УДК 550.384.34+550.385.1

Моделирование и реконструкция параметров речного стока и баланса массы ледников на Северном Кавказе

© 2014 г. В.Г. Коновалов

Институт географии РАН, Москва

vladgeo@gmail.com

Simulation and reconstruction of parameters of streamflow and glacier mass balance in the Northern Caucasus

V.G. Konovalov

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow

Статья принята к печати 24 марта 2014 г.

Баланс массы, водный баланс, дендрохронология, ледники, моделирование, множественная линейная регрессия, речной сток, Северный Кавказ.
Dendrochronology, glaciers, mass balance, modeling, multiple linear regressions, Northern Caucasus, river runoff, water balance

Для исследования и решения поставленной проблемы использована обширная база факторов прямо (разнообразные сведения о климате) или косвенно (индексы ширины и максимальной плотности древесных колец) характеризующих условия формирования годового и сезонного стока рек и составляющих баланса массы ледников на Северном Кавказе. На основе этой информации получен и проверен на независимых данных ряд новых формул для расчёта сезонного стока р. Терек на семи гидропостах в 1901–2010 гг.; оценена также значимость различных аргументов в этих формулах для описания изменчивости функции. Впервые получены уравнения связи между высотой линии равновесия *ELA* в конце периода абляции, индексом площади аккумуляции *AAR* и составляющими годового баланса массы *Bn*, *Bw* и *Bs* на ледниках Джанкуат и Гарабаши. Разработана методика региональных расчётов средних величин аккумуляции на ледниках по данным об абляции и *ELA*.

To study and solve the outlined problem used an extensive database of factors directly (a variety of information about the climate) or indirectly (the indices of width and maximum density of tree rings) characterizing the conditions for the formation of the annual and seasonal river runoff and components of the mass balance for glaciers in the North Caucasus.

Введение

Общая проблема математического моделирования многолетнего режима естественного речного стока в зависимости от временнóго разрешения входной информации включает в себя: 1) расчёт годовых и сезонных объёмов стока/средних расходов воды для замыкающего гидроствора; 2) расчёт внутригодового распределения декадных, месячных и сезонных объёмов стока; 3) моделирование гидрографа стока как функции комплекса влияющих факторов; 4) моделирование неустановившегося безнапорного течения воды в открытых руслах. Для каждой из перечисленных задач существуют решения разного уровня полноты и качества. В качестве примера приведём далеко не полный список публикаций [1, 3, 14, 23]. Результаты моделирования стока используются в основном для промышленного и бытового водопользования и в проектах гидростроительства (гидроэлектростанции, плотины, оросительные системы, водохранилища и т.п.). Задачи нашей работы – статистическое моделирование и реконструкция сезонных объёмов речного стока и составляющих годового баланса массы ледников на Северном Кавказе. Предполагается, что результаты могут быть использованы при проектировании ГЭС, обосновании строительства водохранилищ, многолетнего регулирования стока, совершенствовании методов сверхдолгосрочных гидрологических и гляциологических прогнозов, а также для развития информационной и научно-методической базы региональных гидролого-гляциологических исследований.

На Северном Кавказе П.М. Лурье [15] выделяет три гидрологических сектора: Кубанский – бассейны р. Кубань и верхнего течения р. Кума; Терский – бассейн р. Терек; Дагестанский – бассейн рек Каспийского побережья от р. Акташ на севере до р. Сумгаит на юге. В табл. 1, по данным работ [10, 15], приведены гидролого-гляциологические характеристики для северного и южного склонов Кавказа, а также по отдельным речным бассейнам, что дало возможность выбрать наиболее важный из них для решения поставленной проблемы с учётом значимости ледникового стока и динамики оледенения. Им стал бассейн р. Терек, где данные гидропостов, замыкающих различные площади водосбора, априори позволяют проанализировать изменение вкладов климатических факторов при моделировании и расчётах годового стока. В этом бассейне расположено самое крупное оледенение Кавказа, вклад которого в суммарный объём ледникового стока всего региона составляет 34,0%, а на Северном Кавказе достигает 58,1%. Исследованиями Г.А. Носенко и др. [18]

Таблица 1. **Гидрологические и гляциологические характеристики регионов Северного Кавказа***

Регионы	L, км	F_{bas}, км^2	F_{gl}, км^2/%	W_{gl}, км^3/%	$-\Delta F_{gl}$ 1895–2000 гг., км^2/%	ΔW_{gl} 1895–2000 гг., км^3/%
Южный склон Кавказа			394,4/31,6	1,115/41,5	187,8/19,8	0,513/27,6
Северный склон Кавказа	11 311	302 993	853,6/68,4	1,574/58,5	760,5/80,2	1,343/72,4
Речные бассейны:						
Кубань (К)	906	57 900	203,9/16,3	0,555/20,6	127,7/13,5	0,358/19,3
Терек (Т)	623	43 200	597,0/47,8	0,915/34,0	539,6/56,9	0,795/42,8
Сулак (Д)	169	15 200	41,4/3,3	0,081/3,0	72,7/7,7	0,148/8,0
Самур (Д)	213	7330	8,4/0,7	0,019/0,7	16,8/1,8	0,035/1,9
Кусарчай (Д)	113	694	2,9/0,2	0,004/0,1	3,7/0,4	0,007/0,4
Всего			1248,0/100	2,689/100,0	948,3/100,0	1,856/100,0

*К, Т, Д – соответственно Кубанский, Терский и Дагестанский гидрологические секторы; L – длина речной сети; F_{bas} – площадь бассейна; F_{gl} – площадь оледенения в 2000 г.; W_{gl} – объём ледникового стока в 2000 г.; $-\Delta F_{gl}$ – сокращение площади оледенения; ΔW_{gl} – уменьшение объёма ледникового стока по данным работы [15].

установлено продолжение сокращения площади оледенения Большого Кавказа в 2001–2010 гг. В частности, на северном склоне она уменьшилась на 4,6%, а на южном – на 5,6%.

Постановка задачи и исходные данные

Цель исследования – моделирование пространственно-временно́й изменчивости параметров сезонного (апрель–сентябрь) стока р. Терек и многолетних колебаний составляющих годового баланса массы ледников в этом бассейне и на сопредельной территории. Предполагается установить статистические связи между набором дискретных климатических факторов и речным стоком в замыкающем гидростворе. Этот достаточно упрощенный подход не предусматривает в явном виде физическое описание процесса формирования стока, зато позволяет испытать при статистическом моделировании разнообразный набор аргументов, в том числе многолетние хронологии годовых индексов ширины и максимальной плотности древесных колец, полученные сотрудниками Института географии РАН в условиях Северного Кавказа [6–8, 16]. Решение поставленной задачи будет безусловно интересно для потребителей в области водопользования и гидроэнергетики, а также для прогноза изменений водных ресурсов в связи с возможными изменениями климата.

В качестве зависимых переменных использованы многолетние ряды сезонного стока р. Терек на семи гидропостах: Казбеги, Владикавказ, Эльхотово, Котляревская, Моздок, Степное, Каргалинская. Источники данных – работы [5, 22]. Проанализированы также данные по стоку р. Теберда (гидропост Теберда) в связи с использованием полученных в этом бассейне дендрохронологических данных [6–8, 16]. Гидропост Теберда находится в верховье р. Кубань. Сумма осадков, температура и влажность воздуха – достаточно очевидные параметры для описания пространственно-временно́й изменчивости стока, поскольку они полностью или частично должны характеризовать приходную и расходную составляющие годового водного баланса речного бассейна. В работе использованы данные 25 метеостанций, расположенных в бассейне Терека и на сопредельной территории. Источники данных – [4, 29, 31]. В отдельных случаях многолетние ряды стока и климатических факторов содержат пропуски в наблюдениях. В наших статистических проработках пропуски заполнялись на основе достаточно тесной (коэффициент корреляции не менее 0,70) зависимости рассматриваемого пункта с пунктом-аналогом на Северном Кавказе.

Наряду с информацией наземной гидрометеорологической сети [4, 29, 31], использовались также многолетние ряды месячных значений осадков, температуры воздуха и других характеристик климата, извлечённые для территории Северного Кавказа из нескольких глобальных и региональных климатических архивов [21, 25, 32, 34, 37, 38], которые отличаются продолжительностью временны́х рядов, регулярностью их пополнения, составом и детальностью информации. В число переменных, описывающих условия формирования стока, включен также индекс сухости Палмера [35] – *PDSI*. Этот индекс для конкретного пункта и месяца характеризует разность между суммой осадков, необходимой для сохранения нормального уровня водного баланса, и фактической суммой осадков. В открытом доступе имеются исходные значения *PDSI* [24, 25] за 1870–2005 гг. с шагом 2,5° по географическим координатам и ограничением по широте 60° ю.ш. – 77,5° с.ш. Опыт включения индекса *PDSI* в со-

став уравнений множественной линейной регрессии для описания многолетнего режима годового стока [13] подтверждает возможность увеличения сводного коэффициента корреляции соответствующих многофакторных зависимостей. В настоящее время методика расчёта индекса *PDSI* упрощена и улучшена [25, 27], интервал между узлами регулярной сетки географических координат уменьшен до 0,5°, длина рядов в глобальном масштабе равна 1850–2012 гг., диапазон высоты узлов над уровнем моря – от −148 до 6223 м. После усовершенствования индекс получил название *scPDSI* (self calibrating *PDSI*). Многие годы сток Терека на значительной части протяжённости реки используется для орошения и гидроэнергетики, что искажает естественный режим стока на гидропостах Котляревская, Моздок, Степное и Каргалинская [5]. Основные водозаборы расположены между гидропостами Котляревская – Моздок и вблизи гидропоста Каргалинская.

К сожалению, на Северном Кавказе отсутствуют многолетние ряды измерений или расчётов, характеризующие годовые величины ледникового стока и баланса массы ледников в целом для речных бассейнов. Поэтому в нашем исследовании использованы только измеренные и рассчитанные значения аккумуляции, абляции и баланса массы [20, 28, 30] на двух ледниках: Джанкуат (площадь ледника F_{gl} = 2,69 км^2, данные за 1968–2010 гг.) и Гарабаши (F_{gl} = 4,42 км^2, данные за 1982–2010 гг.). Морфометрические характеристики этих ледников приведены в публикациях [20, 28, 30]. По данным [10], в 2000 г. на Большом Кавказе было 2103 ледника. Из них на южном склоне – 582, а на северном склоне – 1521, в том числе в бассейне Терека – 842 ледника. Средний размер ледника на северном склоне – 0,56 км^2, а в бассейне Терека – 0,71 км^2. После сопоставления площади ледников Джанкуат и Гарабаши со средними значениями для северного склона, а также на основании анализа гистограммы на рис. 1, сделан вывод, что пространственная репрезентативность балансовых наблюдений на этих ледниках недостаточна для региональных выводов и расчётов ледникового стока. Однако это не препятствует локальному исследованию составляющих баланса массы как функции климатических и других перечисленных ранее характеристик.

