

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ  
В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ГИДРОЛОГИИ СУШИ

УДК 556.06

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДНОГО РЕЖИМА РЕК С ВЫСОКОЙ ДОЛЕЙ  
ЛЕДНИКОВОГО ПИТАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ БАССЕЙНА р. БАКСАН)<sup>1</sup>

© 2023 г. Е. Д. Корнилова<sup>a, b, \*</sup>, И. Н. Крыленко<sup>a, b</sup>, Е. П. Рец<sup>b</sup>,  
Ю. Г. Мотовилов<sup>b</sup>, Ф. А. Атабиева<sup>c</sup>, И. И. Кучменова<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

<sup>b</sup>Институт водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

<sup>c</sup>Высокогорный геофизический институт Росгидромета, Нальчик, 360030 Россия, КБР

\*e-mail: [ekaterina.kornilova.hydro@gmail.com](mailto:ekaterina.kornilova.hydro@gmail.com)

Поступила в редакцию 27.09.2022 г.

После доработки 18.12.2022 г.

Принята к публикации 20.12.2022 г.

Водные ресурсы Северного Кавказа преимущественно зависят от состояния ледников, которые интенсивно теряют массу в последние десятилетия на фоне изменения климата. Результатом дегляциации является не только снижение ледникового стока горных рек, но и изменение внутригодового распределения стока. В данном исследовании описана адаптация программного комплекса ЕСОМАГ для моделирования речного стока в бассейне р. Баксан на основе данных о рельефе, подстилающей поверхности водосбора (почв, растительности) и суточных данных о приземной температуре воздуха, дефиците влажности воздуха и осадках. Калибровка и валидация модели и статистическая оценка эффективности расчетов проводились по данным о расходах воды р. Баксан за 2000–2017 гг. На основе разработанной модели формирования стока в бассейне р. Баксан проведены численные эксперименты по оценке чувствительности характеристик стока к изменению площади оледенения. В зависимости от интенсивности процесса дегляциации сток р. Баксан может снизиться на 10–30% в результате уменьшения ледниковой составляющей, а максимальные расходы воды на 10–15%.

*Ключевые слова:* горная гидрология, моделирование стока рек, модель формирования стока, ЕСОМАГ, Северный Кавказ.

DOI: 10.31857/S0321059623040144, EDN: QJUNXK

## ВВЕДЕНИЕ

Северный Кавказ – один из наиболее густонаселенных и развитых в сельскохозяйственном отношении регионов Российской Федерации. В меженные периоды обеспечение региона водными ресурсами зависит преимущественно от объемов речного стока, который связан с масштабами и состоянием оледенения в высокогорных районах и может быть недостаточным в засушливые сезоны [5, 22]. Поэтому разработка методов, позволяющих выполнять оценки объема и режима стока рек, расположенных в бассейнах с высокой степенью оледенения в высокогорных регионах, не теряет своей актуальности.

По последним оценкам, продолжающиеся изменения климата [25, 28] и деградация оледенения Северного Кавказа [1, 16, 28, 32] привели к значительным изменениям речного стока [24]. Уменьшение объема ледникового стока, произошедшее за счет уменьшения площади оледенения, привело к снижению расходов в июле и августе в речных бассейнах Северного Кавказа со степенью оледенения >1% с интенсивностью 4–6%/10 лет за период с 1945 по 2018 г. [24]. Следствие относительного уменьшения водности июля в совокупности с более ранним началом снеготаяния – общая для региона тенденция смещения дат прохождения максимальных расходов воды на более ранние сроки [23, 25]. При этом общее увеличение годовой суммы осадков, наиболее ярко выраженное в равнинной и предгорной областях западной части Северного Кавказа [22], отражается как на увеличении среднегодового стока рек на 5–30% в предгорьях и до 30–70% в равнинной зоне в 1978–2010 гг. по сравнению с 1945–1977 гг. [25], так и на увеличении стока в отдельные месяцы года. Так, среднемесячные расходы июня уве-

<sup>1</sup> Работа выполнена по госзаданию Института водных проблем РАН (тема FMWZ-2022-0001 (1.6 – адаптация модели ЕСОМАГ, 1.12 – расчеты и анализ гидрографов), тема FMWZ-2022-0003 (3.1 – совершенствование модели)); госзаданию кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (раздел I.10 (ЦИТИС 121051400038-1) – параметризация характеристик подстилающей поверхности), при поддержке РФФИ (проект № 21-55-10003 – оценка влияния оледенения).

