

УДК 551.324.902.674

## Реконструкция баланса массы ледника Гарабаши (1800–2005 гг.) по дендрохронологическим данным

© 2013 г. Е.А. Долгова, В.В. Мацковский, О.Н. Соломина, О.В. Рототаева,  
Г.А. Носенко, И.Ф. Хмелевской

Институт географии РАН, Москва

*dolgovakat@gmail.com*

*Статья принята к печати 19 ноября 2012 г.*

Годичные кольца, дендрохронология, ледник Гарабаши, реконструкция баланса массы, сосна обыкновенная.  
Dendrochronology, Garabashi Glacier, mass-balance reconstruction, tree-rings, Scots pine.

Выполнена первая реконструкция баланса массы ледника Гарабаши по дендрохронологическим данным с 1800 по 2005 г. Лучшей моделью воспроизводит изменчивость годового баланса ледника при использовании хронологий по ширине годичных колец и по максимальной плотности поздней древесины. Изучены вклад каждой древесно-кольцевой хронологии в модель и её климатический отклик. Установлена высокая согласованность реконструкции баланса массы ледника по дендрохронологическим данным с реконструкциями, полученными ранее по метеорологическим рядам.

### Введение

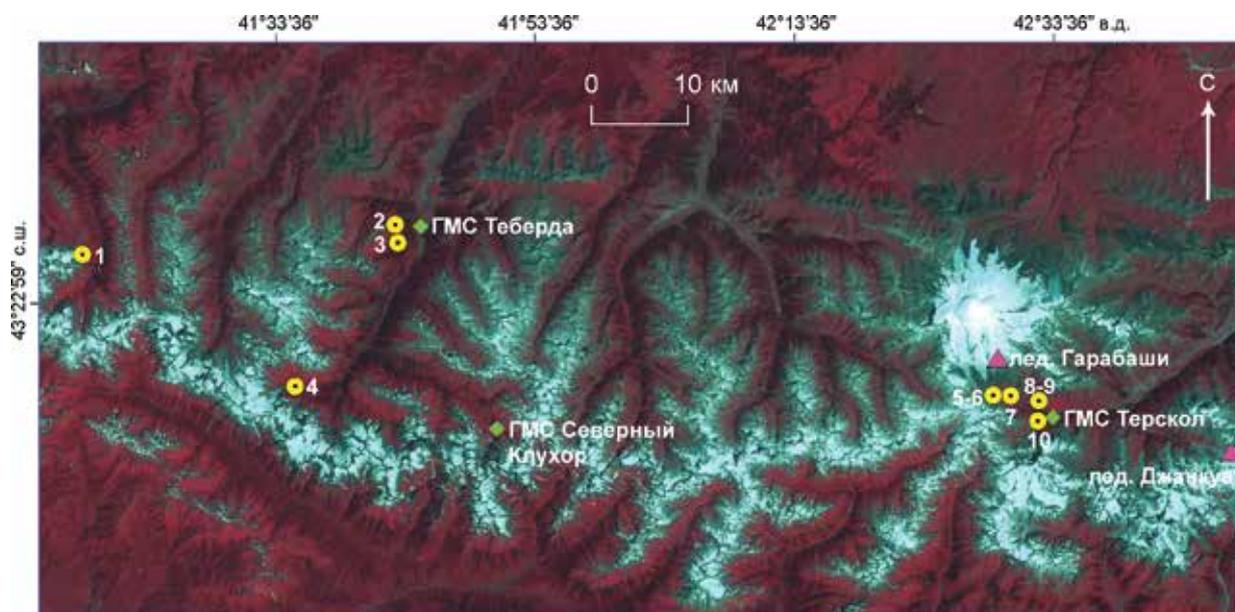
В последние годы наблюдения за ледниками во всех ледниковых районах свидетельствуют об их отступании, связанном с ростом глобальных температур [28]. Это может вызвать подъём уровня Мирового океана, изменить режим стока горных рек и баланс пресной воды в океане, увеличить частоту природных катастроф [17]. В кавказском регионе косвенные источники палеоклиматической информации также указывают на повсеместное отступление ледников после окончания малого ледникового периода [11]. Для создания достоверного прогноза реакции оледенения на климатические изменения в будущем необходимо знать об их трансформации в прошлом. Известно, что ледники чувствительны к климатическим изменениям. Реконструкции, выполненные по данным об отступании ледников, например, работе [28], не отражают межгодовой изменчивости в прошлом из-за задержки в отклике ледников и некоторой сложности в интерпретации получаемых данных. Баланс массы ледников имеет прямой (т.е. без задержки) климатический сигнал, который отражается в изменении значений аккумуляции и абляции. В настоящее время во всем мире ведут наблюдения за балансом массы эталонных ледников, которые хранятся в базе данных Международной службы мониторинга ледников (World Glacier Monitoring Service) [19]. К ним относится и ледник Гарабаши на Северном Кавказе.

Короткие ряды инструментальных наблюдений за ледниками не позволяют анализировать долгопериодные изменения. Чаще всего реконструкция баланса массы основывается на применении значи-

мых связей между параметрами ледников и метеорологическими характеристиками. И хотя этот метод даёт хорошие результаты, у него есть и свои недостатки – невысокие коэффициенты корреляции между сравниваемыми параметрами, а также сложности при выборе рядов по осадкам, которые из-за неравномерности их распределения в высокогорье и на самих ледниках могут не отражать реальные значения аккумуляции. Кроме того, длина реконструкций, как правило, ограничена длиной самих метеорядов, которые, например, на Кавказе в редких случаях покрывают последнее столетие в предгорьях, а в высокогорьях начаты на 40–50 лет позже.