На верхней границе леса в бассейнах рек Баксан и Теберда (Северный Кавказ) для хронологического датирования ширины и плотности древесных колец отобраны керны из стволов пихты и сосны обыкновенной. Керны отбирались и обрабатывались сотрудниками Института географии РАН [6–8, 16] по стандартной методике, принятой в дендроклиматологии. Всего на восьми дендроплощадках отобрано 213 образцов. В результате датирования образцов составлены восемь локальных хронологий для ширины *W* и одна для максимальной плотности годичных колец *maxD*. Максимальная и минимальная продолжительности хронологии для ширины годичных колец равны соответственно 1550–2006 и 1800–2005 гг. Продолжительность хронологии для максимальной плотности – 1759–2005 гг. В работах [6, 8] приведены параметры, характеризующие информационное качество хронологий и результаты реконструкции годового баланса массы *Bn* ледника Гарабаши по корреляционным зависимостям типа $Bn = f(W)$ или $Bn = f(W, maxD)$. Для решения нашей задачи важен также вывод [6, 8], что на всех дендроплощадках величина прироста древесного кольца текущего года в значительной степени обусловлена приростом предыдущих лет.

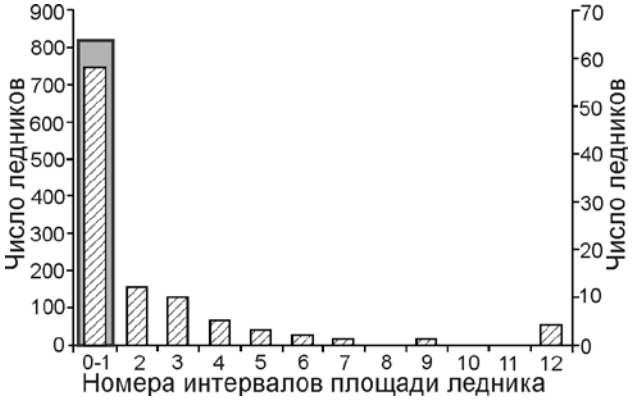

Рис. 1. Гистограмма площади ледника на Северном Кавказе. Для уменьшения длины гистограммы по оси абсцисс сгруппированы количества ледников в интервалах 0–2,0 и 2,01–4,0 км^2, а последний интервал площади принят равным 24,01–36,2 км^2. Шкала числа ледников на левой оси ординат относится к диаграмме серого цвета, а на правой оси ординат – к заштрихованным диаграммам. Шаг изменения площади по оси абсцисс равен 2 км^2

Fig. 1. Histogram of glacier area in the North Caucasus. To reduce the length of the histogram on the x-axis in the first interval combined number of glaciers in the ranges 0–2.0 and 2.01–4.0 km^2 area and the last interval is assumed to be 24.01–36.2 km^2. Scale number of glaciers on the left y-axis refers to the grey column chart, and the right y-axis to the shaded columns. Step changes in the area along the abscissa axis is 2 km^2

Расположение ряда гидропостов (ГП), метеостанций, дендроплощадок и речных бассейнов в Кавказском регионе показано на рис. 2. Отметим основополагающий и исключительно полезный вклад, который внесли руководство и сотрудники

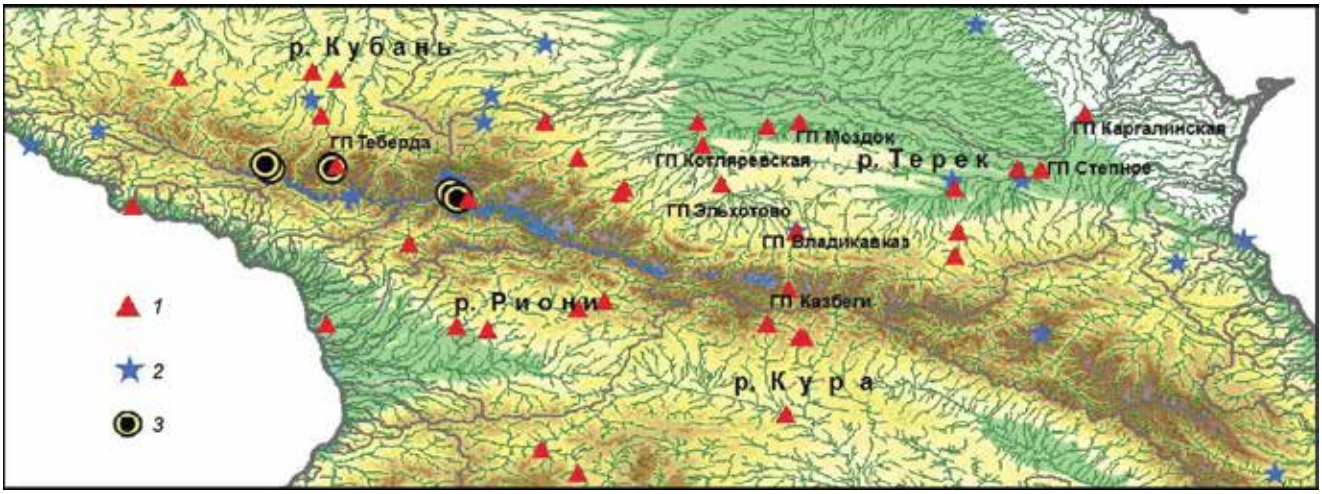

Рис. 2. Расположение гидропостов (ГП), метеостанций, дендроплощадок и речных бассейнов в Кавказском регионе:
1 – гидропосты; *2* – метеостанции; *3* – дендроплощадки; подписанные гидропосты находятся в бассейне Терека, кроме гидропоста Теберда, расположенного в бассейне Кубани; линиями серого цвета показаны границы речных бассейнов, синего – расположение ледников, зелёного – речная сеть

Fig. 2. Location number of gauging stations (ГП), weather stations, tree ring sites and river basins in the Caucasus region:
1 – gauging stations; *2* – meteostation; *3* – tree ring site; signed gauging stations are located in the basin of the Terek, except гп Teberda, located in the Kuban river basin; black lines show the boundaries of river basins, blue color shows the location of glaciers, green lines are river network

отдела гляциологии Института географии РАН и географического факультета МГУ в организацию и проведение многолетних комплексных гляциологических и дендрохронологических исследований на Северном Кавказе, обработку и публикацию этих материалов в научных статьях и справочных изданиях. Нет смысла дублировать здесь известные географические и гидрографические описания территории Северного Кавказа и бассейна Терека, поэтому ограничимся ссылками на некоторые публикации, например [1, 2, 10, 15, 17, 19].

Климатические характеристики формирования стока р. Терек

Внутригодовое распределение стока Терека по данным семи гидропостов характеризует рис. 3. Там же представлено распределение модульных коэффициентов месячных значений осадков и температуры воздуха по данным десяти метеостанций [4, 29, 31], находящихся в бассейне Терека и на сопредельной территории Кавказа. Внутригодовое распределение средней за месяц упругости водяного пара в воздухе аналогично распределению на рис. 3, *б*. Судя по рис. 3, процесс формирования стока Терека имеет следующие особенности: в среднем, период половодья наблюдается в мае–сентябре одновременно на всех рассматриваемых гидропостах; внутригодовое распределение стока, температуры воздуха и упругости водяного пара синхронно во времени и имеет одномодальный характер; внутригодовое распределение месячных сумм осадков имеет явные территориальные различия, которые иллюстрирует рис. 3, *в–г*. Существенный вклад в сток Терека, особенно в летний период и в годы с дефицитом осадков, вносит поступление талой воды из области оледенения. По расчётам [10], объём ледникового питания в верховье бассейна Терека составляет 17,2%, а в устье – 8,5% годового речного стока. Поэтому в число факторов, влияющих на сток и баланс массы ледников, кроме сумм осадков за характерные периоды года, включены также средние за апрель–сентябрь значения температуры воздуха и упругости водяного пара в воздухе.

Оценка пространственного изменения температуры воздуха на Северном Кавказе, характеризующей условия формирования сезонного стока Терека, получена путём исследования корреляционной структуры поля средней за апрель–сентябрь температуры воздуха $T_{\mathrm{IV-IX}}$ по данным 19 метеостанций за 1950–2010 гг., расположенных в интервалах 37,28–47,75° в.д., 41,47–44,98° с.ш. на высоте 30–2927 м над ур. моря. В самом простом одномерном варианте зависимости $T_{\mathrm{IV-IX}}$ от высоты местности Z коэффициент детерминации оказался равным 0,98, что подтверждает пространственную однородность поля температуры воздуха на рассматриваемой территории. В результате подобной проработ-

