УДК 551.324.63 doi: 10.15356/2076-6734-2018-2-171-182

Оценка современной динамики и прогноз гляциологических характеристик ледника Малый Актру (Центральный Алтай)

© 2018 г. В.В. Паромов*, Ю.К. Нарожный, Л.Н. Шантыкова

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия
*pvv0266@mail.ru

Estimation of current dynamics and forecast of glaciological characteristics of the Malyi Aktru Glacier (Central Altai)

V.V. Paromov*, Yu.K. Narozhnyi, L.N. Shantykova

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia
*pvv0266@mail.ru

Received July 1, 2017 *Accepted November 16, 2017*

Keywords: ***climate change, forecast, Gornyi Altai, mass balance characteristics, multiple regression, temporal dynamics.***

Summary

In the context of global and regional climatic changes in the Altai mountain region, observations performed in 1949–2014 demonstrated evident rises of air temperatures, both annual and seasonal means. Relative to the climatic norm (1949–1985), mean annual temperature (averaged for the period 1986–2014) had risen by 0.8–1.9 °C. The most significant warming took place in winter and spring. In winter, the positive difference with the mean value is approximately equal to 0.9–3.8 °C, while in spring 0.9 and 1.7 °C. Air temperatures in summer and autumn periods were rising as well. Changes in annual and seasonal precipitations were more variable. The autumn and winter periods are characterized by a decrease in precipitation. On average, it is respectively 17% and 6%. In the spring and summer seasons, the tendency is opposite since these periods are characterized by a weak increase in precipitation. On average for the whole territory, the increase in the mean climatic amount of seasonal precipitation was equal to 2% and 4% relative the climatic norm for 1966–1985, for spring and summer respectively. The amount of annual precipitation on the territory of Gorny Altai remained unchanged. Under current climate conditions which are characterized by decreasing in winter precipitation, the air temperature rise during all seasons, and longer warm period the mass balance of the Malyi Aktru Glacier becomes drastically negative. Total accumulation decreases, the ablation increases, and as a result, the negative mass balance grows. Using the methods of exponential smoothing, given the type of the trend component in series of meteorological quantities, a forecast of a 10-year mean air temperature and the amount of atmospheric precipitation was made for the period 2021–2030. Using the appropriate regression equations, this allowed calculating predictive mean values of accumulation, ablation, and mass balance of the Malyi Aktru Glacier for the third decade of the XXI century.

Citation: Paromov V.V., Narozhnyi Yu.K., Shantykova L.N. Estimation of current dynamics and forecast of glaciological characteristics of the Malyi Aktru Glacier (Central Altai). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2018. 58 (2): 171–182. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2018-2-171-182

Поступила 1 июля 2017 г. *Принята к печати 16 ноября 2017 г.*

Ключевые слова: ***временна́я динамика, Горный Алтай, изменение климата, масс-балансовые характеристики, множественная регрессия, прогноз.***

Выполнен анализ современных изменений температуры воздуха и осадков на территории Горного Алтая и масс-балансовых характеристик ледника Малый Актру. Проведена верификация ранее разработанной модели прогноза суммарной аккумуляции и абляции на леднике. Дана прогнозная оценка средних величин суммарной аккумуляции, абляции и годового баланса массы на период 2021–2030 гг.

Введение

Глобальное потепление в последние 100 лет – наиболее яркая особенность изменения климата планеты. На региональном уровне наблюдаются изменение количества атмосферных осадков и приземных температур воздуха, а также увеличение частоты аномальных (часто экстремальных) гидрометеорологических явлений [1–4]. В связи с этим оценка современных изменений гляциологических характеристик горного оледенения становится одной из наиболее актуальных задач гляциологии и горной гидрологии. Изучение рядов масс-балансовых характе-

ристик позволяет определить реакцию горных ледников на современные климатические условия, а также прогнозировать значения этих характеристик, основываясь на перспективной оценке территориальных климатических параметров. Основные цели настоящего исследования – оценка современной динамики гляциометеорологических характеристик Центрального Алтая, а также краткосрочный прогноз суммарной аккумуляции C_t, абляции, в данном случае равной общему таянию за вычетом внутреннего питания ($A_t - f$) [5], и годового баланса массы B_n ледника Малый Актру как реперного для исследуемой территории.

Горный Алтай – один из самых высоких горных областей орогенного пояса Южной Сибири. Наиболее приподнятую его часть составляют хребты широтного направления – Катунский, Северо- и Южно-Чуйский, Шапшальский, Курайский и ряд других с высотами более 3000 м. Более низкая ступень свода – хребты субмеридионального направления – Теректинский, Сумультинский, Иолго и пр., в которых высота отдельных вершин более 2000 м. Третью, самую низкую ступень формируют хребты Семинский, Ануйский, Бащелакский и другие со средней высотой около 1200 м.

Горный Алтай – область, где сталкиваются воздушные массы, сформировавшиеся в разных климатических зонах. Территория Алтая относится к переходной зоне, находящейся под влиянием монгольского, среднеазиатского и западносибирского типов климата [6]. Влага, выпадающая в виде атмосферных осадков, приносится на Алтай в основном западными, юго-западными и в меньшей мере северо-западными циклонами. Степень увлажнения долин и котловин Горного Алтая в значительной степени зависит от их ориентировки по отношению к западным влагонесущим потокам. Веерообразное расположение хребтов, с общим направлением с северо-запада на юго-восток, способствует глубокому проникновению влаги в глубь горной страны, вызывая рост количества осадков на склонах горных хребтов. Влияние гор Алтая на температуру воздуха не ограничивается высотным фактором – понижением температур воздуха с увеличением высоты местности, а представляет собой сложный и многообразный процесс. Самые низкие температуры воздуха в зимний период регистрируются в межгорных котловинах, а не на горных склонах. С ноября по апрель в межгорных котловинах формируются мощные озёра холода, а на склонах – инверсионное распределение температур [7].

К наиболее изученным на Алтае относятся ледники бассейна Актру, расположенного в восточной части горного узла Биш-Иирду на северном склоне Северо-Чуйского хребта (рис. 1). В бассейне находится семь ледников, основная площадь которых расположена в высотном интервале 3200–3400 м. Масс-балансовые исследования на ледниках бассейна Актру начались в 1957 г. и продолжались до 2013 г. Ледник Малый Актру – долинный ледник в южной части бассейна. Его площадь в середине XIX в. составляла 3,4 км^2, в 1999 г. – 2,83 км^2 [5], современная площадь ледника (на 2013 г.) – около 2,5 км^2, область его питания лежит на высоте 3100–3200 м [8].

Исходные данные и методика исследования

Динамика климатических характеристик Горного Алтая. На основе данных многолетних наблюдений за приземной температурой воздуха и атмосферными осадками на восьми метеостанциях (ГМС) (из архива ВНИИГМИ-МЦД [9]), расположенных в низко-, средне- и высокогорье Алтая (табл. 1, см. рис. 1), выполнена оценка изменений приземной температуры воздуха и осадков на основе статистического анализа рядов данных метеорологических характеристик.