Известно, что деревья, растущие на верхней границе леса, имеют повышенную чувствительность к изменению тех климатических параметров, которые ограничивают их рост [18]. Выполненные ранее дендроклиматические исследования на Северном Кавказе показали наличие смешанного климатического сигнала в ширине колец хвойных, что затрудняло создание количественной реконструкции метеопараметров. Известно, что в районах с тёплым и влажным климатом ширина колец деревьев может отражать изменчивость такого интегрального показателя, как речной сток. Наши исследования показали, что ширина годичных колец сосны коррелирует с объёмом стока р. Теберда в мае, июле и августе [5]. Это обстоятельство позволило предположить возможность применения дендрохронологического метода для восстановления такого интегрального параметра, как баланс массы ледников.

Ширина годичных колец и параметры баланса массы ледников частично контролируются одними и



**Рис. 1.** Карта расположения площадок отбора дендрохронологического материала, метеостанций (ГМС) и ледников. Дендрохронологические площадки: 1 – KYZ, 2 – KHTP, 3 – KHAT, 4 – ALI, 5 – BAZ, 6 – KV, 7 – GAR, 8 – CHS, 9 – CHE; 10 – TERS; на заднем плане космический снимок LANDSAT от 29 июля 2001 г.

**Fig. 1.** Map of tree-ring sites, weather stations and investigated glaciers.

Tree-ring sites: 1 – KYZ, 2 – KHTP, 3 – KHAT, 4 – ALI, 5 – BAZ, 6 – KV, 7 – GAR, 8 – CHS, 9 – CHE, 10 – TERS. LANDSAT from 29 July 2001s. used as a background

теми же климатическими факторами. Это было замечено ранее во многих других горных странах (Алтай, Альпы, Скалистые Горы, Скандинавия), где дендрохронологический метод успешно применялся для реконструкций баланса массы ледников, в основу которых были положены разные методики и виды деревьев [7, 21–24, 26, 27, 30, 32]. Использование древесно-кольцевых хронологий для этих целей имеет ряд преимуществ: 1) применение метода перекрёстного датирования [6] обеспечивает высокую точность и годовое разрешение реконструкции; 2) расположение площадок отбора дендрохронологического материала в непосредственной близости от ледников даёт возможность получить более тесную связь с ледниковыми параметрами; 3) дендрохронологический метод ограничен лишь возрастом дерева и часто позволяет реконструировать баланс массы ледника за более долгий период относительно инструментальных метеонаблюдений. Отметим и некоторые ограничения дендрохронологических реконструкций. Так, модель калибруется на очень короткой выборке последних лет в условиях современного состояния оледенения, в то время как площадь оледенения в малый ледниковый период была значительно больше. Именно поэтому баланс массы ледников, полученный дендрохронологическим методом, хотя и отражает общие закономерности его изменчивости, но явно завышен для того времени.

По этой причине построение кумулятивной кривой изменения баланса массы ледника, начиная с малого ледникового периода, было бы некорректно.

Задача настоящей работы – создание первой реконструкции баланса массы ледника Гарабаши по дендрохронологическим данным. Для её решения необходимо: 1) оценить возможности и ограничения дендрохронологического метода для реконструкции баланса массы ледника Гарабаши; 2) сравнить полученную реконструкцию с известными историческими сведениями и с реконструкцией, построенной для ледника по гляциометеорологическим данным.

### Материалы и методы

**Масс-балансовые наблюдения.** Ледник Гарабаши расположен на южном склоне ледниковой шапки Эльбруса (рис. 1). Его площадь, по оценкам в работах [4, 8], в 1890 г. составляла 6,32 км<sup>2</sup>, в 2000 г. – 4,47 км<sup>2</sup>. Многолетние комплексные гляциологические наблюдения на леднике ведутся Институтом географии РАН с 1982 г. до настоящего времени. На основе ежегодных измерений получены эмпирические связи составляющих баланса массы ледника с показателями ближайших метеостанций и восстановлены значения годового баланса массы ледника Гарабаши с начала XX в. [8, 9]. Для расчёта абляции авторы использовали данные о летних температурах воздуха на ГМС Терскол (с 1951 г.), а для продления

Таблица 1. Статистические характеристики хронологий

Характеристики	Название хронологии и её местоположение								Максимальная плотность
	KYZ – левый борт р. Кизгич, верхняя граница леса	KV – морена XIV в. ледника Большой Азау	КНТР – склон г. Малая Хатипара (долина р. Теберда)	GAR – селевой конус ледника Гарабаши	CHS – южный и восточный склоны г. Четет, верхняя граница леса	BAZ – конечная морена ледника Большой Азау	ALI – предполье ледника Алибек	TERS – верхняя граница ледника Терскол	
Параметр годичных колец	Ширина								
Длина хронологии, годы	1550–2006	1640–2002	1678–2005	1693–2002	1738–2002	1660–2004	1800–2005	1714–2009	1759–2005
Число образцов (деревьев)	20 (14)	8 (4)	57 (29)	13 (7)	15 (8)	18 (11)	24 (13)	15 (9)	43 (29)
Межсерийный коэффициент корреляции	0,4	0,55	0,51	0,61	0,53	0,44	0,28	0,58	0,52
Стандартное отклонение	0,23	0,18	0,22	0,22	0,15	0,14	0,13	0,16	0,06
Средняя чувствительность	0,16	0,13	0,16	0,13	0,11	0,12	0,12	0,12	0,07
Средняя автокорреляция 1-го порядка	0,66	0,55	0,51	0,61	0,52	0,44	0,28	0,58	0,02
Средняя длина сегмента	203	283	175	160	160	233	114	233	154
EPS > 0,8	1783	1805	1753	1892	1961	1752	1883	1776	1800
Доля главной компоненты, %	47,1	46,0	42,0	39,7	44,2	42,6	45	32,0	41

ряда – на ГМС Пятигорск (с 1891 г.). Реконструкция аккумуляции на леднике основывалась на расчётах по годовым суммам осадков. При этом, кроме данных ГМС Терскол, использовались ряды осадков на ГМС Местия, Хаиши и Сухуми (с 1905 г.), расположенных вдоль долины р. Ингури, – по направлению юго-западного переноса воздушных масс, приносящих основную массу осадков на южный склон Эльбруса. Материалы прямых наблюдений на леднике, использованные для построения модели, охватывали период 1982/83 – 1994/95 гг.

