

УДК 551.324.6 + 551.482.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВОДНОГО БАЛАНСА В БАССЕЙНЕ КУБАНИ

© 2026 г. В. Г. Коновалов

Институт географии РАН, Москва, Россия

e-mail: vladgeo@gmail.com

Поступила 26.08.2025 г.

После доработки 12.12.2025 г.

Принята к печати 23.03.2026 г.

Цель исследования: физико-статистическое моделирование факторов режима речного стока и оледенения, разработка метода расчёта и определение в бассейне Кубани многолетних изменений основных составляющих уравнения годового водного баланса (речной сток, осадки, испарение, подземный сток), ледникового стока V_{gl} и оценка влияния V_{gl} на изменение объёма и уровня Азовского моря. Определение V_{gl} на площади оледенения F_{gl} , где формируются основные компоненты ледникового стока, включает в себя ежегодный расчёт максимальной высоты параметра ELA (Equilibrium Line Altitude, высота линии равновесия аккумуляции и абляции) в зависимости от годового индекса баланса накопления и абляции I_B . Для оценки составляющих локального индекса баланса применены многолетние суммы и средние значения температуры воздуха и осадков за характерные интервалы времени на репрезентативных метеостанциях. Источниками для гляциологических и гидрологических расчётов послужили: каталогизированные морфометрические данные о ледниках и дистанционные измерения параметров оледенения; многолетние внутригодовые месячные суммы осадков и среднемесячные значения: температуры воздуха на метеорологических станциях в бассейне Кубани и на прилегающей территории; измерения стока воды на гидрологических постах в бассейнах Дона и Кубани. Для бассейна р. Теберда (приток Кубани) определены многолетние и средние значения за 1960–2000 гг. годовых объёмов осадков, речного стока, испарения, ледникового стока, подземного стока. Годовой объём V_{gl} на площади F_{gl} в бассейне Кубани изменялся от 0.542 до 1.143 км³. Относительный объём V_{in} притока V_{gl} в Азовское море, рассчитанный в устье Кубани за 1966–2017 гг., изменялся в интервале 1.3–41.6% от суммарного годового баланса Азовского моря. Результаты расчётов составляющих уравнения годового водного баланса Кубани за 1957–2018 гг. предназначены для водохозяйственных и гидропроектных организаций на Северном Кавказе.

Ключевые слова: ледниковый сток, Азовское море, река Кубань, многолетняя информация, характеристики оледенения и стока, приток в Азовское море

DOI: 10.7868/S2412376526020035

Это последняя публикация нашего коллеги В.Г. Коновалова (22.05.1937–08.03.2026).

ВВЕДЕНИЕ

Средние многолетние значения составляющих уравнения годового водного баланса для макро- и мезотерриториальных областей Северного Кавказа содержатся в работах (Лурье, 2003; Рец, 2013; Юмина, 2008) и других. В отличие от этих работ, объектом нашего исследования служит площадь F_{bas} речного водосбора, замыкаемая гидрологическим постом (гп), с учётом того, что данные о водных ресурсах рек на площади F_{bas} считаются

наиболее востребованными в водохозяйственных и гидропроектных организациях. В публикации (Бердников и др., 2023) установлено, что подавляющую долю (до 95–100%) материкового притока воды в Азовское море составляет суммарный сток рек Дон и Кубань. Поскольку современное горное оледенение существует только в бассейне Кубани, задачей работы служит оценка изменений за 1957–2018 гг. характеристик гидрологического режима оледенения и составляющих водного баланса в этом бассейне. Научным обоснованием

результатов водобалансовых расчётов принято заключение в работе (Виноградов, Виноградова, 2008) о пригодности уравнения водного баланса как для определения неизвестного члена, так и для контроля всех элементов этого уравнения. Методической основой расчётов гидрологического режима речных бассейнов Северного Кавказа снегово-ледникового типа формирования стока служат физико-статистические аналоги уравнений теплового и водного баланса.