Для анализа изменения температуры воздуха отдельно за зимний (XI–III месяцы), летний (VI–VIII), весенний и осенний (соответственно IV–V и IX–X) сезоны использованы данные за 1949–2014 гг. Ряды средних за сезон приземных температур воздуха преобразовывались в значения отклонений от среднего (коэффициент ΔT) за период 1949–1985 гг., который был принят за базовый (климатическая норма), т.е. до начала современных климатических изменений. Выбор 1985 г. в качестве граничного объясняется тем, что, по данным исследования [10], десять самых тёплых лет на территории России с 1860 г. приходятся на период с середины 1980-х годов, а семь из них – на последнее десятилетие XX в. – начало XXI в. (1998, 2002, 2003, 2004, 2001 и др. в порядке от более тёплого к более холодному).

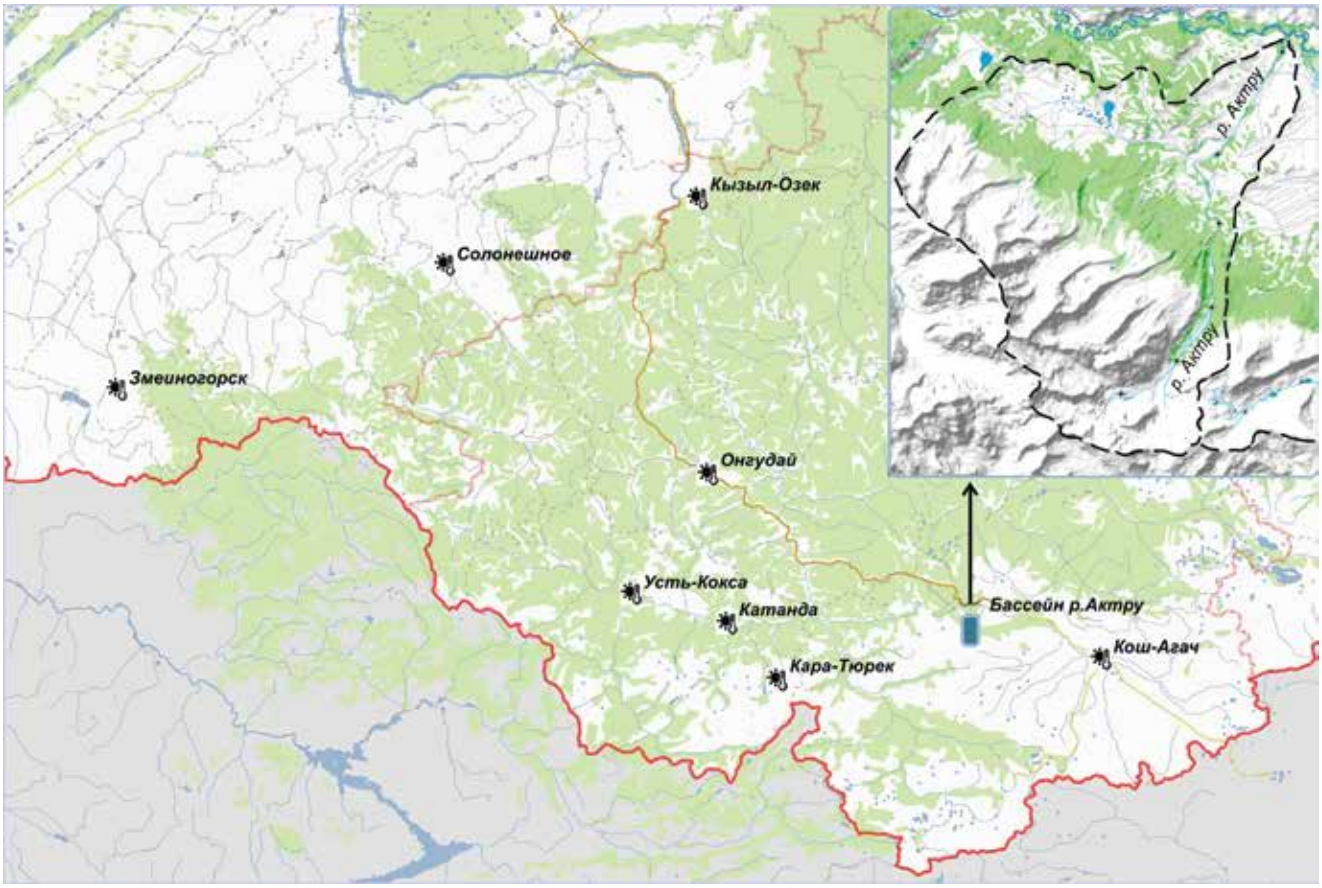

Рис. 1. Расположение бассейна р. Актру и метеостанций Росгидромета на территории Горного Алтая
Fig. 1. Location of the Aktru river basin and Roshydromet weather stations in the Gornyi Altai territory

Ряды сумм атмосферных осадков за год и отдельные сезоны года были переведены в значения безразмерного модульного коэффициента k_x, показывающего долю отклонения суммы осадков климатического сезона расчётного года X_s от среднемноголетнего значения за период 1966–1985 гг. $\overline{X}_{1966-1985}$ и принятого за климатическую норму для осадков:

$$k_x = X_s / \overline{X}_{1966-1985}.$$

Выбор периода 1966–1985 гг. для нахождения климатической нормы осадков объясняется тем, что до 1966 г. в наблюдениях за осадками, по крайней мере трижды, была нарушена однородность рядов [9].

Полученные ряды ΔT и k_x сглаживались по методу с использованием фильтра 4253Н для выявления климатически обусловленных тенденций. Это – мощный метод сглаживания, который совмещает в себе несколько последовательных преобразований скользящим средним и скользящей медианой. В результате получается сглаженный ряд, который сохраняет основные характеристики исходного ряда. Скользящие средние позволяют обнаруживать и отслеживать тенденции в рядах гидрометеорологических характеристик, определять их знак, а также выявлять происходящие в них изменения [11, 12].

Масс-балансовые характеристики ледника Малый Актру и верификация (проверка качества) модели прогноза 2004 г. и данных характеристик. Исходные данные – значения суммарной аккумуляции, абляции и годового баланса массы ледника Малый Актру за период с 1961 по 2013 г. как ранее опубликованные [5], так и новые – результаты полевых наблюдений на леднике Малый Актру по методике, изложенной в работе [5]. В 2004 г. мы разработали и предложили к рассмотрению многофакторную регрессионную модель для расчёта аккумуляции и абляции по температуре воздуха и осадкам на ГМС Кара-Тюрек и Катанда по состоянию изученности до 2002 г.,

Таблица 1. **Метеорологические станции Горного Алтая, материалы наблюдений которых использованы в работе**

Метеостанции	Географические координаты, градусы		Абсолютная высота, м	Начало наблюдений*
	широта	долгота		
Змеиногорск	51,130	82,120	353	1927
Солонешное	51,430	84,200	400	1948
Усть-Кокса	50,270	85,611	978	1934
Катанда	50,167	86,183	949	1933
Онгудай	50,750	86,150	833	1934
Кара-Тюрек	50,032	86,452	2600	1939
Кызыл-Озек	51,883	86,000	331	1929
Кош-Агач	49,993	88,676	1760	1934

*Все станции действуют в настоящее время.