**Метеорологические данные.** В работе использованы также ряды наблюдений за среднемесячными температурами воздуха и количеством осадков на высокогорных метеостанциях, ближайших к местам отбора дендрохронологических образцов и характеризующих особенности климата в определённой долине (см. рис. 1), среди которых: ГМС Северный Клухор (43°25' с.ш., 41°3' в.д., 2037 м над ур. моря) – использовались данные за период с 1956 по 2005 г.; ГМС Теберда (43°27' с.ш., 41°44' в.д., 1313 м) – с 1927 по 2005 г.; ГМС Терскол (43°15' с.ш., 41°50' в.д., 2042 м) – с 1951 по 2005 г.

**Древесно-кольцевые хронологии.** С 2002 г. сотрудники отдела гляциологии Института географии РАН вели экспедиционные работы на Северном Кавказе в долине р. Теберда и в Приэльбрусье. Основываясь на общепринятых принципах отбора дендрохронологического материала, площадки для отбора образцов были заложены вблизи верхней границы леса на склонах долин рек Баксан (CHS), Теберда (КНТР) и Кизгич (KYZ), а также на предпольях ледников Большой Азау (BAZ, KV), Гарабаши (GAR), Терскол (TERS) и Алибек (ALI) (см. рис. 1, табл. 1). Керна отбирались с живых деревьев на высоте 1,2 м. Дальнейшая обработка кернов проводилась согласно стандартным методам дендроклиматологии [6]. Ширина колец измерялась на специальном автоматизированном оборудовании Lintab v 3.0 с помощью программы для анализа древесно-кольцевых серий и графического представления результатов TSAP (Time Series & Analysis Presentation) [29]. Для перекрёстной датировки использовали программу COFECNA [20]. Удаление возрастного тренда из каждой древесно-кольцевой серии реализовано подбором аппроксимирующей кривой и дальнейшим индексированием или стандартизацией (путём деления) в программе ARSTAN [16]. В работе использована также одна хронология максимальной плотности колец сосны (MaxD), полученная ранее для площадки с верхней границы леса в долине р. Теберда (КНТР). На основе этого параметра успешно восстановлены средние температуры апреля–сентября за 1800–2005 гг. [2]. Сравнение реконструкции с более длинным рядом наблюдений на ГМС Пятигорск

(1891–1997 гг.) подтверждает адекватность построенной модели и устойчивость сигнала во времени, а также показывает, что хронология максимальной плотности колец сосны, полученная для верховьев р. Теберда, отражает климатический сигнал не только на локальном уровне, но значима и для всего центрального региона Северного Кавказа.

Для оценки качества древесно-кольцевых рядов использовались коэффициент чувствительности и стандартное отклонение рядов. Качество хронологии можно оценить на основе разных показателей, в том числе с применением коэффициента EPS (Expressed Population Signal). В нашем случае значения EPS рассчитаны для каждой хронологии с помощью 30-летнего «плавающего» окна с 29-летним перекрытием. Индекс EPS, равный 0,85, гарантирует, что ширина кольца за данный год адекватно отражает прирост всей совокупности [31]. Чтобы оценить влияние климатических параметров (среднемесячной температуры воздуха и среднемесячного количества осадков) на изменчивость хронологий, рассчитаны климатические функции отклика за период с января по октябрь в год прироста и с мая по декабрь предыдущего года. Для этих целей использована программа DendroClim [14], с помощью которой вычислены коэффициенты корреляции и проверена стабильность сигнала во времени.

**Построение реконструкции.** Для получения реконструкции использована модель множественной регрессии. После этого просчитывалась наилучшая модель (с наивысшими коэффициентами корреляции) путём перебора всех возможных наборов предикторов (древесно-кольцевых хронологий) для каждого отклика (абляция, баланс массы). При разделении коротких инструментальных данных на верификационные и калибровочные качество самого обучения (т.е. оценка параметров модели) неизбежно снижается. В данном случае качество модели оценивалось методом скользящего контроля, т.е. модель строилась для всего периода, кроме одного года, а в оставшийся год рассчитывалась ошибка прогноза. Описанная процедура повторяется  $n$  раз, где  $n$  – длина периода (т.е. для каждого года). За итоговую ошибку прогноза принимается средняя ошибка за  $n$  процедур [1].