СОСТАВЛЯЮЩИЕ УРАВНЕНИЯ ВОДНОГО БАЛАНСА

Для водобалансовых расчётов применено уравнение годового водного баланса горно-ледникового речного бассейна в виде:

$$W_{\text{run}}(k) = Pr \cdot (F_{\text{bas}}) - Ev \cdot (F_{\text{bas}}) + V_{\text{gl}} + \Delta U \cdot (F_{\text{bas}}), \text{ в км}^3. \quad (1)$$

Здесь и далее k – номер календарного года, Pr и Ev – слои осадков и испарения на средней взвешенной высоте речного бассейна, F_{bas} – площадь бассейна выше замыкающего гидропоста,

ΔU – разность между средним многолетним и k -м значениями подземного стока, V_{gl} – объём ледникового стока, W_{run} – объём поверхностного речного стока с площади F_{bas} , измеренный на замыкающем гидропосту. Привязка компонентов правой части (1) к площади бассейна выше замыкающего гидропоста обусловлена необходимостью сравнения измеренного и рассчитанного годового стока. С учётом доступности и качества исходной гидрометеорологической информации оценка составляющих уравнения (1) выполнена для 1957–2018 гг. и более коротких интервалов времени.

В связи со значительной пространственной изменчивостью осадков в бассейне Кубани (Лурье, 2003; Ледники и климат Эльбруса, 2020) оценка качества расчётов $W_{\text{run}}(k)$ по уравнению (1) выполнена по данным метеостанций для горно-ледникового бассейна р. Теберда (приток Кубани). В табл. 1 приведены сведения и ссылки на результаты, относящиеся к определению составляющих уравнения (1). На рис. 1 приведена гидрографическая схема бассейна Кубани и расположения гидропостов, данные которых использованы в работе. Далее изложены методы и результаты определения составляющих уравнения (1).



Рис. 1. Гидрографическая схема бассейна р. Кубань. 1 – гидропост (гп) Тиховский на р. Кубань, 2 – гп хутор Грозный на р. Белая, 3 – гп хутор Догужиев на р. Лаба, 4 – гп станица Ладожская, верховье Кубани, 5 – гп Теберда на р. Теберда
Fig. 1. Hydrography sketch of the Kuban River Basin. The names of measurement sites. 1 – gauging station (GS) Tikhovskiy on the Kuban River, 2 – GS farm Grozny on the Belaya River, 3 – GS farm Doguzhiev on the Laba River, 4 – GS village Ladozhskaya upper reaches of the Kuban, 5 – GS Teberda on the Teberda River

Таблица 1. Информационно-методическая основа расчёта составляющих водного баланса
Table 1. Information and methodological basis for calculating the components of the water balance