**Таблица 1.** Гидрологические посты в пределах исследуемой территории в бассейне р. Баксан

Гидропост	Площадь бассейна, км <sup>2</sup>	Средняя высота водосбора, м
Заюково	2100	2359
Тырныауз	838	2990

личивались для большей части рек Северного Кавказа с интенсивностью 1–9%/10 лет в период 1945–2018 гг. [24]. Увеличение суточной интенсивности конвективных осадков в летний период, характерное для западной части Северного Кавказа [7], отражается на увеличении средней величины и дисперсии максимальных срочных расходов воды в данном регионе [23]. С уменьшением влияния черноморских циклонов по направлению на В преобладающими факторами становятся уменьшение объема ледникового стока и соответствующее уменьшение средней величины максимальных расходов воды и их дисперсии [23]. Все вышеперечисленные тенденции способствуют видоизменению гидрографов горных рек и перераспределению источников питания, что может повлиять на водообеспечение региона.

В данной работе основное внимание уделено оценке возможностей модели формирования стока ECOMAG [18] для моделирования стока рек с высокой долей ледникового питания на примере высокогорной части р. Баксан, а также численными экспериментами по оценке чувствительности характеристик стока к изменению площади оледенения.

Модели формирования стока широко используются для изучения изменения и прогноза стока рек в различных высокогорных бассейнах мира [9, 11, 14, 20, 21, 29], включая оценки возможных климатических воздействий и влияния сокращения оледенения на изменение стока [6, 8, 10, 12]. Однако для высокогорной территории Кавказа адаптировано небольшое количество детальных моделей формирования стока. Для бассейна р. Баксан применялась модель HBV–ETH до замыкающего створа Тырныауз [11], однако использовались только данные метеорологической станции "Терскол" до 2000 г. В связи со значительными изменениями климата, дегляциацией и расширением сети метеорологических станций в данной работе актуализированы данные и создана более детальная модель формирования стока. Стоит отметить, что несмотря на широкую географию применения модели ECOMAG [2, 13, 19], для детального моделирования стока в высокогорье модель применялась впервые при решении частной задачи по оценке вклада прорывного паводка из оз. Башкара в общий расход р. Баксан в 2017 г. [15].

## ИССЛЕДУЕМАЯ ТЕРРИТОРИЯ

Бассейн р. Баксан располагается в пределах Центрального Кавказа, в наиболее высокой и труднодоступной части Большого Кавказа. Данный район – один из наиболее мощных очагов оледенения Кавказа. Ледники покрывают ~232 км<sup>2</sup> [26], из которых ~60% общей площади оледенения занимают ледники вулканического массива Эльбруса. В пределах бассейна р. Баксан доля оледенения составляет 7.5% в замыкающем створе с. Заюково и 16% – в створе Тырныауз.

Режим стока исследуемой реки характеризуется низкой осенне-зимней меженью и высоким весенне-летним половодьем с резко меняющимися величинами расходов. В качестве замыкающего створа был выбран гидрологический пост Заюково (табл. 1), который аккумулирует большую часть ледникового стока р. Баксан (рис. 1). Средняя высота бассейна – 2350 м, площадь бассейна – 2100 км<sup>2</sup>, из которых 64% приходится на высокогорную часть бассейна (>2000 м).

Согласно данным гидрологических постов Тырныауз и Заюково за период 1977–2017 гг., средние за многолетний период расходы воды составляют соответственно 23.9 и 34.9 м<sup>3</sup>/с, при этом среднесуточные расходы 1%-й обеспеченности – 218 и 306 м<sup>3</sup>/с, 10%-й обеспеченности – 157 и 172 м<sup>3</sup>/с. Однако для ежегодного максимального стока р. Баксан в центральной части Северного Кавказа характерна отрицательная тенденция – среднее значение годового максимального расхода, по данным поста Заюково, в 1981–2016 гг. на 6% ниже, чем в 1931–1980 гг. [23]. В 1978–2010 гг. наблюдается незначительное увеличение среднего годового стока в бассейне р. Баксан (на <10%) по сравнению с 1933–1977 гг. [25].

## АДАПТАЦИЯ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА

Информационно-моделирующий комплекс (ИМК) ECOlogical Model for Applied Geophysics (ECOMAG), разработанный под руководством Ю.Г. Мотовилова [18], – модель с распределенными параметрами, где поверхность бассейна разделяется на отдельные элементарные водосборы, которые формируются в автоматическом режиме на основе цифровой модели рельефа и анализа линий тока. Такая схема позволяет быстро адаптировать модель к любому по площади водосбору и ускоряет процесс подготовки данных для моделирования. Исходные данные для модели – среднесуточные данные о приземной температуре воздуха, осадках и дефиците влажности воздуха, для адаптации модели необходима информация о рельефе и подстилающей поверхности, включая почвенные и ландшафтные карты (табл. 2).