### Полученные результаты

**Древесно-кольцевые хронологии.** Все образцы сосны обыкновенной и пихты подвергнуты перекрёстному датированию, что позволило построить семь стандартных хронологий по ширине годичных колец сосны, одну хронологию пихты и одну хронологию по максимальной плотности сосны. Самой длинной оказалась хронология из долины р. Кизгич (KYZ; 1550–2006 гг.), что, скорее всего, обусловлено

природоохранным статусом территории (Архызский участок Тебердинского заповедника). Хронология пихты – самая короткая и начинается с 1800 г., так как старовозрастные пихты обычно поражены сердцевинной гнилью, которая часто обнаруживается у пихты и в других горных районах [15]. Основные статистические характеристики хронологий приведены в табл. 1. Хронологии по ширине годичных колец сосны характеризуются достаточно высокими межсерийными коэффициентами корреляции ( $r = 0,4 \div 0,6$ ), что указывает на наличие общего сигнала. Во всех хронологиях наблюдаются относительно высокие значения автокорреляции 1-го порядка, т.е. величина прироста текущего года в значительной степени зависит от прироста предыдущих лет. В большинстве случаев автокорреляция затухает к третьему году. Кавказские хронологии по ширине годичных колец имеют относительно низкие значения коэффициента чувствительности – от 0,11 до 0,16 (см. табл. 1), однако, как показывает мировая практика, это не ограничивает возможности климатической реконструкции.

Рассчитанные для хронологий EPS-значения превышают уровень 0,8 лишь за последние 100–200 лет, что, вероятно, связано с недостаточным числом образцов и низкими межсерийными коэффициентами корреляции. Локальная хронология КНТР, в которую входит максимальное число образцов (57), имеет самый длинный период (с 1753 г.) с индексом EPS > 0,8. Для хронологии по максимальной плотности достоверен период с 1800 г. Хронология максимальной плотности колец (MaxD) характеризуется низким значением среднеквадратического отклонения (0,061) и средней чувствительности (0,07), что свойственно хронологиям максимальной плотности колец. Значение автокорреляции 1-го порядка в хронологии равно лишь 0,02, что указывает на незначительное влияние предыдущих лет на формирование максимальной плотности поздней древесины кольца текущего года.

**Реконструкция баланса массы ледника Гарабаши.** В работе использованы данные инструментальных наблюдений на леднике за 1983–2005 гг. В этот период (23 года) средние значения аккумуляции и абляции отличались незначительно: 1222 и 1330 мм в.э. соответственно. Среднеквадратическое отклонение величин аккумуляции и абляции равно соответственно 174,7 и 426,6 мм в.э., а их относительная изменчивость  $C_v$  – 14,3 и 32,1%. Таким образом, летние температуры внесли больший вклад по сравнению со снегонакоплением в колебания годового баланса массы ледника Гарабаши. При анализе изменчивости составляющих баланса за этот период для аккумуляции не выявлено статистически значимого линейного тренда в

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между хронологиями ширины и максимальной плотности годовых колец с балансом массы ледника Гарабаши и его составляющими

Параметры	Название хронологии								
	KYZ	КНТР	CHS	GAR	KV	BAZ	TERS	ALI	MaxD
Аккумуляция	-0,18	0,16	-0,13	-0,14	0,15	0,09	0,32	0,09	-0,37
Абляция	-0,02	-0,37	-0,27	-0,25	-0,47	-0,35	-0,08	-0,17	<b>0,61*</b>
Баланс массы	-0,04	0,36	0,18	0,16	0,44	0,31	0,17	0,17	<b>-0,62</b>

\*Жирным шрифтом выделены статистически значимые коэффициенты ( $p < 0,05$ ).

отличие от заметного тренда увеличения абляции, что, очевидно, приводит к отрицательной динамике баланса массы ледника. Из табл. 2 видно, что хронология по максимальной плотности древесины, которая зависит от летних температур, положительно коррелирует с абляцией ледника Гарабаши и отрицательно – с его балансом массы. Эти связи объясняются чувствительностью максимальной плотности к летним температурам, с одной стороны, и большим вкладом абляции в баланс массы ледников Кавказа – с другой. Связи ширины колец с параметрами баланса массы ледника, в основном, незначимы.

На наш взгляд, целям реконструкции баланса наиболее соответствует модель множественной регрессии, в которой есть не только несколько предикторов, ответственных за конкретные климатические параметры (плотность поздней древесины), но и предиктор, ответственный за комплексный климатический сигнал (ширина годовых колец). Поиск наилучшей модели (с наивысшим коэффи-

циентом детерминации) вели путём перебора всех возможных наборов предикторов (индексы хронологий) для каждого отклика (аккумуляция, абляция, баланс массы). В итоговую модель вошли две хронологии по ширине годовых колец сосны – KYZ и КНТР, а также хронология по максимальной плотности – MaxD.

Для оценки вклада каждого предиктора в модель подробнее рассмотрим климатическую функцию отклика выбранных хронологий. Отметим, что в целом кавказские хронологии по ширине годовых колец слабо коррелируют с метеопараметрами. Самая тесная связь – между хронологией максимальной плотности и среднемесячными температурами тёплого периода на ГМС Северный Клухор ( $r = 0,7$ ), позволившая успешно реконструировать этот параметр до 1800 г. [2]. Установлено, что на прирост текущего года хронологий KYZ и КНТР положительно влияют температуры мая ( $r = 0,4$ ;  $p < 0,05$ ) и ноября предыдущего года ( $r = 0,39$ ;  $p < 0,05$ ), в то время как статистически значимых связей с температурами текущего года и с количеством выпавших осадков нет. Несмотря на то, что явного лимитирующего фактора для хронологий по ширине колец не обнаружено, есть все основания полагать, что в модель вошли хронологии, в той или иной степени чувствительные к осадкам. При проверке стабильности сигнала во времени с помощью корреляционного анализа на скользящем интервале можно констатировать, что в некоторые периоды (1940–1980 гг.) на прирост годовых колец хронологии KYZ отрицательно влияют осадки января (рис. 2), т.е. большое количество зимних осадков может задерживать инициацию роста клеток весной. Это также косвенно подтверждается связью хронологий с таким интегральным показателем, как речной сток [5].