определённых как реперные для масс-балансовых характеристик ледника Малый Актру [13].

Выбор этих двух ГМС в качестве реперных для прогнозной регрессионной модели выполнен на основе анализа матрицы коэффициентов парной корреляции масс-балансовых и метеорологических характеристик. ГМС Кара-Тюрек – высокогорная метеостанция (2600 м), находится на территории Усть-Коксинского района Республики Алтай, на водоразделе северного отрога Катунского хребта. ГМС Катанда расположена в долине р. Катунь (949 м), находится на территории того же района в широтно ориентированной Катандинской котловине. Учитывалось, что данные ГМС действующие и имеют длительный ряд наблюдений.

Прогнозные показатели аккумуляции и абляции в виде среднего значения за период 2002–2010 гг. получали путём ввода в регрессионные модели прогнозных значений температуры воздуха и атмосферных осадков за аналогичный период, полученных по линейному тренду. Базовый принцип такого подхода – «климатическая система обладает существенной инерцией, поэтому прогноз изменения мезоклиматических показателей по тренду вполне возможен и оправдан» [12].

Абляция. Прогноз: «В первое десятилетие XXI века будет наблюдаться рост величины абляции, которая будет самой высокой за весь период инструментальных наблюдений (132 г/см^2), в то же время вариация $A_t - f$ будет весьма значительной, максимум в 2,5 раза больше минимума» [13]. Фактическое состояние: рост абляции действительно произошёл, но не такой интенсивный, как в прогнозе – средний уровень абляции в первое десятилетие XXI в. составил 109 см в.э., относительная ошибка прогноза – 17%. Причина – существенно завышенная по сравнению с фактической оценка прироста летних температур воздуха. Прогноз уровня изменчивости $A_t - f$ оправдался: минимально измеренная величина составила 62 см в.э. (2008/09 г.), а максимальная – 159 см в.э. (2007/08 г.), что в 2,6 раза больше минимума.

Суммарная аккумуляция. Прогноз: «Величина аккумуляции останется повышенной по сравнению с периодом до наступления климатических изменений (95 г/см^2), но понизится на 3% по сравнению с периодом 1991–2002 гг.» [13]. Фактическое состояние: по сравнению с периодом 1991–2002 гг. аккумуляция уменьшилась на 4%, а её среднее значение за 2002–2010 гг. составило 92 см в.э., относительная ошибка прогноза – 3%.

Годовой баланс массы. Прогноз: «Баланс массы ледника Малый Актру будет в целом отрицательным, его средний уровень периода 2002–2010 гг. составит −37 г/см^2» [13]. Фактическое состояние: в среднем за первое десятилетие XXI в. годовой баланс массы составил −18 см в.э., относительная ошибка прогноза – 51%. Результат прогноза – неудовлетворительный.

Верификация модели 2004 г. позволила выявить источники ошибок в подобных моделях и сделать выводы по улучшению предлагаемого подхода к прогнозу масс-балансовых характеристик. Во-первых, описание тренда гидрометеорологических характеристик линейной зависимостью в данном случае не совсем оправдано из-за наблюдающихся в рядах температуры и осадков изменений темпов роста, что указывает на нелинейность тренда. Во-вторых, оценка баланса массы как разности прогнозных значений аккумуляции и абляции неприменима из-за того, что в полученной таким образом оценочном значении годового баланса массы интегрируются все ошибки прогноза и аккумуляции, и абляции.

Обновлённая методика прогноза. Прогноз средних значений масс-балансовых характеристик ледника Малый Актру включает в себя два этапа. Период прогнозирования – ближайшее, в нашем случае третье десятилетие XXI в. (2021–2030 гг.) На первом этапе выполняется прогноз средних за данное десятилетие значений приземной температуры воздуха и осадков. На втором – расчёт средних за аналогичный

временнóй период значений суммарной аккумуляции, абляции и годового баланса массы путём подстановки найденных прогностических климатических характеристик в многофакторные регрессионные модели.

Для прогноза среднемноголетних значений температур воздуха и атмосферных осадков на период 2021–2030 гг. был применён так называемый адаптивный метод анализа и прогнозирования. Инструментом прогноза при адаптивном методе служит модель. Первоначальная оценка параметров этой модели основывается на данных исходного временнóго ряда. На основе новых данных, получаемых на каждом следующем шаге, происходит корректировка параметров модели во времени, а также их адаптация к новым, непрерывно изменяющимся условиям развития явления [14]. Однако такой подход пригоден лишь для обработки рядов с умеренными изменениями во времени, и он оказывается весьма «грубым» при прогнозировании на большое число шагов вперёд. Этим объясняются выбор периода прогнозирования – не более трети длительности базы расчёта тренда [11], а также невозможность использовать метод адаптивного прогнозирования непосредственно к масс-балансовым характеристикам отдельного ледника по причине появления возможных «скачков» в динамике данной характеристики. Климатическая система и соответственно климатические параметры отличаются большей инерционностью в развитии.

В настоящей работе в качестве адаптивной статистической модели использовался метод экспоненциального сглаживания, содержащий демпфированный тренд. Модель тренда для каждого временнóго ряда выбиралась через визуальное оценивание графика наблюдаемых значений. Оптимальные значения используемых при сглаживании параметров α (Alpha), δ (Delta) и γ (Gamma) определялись в пакете STATISTICA автоматическим поиском. Для оценки качества подгонки в целом (для всего ряда) применялась средняя абсолютная относительная ошибка, минимизация которой велась с помощью квази-ньютоновской процедуры.

Полученное значение экспоненциальной средней S_t имеет то же математическое ожидание, что и исходный ряд X_t, но меньшую дисперсию. При этом прогнозное значение экспоненциальной средней $\widetilde{S}_t^{\rightarrow}$ всегда имеет систематическую ошибку, т.е. оно смещено по отношению к истинной среднемноголетней величине [14]. Несмещённая среднемноголетняя величина $S_t^{\rightarrow}$ находилась через ввод в найденные по соответствующей модели значения $\widetilde{S}_t^{\rightarrow}$ поправки на смещение δs_t: $S_t^{\rightarrow} = \widetilde{S}_t^{\rightarrow} \pm \delta s_t$. При этом оценка δs_t для каждого анализируемого ряда температур и осадков определялась через регрессионный анализ и получение регрессионной модели, параметры которой находились на основе сравнения экспоненциальной средней S_t (смещённой) и действительной средней $\overline{X}_t$, найденных за период 2001–2013 гг.