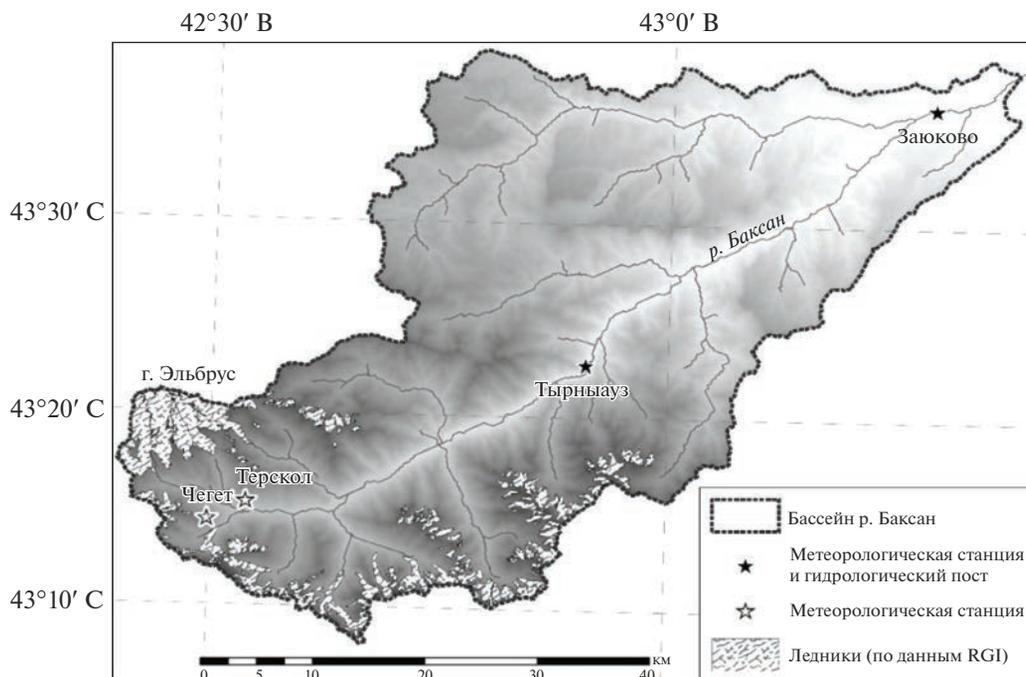


Рис. 1. Бассейн р. Баксан (до замыкающего створа “Заюково”).

Особенности генезиса формирования стока в бассейне р. Баксан обусловили необходимость подключения при расчетах на основе модели ЕСОМАГ ледникового блока, который описывает дополнительное летнее питание р. Баксан и ее притоков за счет таяния ледников и многолетних снежников в высокогорных областях. При расчетах летнего снеготаяния запасы воды в снеге на этих участках не лимитировались. В пределах модельной области ледниками покрыто 102 элементарных водосбора (из 662), из которых 30 на >50%.

Для адаптации модели формирования стока к исследуемому бассейну необходимо было провести калибровку ее параметров. Весь период, в достаточной степени освещенный гидрометеорологическими данными в пределах бассейна р. Баксан, был разделен на период калибровки и период валидации.

Для калибровки и валидации использовались данные двух гидрологических постов: Баксан–Тырныауз, Баксан–Заюково (рис. 2). Период калибровки включал в себя 8 лет (с 2009 по 2017 г.),

Таблица 2. Исходные данные для модели формирования стока ЕСОМАГ

Тип данных	Ресурс	Разрешение	Описание
ЦМР	Consultative Group for International Agriculture Research Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI: <a href="http://srtm.csi.cgiar.org/">http://srtm.csi.cgiar.org/</a> )	90 м × 90 м	Высота
Ландшафтное районирование	Атлас Кабардино-Балкарской республики	1 : 750000	Данные о землепользовании (сельскохозяйственные угодья, тип растительности и т. д.)
Почвенный покров	Атлас Кабардино-Балкарской республики	1 : 750000	Данные о почвах и их физических свойствах
Оледенение	Randolph Glacier Inventory (RGI-6) [21]	10 м × 10 м	Площадь оледенения
Расходы воды	Гидрологический ежегодник	1 сут	Суточные расходы воды
Климат	Метеорологическая база ИВП РАН [3]	1 сут	Среднесуточные температура, осадки и дефицит влажности