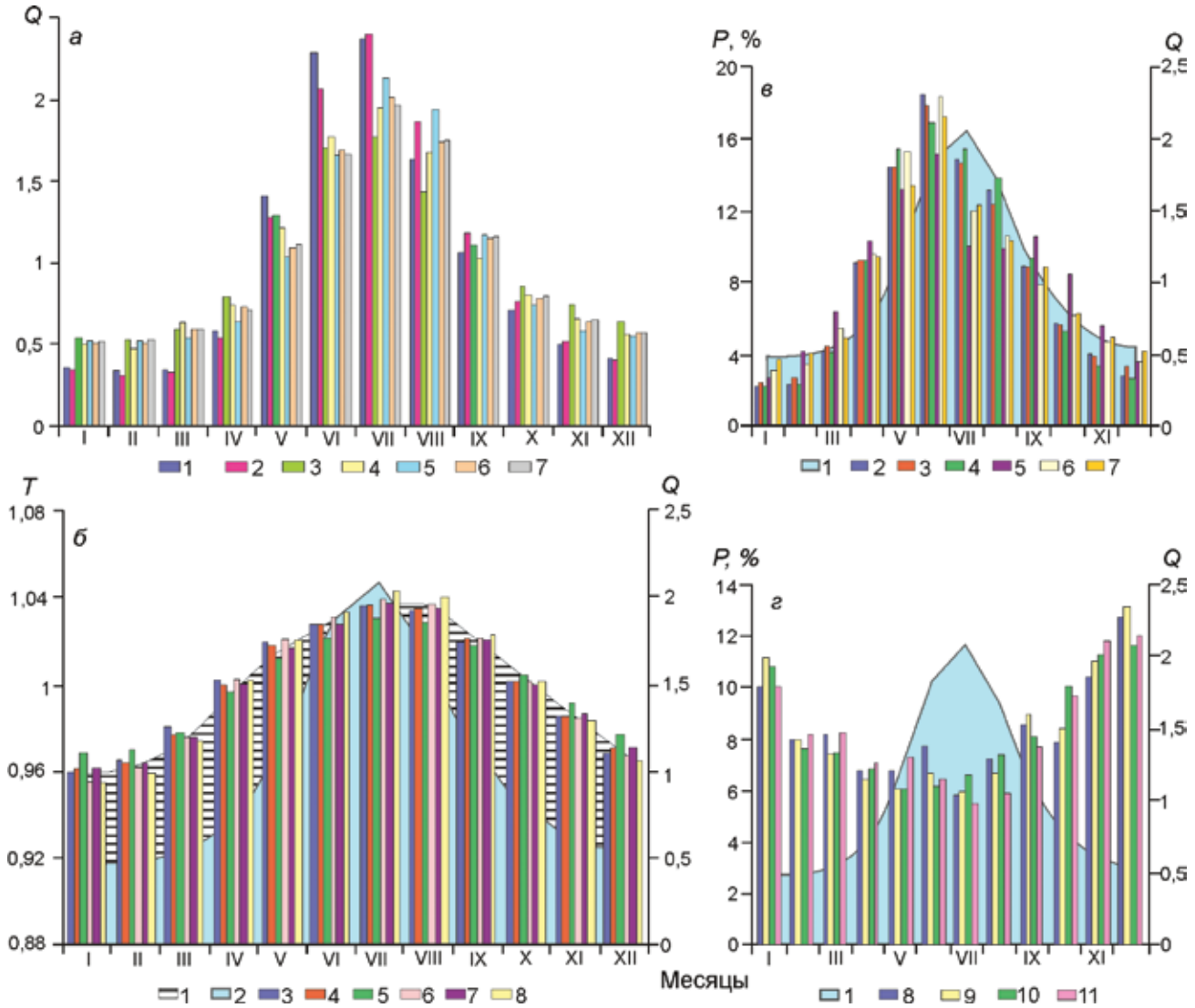

Рис. 3. Внутригодовое распределение стока, осадков и температуры воздуха в бассейне Терека.
а – месячные модульные коэффициенты *Mo* расхода воды *Q* в бассейне Терека; гидропосты: 1 – Казбеги, 2 – Орджоникидзе, 3 – Эльхотово, 4 – Котляревская, 5 – Моздок, 6 – Степное, 7 – Каргалинская; *б* – модульные коэффициенты температуры воздуха *T* и стока *Q*: 1 – средний модульный коэффициент *T* для шести метеостанций; 2 – *Mo* стока Терека; *Mo* для метеостанций: 3 – Зеленчукская, 4 – Кисловодск, 5 – Шаджатмаз, 6 – Владикавказ, 7 – Ахты, 8 – Пятигорск; *в*, *г* – модульные коэффициенты осадков *P* (%) и стока *Q*: 1 – *Mo* стока Терека; *Mo* для метеостанций: 2 – Зеленчукская (928 м над ур. моря), 3 – Кисловодск (943), 4 – Шаджатмаз (2070), 5 – Владикавказ (702), 6 – Ахты (1016), 7 – Пятигорск (576), 8 – Анапа (30), 9 – Туапсе (67), 10 – Сочи (57), 11 – Красная поляна (566)

Fig. 3. Interannual distribution of runoff, precipitation, and air temperature in the Terek basin
a – monthly modular coefficients *Mo* of flow *Q* in the Terek River basin. Gauging stations: 1 – Kazbegi, 2 – Ordzhonikidze, 3 – Elkhotovo, 4 – Kotlyarevskaya, 5 – Mozdok, 6 – Stepnoe, 7 – Kargalinskaya; *б* – modular coefficients of air temperature *T* and flow *Q*: 1 – average modular ratio *T* for the six meteo stations, 2 – *Mo* flow Terek; *Mo* meteo station: 3 – Zelenchukskaya, 4 – Kislovodsk, 5 – Shadzhatmaz, 6 – Vladikavkaz, 7 – Akhty, 8 – Pyatigorsk; *в* and *г* – Modular ratios of precipitation *P* (%) and runoff *Q*: 1 – *Mo* flow Terek. *Mo* meteo station: 2 – Zelenchukskaya (928 meters above sea level), 3 – Kislovodsk (943), 4 – Shadzhatmaz (207), 5 – Vladikavkaz (702), 6 – Akhty (1016), 7 – Pyatigorsk (576), 8 – Anapa (30), 9 – Tuapse (67), 10 – Sochi (57), 11 – Krasnaya Polyana (566)

ки для средней упругости водяного пара в воздухе за апрель–сентябрь $V_{IV–IX}$ получена региональная зависимость $V_{IV–IX} = f(Z)$ с коэффициентом детерминации 0,96. Из этого следует, что приведения к некоторой постоянной высоте над уровнем моря локальных данных о температуре воздуха и упругости водяного пара в воздухе для расчётов сезонного стока Терека не требуется. Аналогичный анализ выполнен по данным об осадках на метеостанциях за май–сентябрь $P_{V–IX}$. Коэффициент детерминации одномерной региональной функции $P_{V–IX} = f(Z)$ составил 0,52, а для зависимости $P_{V–IX}$ от географиче-

ских координат и высоты местности – 0,66. Таким образом, климатическая роль осадков для статистического описания временнóй изменчивости стока Терека определяется локальным вкладом этой переменной в описание дисперсии речного стока на выбранных гидропостах.

По данным за 1950–1985 гг., на семи рассматриваемых гидропостах установлена важная для гидрологических расчётов и прогнозов особенность стока Терека, которая состоит в том, что по мере увеличения сдвига назад по времени связь среднего расхода воды за апрель–сентябрь текущего года с расходом в предшествующие годы меняется от крайне слабой (коэффициент корреляции от 0,14 до 0,23) до почти полного её отсутствия. Аналогичное свойство внутрирядных связей сохраняется и для средних за год расходов. Только на гидропосту Эльхотово при сдвиге во времени от одного до четырёх лет коэффициент автокорреляции изменяется от 0,43 до 0,35. В отличие от стока, автокорреляция в рядах индекса ширины годичных колец W довольно значительная при сдвиге в один год и существенная – при сдвиге назад в три года. В первом случае коэффициент автокорреляции изменяется от 0,64 до 0,45, во втором – от 0,41 до 0,14. В отличие от W, соответствующая автокорреляция ряда максимальной плотности $maxD$ равна 0,12 и 0,04. Из этого следует, что рассматриваемые ряды W, где довольно велика роль предыстории, заведомо малоэффективны для расчётов и прогнозов стока Терека, где такая предыстория отсутствует или очень мала. Учитывая, что средний коэффициент корреляции между $maxD$ и W составил 0,22, эти ряды использовались как независимые переменные при статистическом моделировании стока и баланса массы ледников. Считается [8], что в реконструкциях составляющих баланса массы ледников величина $maxD$ может служить относительным аналогом температуры летнего периода. Аналогичный и достаточно определённый вывод по поводу W не получен.

Методика расчёта стока

Научной основой моделирования и реконструкции временны́х колебаний речного стока Q служит уравнение (1) годового водного баланса речного бассейна:

$$Q = K_R(P - ET) \pm \Delta W, \text{ км}^3, \qquad (1)$$

где K_R – коэффициент трансформации поступления влаги на поверхность водосбора; P – осадки; ET – эвапотранспирация; ΔW – динамические запасы воды в бассейне.

Достаточно просто вопрос описания колебаний стока Q как элемента водного баланса водосбора решается путём измерений на замыкающем гидростворе. Принято, что величина ΔW может быть приравнена к объёму стока за период межени. Очевидно, что в рамках уравнения годового водного баланса (1) разность осадков P и эвапотранспирации ET в качестве характеристики климата должна быть проинтегрирована по площади водосбора и выражена в единицах объёма. Для численного описания и расчёта полей осадков, температуры воздуха и других влияющих факторов, особенно в горах, используется ограниченный набор пунктов измерений. Репрезентативность этих пунктов относительно соответствующих полей климатических факторов априори неизвестна и устанавливается *post factum*, если в результате поиска и отбора исходных данных получено и проверено эмпирическое уравнение связи стока с влияющими факторами. Стратегия объективного отбора и оптимизации состава независимых переменных в уравнении множественной линейной регрессии как стохастического аналога уравнения (1) была направлена на решение комплекса задач.

1. Получить относительные оценки вкладов измеренных на метеостанциях сумм осадков за октябрь–март и апрель–сентябрь, средней температуры воздуха и средней упругости водяного пара в воздухе за апрель–сентябрь в описание дисперсии зависимой переменной (сток Терека либо составляющие баланса массы ледников).

2. Учитывая ограниченность имеющихся рядов наблюдений на метеостанциях, исследовать эффективность использования в уравнениях множественной линейной регрессии $Q = f(X1 \div X4)$ аналогичных характеристик из перечисленных ранее климатических баз данных. Здесь $X1 \div X4$ – пункты измерения переменных, прямо или опосредованно представляющих климатические факторы стока.

3. Отобрать достаточно обоснованные уравнения для многолетних реконструкций стока Терека и составляющих баланса массы ледников. Идентификация переменных $X1 \div X4$ в качестве потенциальных факторов стока или их сочетаний с различными индексами выполнена методом [12] полного перебора возможных комбинаций аргументов в правой части эмпирического уравнения $Q = f(X1 \div X4)$, поиска наивысшего коэффициента корреляции и расчёта параметров линейной регрессии с первого до четвёртого порядков.

4. Исследовать возможность расчёта сезонного стока Терека при использовании в качестве неза-

висимых переменных хронологий годовых индексов ширины и плотности древесных колец.

В качестве источника информации по осадкам использованы наблюдения метеостанций [4, 29, 31] и данные [21, 25, 32, 34, 37, 38] в узлах регулярной сетки с интервалом 0,5° и 0,25° по географическим координатам. В процессе регрессионного анализа вместе с осадками за характерные периоды гидрологического года рассмотрены: средняя температура воздуха и средняя упругость водяного пара в воздухе за апрель–сентябрь; индексы *PDSI* и *scPDSI* [24, 25, 27]; индексы хронологий ширины и максимальной плотности годичных колец пихты и сосны обыкновенной, полученных [6–8, 16] на дендроплощадках (см. рис. 2). Для уравнений множественной линейной регрессии с различным составом аргументов рассчитаны коэффициенты корреляции и детерминации, критерий качества и другие параметры.