В качестве базы для прогноза приземных температур воздуха и осадков был взят не весь период наблюдений на реперных ГМС, а 40-летний ряд с 1974 по 2013 г., содержащий 12-летний интервал, относящийся к периоду доклиматических изменений, и 28-летний отрезок начавшихся климатических изменений. Выбор базового периода для построения прогноза представляет собой компромисс между так называемой «конъюнктурой» – стремлением учесть самые последние сдвиги климатических характеристик и выбранным периодом прогноза, т.е. необходимостью сгладить конъюнктурные колебания [14]. Такой подход учитывает тот факт, что по данным сетевых метеонаблюдений в современный период наблюдается замедление темпов роста приземных температур воздуха на общем фоне потепления [2, 15–19]. Аналогом современной ситуации как по причинам её формирования, так и по длительности может быть похолодание 1940–1975 гг. [20, 21]. Продление демпфирующего тренда на третье десятилетие XXI в. базируется на следующих положениях: а) начало современной «паузы в потеплении» приходится на 1998–2000 гг.; б) её возможная длительность, по аналогии с периодом 1940–1975 гг., составит 30–35 лет.

При разработке методики прогноза аккумуляции, абляции и баланса массы ледника Малый Актру, как и ранее [13], использован формализованный подход – получение математической зависимости, которая позволяет вычислить будущее значение процесса, а именно: статистическая модель множественной регрессии, когда зависимость будущего значения от прошлого задаётся в виде уравнения. Отбор значимых факторных признаков проводился способом пошаговой регрессии, сущность которого достаточно

полно излагается в специализированной литературе [22 и др.]. При этом ставилась цель минимизации количества предикторов уравнения регрессии за счёт исключения второстепенных факторов, но при сохранении адекватности модели исследуемому явлению и наличии физического смысла влияния включённых в уравнение факторов на аккумуляцию или абляцию.

Результаты исследования

Современные климатические изменения в Горном Алтае. Наблюдается увеличение как среднегодовых температур воздуха, так температур всех сезонов года. С*реднегодовые температуры* (в среднем за период 1986–2014 гг.) по сравнению с климатической нормой (1949–1985 гг.) выросли на 0,8–1,9 °С. Наиболее существенно увеличились *температуры зимнего и весеннего периодов*. Прирост среднесезонных температур составил для зимы 0,9–3,8 °С, для весны – 0,9–1,7 °С. В целом для года, а также зимнего периода можно отметить следующие закономерности: а) скорость роста температур воздуха уменьшается с увеличением абсолютной высоты местности, вплоть до практически нулевых значений на ГМС высокогорья [23, 24]; б) максимальные темпы роста приземной температуры воздуха отмечаются на ГМС в межгорных котловинах, которые прямо пропорциональны значению параметра котловинности $K_{котл}$ [7] (рис. 2):

$$K_{котл} = SL^{-1}H\Delta h\alpha,$$

где S – ширина котловины по пойме, км; L – длина котловины, км; H – абсолютная высота днища котловины, км; Δh – глубина котловины, км; α – эмпирический коэффициент, равный 0,99 км$^{-2}$.

Согласно [7], влияние котловинного эффекта тем сильнее, чем больше разность высот между ГМС и окружающими гребнями гор, так как в этом случае будет больше площадь воздухосбора, с которой холодный воздух опускается на дно котловины. Кроме того, чем больше абсолютная высота, тем больше величина эффективного излучения и соответственно меньше значение радиационного баланса. Это приводит к быстрому выхолаживанию днищ котловин, особенно в холодное время года. Можно предположить, что в 1986–2014 гг. в Горном Алтае в холодный период года господствовали такие погодно-климатические ситуации, при которых сокращаются условия, благоприятные для интенсивного выхолаживания котловин.

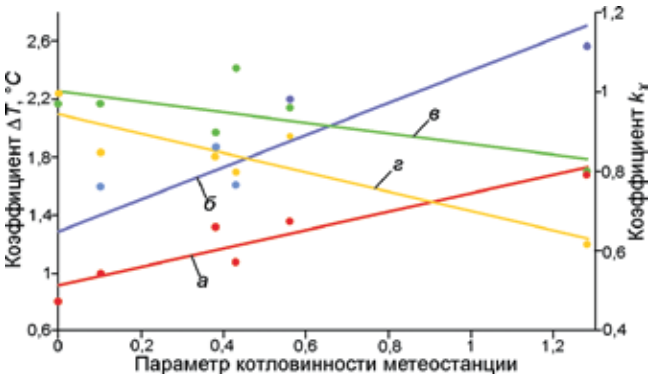

Рис. 2. Зависимость средних за 1986–2014 гг. величин коэффициентов ΔT и k_x от параметра котловинности метеостанции:
а – среднегодовая температура воздуха; *б* – температура воздуха зимнего сезона; *в* – атмосферные осадки зимнего сезона; *г* – атмосферные осадки осени

Fig. 2. Dependence of the average for 1986–2014 of the coefficient ΔT and k_x from the parameter of the trough of the meteorological station:
а – the average annual air temperature; *б* – winter season air temperature; *в* – atmospheric precipitation in the winter season; *г* – atmospheric precipitation in autumn

Температура воздуха *летнего и осеннего периодов* года также растёт. Среднемноголетнее значение температуры трёх летних месяцев возросло на 0,1–0,9 °С, а переходного осеннего сезона – на 0,5–1,0 °С. Но в отличие от зимы и осени, с ростом высоты значение ΔT увеличивается. Таким образом, в Центральном Алтае прирост температуры воздуха летних и осенних месяцев в высокогорье больше, чем в средне- и низкогорье.

Тенденции изменений *сумм годовых и сезонных осадков* более разнообразны. Для *осени и зимы* характерно уменьшение атмосферных осадков в среднем соответственно на 17 и 6%. Наблюдается хорошая корреляция величины отрицательного тренда с факторами подстилающей поверхности (местными условиями), отражёнными в параметре котловинности. Чем больше параметр котловинности, тем более заметна тенденция к снижению осадков этих двух сезонов (см. рис. 2). Максимальные тренды к снижению осадков с сентября по март наблюдаются в долинах и межгорных котловинах