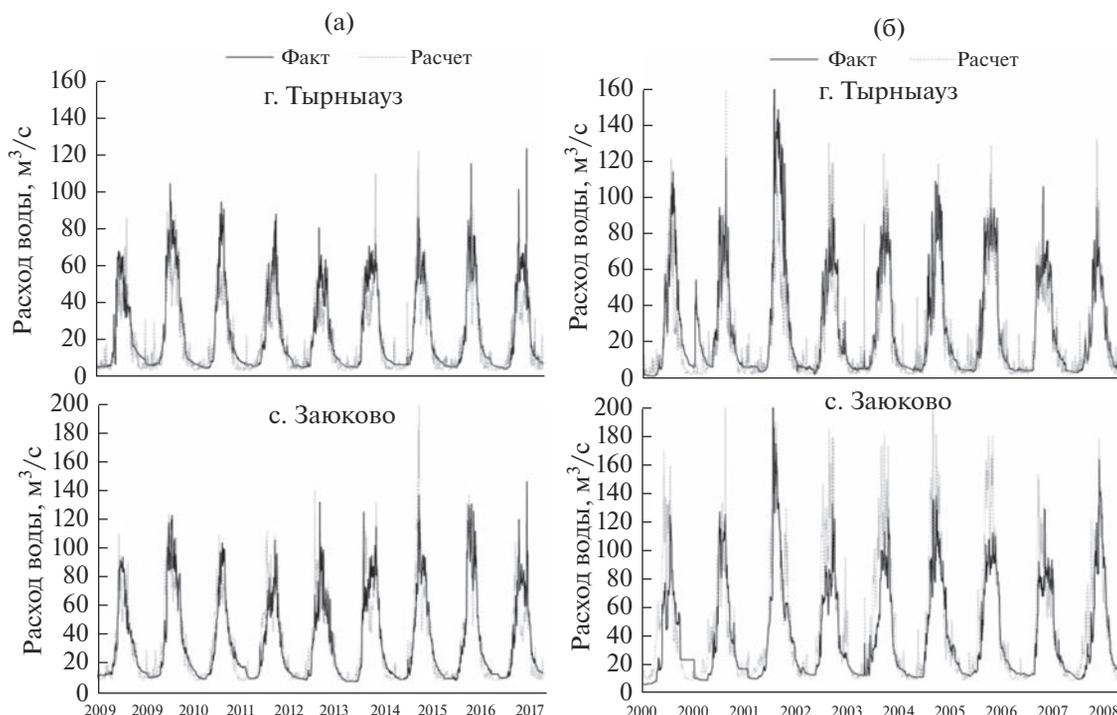


Рис. 2. Фактические и рассчитанные на основе модели ЕСОМАГ среднесуточные гидрографы в разных створах р. Баксан: а – период калибровки, б – период валидации.

период валидации – 8 лет (с 2000 по 2008 г.) (табл. 3). Стоит отметить, что данные метеорологических станций Тырнауз и Заюково доступны с 2008 г., высокогорной станции “Чегет” – с 2000 г., что обусловило выбор более позднего периода для калибровки модели, так как учет данных этих станций значительно влияет на качество и результаты моделирования. В связи с этим также будет снижаться качество моделирования по метеорологическим данным за период до 2000 г., так как калибровочные параметры требуют дополнительной оптимизации в условиях ограниченной метеорологической информации.

Для оценки качества моделирования использовались критерий эффективности моделирования Нэша–Сатклифа (NSE) и систематическая ошибка (BIAS, %), оценки проводились по суточным и месячным гидрографам:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_f - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_f - \bar{Q}_f)^2},$$

$$BIAS = \frac{\bar{Q}_f - \bar{Q}_{sim}}{\bar{Q}_f} \times 100\%,$$

где  $Q_f$  и  $Q_{sim}$  – соответственно фактическое и рассчитанное значения расхода воды в  $i$ -е сутки (или  $i$ -й месяц для среднемесячных оценок),  $\bar{Q}_f$  – средняя величина фактического расхода воды за период расчета  $i = 1, n$ .