Другой способ качественной оценки вклада хронологий по ширине годовых колец в модель – использование метода главных компонент. Оказалось, что при рассмотрении хронологий KYZ и КНТР за общий для них период 1680–2005 гг. первая главная компонента объясняет более 60% изменчивости (собственное значение 1,24). Для второй

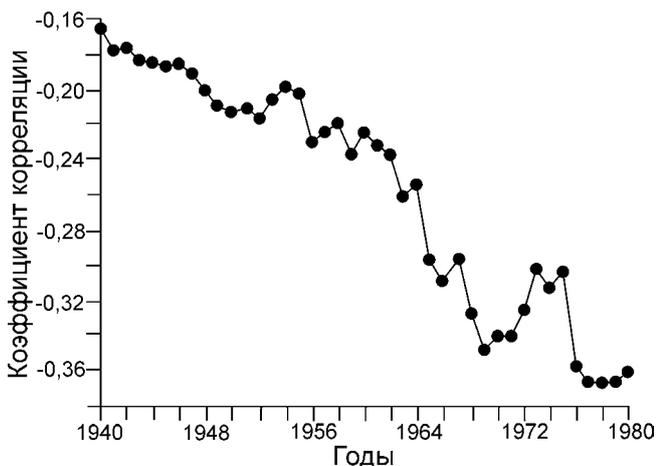
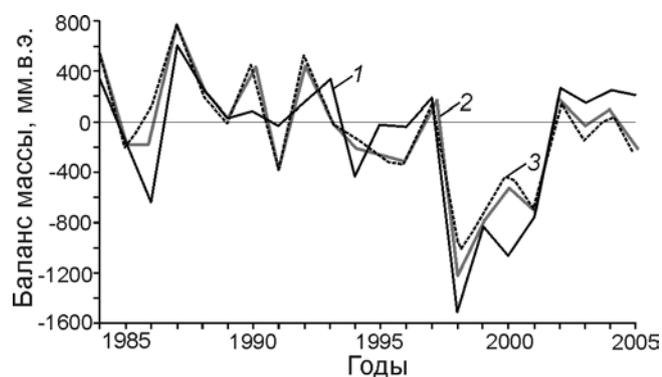


Рис. 2. Оценка стабильности климатического сигнала хронологии по ширине годовых колец KYZ на количество выпавших осадков в январе на ГМС Теберда (1937–2005 гг.)

Fig. 2. Temporal stability analysis of climate signal from ring-width chronology KYZ and January precipitation at Teberda weather station (1937–2005ss.)



**Рис. 3.** Ход баланса массы ледника Гарабаши:  
 1 – инструментальные данные; 2 – реконструированные по дендрохронологическим данным до скользящего контроля; 3 – то же, после скользящего контроля  
**Fig. 3.** Mass balance variations of Garbashi Glacier:  
 1 – instrumental records; 2 – tree-ring based reconstruction before cross-validation; 3 – tree-ring based reconstruction after cross-validation

главной компоненты, объясняющей 38% изменчивости, собственное значение было меньше единицы. Тем не менее, при корреляционном анализе между значениями второй главной компоненты и гляциологическими характеристиками установлена отрицательная корреляция с аккумуляцией ( $r = -0,36$ ).

Итак, проведённый анализ показал наличие сигнала зимних осадков в хронологиях по ширине годовых колец, что позволяет нам использовать модель с целью реконструкции. Отметим, что параметры годовых колец сосны (плотность и ширина) с высокой точностью отражают амплитуду и пики хода баланса массы ледника Гарабаши (рис. 3). Особенно это заметно в 1998–2001 гг. при самых низких значениях баланса массы ледника за рассматриваемый период. Минимальное значение баланса наблюдалось в 1998 г., когда средняя летняя температура на ГМС Терскол  $13\text{ }^{\circ}\text{C}$  была значительно выше среднего значения  $11,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  за весь период наблюдений до этого года (1982–1997 гг.) Кроме того, в 1998 г., в июне, когда таяние на леднике обычно только начинается, наблюдался температурный максимум в Терсколе, равный  $12,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  при норме в  $9,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  [9]. Таким образом, очевидно, что используемая нами для реконструкции модель адекватно отражает изменчивость баланса массы, связанную с катастрофическим таянием ледника в летние месяцы. В то же время отмечаются некоторые различия. Так, в 2000 г. значение баланса массы завышено по дендрохронологическим данным. Среднемесячная температура июля в Терсколе поднялась до рекордных  $15,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Отметим, что даже в 2000 г., когда заметно различие модели и данных измерений, получено резко отрицательное значе-

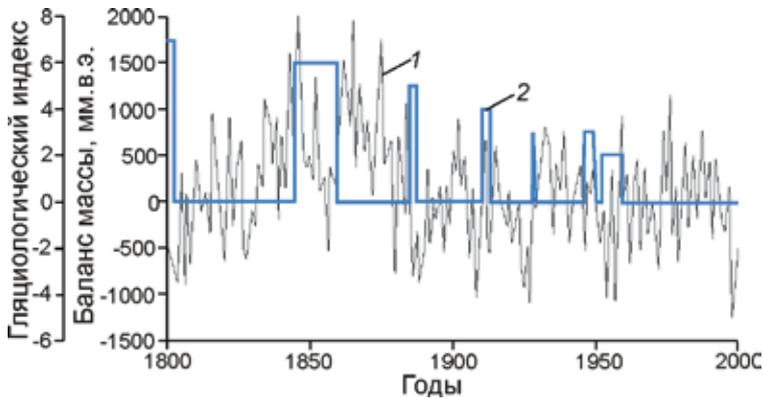
ние реконструированного баланса массы ледника. Таким образом, обнаруженная статистическая связь теоретически позволила нам реконструировать баланс массы ледника Гарабаши начиная с 1800 г.