Индекс	Интервал, годы	Метод	Исходные данные/ Источник из списка литературы	Результаты
<i>Бассейн р. Кубань</i>				
Vol 1	1957–2018	гидрометрия	Северо-Кавказское ГМС/ Bodo, 2000; Dai and Trenberth;	Табл. 2
Vol 2	1957–2018	гидрометрия	Северо-Кавказское ГМС/ Bodo, 2000; Dai and Trenberth	Табл. 2
Vol 3	1957–2018	гидрометрия	Северо-Кавказское ГМС	Табл. 2
Vol 4	1957–2018	гидрометрия	Северо-Кавказское ГМС	Табл. 2
Vol 5	1957–2018	$V_{gl}(k) = M(Z_f) F_{gl}$	Каталог ледников СССР, 1967; RGI Consortium, 2017; Каталог ледников России; WGMS, 2020; Konovalov, 2023, 2024	Табл. 2
Vol 6	1957–2018	$V_{gl}(k) \cdot K_{run}$ $K_{run} = 0.0002 Z + 0.0994$	Лурье, 2003	Табл. 2
<i>Бассейн р Теберда</i>				
Var 3	1957-2018	$Z_f(k) = (Z_{beg} + Z_{end})/2$	Каталог ледников СССР, 1967; RGI Consortium, 2017; Каталог ледников России; WGMS, 2020; RGI Consortium, 2017	Табл. 2
Var 4	1957–2018	$ELA_{max}(k) = Z_{end}(k) + \Delta Z(k) Prob(I_B)_k$; $\Delta Z(k) = Z_{beg} - Z_{min}$; $Prob(I_B)_k = f(Ib)$.	Каталог ледников СССР, 1967; Коновалов, 1985; RGI Consortium, 2017; Каталог ледников России; WGMS, 2020; Погода и Климат	Табл. 2
$W_{run}(k)$	1960–2000	гидрометрия	Северо-Кавказское ГМС	Рис. 3
Ev_k	1960–2000	$Ev_k = E F_{bas}$ $E = f(Z)$	Коновалов, Рудаков, 2018; Harris I. et al.; the CRU TS3.10	Рис. 3
V_{gl}	1960–2000	$V_{gl}(k) = M(Z_f) F_{gl}$	Каталог ледников СССР, 1967; RGI Consortium, 2017; Каталог ледников России; WGMS, 2020; Konovalov, 2023, 2024	Рис. 3
Pr^* $Pr^\#$ $Pr^+(k)$	1960–2000	$Pr^* = Pr^\# + (Pr^\# + Pr^+) \mu$ $Pr^\# = Const + c_1 z + c_2 \phi + c_3 \lambda$ $Pr^+(k) = W_{run} - Ev(F_{bas}) + W_{gl} + \Delta U(F_{bas})$	Погода и Климат; StatSoft, Inc. (2007).	Рис. 3

Vol 1 – сток р. Кубань (гп Тиховский), данные за 2006–2018 гг. восстановлены по связи со стоком Vol 3; Vol 2 – сток рек Кубань и Дон; Vol 3 – годовой приток в Краснодарское водохранилище из верховьев Кубани и рек Белая и Лаба; Vol 4 – приток в Краснодарское водохранилище из верховьев Кубани и рек Белая и Лаба за июль–сентябрь; Vol 5 – ледниковый сток в бассейне Кубани; Vol 6 – приток в Азовское море в устье Кубани; K_{run} – коэффициент стока; Var 3 – высота фирновой границы; Var 4 – максимальная высота ELA ; W_{run} – речной сток, Ev_k – испарение, W_{gl} – ледниковый сток, Pr^* , $Pr^\#$, – этапы расчёта осадков, $Pr^+(k)$ – конечный результат расчёта осадков после калибровки.

Vol 1 – runoff of the Kuban River (Tikhovsky gauging station), data for 2006–2018 were reconstructed by relation with the runoff Vol 3; Vol 2 – runoff of the Kuban and Don rivers; Vol 3 – annual inflow to the Krasnodar reservoir from the upper reaches of the Kuban and the Belaya and Laba rivers; Vol 4 – inflow to the Krasnodar reservoir from the upper reaches of the Kuban and the Belaya and Laba rivers for July-September; Vol 5 – glacial runoff in the Kuban basin; Vol 6 – inflow to the Sea of Azov at the mouth of the Kuban; K_{run} – runoff coefficient; Var 3 – the firm line elevation; Var 4 – maximum ELA ; W_{run} – river runoff, Ev_k – evaporation, W_{gl} – glacial runoff, Pr^* , $Pr^\#$, are the stages of precipitation calculation, $Pr^+(k)$ is the final result of precipitation calculation after calibration.

Ледниковый сток. Годовой сток с общей площади оледенения в речном бассейне представляет собой главным образом сумму объёмов таяния: льда под мореной V_{im} , открытого льда V_i , фирна возрастом более одного года V_{of} , зимнего V_{ws} и летнего снега V_{ss} . В зависимости от метода составления водного баланса речного бассейна перечисленные переменные суммируются согласно уравнениям:

$$V_{gl}(k) = \sum_{d_{begc}}^{d_{endc}} [V_{im}(\tau) + V_i(\tau) + V_{of}(\tau) + V_{of}(\tau) + V_{ws}(\tau) + V_{ss}(\tau)], \quad (2)$$

$$W_{gl}(k) = \sum_{d_{begi}}^{d_{endi}} [V_{im}(t_1) + V_i(t_1) + V_{of}(t_1)], \quad (3)$$

где k – номер года, d_{begc} и d_{endc} – даты начала и конца расчётного периода, d_{begi} и d_{endi} – даты начала и конца периода таяния льда, $\tau = d_{begc} \dots d_{endc}$, $t_1 = d_{begi} \dots d_{endi}$.