В табл. 3 представлены результаты калибровки и валидации модели по данным основных калибровочных створов. Результаты расчетов суточного стока признаются хорошими при значениях  $NSE > 0.7$  и  $BIAS < 10\%$ , удовлетворительными –

Таблица 3. Результаты калибровки и валидации модели

Гидрологический пост	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Период калибровки 2009–2017 гг.		Период валидации 2000–2008 гг.			
		сутки		сутки		месяц	
		NSE	BIAS	NSE	BIAS	NSE	
г. Тырнауз	838	0.81	–11.4	0.84	0.76	–13.6	0.82
с. Заюково	2100	0.76	2.81	0.87	0.53	13.4	0.64

**Таблица 4.** Список калибровочных параметров и их оптимизированное значение

Параметр	Описание	Диапазон	Оптимизированное значение
EKOPT	Множитель на коэффициент испарения (безразмерный)	0.4–0.7	0.7
ALFOPT	Множитель на коэффициент таяния, мм/сут × °C	0.5–0.8	0.45
UImax	Водоудерживающая способность снега (безразмерный)	0.1–0.7	0.11
TCRst	Коэффициент на критическую температуру таяния снежного покрова (безразмерный)	–2...+2	–2
Rnew	Плотность свежеснежного покрова, г/см <sup>3</sup>	0.01–0.2	0.09
GradT	Градиент температуры, °C/м	–0.005...–0.007	–0.006
GradP	Градиент осадков, м/м	–0.0003–0.0007	0.0003

при  $NSE > 0.5$  и  $BIAS < 15\%$ . Согласно приведенным выше графикам критериев качества  $NSE$  и  $BIAS$ , получены хорошие и удовлетворительные результаты расчета суточных и среднемесячных гидрографов.

В процессе калибровки выявлялись параметры, к которым модель наиболее чувствительна, путем их последовательного перебора и задания им различных значений в пределах физически обоснованного диапазона. После определения ключевых параметров калибровка заключалась в поиске конкретных их величин, при которых наблюдался наилучший результат согласно критериям оценки качества моделирования. Сток высокогорного бассейна р. Баксан зависит, главным образом, от следующих параметров [18]: множителей на коэффициент испарения, таяния, водоудерживающую способность снега, критическую температуру таяния снежного покрова; плотности свежеснежного покрова, градиента температуры воздуха и градиента осадков [4] (табл. 4).

#### ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ОЦЕНКЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК СТОКА К ИЗМЕНЕНИЮ ПЛОЩАДИ ОЛЕДЕНЕНИЯ

Численные эксперименты позволяют оценить чувствительность модели к различным входным условиям. В пределах бассейна р. Баксан значительное влияние на сток оказывают оледенение и его продолжающаяся деградация. Площадь ледников Большого Кавказа уменьшалась в среднем на 0.44% в год в период с 1960 по 1986 г. и на 0.69% в год в период с 1986 по 2014 г. [31]. Если экстраполировать данные тенденции, то уже через 30 лет площадь оледенения Кавказских гор может уменьшиться на 25%, через 70 лет – на 50%. Согласно прогностическим моделям, площадь оледенения Кавказа к концу XXI в. может сократиться на 60–

90% в зависимости от климатического сценария [17].

В рамках эксперимента для оценки изменения стока в связи с наблюдаемыми изменениями оледенения воспроизводились следующие сценарии:  $L$  – современная площадь оледенения (по данным RGI),  $L75$  – 75% от современной площади оледенения,  $L50$  – 50% от площади оледенения,  $L125$  – 125% от площади оледенения и  $L0$  – отсутствие ледников. Относительные изменения доли ледников принимались одинаковыми для всех элементарных водосборов. Далее проводился расчет со входными данными за период с 2009 по 2017 г. с учетом разных площадей оледенения.

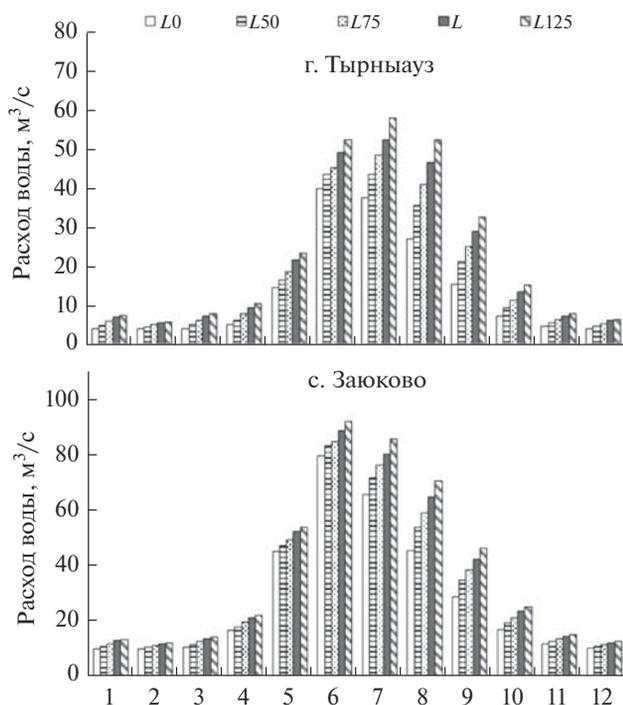
Результаты эксперимента (табл. 5) показывают, что изменение площади оледенения в большей мере влияет на сток в высокогорной части бассейна, при движении вниз по течению влияние ослабевает. Например, при уменьшении оледенения на 50% (сценарий  $L50$ ) от современного состояния общий объем стока за расчетный период в г. Тырнаузе уменьшился на 21%, в то время как в с. Заюково изменение составило 12%. При отсутствии ледников (сценарий  $L0$ ) сток уменьшился на 34.5 и 20% в г. Тырнаузе и с. Заюково соответственно. При сценарии  $L125$  (увеличение площади ледников) сток увеличивается на 9.8 и 5.7% в г. Тырнаузе и с. Заюково соответственно.