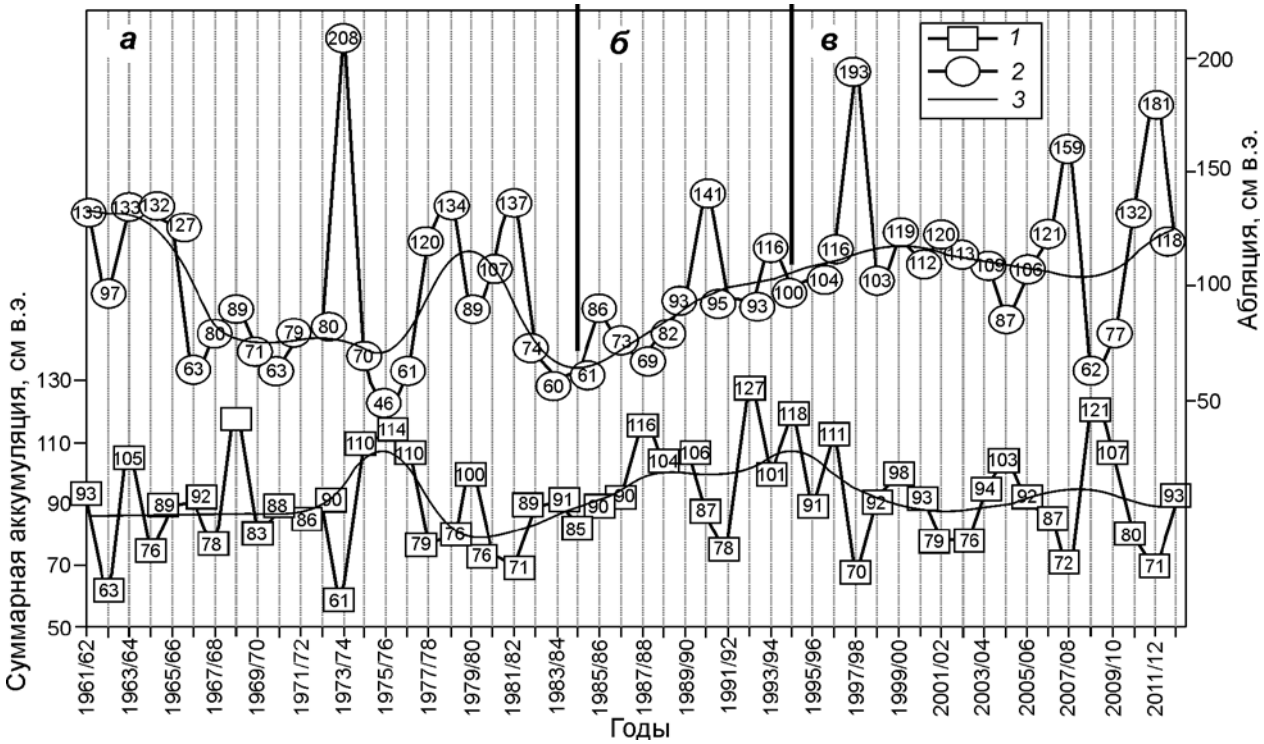

Рис. 3. Хронологические кривые хода суммарной аккумуляции и абляции на леднике Малый Актру за 1962–2013 гг.: *1* – суммарная аккумуляция; *2* – суммарная абляция; *3* – скользящая средняя по методу с использованием фильтра 4253Н; периоды, в пределах которых наблюдается характерная временная динамика и соотношение значений суммарной аккумуляции и абляции: *а* – 1962–1985 гг.; *б* – 1986–1995 гг.; *в* – 1996–2013 гг.

Fig. 3. Long–term time series of total accumulation and ablation on the Malyi Aktru Glacier for 1962–2013: *1* – accumulation; *2* – ablation; *3* – moving average by method 4253H; time periods within which there is a characteristic temporal dynamics and the ratio of the values of total accumulation and ablation: *а* – 1962–1985; *б* – 1986–1995; *в* – 1996–2013

юго-восточного Алтая. В *весенний и летний сезоны года* фиксируется противоположная тенденция – слабый рост количества осадков. В среднем по территории увеличение среднемноголетней суммы осадков в эти периоды составило соответственно 2 и 4% нормы 1966–1985 гг. Сумма годовых осадков в целом на территории Горного Алтая остаётся без изменений, учитывая противоположно направленные тенденции в рядах сезонных осадков.

Динамика гляциологических характеристик ледника Малый Актру. За период инструментальных наблюдений (1962–2013 гг.) кумулятивный баланс массы составил −6,24 м в.э., при этом среднемноголетнее значение годового баланса массы за этот же период времени равно −9,65 см в.э. Однако в условиях нестационарности региональных и глобальных климатических показателей в последние 30 (или более) лет и высокой чувствительности масс-балансовых характеристик горных ледников к климатическим изменениям можно говорить о неоднородности как климатических, так и гляциологических показателей, поэтому и оценка среднего значения за весь период наблюдений не информативна.

Анализ хронологических рядов C_t и $A_t - f$ за 1962–2013 гг. (рис. 3) показал, что можно выделить три временных интервала (периода), в пределах которых наблюдаются характерная временна́я динамика и соотношение значений суммарной аккумуляции и абляции.

1962–1985 гг. Направление изменения суммарной аккумуляции, абляции и среднее за период значение годового баланса массы −8 см в.э. характеризует климатические условия высокогорья Алтая до начала активных климатических изменений. При этом наблюдалось асинхронное движение C_t и $A_t - f$ при медленном тренде на снижение абляции при общей стационарности аккумуляции, что привело к нулевому значению баланса массы в последнее десятилетие рассматриваемого периода (табл. 2, см. рис. 3).

Таблица 2. **Среднемноголетние значения масс-балансовых характеристик ледника Малый Актру за характерные интервалы времени**

Годы	Масс-балансовая характеристика, см в.э.		
	суммарная аккумуляция	абляция	годовой баланс массы
Первый интервал			
1962–1971	89	99	−10
1976–1985	89	89	0
1962–1985	88	96	−8
Второй интервал			
1986–1995	102	95	+7
Третий интервал			
1996–2005	91	118	−27
2006–2013	90	120	−30
1996–2013	91	119	−28

1986–1995 гг. Наблюдалось синхронное изменение суммарной аккумуляции и абляции в сторону их увеличения (см. рис. 3). При этом общий прирост C_t (+13 см в.э.) от среднего уровня предшествующего десятилетия превысил аналогичные показатели $A_t - f$ (+6 см в.э.), что привело к положительному годовому балансу массы ледника +7 см в.э. (см. табл. 2). Причины таких сдвигов масс-балансовых показателей – региональные климатические изменения на первом этапе потепления, а именно: сочетание начавшегося потепления с ростом осадков практически во всех сезонах года в высокогорной зоне Горного Алтая [23, 24].

1996–2013 гг. Период существования ледника в новых климатических условиях. Нарастание негативных для ледника климатических воздействий (продолжающееся снижение сумм зимних атмосферных осадков, всесезонный рост температур воздуха, увеличение продолжительности тёплого периода года) привело к резкому отрицательному балансу массы (−28 см в.э.) и соответственно к быстрому отступанию языка ледника. Средний темп отступания составил 12,5 м/год. При этом наблюдается, как и в 1962–1985 гг., асинхронное движение аккумуляции и абляции, но тренд в их рядах – расходящийся (см. рис. 3).

Таким образом, современные климатические условия в Центральном Алтае отражаются на масс-балансовых характеристиках ледника Малый Актру, которые показывают снижение суммарной аккумуляции, рост абляции, постепенный рост отрицательного годового баланса массы и, как следствие, резкое сокращение площади и языка ледника Малый Актру [8].