Возможность применения формул (2) и (3) для региональных расчётов ледникового стока V_{gl} и ледникового питания W_{gl} обусловлена наличием информации о многолетнем $k = 1 \dots N$, внутригодовом $t_k = d_{begi} \dots d_{endi}$ ходе ELA (аббревиатура Equilibrium Line Altitude) на ледниках $ELA = ELA(t)_k$ и максимальных значений ELA в конце периода абляции льда k -го года, т.е. $ELA_{max}(t)_k = ELA(d_{endi})$. При отсутствии данных: d_{begr} , d_{endr} , d_{begi} , d_{endi} и ELA применяется полученная в работе (Кренке, 1982) региональная степенная зависимость $M_{gl}(Z)$ от средней летней температуры воздуха $T_s(Z)$. Таким образом, вместо уравнения (2) используется формула (4).

$$V_{gl}(k) = M(Z_f) F_{gl}, \quad (4)$$

где $M(Z_f)$ – годовой слой таяния на высоте границы питания (Z_f) как функция средней летней температуры воздуха $T_s = T_s(Z)$, $Z_f = (Z_{beg} + Z_{end})/2$, Z_{beg} и Z_{end} – соответственно абсолютные высоты начала и конца ледников, F_{gl} – площадь оледенения. В этом случае влияние моренного покрова на объём V_{gl} , вероятно, учитывается связью между удельным балансом массы ледника и площадью морены, а определение остальных составляющих в правой части (1) выполняется безусловно, поскольку они находятся в интервале $Z_{beg} - Z_{end}$.

Учитывая линейный характер связи между слоем таяния и высотой над уровнем моря (Ко-

новалов, 1985), уравнение (4) применяется для определения годового/сезонного объёма ледникового питания W_{gl} , который формируется в областях абляции $V(Ab)$ и аккумуляции $V(Ac)$ в интервалах высоты: $Z_{end} - Z_{uml}$, $Z_{uml} - ELA_{max}$, и $ELA_{max} - Z_{beg}$. Здесь ELA_{max} – максимальная высота границы нулевого баланса аккумуляции и абляции на леднике в k году, Z_{uml} – верхний уровень распространения сплошного моренного покрова.

Определение таяния на площади F_{gl} , где формируются основные составляющие ледникового стока (Коновалов, 1985, 2015; Konovalov, 2024) включает ежегодный расчёт максимального значения параметра ELA_{max} как функции годового индекса баланса аккумуляции и абляции (I_B). В качестве I_B для бассейна Кубани были испытаны: региональный баланс массы ледников для Северного Кавказа (Dyurgerov, 2010); локальные балансы массы на условно репрезентативных ледниках Гарабаши и Джанкуат (WGMS, 2020); разность безразмерных аномалий осадков и температуры воздуха за характерные интервалы времени на метеостанции Зеленчукская (Погода и климат, 2022). Наиболее информативным оказался годовой баланс массы на леднике Джанкуат. Среднюю за многолетний интервал времени максимальную высоту ELA в k -ом году определяем по формуле:

$$ELA_{max}(k) = Z_{end}(k) + \Delta Z(k) \cdot Prob(I_B)_k, \quad (5)$$

где $\Delta Z = (Z_{beg} - Z_{end})$, $Prob$ – статистическая обеспеченность гидрологической величины (Коновалов, 1985). Расчет объёмов поступления талой воды с площади оледенения выполняется отдельно для высотных интервалов $Z_{end} - ELA_{max}$ и $ELA_{max} - Z_{beg}$. При этом принято, что из интервала $Z_{end} - ELA_{max}$ вся вода попадает в русло реки, а в интервале $ELA_{max} - Z_{beg}$ часть объёма таяния расходуется на внутреннее питание ледников. Использование этих высотных суб-интервалов для определения V_{gl} приводит к частичному игнорированию влияния имеющейся поверхностной морены на таяние в масштабе совокупности ледников. Ежегодные значения F_{gl} , Z_{beg} и Z_{end} , необходимые для расчёта V_{gl} в бассейне Кубани, получены автором путём линейной либо полиномиальной фильтрации трёхразовых срезов F_{gl} , Z_{beg} и Z_{end} в интервале 1957–2018 гг. Источники данных – Каталог ледников СССР, 1967; RGI Consortium, 2017; Каталог ледников России; WGMS, 2020. За 1957–2018 гг. F_{gl} уменьшилась

от 216.6 до 200 км², высота Z_{beg} и Z_{end} возросла соответственно от 3470 до 3793 м и от 2631 до 2747 м.

Определение в бассейне Кубани $V_{\text{gl}}(k)$ как функции $T_s(k) = T(Z)$ и осадков Pr в уравнении (1) основано на измерениях температуры воздуха и осадков на метеостанциях: Красная поляна (566), Владикавказ (703), Зеленчукская (929), Теберда (1313), Клухорский перевал (2039), Шаджатмаз (2056), Сулак (2923) (Погода и Климат, 2022). Здесь после названия метеостанций в скобках дана высота в метрах над ур. моря. Ежегодный коэффициент корреляции зависимости $T_s = f(Z)$ в течение 1957–2018 гг. изменялся от -0.98 до -1.00 . Тренд T_s на высоте Z_f равен $0.015 \cdot N_{\text{year}} + 5.7$, N_{year} – номер года.

В итоге рассчитано многолетнее изменение годового объёма V_{gl} и его относительный вклад $\Omega = V_{\text{gl}}/Vol(6-8)$ в сток Кубани (гидропост Тиховский), $Vol(6-8)$ – объём стока за июнь–август. При применении доступных измерений стока на этом гидропосту за 1957–2005 гг. Ω изменялся за лето от 10.4 до 47.1%, а за год от 3.6 до 12.4%, и в суммарном годовом стоке Дона и Кубани от 1.2 до 4.7%. В данном случае оценки вклада V_{gl} в сток Кубани не являются территориально значимыми, поскольку данные о режиме стока на гп Тиховский подвержены влиянию Краснодарского водохранилища. Для освобождения от антропогенного влияния этого водохранилища на параметр Ω и получения характеристик естественного стока Кубани (W_{run}) использованы измерения стока на реках снеговой типа питания, расположенных выше Краснодарского водохранилища. Это реки (см. рис. 1): Белая (гп хутор Грозный), Лаба (гп хутор Догужиев) и речные бассейны в верховьях Кубани, которые характеризуют данные по стоку на гидропосту станица Ладожская. Всего в бассейне Кубани находится 15 водохранилищ, из них 14 небольших по площади и объёму расположены ниже Краснодарского водохранилища и не влияют на расчёт параметра Ω . Источники данных по стоку (Лурье, 2003; Государственный ..., 2000–2009; Юмина, 2008; Vodo, 2000; Dai and Trenberth, electronic resource).

В результате применения W_{run} и V_{gl} за 1957–2018 гг. (табл. 2) минимальный, максимальный и средний вклады в процентах ледникового стока в годовой сток Кубани выше Краснодарского водохранилища определены соответственно как: 4.6, 16.0, 8.9.

Ледниковый сток и изменение объёма Азовского моря. Поскольку ледниковый сток попадает в моря только как часть речного стока, обоснованными оценками вклада V_{gl} в изменения объёма и уровня Азовского моря следует считать значения V_{gl} , приведённые к устью Кубани. Разумеется, этот вывод относится и к другим аналогичным ситуациям на планете Земля.