Максимальный расход воды р. Баксан также откликается на изменение площади оледенения. Он уменьшается при сценарии  $L50$  (сокращение площади оледенения) на 14 и 9% в г. Тырнаузе и с. Заюково соответственно; увеличивается при сценарии  $L125$  (увеличение площади оледенения на 25%) на 3.8 и 2.4% в г. Тырнаузе и с. Заюково соответственно.

Изменение оледенения влияет на расходы воды преимущественно в летние месяцы и в сентябре – в период интенсивного таяния уже открытых

**Таблица 5.** Характеристики стока р. Баксан и их изменение в зависимости от расчетного сценария (1 – г. Тырнауз, 2 – с. Заюково)

Сценарий	Общий сток за период, км <sup>3</sup>		Изменение стока, %		Максимальный расход за период, м <sup>3</sup> /с		Изменение максимального расхода, %	
	1	2	1	2	1	2	1	2
L	6.00	10.3			128	205		
L75	5.32	9.67	-11.3	-6.6	115	192	-9.8	-6.4
L50	4.72	9.07	-21.3	-12.4	110	185	-13.8	-9.4
L0	3.93	8.27	-34.5	-20.0	106	179	-16.7	-12.6
L125	6.59	10.9	9.8	5.7	133	210	3.8	2.4

**Рис. 3.** Осредненные за период с 2009 по 2017 г. среднемесячные гидрографы по результатам численного эксперимента при изменениях доли оледенения.

от снега ледников (рис. 3). На рис. 3 видно, что наибольший эффект от эксперимента наблюдается в июле и августе. Например, при сценарии L50 среднемесячный расход воды р. Баксан уменьшился в июле на 17 и 11%, в августе – на 23 и 17%, в сентябре – на 27 и 18%, по данным гидропостов Тырнауз и Заюково соответственно. При отсутствии оледенения (сценарий L0) сток в летние месяцы в среднем уменьшается на 40 и 30%, при увеличении площади оледенения на 25% (сценарий L125) – увеличивается на 12 и 9%, по данным гидропостов г. Тырнауза и с. Заюково соответственно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе обширной информационной базы (гидрометеорологические данные, карты подстилающей поверхности) адаптирована модель формирования речного стока для высокогорной части бассейна р. Баксан. Для учета региональных особенностей был подключен дополнительный блок модели, учитывающий оледенение. Модель позволяет с удовлетворительной точностью воспроизвести наблюдаемые гидрографы суточного стока за многолетний период.

Проведены численные эксперименты по оценке чувствительности характеристик стока р. Баксан к изменению площади оледенения. Показано, что возможное сокращение площади оледенения в бассейне р. Баксан приведет к уменьшению годового стока, снижению максимальных расходов воды и повышению доли летнего стока в годовом объеме стока. В зависимости от интенсивности процесса дегляциации годовая сток р. Баксан может снизиться в верхнем течении на 20–30%, в нижнем течении – на 10–20% в результате уменьшения ледниковой составляющей. Максимальные расходы воды также снизятся на 10–15%.

Численные эксперименты позволяют оценить возможное влияние дегляциации на речной сток р. Баксан. Следует отметить, что климатические колебания, такие как изменения температуры и осадков, могут оказать дополнительное воздействие на речной сток.

Авторы выражают благодарность Е.М. Богаченко и всем сотрудникам центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Кабардино-Балкарской Республики за предоставленную гидрометеорологическую информацию.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Золотарев Е.А., Харьковец Е.Г. Эволюция оледенения Эльбруса после малого ледникового периода // Лед и снег. 2012. № 2 (118). С. 15–22.
2. Морейдо В.М., Калугин А.С. Оценка возможных изменений водного режима реки Селенги в XXI в.