### Обсуждение

**Реконструкция баланса массы ледника Гарабаши по дендрохронологическим данным.** В целом, полученная по дендрохронологическим данным реконструкция отражает тенденции изменений ледников на Кавказе. Так, она показывает накопление массы ледников в 1830–60-х годах, когда граница питания на ледниках Кавказа проходила примерно на 150 м ниже, чем в конце XX в., а ледники были существенно длиннее и имели большую толщину [4, 10]. Наступание ледников Эльбруса и Центрального Кавказа в середине XIX в. подтверждено историческими данными. На рисунке Г. Абиха 1849 г. ледник Азау, состоящий из четырёх потоков льда, заполнял полностью верховья долины и вторгался в старый сосновый лес. Согласно повторному рисунку Г. Абиха, сделанному в 1884 г., а также фотографиям М. Деши, в 1884–1887 гг. ледник уже начал отступать [13, 25]. Кроме того, О.Н. Соломина и И.С. Бушуева [12] дендрохронологическим методом с высокой точностью датировали одну из морен ледника Кашкаташ на Центральном Кавказе, которая относится к 1839–1840 гг. Согласно полученной реконструкции, с 1832 г. баланс массы ледника Гарабаши становится положительным и начинается формирование морены. Имея в виду обычное запаздывание реакции конца ледника на изменения баланса в 5–10 лет, эти данные хорошо согласуются между собой. Достоверность реконструкции также подтверждается сопоставлением с датировками морен на Кавказе (рис. 4).

В итоговую модель множественной регрессии для реконструкции баланса массы ледника Гарабаши, выбранную по наилучшему коэффициенту детерминации, вошли хронологии, полученные на пробных площадях Тебердинского района, хотя он и удалён на 100–150 км от Эльбруса. Хронология по максимальной плотности вошла в модель ввиду её высокой чувствительности к изменчивости температур тёплого периода; кроме того, она наилучшим образом воспроизводит изменчивость абляции. Использование хронологий по ширине годовых колец сосен Тебердинского района связано с большой абсолютной высотой их произрастания и расположением вблизи верхней границы леса. Поэтому они, видимо, лучше других хронологий отражают климатический режим в ледниковой зоне.

**Сравнение реконструкций.** Обе реконструкции годового баланса массы ледника Гарабаши (общий период 1800–2005 гг.), основанные на дендрохронологических (настоящая работа) и гляциометеорологи-



**Рис. 4.** Сравнение реконструированного по дендрохронологическим данным баланса массы ледника Гарабаши (ряд 1) с гляциологическим индексом для северного макросклона Центрального Кавказа (ряд 2)

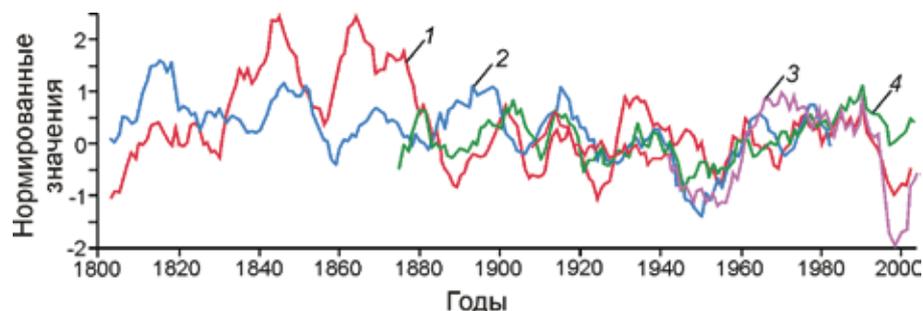
**Fig. 4.** Comparison of tree-ring based reconstructed mass-balance of Garabashi glacier (line 1) and glacier index (line 2)

ческих данных (рис. 5) [9], в целом, имеют хорошую взаимную согласованность ( $r = 0,53$ ;  $p < 0,05$ ), особенно для периода 1975–2005 гг. Однако обнаружены и различия. Так, в 1920-е годы, согласно реконструкции по метеоданным, значения баланса массы были близки к нулю, в то время как в реконструкции по дендрохронологическим данным в этот период преобладали отрицательные значения баланса массы. С 1929 г. обе балансовые кривые показывают отрицательные значения баланса вплоть до конца 1950-х годов. Это согласуется с ходом летней температуры по данным ГМС Терскол, которая в 1950-е годы была максимально высокой за весь период метеонаблюдений до настоящего времени. В 1960-е годы резко сменились циркуляционные условия, что благоприятно сказалось на состоянии ледников Кавказа. Однако две реконструкции этого времени существенно различаются. Так, ряд, полученный по дендрохронологическим данным, имеет отрицательные значения, а по гляциологическим – положительные. После 1975 г. оба ряда характеризуются высокой корреляцией и значимых различий не обнаружено.

Чтобы оценить достоверность дендрохронологической реконструкции ранее 1905 г., мы сравнили её

с реконструкцией баланса массы другого опорного горно-долинного ледника – Джанкуат, расположенного в долине р. Адыл-Су [3]. Интересно, что реконструкции показывают высокое сходство межгодовой изменчивости в период 1800–1905 гг., что косвенно подтверждает адекватность построенной модели. Общая синхронность динамики оледенения Альп и Кавказа позволяет нам сравнить полученную реконструкцию баланса массы Гарабаши с подобными реконструкциями. Для этой цели мы использовали реконструкцию баланса массы ледника Хинтерайсфернер (Hintereisferner, Австрия) также полученную по дендрохронологическим данным (см. рис. 5) [27]. Обнаружено высокое сходство между реконструированными значениями баланса массы выбранных ледников ( $r = 0,35$ ;  $p < 0,05$ ).