Формулы для расчёта сезонного стока р. Терек

Решение поставленной в работе задачи получено путём выявления пунктов и видов наблюдений, адекватно характеризующих основные фазы гидрологического цикла в бассейне Терека как реки снего-ледниково-дождевого типа питания. Локальные суммы осадков за характерные периоды октябрь–март ($P_{\text{X–III}}$) и апрель–сентябрь ($P_{\text{IV–IX}}$), средняя температура воздуха и упругость водяного пара в воздухе за апрель–сентябрь (соответственно $T_{\text{IV–IX}}$ и $V_{\text{IV–IX}}$) использованы для параметризации составляющих годового водного баланса – накопление и таяние твёрдых осадков, жидкие осадки и испарение. Список климатических факторов сезонного стока Терека был увеличен за счёт информационных возможностей базы данных *CRU* 3.2.1. [32], где в узлах регулярной пространственной сетки, наряду с характеристиками температуры воздуха и осадков, содержатся также многолетние ряды средних месячных значений упругости водяного пара в воздухе (*vap*), разности максимальной и минимальной температуры воздуха (*dtr*), потенциальной эвапотранспирации (*pet*). Согласно [32], величина *pet* в мм день$^{-1}$ определяется по формуле из работы [27]:

$$pet = \frac{0{,}408\Delta\left(Rn - G\right) + \gamma\dfrac{900}{T + 273{,}16}U2\left(e_a - e_d\right)}{\Delta + \gamma\left(1 + 0{,}34U2\right)}, \qquad (2)$$

где Rn – радиационный баланс на деятельной поверхности (МДж м$^{-2}$ день$^{-1}$); G – поток тепла в почве, принят равным нулю; T – температура воздуха на высоте 2 м, °С; $U2$ – скорость ветра на высоте 2 м, м с$^{-1}$; $e_a - e_d$ – дефицит упругости водяного пара на высоте 2 м, кПа; Δ – параметр кривой упругости водяного пара, кПа °С$^{-1}$; γ – психрометрическая константа, кПа °С$^{-1}$; 900 – эмпирический параметр типа поверхности (кДж$^{-1}$кг К день$^{-1}$); 0,34 – ветровой параметр для типа поверхности, см$^{-1}$.

Исходная информация для расчёта *pet* содержится в базе данных *CRU* 3.2.1. и других источниках, см. [27]. Для определения среднего за месяц значения величину *pet* по формуле (2) следует умножить на масштабный коэффициент 10 и число дней в месяце. Наборы данных (*P*, *T*, *V*, *vap*, *dtr*, *pet*) для численных экспериментов по программе регрессионного анализа [12] формировались так, чтобы аргументы, выбранные в эмпирические формулы $Q = f(X1 \div X4)$, можно было интерпретировать либо как стохастические аналоги составляющих уравнения годового водного баланса, либо как более или менее репрезентативные характеристики условий формирования стока Терека (индексы *PDSI* и *scPDSI*, ширина и плотность годичных колец деревьев). Для получения уравнений $Q = f(X1 \div X4)$ на основе климатических факторов стока (осадки, температура воздуха, упругость водяного пара в воздухе) сначала использовались исходные наблюдения на метеостанциях, а затем тот же набор аргументов, но уже извлечённых из базы данных *CRU* 3.2.1. Этим способом решалась задача реконструкции стока Терека за 1901–2010 гг. на семи гидропостах по климатическим данным.

На заключительном этапе регрессионного анализа рассмотрены варианты эмпирических уравнений $Q = f(X1 \div X4)$, содержащих индексные характеристики условий формирования стока. Изменение параметров уравнений множественной линейной регрессии для расчёта сезонного стока Терека на семи гидропостах при различном составе исходных данных характеризуют табл. 2, 4, где серой заливкой выделены рекомендуемые варианты расчёта стока с учётом обоснованности состава уравнений и целесообразности повышения порядка регрессии для улучшения тесноты рассматриваемых связей. Там же приведены сведения о результатах независимого контроля полученных формул. Значения в последней строке табл. 2, 3 позволяют оценить значимость изменения параметров регрессии и относительного вклада аргументов в описание изменчивости стока в целом для бассейна Терека. Данные табл. 2–4 служат основой для следующих выводов.

1. Различие сводных коэффициентов корреляции для уравнений регрессии 3-го и 4-го порядков в большинстве случаев весьма мало.

Таблица 2. **Параметры уравнений регрессии $Q_{IV-IX} = f(T_{IV-IX}, P1_{X-III}, P2_{IV-IX})$ по данным метеостанций (*mst*) и базы данных *CRU* 3.2.1.; период 1961–1985 гг.***

Гидропосты	$Q_{IV-IX} = f(T_{IV-IX}, P1_{X-III}, P2_{IV-IX})$ – *mst*										O_1, %	O_2, %	$Q_{IV-IX} = f(T_{IV-IX}, P1_{X-III}, P2_{IV-IX})$ – *CRU* 3.2.1.										O_1, %	O_2, %
	$R(3)$	$R^2(3)adj$	$R(4)$	$R^2(4)adj$	Вклады T, $P1$, $P2$								$R(3)$	$R^2(3)adj$	$R(4)$	$R^2(4)adj$	Вклады T, $P1$, $P2$							
					$R(3)$			$R(4)$									$R(3)$			$R(4)$				
					T	$P1$	$P2$	T	$P1$	$P2$							T	$P1$	$P2$	T	$P1$	$P2$		
Казбеги	0,80	0,58	0,83	0,63	0	0,82	0,18	0,13	0,67	0,20	5,8	14,8	0,78	0,55	0,80	0,56	0	0,35	0,65	0	0,37	0,63	6,7	17,0
Владикавказ	0,74	0,48	0,78	0,53	0	0,80	0,20	0	0,85	0,15	9,6	19,2	0,84	0,66	0,93	0,84	0,31	0	0,69	0,48	0,23	0,29	5,1	22,3
Эльхотово	0,81	0,61	0,86	0,69	0	0,52	0,48	0	0,49	0,51	6,9	15,8	0,83	0,65	0,85	0,66	0	0,70	0,30	0	0,68	0,32	7,4	13,0
Котляревская	0,87	0,71	0,89	0,75	0,34	0,26	0,40	0,34	0,26	0,40	5,3	13,3	0,89	0,77	0,91	0,80	0	0,30	0,70	0	0,32	0,68	4,4	13,4
Моздок	0,78	0,56	0,80	0,57	0	0,31	0,69	0,29	0,30	0,41	11,2	18,5	0,83	0,64	0,85	0,66	0	0,11	0,89	0	0,15	0,85	8,9	21,7
Степное	0,85	0,68	0,86	0,70	0	0,43	0,57	0	0,32	0,68	9,5	10,8	0,91	0,80	0,91	0,79	0	0,13	0,87	0	0,14	0,86	7,7	18,7
Каргалинская	0,82	0,62	0,84	0,65	0	0,41	0,59	0,39	0,39	0,22	12,8	19,3	0,91	0,81	0,92	0,82	0	0,13	0,87	0	0,15	0,85	9,1	23,7
Теберда	0,85	0,67	0,88	0,72	0,28	0,55	0,17	0,17	0,39	0,42	5,0	11,3	0,89	0,77	0,91	0,79	0,18	0,74	0,08	0	0,87	0,13	4,2	15,3
Сумма	6,52	4,91	6,74	5,24	0,62	4,10	3,28	1,32	3,67	2,99			6,88	5,65	7,08	5,92	0,49	2,46	5,05	0,48	2,91	4,61		

*Q_{IV-IX} – средний расход воды за апрель–сентябрь; T_{IV-IX} – средняя температура воздуха за апрель–сентябрь; $P1_{X-III}$ и $P2_{IV-IX}$ – соответственно средние осадки за октябрь–март и апрель–сентябрь, римские цифры у названий переменных обозначают интервал времени; $R(3)$ и $R(4)$ – соответственно сводный коэффициент корреляции уравнений линейной регрессии 3-го и 4-го порядков; T – относительный вклад средней температуры воздуха за апрель–сентябрь в описание изменчивости стока; $P1$ и $P2$ – соответственно относительные вклады средних осадков за октябрь–март и апрель–сентябрь в описание изменчивости стока; O_1 и O_2 – соответственно относительные ошибки расчёта стока в обучающей и контрольной выборках; $R^2(3)adj$ и $R^2(4)adj$ – скорректированные коэффициенты детерминации $R^2adj = 1 - (1 - R^2)(n - 1)/(n - k)$, где R^2 – квадрат коэффициента корреляции, n – число наблюдений, k – число параметров. Значения в строке «сумма» характеризуют изменение параметров линейной регрессии 3-го и 4-го порядков.

Таблица 3. **Параметры регрессии $Q_{IV-IX} = f(T_{IV-IX}, P1_{X-III}, P2_{IV-IX}, V_{IV-IX})$ по данным метеостанций (*mst*) и базы данных *CRU* 3.2.1.; период 1961–1985 гг.**

Гидропосты	$Q_{IV-IX} = f(T_{IV-IX}, P1_{X-III}, P2_{IV-IX}, V_{IV-IX})$ – *mst*												$Q_{IV-IX} = f(P1_{X-III}, P2_{IV-IX}, T_{IV-IX}, vap_{IV-IX})$ – *CRU* 3.2.1.											
	$R(3)$	$R^2(3)adj$	$R(4)$	$R^2(4)adj$	Вклады T, $P1$, $P2$, V								$R(3)$	$R^2(3)adj$	$R(4)$	$R^2(4)adj$	Вклады T, $P1$, $P2$, vap							
					$R(3)$				$R(4)$								$R(3)$				$R(4)$			
					T	$P1$	$P2$	V	T	$P1$	$P2$	V					T	$P1$	$P2$	vap	T	$P1$	$P2$	vap
Казбеги	0,80	0,58	0,84	0,64	0	0,82	0,18	0	0	0,73	0	0,27	0,78	0,55	0,80	0,57	0	0,35	0,65	0	0	0,29	0,67	0,03
Владикавказ	0,74	0,48	0,79	0,55	0	0,87	0	0,13	0,24	0,49	0	0,27	0,84	0,67	0,93	0,84	0,49	0	0	0,51	0,48	0,23	0,29	0
Эльхотово	0,81	0,61	0,86	0,69	0	0,48	0,52	0	0	0,49	0,51	0	0,83	0,65	0,87	0,70	0	0,70	0,30	0	0	0,37	0,29	0,36
Котляревская	0,88	0,75	0,90	0,78	0,68	0	0	0,32	0,25	0	0,42	0,33	0,89	0,77	0,91	0,80	0	0,30	0,70	0	0	0,32	0,68	0
Моздок	0,80	0,58	0,86	0,70	0	0,18	0,65	0,17	0	0,71	0,14	0,15	0,83	0,64	0,86	0,70	0	0,11	0,89	0	0	0,09	0,81	0,10
Степное	0,85	0,68	0,87	0,70	0	0,43	0,57	0	0	0,28	0,50	0,22	0,91	0,80	0,91	0,80	0	0,13	0,87	0	0	0,14	0,86	0
Каргалинская	0,82	0,62	0,86	0,68	0	0,41	0,59	0	0	0,11	0,53	0,36	0,91	0,80	0,94	0,86	0	0,13	0,87	0	0	0,07	0,68	0,25
Теберда	0,84	0,67	0,91	0,79	0	0,55	0,14	0,31	0	0,38	0,38	0,24	0,89	0,77	0,91	0,80	0,17	0,74	0,09	0	0,17	0,57	0,07	0,19
Сумма	6,54	4,97	6,89	5,53	0,68	3,74	2,65	0,93	0,49	3,19	2,48	1,84	6,88	5,65	7,13	6,07	0,66	2,46	4,37	0,51	0,65	2,08	4,35	0,93

*V_{IV-IX} и vap_{IV-IX} – средняя за апрель–сентябрь упругость водяного пара в воздухе по данным метеостанций и в узлах регулярной сетки координат база данных *CRU* 3.2.1.; V и vap – относительный вклад соответственно V_{IV-IX} и vap_{IV-IX} в описание изменчивости стока. Обозначение других усл. обозначений см. в табл. 2.