Прогноз средних величин масс-балансовых характеристик ледника Малый Актру на 2021–2030 гг. Используя методы экспоненциального сглаживания, которые содержат демпфированный тренд, выполнен прогноз средней температуры воздуха и сумм атмосферных осадков. Путём подстановки в уравнения (1)–(3) прогнозных значений температуры и осадков сделана оценка средних значений C_t, $A_t - f$ и B_n на период 2021–2030 гг. Сезонные и годовые показатели температуры воздуха и атмосферных осадков на ГМС Кара-Тюрек и Катанда, при отсутствии метеорологических наблюдений в бассейне Актру, можно считать реперными для расчёта масс-балансовых характеристик ледника Малый Актру. Модели множественной регрессии получены не только для суммарной аккумуляции и абляции, но и для годового баланса массы. Выведенные уравнения множественной регрессии имеют следующий вид:

$$C_t = 65{,}8 + 0{,}0542P_1 + 0{,}08P_2 - 0{,}123T_1^3 - 0{,}037T_2^3; \quad (1)$$

$$A_t - f = 0{,}0496T_3^3 - 0{,}27P_3 - 39{,}6; \quad (2)$$

$$B_n = 111{,}8 + 0{,}09P_1 - 0{,}0552T_3^3 - 7{,}88T_1, \quad (3)$$

где P_1 – сумма осадков за данный балансовый год по ГМС Катанда; P_2 – сумма осадков осени (IX–X) предшествующего календарного года по ГМС Кара-Тюрек; P_3 – сумма осадков осени предшествующего календарного года по ГМС Катанда; T_1 – средняя температура осени (IX–X) предшествующего календарного года по ГМС Кара-Тюрек; T_2 – средняя температура лета (VI–VIII) данного балансового года по ГМС Кара-Тюрек; T_3 – средняя температура лета данного балансового года по ГМС Катанда.

Статистическая оценка значимости и устойчивости полученных моделей множественной нелинейной регрессии показывает их удовлетворительное качество (табл. 3).

Аккумуляция на леднике прямо пропорциональна сумме осадков за год (ноябрь–октябрь) и осенний сезон (сентябрь–октябрь) предшествующего года, но обратно пропорциональна средней температуре лета и осени предшествующего года. Если осенью наблюдались высокие температуры воздуха, то осадки выпадали в жидком виде

Таблица 3. **Оценка статистической значимости и устойчивости уравнений множественной регрессии (1961–2013 гг.)***

Уравнение (1)					
Коэффициенты уравнения множественной регрессии	Свободный член	P_1	P_2	T_1	T_2
Значение коэффициента	65,8	0,0542	0,08	0,123	0,037
Стандартная ошибка коэффициента	11,0	0,0229	0,04	0,044	0,017
Коэффициент детерминации R^2	0,422				
Критерий качества $\overline{S}/\sigma$	0,79				
Уравнение (2)					
Коэффициенты уравнения множественной регрессии	Свободный член	T_3		P_3	
Значение коэффициента	39,6	0,0496		0,27	
Стандартная ошибка коэффициента	19,1	0,0049		0,097	
Коэффициент детерминации R^2	0,745				
Критерий качества $\overline{S}/\sigma$	0,52				
Уравнение (3)					
Коэффициенты уравнения множественной регрессии	Свободный член	P_1	T_3	T_1	
Значение коэффициента	111,8	0,09	0,0552	7,88	
Стандартная ошибка коэффициента	36,5	0,049	0,0072	2,50	
Коэффициент детерминации R^2	0,695				
Критерий качества $\overline{S}/\sigma$	0,57				

*P_1 – сумма осадков за данный балансовый год по ГМС Катанда; P_2 – сумма осадков осени (IX–X) предшествующего календарного года по ГМС Кара-Тюрек; P_3 – сумма осадков осени предшествующего календарного года по ГМС Катанда; T_1 – средняя температура осени предшествующего календарного года по ГМС Кара-Тюрек; T_2 – средняя температура лета (VI–VIII) данного балансового года по ГМС Кара-Тюрек; T_3 – средняя температура лета данного балансового года по ГМС Катанда. Критерий качества рассчитан на зависимом материале.

и стекали в речную сеть, т.е. не аккумулировались на поверхности ледника. На аккумуляцию также влияет температура воздуха летнего сезона, но эта связь нелинейная, а кубическая, что отмечалось и в более ранних работах [25, 26]. Абляция на леднике представляет собой функцию двух факторов: она прямо пропорциональна средней температуре лета и обратно пропорциональна осадкам осени предшествующего года. Дождливая осенняя погода в горах Центрального Алтая приводит к общему похолоданию, при этом на поверхность ледника осадки выпадают в твёрдом виде. Таким образом, поверхность языка ледника уже забронирована существенным количеством осеннего снега, на который в дальнейшем ложатся твёрдые зимние осадки. Данный фактор (увеличенная толща снега на языке) сдвигает сроки начала таяния и несколько уменьшает абляцию. Годовой баланс массы находится в прямой зависимости от годовой суммы осадков, но обратно пропорционален температурам воздуха лета и осени, высокие значения которых отрицательно влияют на накопление твёрдых осадков.

В третьем десятилетии XXI в. будет наблюдаться абляция на уровне современных значений, при этом сохранится значительная межгодовая изменчивость $A_t - f$. Близкий к линейному тренд на увеличение летних температур воздуха на ГМС Катанда и Кара-Тюрек, характерный для периода 1986–2013 гг., не сохранится. Среднемноголетняя температура воздуха летнего сезона года стабилизируется на уровне, достигнутом в первом десятилетии, но продолжится рост температур осени. Величина суммарной аккумуляции продолжит тренд на снижение, связанный с постепенным уменьшением сумм твёрдых атмосферных осадков (табл. 4). Среднемноголетнее значение годового баланса массы, вероятно, станет более отрицательным. Основная причина – снижение объёмов твёрдых осадков, поступающих на поверхность ледника на фоне стабильно высокой абляции.

Выводы

В условиях глобальных и региональных климатических изменений в Горном Алтае, по состоянию изученности на 2014 г., наблюдается увеличение как среднегодовых температур воздуха, так

Таблица 4. **Наблюдённые (2006–2013 гг.) и прогнозные (2021–2030 гг.) среднемноголетние значения гляциологических и климатических характеристик**

Параметр	Период осреднения	
	2006–2013 гг.	2021–2030 гг.
*Климатические характеристики**		
P_1, мм	420	419±6
P_2, мм	97	100±4
P_3, мм	56	54±2
T_1, °C	−1,5	−0,8±0,13
T_2, °C	+6,4	+6,4±0,16
T_3, °C	+15,1	+15,2±0,10
Масс-балансовые характеристики ледника Малый Актру, см в.э.		
Суммарная аккумуляция	90	87±12
Абляция	120	120±18
Годовой баланс массы	−30	−38±26

*Обозначения климатических характеристик см. табл. 3.

температур воздуха всех сезонов года. В целом для года, а также зимнего и весеннего периодов можно отметить следующие закономерности: а) скорость роста температур воздуха падает с ростом абсолютной высоты местности, вплоть до близких к нулевым значениям на станциях высокогорья; б) максимальные темпы роста приземной температуры воздуха отмечаются на ГМС, расположенных в межгорных котловинах Горного Алтая. Направленность изменения сумм годовых и сезонных осадков не так однозначна, как для приземной температуры воздуха. Для осени и зимы характерно уменьшение атмосферных осадков. При этом наблюдается корреляция величины отрицательного тренда с факторами подстилающей поверхности (местными условиями), отражёнными в параметре котловинности. Для весеннего переходного и тёплого сезонов года характерна тенденция роста сумм атмосферных осадков. Сумма годовых осадков в целом на территории Горного Алтая остаётся без изменений, учитывая противоположно направленные тенденции в рядах сезонных осадков.

