюдений	Средняя летняя температура по ГМС Каратюрек, °С	Скорость изменения ледового баланса, мм вод. экв./год	Материалы
1952–1978	5,5	+99	Топосъемка
1978–1983	5,9	–142	Наблюдения за ледовым балансом
1978–1983	5,9	–85	Топосъемка
1973–1986	5,7	–13	Наблюдения за ледовым балансом
1978–1990	5,5	+79	Наблюдения за ледовым балансом
1978–1990	5,5	+60	Топосъемка
1990–1996	5,9	–94	Наблюдения за ледовым балансом

С учетом всех имеющихся материалов попытаемся определить скорость изменения ледового баланса ледника Малый Актру в зависимости от средней летней температуры (июнь–август) в ледниковой зоне Алтая. Ближайшая к леднику метеостанция – Актру (2150 м). К сожалению, наблюдения были относительно кратковременными и нерегулярными: круглогодичные велись с 1957 по 1960 г., затем с 1960 по 1968 г. лабораторией гляциоклиматологии ТГУ проводились ежегодные сезонные наблюдения, с 1972 по 1994 г. метеостанция Актру работала в системе Росгидромета. Поэтому нами были использованы данные по ГМС Каратюрек (северный склон Катунского хребта, абсолютная высота 2605 м, наблюдения с 1939 г. до настоящего времени). Расстояние от нее до объекта исследований около 95 км, коэффициент корреляции температур летних месяцев по метеостанциям Каратюрек и Актру приближен к 1. Скорость изменения ледового баланса ледника Малый Актру за периоды между топографическими съемками представлена в табл. 4.

Полученные материалы по изменению поверхности ледника Малый Актру с 1952 по 1990 г. и результаты расчетов В.П. Галахова по составляющим ледового баланса позволяют оценить влияние термического режима на скорость изменения ледового баланса ледника Малый Актру. На рис. 3 приведен график связи средней летней температуры (ось абсцисс) и скорости изменения ледового баланса ледника Малый Актру (ось ординат). Связь статистически значимая (коэффициент корреляции $R^2 = 0{,}947 \approx 1$).

Таким образом, материалы наблюдений за ледовым балансом и поверхностью ледника Малый Актру позволили оценить изменение толщины и объема льда в леднике за период 1952–1990 гг. (рис. 4). Судя по скорости изменения ледового баланса и средней летней температуре, за последние 20 лет ледник Малый Актру должен был потерять в толщине не менее 10 м.

Анализ данных по балансу ледника Малый Актру за 1990–2009 гг., опубликованных в “Glasier Mass Balance Bulletin” и монографии [*Галахов, 1999*], показал, что с 1990 по 2012 г. баланс уменьшен на 5120 мм водного эквивалента (это соответствует потере слоя вещества толщиной примерно 6,5 м). Данные за 2010–2011 гг. в бюллетене отсутствуют, и эти годы не учитывались. Такое существенное расхождение требует проверки этих материалов независимыми данными. К сожалению, в настоящее время выполнить топографическую съемку современной поверхности ледника Малый Актру невозможно из-за большой крутизны, многочисленных трещин и камнепадов. Поэтому для построения ЦМР ледниковой поверхности в сентябре 2013 г. была выполнена стереоскопическая съемка со спутника WorldView-1, сейчас производится ее обработка. Если учесть, что объем ледника в 1961 и 1990 гг. был одинаковым (см. рис. 4), то сравнение ЦМР, построенной по результатам обработки стереопары и топографической карты 1961 г., позволит оценить изменение объема ледника за последние 23 года более корректно.

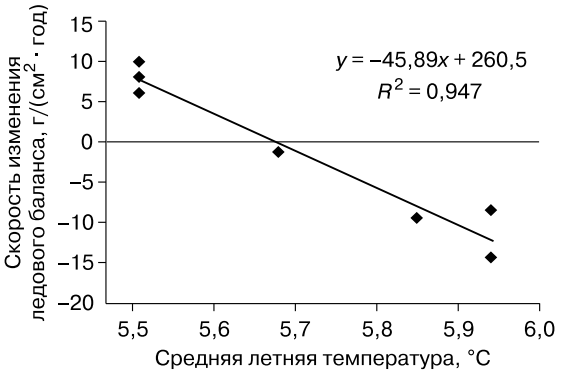

Рис. 3. Зависимость скорости изменения ледового баланса ледника Малый Актру от средней летней температуры на ГМС Каратюрек.