Таблица 4. **Параметры уравнений линейной регрессии 4-го порядка для расчёта сезонного стока Q_{IV-IX} в бассейне Терека**

Гидропосты	Заданные предикторы для расчёта стока Q_{IV-IX}*	$R(4)$	*Crit*	O_1, %	O_2, %	*P GPCC*	*Chrono*	*P Aphro*	*scPDSI*
Котляревская	$Chrono_{I-XII}$	0,66	0,75	8,8	–	–	1,00	–	–
	$Chrono_{I-XII}$, $scPDSI_{IV-IX}$	0,89	0,45	5,3	17,1	–	0,20	–	0,80
	P_{IV-IX} *Aphro*, $Chrono_{I-XII}$	0,81	0,59	6,5	–	–	0,05	0,95	–
	P_{IV-IX} *GPSS*, $Chrono_{I-XII}$	0,88	0,48	10,5	13,6	0,80	0,20	–	–
Эльхотово	$Chrono_{I-XII}$	0,60	0,80	10,2	–	–	1,00	–	–
	$Chrono_{I-XII}$, $scPDSI_{IV-IX}$	0,87	0,50	6,9	11,5		0,13		0,87
	P_{IV-IX} *Aphro*, $Chrono_{I-XII}$	0,85	0,52	7,1	–	–	0,25	0,75	–
	P_{IV-IX} *GPSS*, $Chrono_{I-XII}$	0,77	0,64	8,5	11,6	0,52	0,48	–	–
Владикавказ	$Chrono_{I-XII}$	0,60	0,80	13,3	–	–	1,00	–	–
	$Chrono_{I-XII}$, $scPDSI_{IV-IX}$	0,86	0,51	7,9	19,5	–	0,19	–	0,81
	P_{IV-IX} *Aphro*, $Chrono_{I-XII}$	0,85	0,52	7,5	–	–	0	1,00	–
	P_{IV-IX} *GPSS*, $Chrono_{I-XII}$	0,76	0,65	9,7	13,2	0,42	0,58	–	–
Моздок	$Chrono_{I-XII}$	0,53	0,85	14,9	–	–	1,00	–	–
	$Chrono_{I-XII}$, $scPDSI_{IV-IX}$	0,88	0,50	8,1	21,4	–	0,04	–	0,96
	P_{IV-IX} *Aphro*, $Chrono_{I-XII}$	0,75	0,66	10,3	–	–	0,30	0,70	–
	P_{IV-IX} *GPSS*, $Chrono_{I-XII}$	0,76	0,64	10,9	20,9	0,74	0,26	–	–
Степное	$Chrono_{I-XII}$	0,61	0,80	14,6	–	–	1,00	–	–
	$Chrono_{I-XII}$, $scPDSI_{IV-IX}$	0,92	0,38	7,3	24,8	–	0,03	–	0,97
	P_{IV-IX} *Aphro*, $Chrono_{I-XII}$	0,83	0,55	10,0	–	–	0,23	0,77	–
	P_{IV-IX} *GPSS*, $Chrono_{I-XII}$	0,85	0,53	9,2	32,6	0,90	0,01	–	–
Каргалинская	$Chrono_{I-XII}$	0,64	0,77	16,9	–	–	1,00	–	–
	$Chrono_{I-XII}$, $scPDSI_{IV-IX}$	0,91	0,41	8,5	27,0		0,06	–	0,94
	P_{IV-IX} *Aphro*, $Chrono_{I-XII}$	0,83	0,56	11,9	–	–	0,22	0,78	–
	P_{IV-IX} *GPSS*, $Chrono_{I-XII}$	0,85	0,53	11,5	–	0,72	0,38	–	–
Казбеги	$Chrono_{I-XII}$	0,51	0,86	9,3	–	–	1,00	–	–
	$Chrono_{I-XII}$, $scPDSI_{IV-IX}$	0,77	0,64	6,6	13,6	–	0,17	–	0,83
	P_{IV-IX} *Aphro*, $Chrono_{I-XII}$	0,65	0,76	8,4	–	–	0,32	0,68	–
	P_{IV-IX} *GPSS*, $Chrono_{I-XII}$	0,75	0,66	7,4	14,9	0,78	0,22	–	–
Теберда	$Chrono_{I-XII}$	0,42	0,91	9,5	–	–	1,00	–	–
	$Chrono_{I-XII}$, $scPDSI_{IV-IX}$	0,78	0,63	6,6	16,9	–	0	–	1,00
	P_{IV-IX} *Aphro*, $Chrono_{I-XII}$	0,87	0,50	4,7	–	–	0	1,00	–
	P_{IV-IX} *GPSS*, $Chrono_{I-XII}$	0,74	0,68	6,6	16,0	0,24	0,76	–	–

Q_{IV-IX} – средний расход воды за апрель–сентябрь; $R(4)$ – сводный коэффициент корреляции линейного уравнения регрессии 4-го порядка; $Crit = S/\sigma$ – критерий качества уравнения, S – среднеквадратичная ошибка расчёта, σ – стандарт отклонения зависимой переменной;. O_1 и O_2 – см. в табл. 2; $Chrono_{I-XII}$ – индексы хронологий ширины и плотности годичных древесных колец (названия выбранных дендроплощадок в таблицу не включены); $scPDSI_{IV-IX}$ – средний за апрель–сентябрь усовершенствованный индекс сухости Палмера в узлах регулярной сетки координат с интервалом 0,5° по широте и долготе; P_{IV-IX} *Aphro* – сумма осадков за апрель–сентябрь из базы данных *Aphrodite* [38]; P_{IV-IX} *GPSS* – сумма осадков за апрель–сентябрь из базы данных *GPSS* [21]. Значения P_{IV-IX} *Aphro* и P_{IV-IX} *GPSS* получены для территории бассейна Терека также в узлах регулярной сетки координат с интервалом 0,5° по широте и долготе. Обучающая выборка – 1960–1985 гг., контрольная – 1925–1959, 1986–2007 гг. Прочерк – отсутствие вычислений.

2. Вклады осадков за октябрь–март и апрель–сентябрь в описание изменчивости стока являются преобладающими.

3. Установлены пункты, наиболее репрезентативные для оценки климатических факторов стока. Этот вывод следует использовать для оптимизации состава и расположения пунктов наблюдательной сети.

4. Вклады осадков за октябрь–март и апрель–сентябрь, температуры воздуха и упругости водяного пара в воздухе за апрель–сентябрь в описание дисперсии стока по данным метеостанций соответствуют значимости этих переменных как аналогов приходо-расходной части уравнения водного баланса (1).

5. При использовании данных по осадкам, температуре воздуха и упругости водяного пара из базы данных *CRU* 3.2.1. произошло некоторое увеличение относительного вклада осадков за апрель–сентябрь, которое, по-видимому, объясняется принятой методикой пространственной экстраполяции метеоданных.

6. Включение упругости водяного пара в состав потенциальных аргументов для расчёта стока Терека не привело к существенному изменению параметров эмпирических формул. Далее в качестве примера приведены уравнения регрессии, полученные для расчёта среднего стока Терека за апрель–сентябрь (в м^3/с) на гидропосту Котляревская по данным об осадках и температуре воздуха на метеостанциях ($Q1$) и ($Q2$) из узлов регулярной сетки координат в базе данных *CRU* 3.2.1:

$$Q1_{\text{IV–IX}} = -14{,}4T_{\text{Терскол(IV–IX)}} + 0{,}43P1_{\text{Терскол(X–III)}} + 0{,}27P2_{\text{Владикавказ(IV–IX)}} + 0{,}44P2_{\text{Теберда(IV–IX)}} + 200{,}4;$$

$$Q2_{\text{IV–IX}} = 0{,}08P1_{U5\text{(X–III)}} + 0{,}06P1_{U20\text{(X–III)}} + 0{,}10P2_{U26\text{(IV–IX)}} + 0{,}12P2_{U28\text{(IV–IX)}} + 7{,}1,$$

где $P1$ и $P2$ – соответственно осадки за октябрь–март и апрель–сентябрь, мм; T – температура воздуха за апрель–сентябрь, °С; названия метеостанций и периоды суммирования или осреднения переменных записаны как индексы при $P1$, $P2$ и T; символ U с цифрой указывает номер узла в базе данных *CRU* 3.2.1. Статистические параметры уравнений регрессии для $Q1$ и $Q2$ приведены в табл. 2.

Реконструкция многолетних колебаний годового стока по дендрохронологическим данным заключается в замене правой части уравнения (1) сведениями о ширине/плотности древесных колец. Обоснованность этой замены далеко не очевидна без дополнительного анализа, поскольку на ширину и максимальную плотность древесных колец влияют не только климат, но и эколого-физиологические факторы, не имеющие прямого отношения к стоку. Кроме того, лимитирующее воздействие на тесноту связей $Q = f(D1 \div D4)$ оказывают эколого-климатические особенности формирования годичных колец деревьев на Северном Кавказе. Здесь $D1 \div D4$ – хронологии индексов годичных колец. В принципе, задача реконструкции сезонного речного стока или составляющих баланса массы ледников на основе одних только годичных индексов ширины и плотности древесных колец обоснована недостаточно. В обоих случаях это выглядит как попытка описать поведение целевой функции, представляющей собой результат взаимодействия сезонных факторов, с помощью годичных индексов *maxD* и *W* с неоднозначной климатической интерпретацией и пространственной экстраполяцией биологических характеристик древесных колец. Тем не менее, нецелесообразно полностью отвергать возможность палеогеографических реконструкций с привлечением вековых рядов индексов *maxD* и *W*, при условии независимого контроля результатов и их увязки с другими географическими процессами, имеющими аналогичную причинно-следственную природу.