Хотелось бы отметить, что несогласованность хода реконструкций в отдельные периоды связана с рядом причин. Одна из наиболее вероятных – влияние на баланс массы ледников лет с аномально высокой аккумуляцией, которая часто не отражается в дендрохронологических рядах. К недостаткам нашей реконструкции можно отнести короткий инструментальный ряд наблюдений, положенных в основу



**Рис. 5.** Сравнение реконструкций баланса массы ледников.

Дендрохронологические данные: 1 – Гарабаши (настоящая работа), 2 – Хинтерайсфернер [27]; метеорологические данные: 3 – Гарабаши [9], 4 – Джанкуат [3]; ряды нормированы и сглажены 7-летним скользящим средним

**Fig. 5.** Mass-balance reconstructions comparison.

Based on tree-ring data: 1 – Garabashi Glacier (actual study), 2 – Hintereisferner Glacier [27]; based on meteorological records: 3 – Garabashi Glacier [9], 4 – Djankuat Glacier [3]; all series are normalized and smoothed by 7-year averaging

построения модели, и возможную нестационарность связи дендрохронологических и балансовых показателей во времени [22].

### Заключение

Впервые авторы попытались сделать реконструкцию баланса массы ледника Гарабаши по дендрохронологическим данным и сопоставить их с масс-балансовыми измерениями. Установлено, что дендрохронологический метод позволяет с достаточно высоким разрешением получить гляциологические характеристики ледника на период, не охваченный наблюдениями. Реконструированные значения баланса массы ледника на основе хронологий по ширине и плотности годовых колец достоверно отражают его изменчивость как в межгодовой, так и в многолетней динамике. Поиск старых, долгоживущих деревьев, а также погребённой древесины на Северном Кавказе увеличит длину реконструкции в глубь веков.

Реконструированные значения баланса массы ледника на основе хронологий ширины и плотности годовых колец достоверно отражают его изменчивость как в многолетней динамике, так и в динамике по годам. В последние десятилетия трансформирование баланса массы ледника Гарабаши тесно связано с изменчивостью летней температуры воздуха. Особенность нашей реконструкции состоит в том, что мы использовали хронологии не только по максимальной плотности, которая также тесно связана с летней температурой и абляцией, но и по ширине годовых колец, вклад которых, скорее всего, отражает и условия зимнего периода (возможно, влияние зимних осадков).

**Благодарности.** Мы благодарим сотрудников Института географии РАН В.Н. Михаленко и И.И. Лаврентьева за помощь в сборе дендрохронологического материала, сотрудника Государственного Тебердинского биосферного заповедника А.Н. Бока за помощь в проведении полевых работ, К. Николусси за предоставленные данные по леднику Хинтерайсфернер, М. Хьюза за помощь в выполнении лабораторных работ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ № 11-05-00304-а и при поддержке гранта НШ-479.2012.5 ведущей научной школы.

### Литература

1. Вапник В.Н., Червоненкис А.Я. Теория распознавания образов. М.: Наука, 1974. 415 с.
2. Долгова Е., Соломина О. Первая количественная реконструкция температуры тёплого периода на Кавказе по дендрохронологическим данным // ДАН. 2010. Т. 431. Вып. 2. С. 252–256.
3. Дюргеров М.Б., Поповнин В.В. Реконструкция баланса массы, пространственного положения и жидкого стока ледника Джанкуат во второй половине XIX века // МГИ. 1981. Вып. 40. С. 73–81.
4. Золотарёв Е.А. Эволюция оледенения Эльбруса: Картографо-аэрокосмические технологии гляциологического мониторинга. М.: Научный мир, 2009. 238 с.
5. Мацковский В.В., Долгова Е.А., Соломина О.Н. Опыт использования дендрохронологических данных для реконструкции стока р. Теберда за 1850–2002 гг. // Лёд и Снег. 2011. № 1 (113). С. 119–123.
6. Методы дендрохронологии. Часть I. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации / Отв. ред. Е.А. Ваганов, С.Г. Шиятов. Красноярск: изд. центр КГУ, 2000. 82 с.
7. Овчинников Д.В. Реконструкция баланса массы ледника Малый Актру (Алтай) по данным денситометрии годовых колец // Изв. РГО. 2004. № 134. Вып. 1. С. 37–45.
8. Рототаева О.В., Тарасова Л.Н. Реконструкция баланса массы ледника Гарабаши за последнее столетие // МГИ. 2000. Вып. 88. С. 16–26.
9. Рототаева О.В., Носенко Г.А., Хмелевской И.Ф., Тарасова Л.Н. Балансовое состояние ледника Гарабаши (Эльбрус) в 80-х и 90-х годах XX столетия // МГИ. 2003. Вып. 95. С. 111–121.
10. Серебряный Л.Р., Голодковская Н.А., Орлов А.В., Малысова Е.С., Ильвес Э.О и др. Колебания ледников и процессы моренонакопления на Центральном Кавказе. М.: Наука, 1984. 216 с.
11. Соломина О.Н. Горное оледенение Северной Евразии в голоцене. М.: Научный мир, 1999. 264 с.
12. Соломина О.Н., Бушуева И.С., Кудерина Т.М., Мацковский В.В., Кудиков А.В. К голоценовой истории ледника Уллукам // Лёд и Снег. 2012. № 1 (117). С. 85–94.
13. Abich H. Geologische Beobachtungen auf Reisen im Kaukasus um Jahre 1873. Moskau, 1875. 138 p.
14. Biondi F., Waikul K. DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies // Computers & Geosciences. 2004. V. 30. P. 303–311.
15. Büntgen U., Esper J., Frank D.C., Nicolussi K., Schmidhalter M.A. 1052-year tree-ring proxy for Alpine summer temperatures // Climate Dynamics. 2008. V. 25. P. 141–153.
16. Cook E.R. A Time Series Analysis Approach to Tree-Ring Standardization: Ph.D. Dissertation. Tucson, AZ: University of Arizona, 1985. 171 p.
17. Dyurgerov M., Meier M. Glaciers and the Changing Earth System: A 2004 Snapshot. Institute of Arctic and Alpine Research // Occasional Paper. 2005. V. 58. 116 p.
18. Fritts H.C. Tree rings and climate. L; N.Y.; San Francisco: Academic Press, 1976. 567 p.
19. Glacier Mass Balance Bulletin (MBB). IAHS (ICSII) – UNEP – UNESCO, Zurich. 1991–2011. № 1–11.
20. Grissino-Mayer H. Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA // Tree-Ring Research. 2001. V. 57. P. 205–221.
21. Larocque S.J., Smith D.J. «Little Ice Age» proxy glacier mass balance records reconstructed from tree rings in the Mt Waddington area, British Columbia Coast Mountains, Canada // Holocene. 2005. V. 15. P. 748–757.
22. Leonelli G., Pelfini M., Cherubini P. Exploring the potential of tree-ring chronologies from the Trafoi Valley (Central Ital-