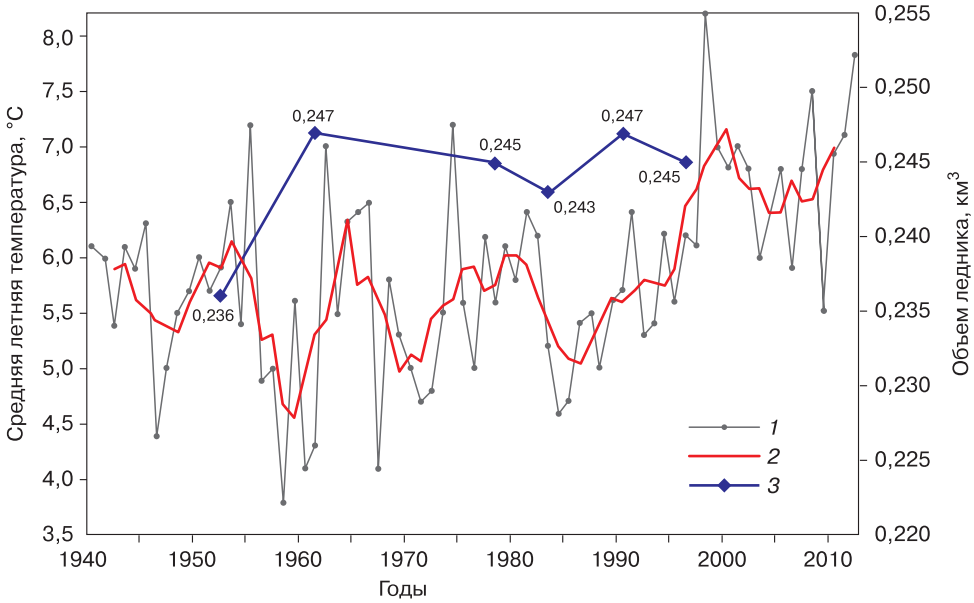

Рис. 4. Динамика средней летней температуры по ГМС Каратюрек и объем ледника Малый Актру.

1 – средняя летняя температура; *2* – пятилетняя скользящая средняя температур; *3* – объем ледника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Материалы экспериментальных наблюдений на леднике Малый Актру показали следующее.

1. За период с 1961 (год создания топографической карты масштаба 1:25 000) по 1995 г. язык ледника отступил на 160 м. Но несмотря на то что язык отступал, объем ледника за с 1952 по 1996 г. увеличился почти на 4 %, средняя толщина возросла на 3,5 м.

2. С 1991 по 2013 г. язык ледника Малый Актру отступил на 379 м. Таким образом, интенсивность отступания относительно предыдущего периода увеличилась более чем в 3,5 раза – 4,7 м/год в 1961–1995 гг. и 17,2 м/год в 1991–2013 гг. Площадь ледника уменьшилась значительно – с 2,85 до 2,5 км^2 (на 12 %).

3. Материалы по ГМС Каратюрек показали, что за два последних десятилетия средняя летняя температура увеличилась примерно на градус по сравнению с предшествующим периодом. В частности, средняя летняя температура по ГМС Каратюрек за 1993–2012 гг. составляет 6,67 °С. Очевидно, это является главной причиной резкого увеличения темпов сокращения площади и языка ледника в последние десятилетия.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 13-05-00002; 12-05-31439).

Литература

Арефьев В.Е. На ледниках Алтая и Саян / В.Е. Арефьев, Р.М. Мухаметов. Барнаул, Изд-во Комитета адм-ции Алт. края по образованию, 1996, 176 с.

Атлас снежно-ледовых ресурсов мира / Под ред. В.М. Котлякова. М., Ин-т географии РАН, 1997, 392 с.

Галахов В.П. Ледники Актру (Алтай) / В.П. Галахов, Ю.К. Нарожнев, С.А. Никитин и др. Л., Гидрометеоиздат, 1987, 119 с.

Галахов В.П. Ледники Алтая / В.П. Галахов, Р.М. Мухаметов. Новосибирск, Наука, 1999, 136 с.

Галахов В.П. Имитационное моделирование как метод гляциологических реконструкций горного оледенения / В.П. Галахов. Новосибирск, Наука, 2001, 136 с.

Галахов В.П. Колебания ледников и изменений климата в позднем голоцене по материалам исследований ледников и ледниковых отложений бассейна Актру (Центральный Алтай, Северо-Чуйский хребет) / В.П. Галахов, А.Н. Назаров, Н.Ф. Харламова. Барнаул, Изд-во АлтГУ, 2005, 132 с.

Нарожный Ю.К. Ресурсная оценка и тенденции изменения ледников в бассейне Актру (Алтай) за последние полтора столетия // Материалы гляциол. исслед., 2001, вып. 90, с. 117–125.

Никитин С.А., Веснин А.В., Осипов А.В., Игловская Н.В. Радиофизические исследования ледников Алтая // Вопросы географии Сибири. Томск, Изд-во Том. ун-та, 1997, № 22, с. 120–128.

Хеберли В., Хельцле М. Опыт использования кадастровых данных для оценки основных гляциологических характеристик и воздействия региональных изменений климата на горные ледники (на примере Альп) // Материалы гляциол. исслед., 1997, вып. 82, с. 116–124.

Hagedorn H. Eiszeit, Klimaanderung und Menschenheit // Akademia Aktuel, Dezember 2004, No. 02, S. 8–13.

World glacier monitoring service [Электронный ресурс]. URL: http://www.wgms.ch/ (дата обращения: 16.07.2014).

Поступила в редакцию
19 мая 2014 г.