С этой целью выполнены эксперименты по объединению дендрохронологических данных и других аргументов в уравнениях для расчёта сезонного стока. В обучающие выборки входили 1960–1985 гг., а контрольные длиной от 47 до 57 лет включали интервалы 1925–1959 и 1986–2007 гг. Параметры эмпирических уравнений множественной линейной регрессии для описания изменчивости сезонного стока Терека при различном составе влияющих аргументов и результаты оценки качества формул приведены в табл. 4. Информация в этой таблице имеет скорее исследовательскую, чем потребительскую направленность и позволяет сделать ряд предварительных выводов.

1. Подтверждается заключение о непригодности для практических целей формул типа $Q_{\text{IV–IX}} = f(Chrono_{\text{I–XII}}: maxD, W)$ из-за низких коэффициентов корреляции: от 0,51 до 0,66.

2. Использование *maxD* и *W* в составе уравнений $Q_{\text{IV–IX}} = f(Chrono_{\text{I–XII}}: maxD, W)$ или $Q_{\text{IV–IX}} = f(Chrono_{\text{I–XII}}, scPDSI_{\text{IV–IX}})$ ограничивает применение таких формул для оперативных гидрологических расчётов ввиду нерешённой проблемы регулярного продолжения временны́х рядов соответствующих хронологий.

3. Комбинации хронологий *maxD* и *W* с данными по осадкам за апрель–сентябрь из базы данных *CRU* 3.2.1., *Aphro* и *GPCC* оказались менее эффективными для расчётов сезонного стока Терека по сравнению с $Q_{\text{IV–IX}} = f(Chrono_{\text{I–XII}}, scPDSI_{\text{IV–IX}})$.

4. Комбинация предикторов $Chrono_{\text{I–XII}}$ и $scPDSI_{\text{IV–IX}}$ может быть основой для совершенствования методики реконструкции вегетационного стока Терека в 1901–2003 гг. на гидропостах Владикавказ, Эльхотово и Котляревская. Учитывая преобладающий вклад индекса $scPDSI_{\text{IV–IX}}$ в описание дисперсии стока, этот результат обусловлен достоинствами $scPDSI_{\text{IV–IX}}$ как предиктора стока за апрель–сентябрь. Длина реконструированного ряда стока может быть увеличена до 1850–2012 гг., если использовать базу данных для индекса *scPDSI* с разрешением регулярной сетки 2,5° × 2,5° по широте и долготе.

Расчёты составляющих баланса массы ледников

Поиск стохастических уравнений для расчёта аккумуляции *Ac*, абляции *Ab* и баланса массы в целом *Bn* ледников Джанкуат и Гарабаши выполнен на основе следующих влияющих факторов: суммы осадков за октябрь–март и апрель–сентябрь; средних за апрель–сентябрь значений температуры воздуха и упругости водяного пара в воздухе. Как и в предыдущем анализе, использованы данные наблюдений на метеостанциях и в узлах регулярной сетки из базы данных *CRU* 3.2.1. Результаты этой проработки приведены в табл. 5 и 6. Формулы в этих таблицах пригодны для ретроспективных и перспективных расчётов *Ac*, *Ab* и *Bn* за пределами калибровочных выборок, если это позволяют ряды наблюдений за температурой воздуха и осадками на метеостанциях, перечисленных в этих таблицах. Далее приведём примеры эмпирических формул для расчёта годовых величин абляции (в см) на ледниках Джанкуат (Д) и Гарабаши (Г):

$$Ab(\text{Д}) = 45{,}6T_{\text{Теберда(IV–IX)}} - 3{,}5P_{\text{Шаджатмаз(X–III)}} + 0{,}6P_{\text{Терскол(X–III)}} - 281{,}1; \quad (3)$$

$$Ab(\text{Г}) = 52{,}0T_{\text{Теберда(IV–IX)}} - 1{,}1P_{\text{Буйнакск(X–III)}} - 0{,}6P_{\text{Теберда(IV–IX)}} - 442{,}4. \quad (4)$$

Статистические параметры уравнений регрессии для выражений (3) и (4) содержатся в табл. 5. Обращает на себя внимание различия вкладов температуры воздуха и осадков в описание дисперсии *Ac*, *Ab* и *Bn* на ледниках Гарабаши и Джанкуат. При этом почти всегда сохраняется большая значимость вклада средней температуры воздуха за апрель–сентябрь. Таким образом, наличие корреляции между независимым рядом температуры воздуха и реконструированными тем или иным способом рядами *Ac*, *Ab* и *Bn* можно рассматривать как одно из доказательств репрезентативности результатов реконструкции.

Контроль качества уравнений $Ac = f(P1, P2, T)$ и $Ab = f(P1, P2, T)$ в табл. 5 выполнен за 1968–1981 и 2002–2009 гг. Вклады осадков за октябрь–март и апрель–сентябрь, температуры воздуха и упругости водяного пара в воздухе за апрель–сентябрь в описание дисперсии составляющих баланса массы ледников Гарабаши и Джанкуат по данным метеостанций соответствуют значимости этих переменных как аналогов приходо-расходной части уравнения водно-ледового баланса. При использовании данных по осадкам, температуре воздуха и упругости водяного пара из базы данных *CRU* 3.2.1. произошло некоторое увеличение относительного вклада осадков за апрель–сентябрь, что, скорее всего, связано с методикой экстраполяции метеоданных в узлы регулярной сетки. Включение упругости водяного пара в состав аргументов для расчёта баланса массы и его составляющих существенно не изменило параметры эмпирических формул. По данным за 1982–2002 гг. получены уравнения множественной линейной регрессии для *Ac*, *Ab* и *Bn* на ледниках Гарабаши и Джанкуат как функций индексов ширины и максимальной плотности древесных колец. Коэффициенты детерминации уравнений 4-го порядка этих уравнений оказались следующими: на леднике Джанкуат *Ac* – 0,38, *Ab* – 0,62, *Bn* – 0,68; на леднике Гарабаши *Ac* – 0,34, *Ab* – 0,68, *Bn* – 0,75. На леднике Джанкуат относительная ошибка расчёта *Ac* в калибровочной и контрольной выборках составила 10,9 и 24,5% соответственно, а для *Ab* – 8,1 и 34,9%. Контроль уравнений для *Ac* и *Ab* на леднике Гарабаши не выполнен из-за отсутствия независимых данных. В связи с такими не слишком обнадёживающими результатами реконструкции рядов *Ac*, *Ab* и *Bn* на ледниках Гарабаши и Джанкуат как функции хронологий *KYZ*, *KHTP*, *CHS*, *GAR*, *KV*, *MaxD* пока не рассматриваются.

По данным из работ [28, 30] выполнен анализ связей гляциологических характеристик режима (*AAR*, *ELA*) и баланса массы на каждом из ледников Джанкуат (Д) и Гарабаши (Г), так и между ними. Эти результаты, имеющие ключевое значение для гляциологических расчётов и реконструкций, даны в табл. 7. Уравнения (1) – (4) в табл. 7 позволяют получать важные для гидрологических расчётов дополнительные параметры *AAR* и *ELA* при наличии данных о балансе *Bn* и наоборот, а уравнения (5) – (8) в той же таблице характеризуют удовлетворительную пространственную связь между балансом массы и его составляющими на ледниках Джанкуат и Гарабаши.

Наличие тесных зависимостей между основными элементами водно-ледового баланса ледника и сравнительно легко определяемой характеристикой *ELA* в конце периода абляции существенно упрощает режимные гляциологические расчёты. Покажем это на примере зависимости $ELA = f(Bn)$, общим аналитическим видом которой служит линейное уравнение

$$ELA = a_z Bn + b_z, \quad (5)$$

где a_z и b_z – локальные или региональные эмпирические коэффициенты.

В литературе существуют многочисленные подтверждения линейности зависимости между многолетними временными рядами *ELA* и *Bn*. На-

Таблица 5. **Параметры уравнений регрессии *Ac, Ab, Bn* = $f(T_{IV-IX}, P1_{X-III}, P2_{IV-IX})$ по данным метеостанций (*mst*) и базы данных *CRU* 3.2.1.; период 1982–2002 гг.***

Параметры	*Ac, Ab, Bn* = $f(T_{IV-IX}, P1_{X-III}, P2_{IV-IX})$ – *mst*										*Ac, Ab, Bn* = $f(T_{IV-IX}, P1_{X-III}, P2_{IV-IX})$ – *CRU* 3.2.1.										O_1, %	O_2, %
	$R(3)$	$R^2(3)adj$	$R(4)$	$R^2(4)adj$	Вклады *T*, *P*1, *P*2						$R(3)$	$R^2(3)adj$	$R(4)$	$R^2(4)adj$	Вклады *T*, *P*1, *P*2							
					$R(3)$			$R(4)$							$R(3)$			$R(4)$				
					T	*P*1	*P*2	*T*	*P*1	*P*2					*T*	*P*1	*P*2	*T*	*P*1	*P*2		
Ледник Джанкуат																						
Ac	0,93	0,85	0,95	0,89	0	0,81	0,19	0	0,75	0,25	0,90	0,78	0,94	0,86	0	0,96	0,04	0	0,85	0,15	5,4	18,4
Ab	0,95	0,88	0,97	0,92	0,69	0,31	0	0,60	0,40	0	0,93	0,85	0,93	0,84	0,51	0,20	0,29	0,36	0,28	0,36	4,7	13,6
Bn	0,89	0,77	0,92	0,82	0,48	0,52	0	0,45	0,53	0,02	0,94	0,87	0,95	0,88	0	0,75	0,25	0,27	0,58	0,15	0	0
Ледник Гарабаши																						
Ac	0,81	0,59	0,83	0,63	0,30	0,70	0	0,29	0,56	0,15	0,85	0,67	0,88	0,72	0	0,85	0,15	0,13	0,77	0,10	6,2	6,9
Ab	0,93	0,85	0,95	0,87	0,80	0,05	0,15	0,75	0,04	0,21	0,95	0,88	0,95	0,88	0,55	0	0,45	0,49	0,05	0,46	10,2	14,8
Bn	0,94	0,86	0,96	0,89	0,89	0	0,11	0,78	0	0,22	0,95	0,89	0,95	0,89	0,53	0,15	0,32	0,49	0,16	0,35	0	0
∑*Ac*	1,74	1,44	1,78	1,52	0,30	1,51	0,19	0,29	1,31	0,40	1,75	1,45	1,82	1,58	0	1,81	0,19	0,13	1,62	0,25	0	0
∑*Ab*	1,88	1,73	1,92	1,79	1,49	0,36	0,15	1,35	0,44	0,21	1,88	1,73	1,88	1,72	1,06	0,20	0,74	0,85	0,33	0,82	0	0
∑*Bn*	1,83	1,63	1,88	1,71	1,37	0,52	0,11	1,23	0,53	0,24	1,89	1,76	1,90	1,77	0,53	0,90	0,57	0,76	0,74	0,50	0	0

**Ac*, *Ab*, *Bn* – соответственно годовые значения аккумуляции, абляции и баланса массы; ∑*Ac*, ∑*Ab*, ∑*Bn* – суммы для ледника Джанкуат и Гарабаши, используются для сравнения изменений параметров линейной регрессии 3-го и 4-го порядков. Остальные условные обозначения см. в табл. 2–4.