- на основе модели формирования стока // Вод. ресурсы. 2017. Т. 44. № 3. С. 275–284.
3. Патент РФ 2020622193. База данных для регионального гидрологического моделирования на территории Российской Федерации. В.М. Морейдо, А.Н. Амербаев. 2020. Бюл. № 11.
  4. *Погорелов А.В.* Снежный покров Большого Кавказа: Опыт пространственно-временного анализа. М.: Академкнига, 2002. 287 с.
  5. *Рыбак Е.А., Рыбак О.О.* Анализ региональных особенностей структуры водопользования на Северном Кавказе. Ч. 1. Водообеспеченность и водопотребление // Системы контроля окружающей среды. 2021. № 2. Вып. 44. С. 96–105. <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2021-2-96-105>
  6. *Bliss A., Hock R., Radic V.* Global response of glacier runoff to twenty-first century climate change // *J. Geophys. Res.: Earth Surface*. 2014. V. 119 (4). P. 717–730. <https://doi.org/10.1002/2013JF002931>
  7. *Chernokulsky A.V., Kozlov F.A., Zolina O.G., Bulygina O.N., Mokhov I.I., Semenov V.A.* Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades // *Environ. Res. Lett.* 2019. V. 14. P. 045001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aafb82>
  8. *Duethmann D., Bolch T., Farinotti D. et al.* Attribution of streamflow trends in snow and glacier melt-dominated catchments of the Tarim River, Central Asia // *Water Resour. Res.* 2015. V. 51(6). P. 4727–4750. <https://doi.org/10.1002/2014WR016716>
  9. *Gao X., Ye B., Zhang S., Qiao C., Zhang X.* Glacier runoff variation and its influence on river runoff during 1961–2006 in the Tarim River Basin, China // *Sci. China Earth Sci.* 2010. V. 53 (6). P. 880–891. <https://doi.org/10.1007/s11430-010-0073-4>
  10. *Gurtz J., Lang H., Verbunt M., Zappa M.* The use of hydrological models for the simulation of climate change impacts on mountain hydrology // *Global Change and Mountain Regions*. 2005. P. 343–354. [https://doi.org/10.1007/1-4020-3508-X\\_34](https://doi.org/10.1007/1-4020-3508-X_34)
  11. *Hagg W., Shahgedanova M., Mayer C., Lambrecht A., Popovnin V.* A sensitivity study for water availability in the Northern Caucasus based on climate projections // *Global and Planetary Change*. 2010. V. 73 (3–4). P. 161–171. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2010.05.005>
  12. *Huss M., Fischer M.* Sensitivity of very small glaciers in the Swiss Alps to future climate change // *Frontiers Earth Sci.* 2016. V. 4. P. 34. <https://doi.org/10.3389/feart.2016.00034>
  13. *Kalugin A.S., Motovilov Y.G.* Runoff formation model for the amur river basin // *Water Resour.* 2018. V. 45 (2). P. 149–159. <https://doi.org/10.1134/S0097807818020082>
  14. *Klok E.J., Jasper K., Roelofsma K.P., Gurtz J., Badoux A.* Distributed hydrological modelling of a heavily glaciated Alpine river basin // *Hydrol. Sci. J.* 2001. V. 46 (4). P. 553–570. <https://doi.org/10.1080/02626660109492850>
  15. *Kornilova E.D., Krylenko I.N., Rets E.P., Motovilov Y.G., Bogachenko E.M., Krylenko I.V., Petrakov D.A.* Modeling of Extreme Hydrological Events in the Baksan River Basin, the Central Caucasus, Russia // *Hydrology*. 2021. V. 8 (1). P. 24. <https://doi.org/10.3390/hydrology8010024>
  16. *Kutuzov S., Lavrentiev I., Smirnov A., Nosenko G., Petrakov D.* Volume changes of Elbrus glaciers from 1997 to 2017 // *Frontiers Earth Sci.* 2019. V. 7. P. 153. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00153>
  17. *Marzeion B., Hock R., Anderson B.A., Bliss A., Champollion N., Fujita K., Huss M., Immerzeel W.W., Kraaijenbrink P.D., Malles J.H., Maussion F., Radic V., Rounce D.R., Sakai A., Shannon S., Wal R.V., Zekollari H.* Partitioning the Uncertainty of Ensemble Projections of Global Glacier Mass Change // *Earth's Future*. 2020. V. 8 (7). P. e2019EF001470. <https://doi.org/10.1029/2019EF001470>
  18. *Motovilov Y.G., Gottschalk L., Engeland K., Belokurov A.* ECOMAG – Regional Model of Hydrological Cycle. Application to the NOPEX Region. 1999. 88 p.
  19. *Motovilov Y., Kalugin A., Gelfan A.* An ECOMAG-based Regional Hydrological Model for the Mackenzie River basin // EGU General Assembly Conf. Abstracts. 2017. P. 8064.
  20. *Omani N., Srinivasan R., Karthikeyan R., Smith P.* Hydrological modeling of highly glacierized basins (Andes, Alps, and Central Asia) // *Water*. 2017. V. 9 (2). P. 111. <https://doi.org/10.3390/w9020111>
  21. *Rahman K., Maringanti C., Beniston M., Widmer F., Abbaspour K., Lehmann A.* Streamflow modeling in a highly managed mountainous glacier watershed using SWAT: the Upper Rhone River watershed case in Switzerland // *Water Resour. Management*. 2013. V. 27 (2). P. 323–339. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0188-9>
  22. *Rets E., Kireeva M.* Hazardous hydrological processes in mountainous areas under the impact of recent climate change: case study of Terek River basin // *IAHS Publ.* 2010. V. 340 (2010). P. 126–134.
  23. *Rets E.P., Durmanov I.N., Kireeva M.B.* Peak runoff in the north Caucasus: Recent trends in magnitude, variation and timing. // *Water Resour.* 2019. V. 46 (1). P. 56–66. <https://doi.org/10.1134/S0097807819070157>
  24. *Rets E.P., Durmanov I.N., Kireeva M.B., Smirnov A.M., Popovnin V.V.* Past ‘peak water’ in the North Caucasus: Deglaciation drives a reduction in glacial runoff impacting summer river runoff and peak discharges // *Climatic Change*. 2020. V. 163 (4). P. 2135–2151. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02931-y>
  25. *Rets E.P., Dzhamalov R.G., Kireeva M.B., Frolova N.L., Durmanov I.N., Telegina A.A., Telegina E.A., Grigoriev V.Y.* Recent trends of river runoff in the North Caucasus // *Geogr. Environ. Sustainability*. 2018. V. 11 (3). P. 61–70. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-11-3-61-70>
  26. RGI Consortium. Randolph Glacier Inventory-A Dataset of Global Glacier Outlines. Version 6.0. Global Land Ice Measurements from Space. Boulder, CO, USA, 2017.
  27. *Shahgedanova M., Hagg W., Zacios M., Popovnin V.* An Assessment of the recent past and future climate change, glacier retreat, and runoff in the caucasus re-