Для определения среднего за 1957–2018 гг. вклада ледникового стока в устье Кубани в изменение уровня Азовского моря воспользуемся известным понятием коэффициента стока K_{run} . По данным в работе (Лурье, 2003) об изменении годового коэффициента стока на различных высотах в бассейне Кубани автором получено уравнение:

$$K_{\text{run}} = 0.0002 \cdot Z + 0.0994, \quad (6)$$

где Z высота в м над ур. моря, коэффициент детерминации $R^2 = 0.94$. Для бассейна р. Терек найдено аналогичное уравнение:

$$K_{\text{run}} = 0.0002 \cdot Z + 0.093 \quad (7)$$

с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.99$.

В устье Кубани средний годовой объём притока $V_{\text{gl}}(\text{in})$ в Азовское море равен 0.0795 км³. Эта величина получена как произведение K_{run} , найденного по уравнению (6) при $Z = 0$, и объёма годового ледникового стока $V_{\text{gl}} = 0.8000$ км³, рассчитанного в среднем за 1957–2018 гг. для оледенения Кубани. Средний вклад V_{gl} за этот же период в годовой материковый сток в Азовское море составил 0.39%. При использовании оценок водного баланса Азовского моря в работе (Бердников и др., 2023) средний годовой вклад $V_{\text{gl}}(\text{in})$ в среднее изменение объёма Азовского моря за 1966–2017 гг. составляет 3.8% от 2.1 км³. Интервал 1966–2017 гг. обусловлен наличием сведений за общий период расчёта.

В результате построения линейных однофакторных связей между средним годовым изменением уровня Азовского моря ΔH (Мировой водный..., 1974) и потенциально возможными влияющими факторами получены следующие коэффициенты корреляции r : $\Delta H = f(V_{\text{gl}}(\text{in}))$, $r = 0.180$; $\Delta H = f(Z_f)$, $r = 0.081$; $\Delta H = f(W_{\text{riv}})$, $r = 0.202$; $\Delta H = f(V)$, $r = 0.477$. Здесь W_{riv} – сумма годового стока рек Дон и Кубань, V – водный баланс Азовского моря по данным (Бердников и др., 2023), остальные обозначения прежние.