Таблица 6. **Параметры уравнений регрессии *Ac, Ab, Bn* = $f(T_{IV-IX}, P_{X-XII} + P_{I-III}, P_{IV-IX}, V_{IV-IX})$ по данным метеостанций (*mst*) и базы данных *CRU* 3.2.1.; период 1982–2002 гг.***

Параметры	*Ac, Ab, Bn* = $f(T_{IV-IX}, P_{IV-IX} + P_{I-III}, P_{IV-IX}, V_{IV-IX})$ – *mst*												*Ac, Ab, Bn* = $f(P_{IV-IX} + P_{I-III}, P_{IV-IX}, T_{IV-IX}, vap_{IV-IX})$ – *CRU* 3.2.1.											
	$R(3)$	$R^2(3)adj$	$R(4)$	$R^2(4)adj$	Вклады *T*, *P*1, *P*2, *V*								$R(3)$	$R^2(3)adj$	$R(4)$	$R^2(4)adj$	Вклады *T*, *P*1, *P*2, *vap*							
					$R(3)$				$R(4)$								$R(3)$				$R(4)$			
					T	*P*1	*P*2	*V*	*T*	*P*1	*P*2	*V*					*T*	*P*1	*P*2	*vap*	*T*	*P*1	*P*2	*vap*
Ледник Джанкуат																								
Ac	0,93	0,85	0,95	0,89	0	0,81	0,19	0	0	0,75	0,25	0	0,87	0,72	0,93	0,82	0	0,92	0	0,08	0	0,82	0,18	0
Ab	0,95	0,88	0,97	0,92	0,69	0,31	0	0	0,60	0,40	0	0	0,92	0,82	0,93	0,83	0,69	0,04	0,27	0	0,62	0,07	0,31	0
Bn	0,91	0,79	0,94	0,84	0,32	0	0,42	0,26	0	0,39	0,18	0,43	0,94	0,87	0,95	0,88	0	0,75	0,25	0	0	0,75	0,25	0
Ледник Гарабаши																								
Ac	0,82	0,62	0,85	0,65	0	0,52	0,13	0,35	0	0,51	0,17	0,32	0.86	0,69	0,92	0,80	0	0,72	0	0,28	0	0,54	0,14	0,32
Ab	0,95	0,88	0,97	0,91	0,80	0,10	0	0,10	0,43	0	0,17	0,40	0,95	0,89	0,95	0,89	0,55	0	0,45	0	0,52	0,03	0,45	0
Bn	0,94	0,87	0,96	0,89	0,58	0	0,12	0,30	0,78	0	0,22	0	0,95	0,89	0,95	0,89	0.53	0,15	0,32	0	0,50	0,16	0,34	0
∑*Ac*	1,75	1,47	1,80	1,54	0	1,33	0,32	0,35	0	1,26	0,42	0,32	1,73	1,41	1,85	1,62	0	1,64	0	0,36	0	1,36	0,32	0,32
∑*Ab*	1,90	1,76	1,94	1,83	1,49	0,41	0	0,10	1,03	0,40	0,17	0,40	1,87	1,71	1,88	1,72	1,24	0,04	0,72	0	1,14	0,10	0,76	0
∑*Bn*	1,85	1,66	1,90	1,73	0,90	0	0,54	0,56	0,78	0,39	0,40	0,43	1,89	1,76	1,90	1,77	0,53	0,90	0,57	0	0,50	0,91	0,59	0

*Условные обозначения см. табл. 2–5.

Таблица 7. **Зависимости между гляциологическими характеристиками для ледников Джанкуат (Д) и Гарабаши (Г)***

Уравнение	Годы	R^2	δY
1. AAR(Д) = 0,0156Bn(Д) + 58,6, %	1968–1999	0,64	8,1
2. ELA(Д) = −0,129Bn(Д) + 3197, м над ур. моря	1968–1999	0,77	47,6
3. AAR(Г) = 0,033Bn(Г) + 60,0, %	1984–1999	0,95	3,9
4. ELA(Г) = −0,313Bn(Г) + 3810, м над ур. моря	1984–1999	0,93	43,6
5. ELA(Д) = 0,772ELA(Г) + 246, м над ур. моря	1984–1999	0,71	53,4
6. Bn(Г) = 0,547Bn(Д) − 5,2, см	1982–2009	0,61	32,2
7. Ab(Д) = 0,860Ab(Г) + 146,4, см	1982–2009	0,81	18,1
8. Ac(Д) = 2,072Ac(Г) + 0,03, см	1982–2009	0,54	32,9
9. ELA(Д) = 1,58Ab(Д) + 2816, м над ур. моря	1968–1999	0,48	32,9
10. ELA(Д) = −0,13Ac(Д) + 3507, м над ур. моря	1968–1999	0,44	71,5
11. AAR(Д) = −0,1725Ab(Д) + 100,4, %	1968–1999	0,34	74,2
12. AAR(Д) = 0,02Ac(Д) + 19,0, %	1968–1999	0,42	10,9
13. ELA(Г) = 0,32Ab(Г) + 3468, м над ур. моря	1984–1999	0,86	10,2
14. ELA(Г) = −0,28Ac(Г) + 4146, м над ур. моря	1984–1999	0,08	61,6
15. AAR(Г) = −0,03Ab(Г) + 95,4, %	1984–1999	0,63	158,0
16. AAR(Г) = 0,05Ac(Г) + 6,1, %	1984–1999	0,45	10,7

**AAR* – доля площади аккумуляции относительно всего ледника; ELA – высота линии равновесии между годовыми величинами аккумуляции Ac и абляции Ab; Bn – годовой баланс массы ледника; R^2 – коэффициент детерминации; δY – среднеквадратичная ошибка расчёта.

пример, в работах [9, 11, 30] приведены тесные линейные зависимости $ELA = f(Bn)$ для многолетних рядов данных на 15 ледниках Европы, Америки и Азии. Подставив в формулу (5) вместо годового баланса Bn разность годовых значений аккумуляции Ac и абляции Ab, получим:

$$ELA = a_z(Ac - Ab) + b_z,$$

откуда следует, что

$$Ac = Ab + (ELA - b_z)/a_z, \qquad (6)$$

т.е. сложные и трудоёмкие определения аккумуляции на леднике заменены простыми измерениями или расчётами ELA и абляции. Эксперименты на ледниках Австрии и Норвегии показали [33, 36], что для определения ELA вполне пригодны данные спутникового зондирования, что расширяет возможности дистанционного мониторинга режима оледенения. При этом следует либо учитывать, либо пренебрегать влиянием на высоту ELA зоны наложенного льда, которая в конце периода абляции располагается ниже фирновой границы, а годовая абляция легко и довольно точно рассчитывается как функция средней летней температуры воздуха.

Локальные оценки параметров a_z и b_z получены по материалам [26, 28, 30] достаточно длительных измерений ELA и составляющих годового баланса массы на континентальных ледниках, расположенных в Северном полушарии. Выборка содержит 38 ледников, охватывает 1946–2003 гг., минимальное и максимальное значения ELA равны соответственно 470 и 4450 м над ур. моря. Средняя длина временны́х рядов составляет 27 лет. Коэффициент корреляции зависимости $ELA = f(Bn)$ в среднем для 38 ледников равен −0,90 и изменяется от −0,73 до −0,98. Для описания региональной пространственной вариации коэффициентов a_z и b_z получены эмпирические уравнения регрессии $a_z = a_z(Long, Lat, Z_{med})$ и $b_z = b_z(Z_{med})$. Соответствующие им коэффициенты корреляции равны 0,72 и 0,99 и средний модуль относительной ошибки расчёта функций a_z и b_z – 29 и 4%. Здесь $Long$ и Lat – географические долгота и широта, Z_{med} – средняя высота ледника. Определение по формуле (6) средних значений аккумуляции на ледниках Джанкуат и Гарабаши дало 276 и 89 см, что отличается соответственно на +12 и −28% от измеренных величин Ac [28, 30].

Заключение

Численное описание колебаний сезонного стока Терека и составляющих баланса массы ледников Джанкуат и Гарабаши получено в настоящей работе с помощью метода стохастического моделирования и дискретных данных, представляющих собой поля влияющих климатических характеристик (осадки, температура и влажность возду-

ха). Практическая реализация этого в принципе правильного подхода осложняется несоответствием пространственной репрезентативности пунктов измерения стока и климатических характеристик. Очевидно, что информация о стоке относится ко всей площади водосбора, замыкаемой гидропостом. Для этих данных мы ищем связь с влияющими климатическими факторами, измеренными на нерегулярной сети пунктов с заведомо неизвестной степенью пространственной репрезентативности. Как правило, эти пункты расположены за пределами заданной площади, где формируется сток (см., например, рис. 2). Аналогичная ситуация имеет место и при поиске связей между составляющими баланса массы отдельных ледников (Джанкуат и Гарабаши) с характеристиками климата, измеренными в отдельных пунктах на всей территории Кавказа, а также когда многолетние индексы ширины и плотности древесных колец, полученные в верховье Кубани, используются для описания колебаний стока и баланса массы ледников в бассейне Терека, удалённом от дендроплощадок Кубани на 100–150 км.

Качество решения поставленной в работе задачи объективно зависит от размеров выборок данных, используемых для получения и верификации эмпирических формул. Не будем также забывать, что математической основой строгого применения метода линейной регрессии служит условие нормальности распределения функции и её аргументов. В результате применения критерия Колмогорова–Смирнова оказалось, что это условие не выполняется. Отметим, что, как правило, такая проверка не проводится.