За период инструментальных наблюдений за масс-балансовыми характеристиками на леднике Малый Актру наблюдалось три разнородных периода поведения аккумуляции и абляции. Первый период (1962–1985 гг.) характеризуется общим превышением абляции над аккумуляцией и слабым отрицательным значением баланса массы. Во второй период (1986–1995 гг.) наблюдается синхронное изменение аккумуляции и абляции в сторону их увеличения, при этом общий прирост аккумуляции от среднего уровня предшествующего десятилетия превысил аналогичные показатели абляции, что привело к положительному балансу. Третий период (1996–2013 гг.) – нарастание негативных для существования ледника климатических воздействий (продолжающееся снижение сумм зимних атмосферных осадков, всесезонный рост температур воздуха, увеличение продолжительности тёплого периода года), которое привело к резкому отрицательному балансу массы и быстрому отступанию языка ледника.

Результаты верификации модели прогноза масс-балансовых характеристик, показавшие удовлетворительный результат, говорят о применимости (с исправлениями) предложенного подхода к оценке средних величин масс-балансовых показателей на ближайшее десятилетие. Установлены источники ошибок и сделаны выводы по улучшению прогноза масс-балансовых характеристик на основе многофакторных регрессионных зависимостей.

С помощью методов экспоненциального сглаживания, учитывая тип трендовой составляющей рядов метеорологических характеристик, выполнен прогноз средней температуры воздуха и сумм атмосферных осадков, предикторов уравнений регрессии аккумуляции и абляции на период 2021–2030 гг. При этом учитывалось, что в современный период темпы роста приземных температур воздуха снижаются.

Абляция на леднике Малый Актру останется на уровне предшествующего десятилетия, при этом межгодовая изменчивость $A_t - f$ по-прежнему будет значительной. Близкий к линейному тренд на увеличение летних температур воздуха на ГМС Катанда и Кара-Тюрек, характерный для периода 1986–2013 гг., не сохранится. Температура воздуха летнего сезона года стабилизируется на уровне, достигнутом в первом десятилетии, но продолжится рост температур осени. Величина суммарной аккумуляции продолжит слабый тренд на снижение, связанный с постепенным уменьшением сумм твёрдых атмосферных осадков. Среднемноголетнее значение годового баланса массы, вероятно, станет более отрицательным. Основная причина – снижение объёмов твёрдых осадков, поступающих на поверхность ледника на фоне стабильно высокой абляции.

Литература

1. *Колмакова М.В., Захарова Е.А., Кураев А.В., Земцов В.А., Кирпотин С.Н.* Временная изменчивость климата и обводненности территории Западной Сибири по данным метеорологических станций, модельного реанализа и спутниковой альтиметрии // Вестн. Томского гос. ун-та. 2012. № 364. С. 173–180.
2. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации: Общее резюме. М.: Росгидромет, 2014. 60 с.
3. *Переведенцев Ю.П., Верещагин М.А., Шанталинский К.М., Наумов Э.П., Тудрий В.Д.* Современные глобальные и региональные изменения окружающей среды и климата. Казань: «УНИПРЕСС», 1999. 96 с.
4. *Groisman P.Y., Blyakharchuk T.A., Chernokulsky A.V., Arzhanov M.M., Marchesini L.B., Bogdanova E.G., Borzenkova I.I., Bulygina O.N., Karpenko A.A., Karpenko L.V., Knight R.W., Khon V.C., Korovin G.N., Meshecherskaya A.V., Mokhov I.I., Parfenova E.I., Razuvaev V.N., Speranskaya N.A., Tchebakova N.M., Vygodskaya N.N.* Climate changes in Siberia // Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences. Springer Environmental Science and Engineering / Eds.: P. Groisman, G. Gutman. Dordrecht: Springer, 2013. P. 57–109. doi.org/10.1007/978-94-007-4569-8_3.
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. *Попова К.И.* О типах годового хода атмосферных осадков в Горном Алтае // Гляциология Алтая. 1972. Вып. 7. С. 120–130.
7. *Севастьянов В.В.* Климатические ресурсы Горного Алтая и их прикладное использование. Томск: Изд-во ТГПУ, 2009. 252 с.
8. *Галахов В.П., Самойлова С.Ю., Шевченко А.А., Шереметов Р.Т.* Колебания ледника Малый Актру (Русский Алтай) за период инструментальных наблюдений с 1952 по 2013 год // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX. № 2. С. 81–86.
9. http://meteo.ru/data (дата обращения:07.12.2016)
10. *Переведенцев Ю.П., Наумов Э.П., Шанталинский К.М.* Современные глобальные и региональные изменения климата // Географич. вестник. 2006. № 2. С. 84–96.
11. *Афанасьев В.Н., Юзбашев М.М.* Анализ временных рядов и прогнозирование. М.: Финансы и статистика, 2010. 320 с.
12. *Дуброва Т.А.* Статистические методы прогнозирования. М.: ЮНИТИ, 2003. 206 с.
13. *Нарожный Ю.К., Паромов В.В., Шантыкова Л.Н.* Возможные тенденции изменения режима лед-

Reference

1. *Kolmakova M.V., Zakharova Ye.A., Kouraev A.V., Zemtsov V.A. Kirpotin S.N.* Temporal variability of climate, flooded and wet zones in Western Siberia from data stations, atmospheric reanalysis and satellite altimetry. *Vestnik TGU.* Herald of TSU. 2012, 364: 173–180. [In Russian].
2. *Vtoroy otsenochniy doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii. Obshchee resume.* The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. General summary. Moscow: Roshydromet, 2014: 60 p. [In Russian].
3. *Perevedentsev Yu.P., Vereschagin M.A., Shantalinskiy K.M., Naumov E.P., Tudriy V.D. Sovremennye globalnye i regionalnye izmeneniya okruzhayushchey sredy i klimata.* Modern global and regional changes of environment and climate. Kazan: UNIPRESS, 1999: 96 p. [In Russian].
4. *Groisman P.Y., Blyakharchuk T.A., Chernokulsky A.V., Arzhanov M.M., Marchesini L.B., Bogdanova E.G., Borzenkova I.I., Bulygina O.N., Karpenko A.A., Karpenko L.V., Knight R.W., Khon V.C., Korovin G.N., Meshecherskaya A.V., Mokhov I.I., Parfenova E.I., Razuvaev V.N., Speranskaya N.A., Tchebakova N.M., Vygodskaya N.N.* Climate changes in Siberia. Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences. Springer Environmental Science and Engineering. Eds.: P. Groisman, G. Gutman. Dordrecht: Springer, 2013: 57–109. doi.org/10.1007/978-94-007-4569-8_3.
5. *Narozhnyi Yu.K.* Resource assessment and trends of glacier changes in the Aktru basin (Altai) within the last half century. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy.* Data of Glaciological Studies. 2001, 90: 117–125. [In Russian].
6. *Popova K.I.* The types of annual regime of precipitation in the Gornyi Altai. *Glyatsiologiya Altaya.* Glaciology of Altai. 1972, 7: 120–130. [In Russian].
7. *Sevastyanov V.V. Klimaticheskie resursy Gornogo Altaya i ikh prikladnoye ispolzovaniye.* Climatic resources of the Gornyi Altai and their applied use. Tomsk: TSPU, 2009: 252 p. [In Russian].
8. *Galakhov V.P., Samoylova S.Yu., Shevchenko A.A., Sheremetov R.T.* Fluctuation of Maliy Aktru Glacier (Russian Altai) for the period of instrumental observations from 1952 to 2013. *Kriosfera Zemli.* Earth Cryosphere. 2015, XIX (2): 81–86. [In Russian].
9. Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center. Data access. Available at: http://meteo.ru/data (accessed 07.12.2016).
10. *Perevedentsev Yu.P., Naumov E.P., Shantalinskiy K.M.* Modern global and regional climate change. *Geograficheskiy vestnik.* Geographical Bulletin. 2006, 2: 84–96. [In Russian].
11. *Afanasiev V.N., Yuzbashev M.M. Analiz vremennykh ryadov i prognozirovaniye.* Time series analysis and forecasting. Moscow: Finansy i statistika, 2010: 320 p. [In Russian].
12. *Dubrova T.A. Statisticheskiye metody prognozirovaniya.* Statistical forecasting methods. Moscow: UNITY, 2003: 206 p. [In Russian].
13. *Narozhnyi Yu.K., Paromov V.V. Shantykova L.N.* Possible trends in the change of glacier regime and the Altai mountain climate up to 2010. *Materialy Glyatsio-*