- ian Alps) to reconstruct glacier mass balance // BOREAS. 2008. V. 37. № 1. P. 169–178.
23. Lewis D., Smith D.J. Dendrochronological mass balance reconstruction, Strathcona Provincial Park, Vancouver Island, British Columbia, Canada // Arctic, Antarctic and Alpine Research. 2004. V. 36. P. 598–606.
  24. Linderholm H.W., Jansson P., Chen D. A high-resolution reconstruction of Storglaciären mass balance back to 1780/1781 using tree-ring data and circulation indices // Quaternary Research. 2007. V. 67. P. 12–20.
  25. M. von Déchy. Kaukasus Reisen und Forschungen im kaukasischen Hochgebirge: Bd. I. Berlin, 1905. 348 p.
  26. Matthews J.A. Glacier and climatic fluctuations inferred from tree-growth variations over the last 250 years, central southern Norway // Boreas. 1977. V. 6. P. 1–24.
  27. Nicolussi K., Patzelt G. Reconstructing glacier history in Tyrol by means of tree-ring investigations // Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie. 1996. V. 32. P. 207–215.
  28. Oerlemans J. Atmospheric science: Extracting a climate signal from 169 glacier records // Science. 2005. V. 308. № 5722. P. 675–677.
  29. Rinn F. Tsap version 3.5. Reference Manual. Computer program for tree ring analysis and presentation. Heidelberg, Germany, Frank Rinn, 1996. 264 p.
  30. Watson E., Luckman B.H. Tree-ring based mass-balance estimates for the past 300 years at Peyto Glacier, Alberta, Canada // Quaternary Research. 2004. V. 62. P. 9–18.
  31. Wigley T.M.L., Briffa K.R., Jones P.D. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology // Journ. of Climate and Applied Meteorology. 1984. V. 23. P. 201–213.
  32. Wood L., Smith D.J., Demuth M.N. Extending the Place Glacier mass balance record to AD 1585, using tree-rings and wood density // Quaternary Research. 2011. V. 76. № 3. P. 305–313.

### Summary

The exploration whether tree-ring data can be effectually applied for the mass balance reconstruction in Caucasus was the main goal of this research. Tree-ring width and maximum density chronologies

of pine (*Pinus sylvestris L.*) at seven high-elevation sites in Northern Caucasus were explored for this purpose. As well as in other places of the temperate zone tree-ring width has complex climate signal controlled both temperature and precipitation. Instrumental mass balance records of Garabashi Gglacier started at 1983s. It is well known that Caucasus glaciers intensively retreat in the last decades and according to instrumental data mass balance variations are mostly controlled by the ablation, i.e. summer temperature variations. Maximum density chronology has statistically significant correlation with mass balance due to summer temperature sensitivity and great input of ablation to total mass balance variations. To include in our reconstruction different climatically sensitive parameters, stepwise multiple regression model was used. The strongest relation ( $r = 0.88$ ;  $r^2 = 0.78$ ;  $p < 0.05$ ) between two ring-width and one maximum density chronologies was identified. Cross-validation test ( $r = 0.79$ ;  $r^2 = 0.62$ ;  $p < 0.05$ ) confirmed model adequacy and it allowed to reconstruct Garabashi Glacier mass balance for 1800–2005ss. Reconstructed and instrumental mass balance values coincide well except the most recent period in 2000s, when the reconstructed mass balance slightly underestimated the real values. However even in this period it remained negative as well as the instrumental records. The bias can be explained by the weak sensitivity of the chronologies to winter precipitation (i.e. accumulation). The tree-ring based mass balance reconstruction was compared with one based on meteorological data (since 1905s). Both reconstructions have good inter-annual agreement ( $r = 0.53$ ;  $p < 0.05$ ) particularly for the period between 1975 and 2005. According to the reconstruction two distinct periods of positive mass balance occurred in 1830s and 1860s. They agree well with early historical data and the tree-ring of moraines of Kashkatash Glacier in Central Caucasus.