Перечислим новые и наиболее значимые результаты. Для исследования и решения поставленной проблемы использована обширная база факторов прямо (разнообразные сведения о климате) или косвенно (индексы сухости климата, ширины и максимальной плотности древесных колец) характеризующих условия формирования годового и сезонного стока рек и составляющих баланса массы ледников на Северном Кавказе. На основе этой информации: 1) получен и проверен на независимых данных ряд новых формул для расчёта сезонного стока Терека на семи гидропостах в 1901–2010 гг.; 2) оценена значимость различных аргументов в этих формулах для описания изменчивости функции; 3) впервые получены уравнения связи между высотой линии равновесия *ELA* в конце периода абляции, индексом площади аккумуляции *AAR* и составляющими баланса массы на ледниках Джанкуат и Гарабаши; 4) разработана методика региональных расчетов средних величин аккумуляции на ледниках по данным об абляции и *ELA*.

Литература

1. *Боровикова Л.Н., Денисов Ю.М., Трофимова Е.Б., Шенцис И.Д.* Математическое моделирование процесса стока горных рек // Тр. САНИГМИ. 1972. Вып. 61 (76). 150 с.
2. *Важнов А.Н.* Анализ и прогноз стока рек Кавказа. М.: Гидрометеоиздат, 1966. 275 с.
3. *Виноградов Ю.Б.* Математическое моделирование процессов формирования стока. Л.: Гидрометеоиздат,1988. 312 с.
4. ВНИИГМИ-МЦД. Специализированные массивы для климатических исследований. http://aisori.meteo.ru/ClimateR
5. Государственный водный кадастр, 1997–2007. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Ч. 1. Т. 1. Вып. 26. Ростов-на-Дону, 2000–2009.
6. *Долгова Е.А.* Реконструкция гидрометеорологических условий на Северном Кавказе по дендрохронологическим данным за период 1800–2005 гг.: Автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. М.: Институт географии РАН, 2011. 24 с.
7. *Долгова Е.А., Соломина О.Н.* Первая количественная реконструкция температуры воздуха тёплого периода на Кавказе по дендрохронологическим данным // ДАН. 2010. 431. № 2. С. 1–5.
8. *Долгова Е.А., Мацковский В.В., Соломина О.Н., Рототаева О.В., Носенко Г.А., Хмелевской И.Ф.* Реконструкция баланса массы ледника Гарабаши (1800–2005 гг.) по дендрохронологическим данным // Лёд и Снег. 2013. № 1 (121). С. 34–42.
9. *Дюргеров М.Б.* Мониторинг баланса массы горных ледников. М.: Наука, 1993. 124 с.
10. *Ефремов Ю.В., Панов В.Д., Лурье П.М., Ильичев Ю.Г., Панова С.В., Лутков Д.А.* Орография, оледенение, климат Большого Кавказа: Опыт комплексной характеристики и взаимосвязей. Краснодар: изд. Кубанского госуниверситета, 2007. 337 с.
11. *Коновалов В.Г.* Таяние и сток с ледников в бассейнах рек Средней Азии. Л.: Гидрометеоиздат, 1985, 237 с.
12. *Коновалов В.Г., Мацковский В.В.* Регионализация и регрессионный анализ температуры воздуха и осадков в глобальной БД по климату // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 283–289.
13. *Коновалов В.Г., Максимова О.Е.* Реконструкция и прогноз составляющих водного баланса по дендрохронологическим данным в бассейне р. Нарын (Киргизия) // Лёд и Снег. 2012. № 3 (119). С. 87–98.
14. *Кучмент Л.С., Гельфан А.Н.* Динамико-стохастические модели формирования речного стока. М.: Наука, 1993. 101 с.
15. *Лурье П.М.* Водные ресурсы и водный баланс Кавказа. СПб.: Гидрометеоиздат, 2002. 506 с.
16. *Мацковский В.В., Долгова Е.А., Соломина О.Н.* Применение дендрохронологических данных для реконструкции стока реки Теберды за 1850–2005 гг. // Лёд и Снег. 2011. № 1 (113). С. 119–123.
17. *Мельникова Т.Н., Комлев А.М.* Водоносность рек Северо-западного Кавказа. Майкоп.: «Качество», 2003. 130 с.
18. *Носенко Г.А., Хромова Т.Е., Рототаева О.В., Шахгеданова М.В.* Реакция ледников Центрального Кавказа в 2001–2010 гг. на изменения температуры и количества осадков. // Лёд и Снег. 2013. № 1 (121). С. 26–33.

19. *Панов В.Д.* Эволюция современного оледенения Кавказа. СПб.: Гидрометеоиздат, 1993. 431 с.
20. *Рототаева О.В., Тарасова Л.Н.* Реконструкция баланса массы ледника Гарабаши за последнее столетие // МГИ. 2000. Вып. 88. С. 16–26.
21. *Becker A., Finger P., Meyer-Christoffer A., Rudolf B., Schamm K., Schneider U., Ziese M.* Global Precipitation Climatology Centre, Deutscher Wetterdienst, Offenbach, Germany, in Earth System Science Data. doi: http://dx.doi.org/10.5194/essd-5-71-2013.
22. *Bodo B.A.* Monthly Discharges for 2400 Rivers and Streams of the former Soviet Union [FSU]. July, 2000.
23. *Chong-yu Xu.* Hydrologic Models. Uppsala University, Department of Earth Sciences and Hydrology, 2002. 158 p.
24. *Cook E.R., Anchukaitis K.J., Buckley B.M., D'Arrigo R.D., Jacoby G.C., Wright W.E.* Monsoon Asia Drought Atlas (MADA). IGBP PAGES/World Data Center for Paleoclimatology Data Contribution Series # 2010-037. NOAA/NCDC Paleoclimatology Program. Boulder CO. USA, 2010.
25. *Dai A., K. Trenberth E., Qian T.* A global data set of Palmer Drought Severity Index for 1870–2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming // Journ. of Hydrometeorology. 2004. № 5. P. 1117–1130.
26. *Dyurgerov M.B., Meier M.F.* Glaciers and the changing Earth system: A 2004 snapshot. INSTAAR, University of Colorado at Boulder. Boulder, Colorado. Occasional Paper 2005. № 58. 119 p.
27. *Ekstrom V., Jones P.D., Fowler H.J., Lenderink G., Buishand T.A., Conway D.* Regional climate model data used within the SWURVE project 1: projected changes in seasonal patterns and estimation of PET // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2007. № 11 (3). P. 1069–1083.
28. Fluctuation of glaciers 1959–2012. Paris – Zurich, IAHS (ICSI) – UNESCO, 1967–2013.
29. Former Soviet Union Monthly Precipitation Archive, 1891–1993. – NSIDC-0059. 1998. Boulder, USA. http://www-nsidc.colorado.edu/.
30. Glacier Mass Balance Bulletin (MBB). IAHS (ICSI)-UNEP-UNESCO, Zurich.1991–2011. № 1–11.
31. Global Historical Climatological Network Database. GHCN, Version 2. 1999. ftp://www.ncdc.noaa.gov/
32. *Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H.* Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3. 10 dataset // Journ. of Climatology. 2012. doi: 10.1002/joc.3711.
33. *Heiskanen J., Kajuutti K., Jackson M., Elvehøy H., Pellikka P.* Assessment of glaciological parameters using Landsat satellite data in Svartisen, Northern Norway. Proc. of EARSeL-LIS-SIG-Workshop Observing our Cryosphere from Space, Bern, March 11–13, 2002. P. 34–42.
34. *Klok E.J., Klein Tank A.M.G.* Updated and extended European dataset of daily climate observations // Journ. of Climatology. 2008. Published online in Wiley Inter Science www.interscience.wiley.com. doi: 10.1002/joc.1779.
35. *Palmer W.C.* Meteorological Drought. US Department of Commerce, Washington DC // Research Paper. 1965. № 45. 65 p.
36. *Pelikka P., Rees W.G.* Remote Sensing of Glaciers. Techniques for Topographic, Spatial and Thematic Mapping of Glaciers. Taylor & Francis Group, London, UK. 2010. 350 p.
37. *Willmott C.J., Matsuura K.* Smart Interpolation of Annually Averaged Air Temperature in the United States // Journ. of Applied Meteorology. 1995. V. 34. P. 2577–2586.
38. *Yatagai A., Kamiguchi K., Arakawa O., Hamada A., Yasutomi N, Kitoh A.* APHRODITE: constructing a long-term daily gridded precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges // BAMS. 2012/ doi: 10.1175/BAMS-D-11-00122.1.

Summary

The work was aimed at numerical modeling of spatial-temporal variability of the river Terek seasonal (April to September) streamflow characteristics and long-term fluctuations of components of annual glacier mass balances in this basin and on the adjacent territories. Mass balance of glaciers Djankuat and Garabashi was calculated. Simulation was performed by means of stochastic modeling and discrete data presenting fields of main meteorological parameters (precipitation, air temperature and humidity) having effect on the streamflow. Realization of this approach is complicated by the fact that spatial representativeness of hydrological and meteorological sites are not corresponding one to another. Data on the runoff is clearly related to the total drainage area closed by a gauging station. And for this data we study a relationship with meteorological parameters which are measured at a non-regular observational network whose spatial representativeness is unknown. These stations are generally located beyond the area under investigation (Fig. 2). Similar problem exists when we analyze a relationship between components of the mass balance of individual glaciers (Djankuat and Garabashi) and the above climate characteristics measured at some stations located on the whole Caucasus territory. The same takes place when long-term indices of width and density of tree annual rings obtained in upper reaches of the river Kuban' are used for analysis of variations of the runoff and the glacier mass balance in the river Terek basin located at a distance of 100–150 km from the Kuban' dendrologic sites.

To solve the problem we used a wide number of factors which directly (various information about the climate) or indirectly (indices of the climate dryness, wood ring characteristics) characterize conditions of formation of annual and seasonal river runoff and components of glacier mass balance in the North Caucasus. Use of all obtained information made possible the following results: a) new formulas for the calculation of seasonal runoff of the Terek river at the seven gauging stations for 1901–2010 years were derived and verified with independent data; b) significance of various arguments in these formulas was assessed to describe variability of function; c) for the first time relationships between the equilibrium line altitude (*ELA*), the index of area of accumulation (*AAR*), and components of the mass balance of the glaciers Djankuat and Garabashi were obtained; d) a technique for regional calculation of average accumulation on these glaciers was developed by using data on ablation and *ELA*.