ников и климата высокогорья Алтая до 2010 г. // МГИ. 2005. Вып. 98. С. 220–224.
14. *Лукашин Ю.П.* Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов. М.: Финансы и статистика, 2003. 416 с.
15. *Ипполитов И.И., Логинов С.В., Харюткина Е.В., Морару Е.И.* Изменчивость климата азиатской территории России в 1975–2012 годах // География и прир. ресурсы. 2014. № 4. С. 13–21.
16. *Переведенцев Ю.П., Шанталинский К.М.* Динамика тропо- и стратосферы и изменения современного климата // Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. Т. 1. С. 211–231.
17. *Tollefson J.* Climate change: The case of the missing heat // Nature. 2014. V. 505. P. 276–278. doi: 10.1038/505276a.
18. *Trenberth K.E., Fasullo J.T.* An apparent hiatus in global warming? // Earth's Future. 2013. № 1. P. 19–32. doi:10.1002/2013EF000165.
19. *England M.H., McGregor S., Spence P., Meehl G.A., Timmermann A., Wenju Cai, Gupta A.S., McPhaden M.J., Purich A., Santoro A.* Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus // Nature Climate Change. 2014. № 4. P. 222–227. doi: 10.1038/nclimate2106.
20. *Семенов В.А.* Колебания современного климата, вызванные обратными связями в системе атмосфера – арктические льды – океан // Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. Т. 1. С. 232–248.
21. *Шерстюков Б.Г.* Региональные и сезонные закономерности изменений современного климата. Обнинск: изд. «ГУ ВНИИГМИ-МЦД». 2008. 246 с.
22. *Дубровская Л.И., Князев Г.Б.* Компьютерная обработка естественно-научных данных методами многомерной статистики. Томск: ТМЛ-Пресс, 2011. 120 с.
23. *Паромов В.В., Шантыкова Л.Н.* Динамика гидрометеорологических характеристик Алтая во второй половине XX в. // МГИ. 2001. Вып. 90. С. 112–116.
24. *Паромов В.В.* Ресурсы речного стока бассейна Верхней Оби. Томск: изд. ТГУ, 2002. 113 с.
25. *Вилесов Е.Н., Гужавина Е.А.* Реконструкция баланса массы ледника Туюксу за последнее столетие // МГИ. 1988. Вып. 62. С. 51–58.
26. *Кренке А.Н., Ходаков В.Г.* О связи поверхностного таяния ледников с температурой воздуха // МГИ. 1966. Вып. 12. С. 153–164.

logicheskikh Issledovaniy. Data of Glaciological Studies. 2005, 98: 220–224. [In Russian].
14. *Lukashin Yu.P. Adaptivnye metody kratkosrochnogo prognozirovaniya vremennykh ryadov.* Adaptive methods of short-term forecasting of time series. Moscow: Finansy i statistika, 2003: 416 p. [In Russian].
15. *Ippolitov I.I., Loginov S.V., Kharyutkina E.V., Moraru E.I.* Variability of the climate of Asian territory of Russia in 1975–2012. *Geografiya i prirodniye resursy*. Geography and Natural Resources. 2014, 4: 13–21. [In Russian].
16. *Perevedentsev Yu.P., Shantalinskiy K.M.* Dynamics of the troposphere and stratosphere and changes in the modern climate. *Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya*. Fundamental and applied climatology. 2015, 1: 211–231. [In Russian].
17. *Tollefson J.* Climate change: The case of the missing heat. Nature. 2014, 505: 276–278. doi: 10.1038/505276a.
18. *Trenberth K.E., Fasullo J.T.* An apparent hiatus in global warming? Earth's Future. 2013, 1: 19–32. doi: 10.1002/2013EF000165.
19. *England M.H., McGregor S., Spence P. Meehl G.A., Timmermann A., Wenju Cai, Gupta A.S., McPhaden M.J., Purich A., Santoro A.* Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus. Nature Climate Change. 2014, 4: 222–227. doi: 10.1038/nclimate2106.
20. *Semenov V.A.* Oscillations of the modern climate caused by feedbacks in the system atmosphere – arctic ice – ocean. *Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya*. Fundamental and applied climatology. 2015, 1: 232–248. [In Russian].
21. *Sherstuykov B.G. Regionalnye i sezonnye zakonomernosti izmeneniy sovremennogo klimata.* Regional and seasonal patterns of changes in the modern climate. Obninsk: RIHMI-WDC, 2008: 246 p. [In Russian].
22. *Dubrovskya L.I., Knyazev G.B. Kompyuternaya obrabotka estestvenno-nauchnykh dannykh metodami mnogomernoy statistiki.* Computer processing of natural science data using multidimensional statistics. Tomsk: TML-Press, 2011: 120 p. [In Russian].
23. *Paromov V.V., Shantykova L.N.* Dynamics of hydrometeorological characteristics of Altay in the second half of the XX century. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy.* Data of Glaciological Studies. 2001, 90: 112–116. [In Russian].
24. *Paromov V.V. Resursy rechnogo stoka basseyna Verkhney Obi.* Resources of river flow of the Upper Ob basin. Tomsk: TSU, 2002: 113 p. [In Russian].
25. *Vilesov E.N., Guzhavina E.A.* Reconstruction of mass balance of Tuyuksu Glacier in the last century. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy.* Data of Glaciological Studies. 1988, 62: 51–58. [In Russian].
26. *Krenke A.N., Khodakov V.G.* The connection of glaciers surface melting with air temperature. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy.* Data of Glaciological Studies. 1966, 12: 153–164. [In Russian].