- gion using dynamical and statistical downscaling and HBV-ETH hydrological model // *Regional Aspects of Climate-Terrestrial-Hydrologic Interactions in Non-boreal Eastern Europe*. 2009. P. 63–72.  
[https://doi.org/10.1007/978-90-481-2283-7\\_8](https://doi.org/10.1007/978-90-481-2283-7_8)
28. *Shahgedanova M., Nosenko G., Kutuzov S., Rototaeva O., Khromova T.* Deglaciation of the Caucasus Mountains, Russia / Georgia, in the 21st century observed with ASTER satellite imagery and aerial photography // *The Cryosphere*. 2014. V. 8 (6). P. 2367–2379.  
<https://doi.org/10.5194/tc-8-2367-2014>
29. *Singh V., Jain S.K., Shukla S.K.* Glacier change and glacier runoff variation in the Himalayan Baspa river basin // *J. Hydrol.* 2021. V. 593. P. 125918.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125918>
30. *Tashilova A., Ashabokov B., Kesheva L., Teunova N.* Analysis of climate change in the Caucasus region: End of the 20th–Beginning of the 21st Century // *Climate*. 2019. V. 7 (11).  
<https://doi.org/10.3390/cli7010011>
31. *Tielidze L.G., Wheate R.D.* The greater caucasus glacier inventory (Russia, Georgia and Azerbaijan) // *The Cryosphere*. 2018. V. 12 (1). P. 81–94.  
<https://doi.org/10.5194/tc-12-81-2018>
32. *Toropov P.A., Aleshina M.A., Grachev A.M.* Large-scale climatic factors driving glacier recession in the Greater Caucasus, 20th–21st century // *Int. J. Climatol.* 2019. V. 39 (12). P. 4703–4720.  
<https://doi.org/10.1002/joc.6101>