Таблица 2. Составляющие уравнения годового водного баланса в бассейне Кубани

Table 2. Components of yearly water balance equation in the Kuban River basin

Год	F_{gl} , км ²	км ³ /год						%		м над ур. моря	
		Vol 1	Vol 2	Vol 3	Vol 4	Vol 5	Vol 6	Var 1	Var 2	Var 3	Var 4
1957	214.6	10.67	35.20	7.94	2.26	0.86	0.09	10.8	37.9	3048	2983
1958	215.3	14.03	38.98	9.82	3.28	0.77	0.08	7.8	23.5	3058	2739
1959	216.0	10.22	32.68	7.62	2.14	0.85	0.09	11.2	39.8	3067	2936
1960	216.6	13.04	37.01	9.68	2.92	0.69	0.07	7.1	23.5	3077	2657
1961	217.3	12.35	29.52	7.98	2.73	0.83	0.08	10.4	30.3	3086	2811
1962	218.0	12.58	27.91	7.87	2.37	0.90	0.09	11.4	37.8	3095	2951
1963	218.6	16.39	48.06	10.44	4.00	0.60	0.06	5.8	15.1	3104	2696
1964	219.3	10.98	42.24	8.38	2.92	0.72	0.07	8.6	24.7	3113	2898
1965	219.9	12.12	30.13	8.34	3.08	0.81	0.08	9.7	26.3	3121	2861
1966	220.6	12.05	29.05	9.67	4.41	0.95	0.09	9.8	21.6	3129	2644
1967	221.3	13.04	28.91	9.36	4.11	0.55	0.05	5.8	13.3	3137	2840
1968	221.9	14.79	41.28	10.75	3.18	0.69	0.07	6.4	21.6	3145	2957
1969	222.6	6.79	20.38	5.34	1.48	0.84	0.08	15.7	56.5	3152	3521
1970	223.3	10.83	38.23	8.00	2.19	0.68	0.07	8.5	30.9	3160	2802
1971	223.9	9.68	30.61	6.96	1.89	0.77	0.08	11.1	40.8	3167	3118
1972	224.6	12.27	20.49	9.81	2.79	0.87	0.09	8.9	31.2	3173	3589
1973	225.3	9.99	21.18	7.38	2.20	0.68	0.07	9.3	31.1	3180	3149
1974	225.9	8.92	25.06	6.88	1.96	0.66	0.07	9.6	33.6	3186	2946
1975	226.6	10.37	21.69	7.11	1.85	0.89	0.09	12.5	48.1	3192	3504
1976	227.3	12.05	22.05	10.36	2.39	0.77	0.08	7.4	32.3	3198	2896
1977	227.9	10.22	31.75	9.03	2.99	0.74	0.07	8.1	24.6	3203	3229
1978	228.6	11.67	35.53	7.97	2.85	0.72	0.07	9.1	25.3	3209	2766
1979	229.2	10.14	47.14	8.31	2.08	0.77	0.08	9.3	37.2	3214	3220
1980	229.9	12.27	32.05	8.62	1.74	0.89	0.09	10.3	51.3	3218	2869
1981	230.6	13.11	46.40	8.63	2.69	0.69	0.07	8.0	25.5	3223	3529
1982	231.2	13.65	34.62	9.67	3.45	0.65	0.07	6.7	18.9	3227	2815
1983	231.9	8.08	25.86	6.05	1.55	0.72	0.07	11.8	46.1	3231	3581
1984	232.6	9.53	21.61	7.16	2.36	0.74	0.07	10.4	31.4	3235	3002
1985	233.2	9.68	29.11	6.66	1.50	0.77	0.08	11.6	51.5	3239	3288
1986	233.9	6.86	29.46	5.06	1.32	0.83	0.08	16.4	62.6	3242	3354
1987	234.6	14.41	33.12	11.40	3.88	0.81	0.08	7.1	20.9	3245	2684
1988	235.2	13.65	34.47	10.79	3.50	0.72	0.07	6.6	20.4	3248	2748
1989	235.9	16.01	32.14	13.29	3.84	0.92	0.09	7.0	24.1	3251	3078
1990	236.6	10.29	25.95	8.85	1.78	0.69	0.07	7.8	38.7	3254	2916
1991	237.2	10.45	33.05	8.76	3.08	0.85	0.09	9.7	27.7	3256	3249
1992	237.9	16.24	32.48	12.78	3.48	0.59	0.06	4.6	16.9	3258	3128
1993	238.5	14.10	35.95	11.76	3.56	0.72	0.07	6.1	20.2	3259	2717
1994	239.2	7.40	43.13	5.94	0.99	0.61	0.06	10.2	61.0	3261	3567

Таблица 2. Окончание

Год	F_{gl} , км ²	км ³ /Год						%		м над ур. моря	
		Vol 1	Vol 2	Vol 3	Vol 4	Vol 5	Vol 6	Var 1	Var 2	Var 3	Var 4
1995	239.9	11.97	34.22	10.36	2.82	0.77	0.08	7.5	27.4	3262	3073
1996	240.5	11.28	38.52	10.34	3.36	0.84	0.08	8.1	24.9	3263	3158
1997	241.2	17.08	39.95	14.26	4.02	0.85	0.09	6.0	21.2	3264	2995
1998	241.9	11.97	34.91	10.52	1.79	1.07	0.11	10.2	59.7	3265	3659
1999	242.5	11.06	33.18	8.12	2.30	0.88	0.09	10.8	38.2	3265	3412
2000	243.2	12.50	33.07	8.34	2.01	1.04	0.10	12.5	51.7	3265	3723
2001	240.8	10.67	30.24	7.73	1.69	0.88	0.09	11.4	51.9	3265	3477
2002	238.4	17.00	36.40	14.40	5.04	0.73	0.07	5.1	14.5	3264	2841
2003	236.0	10.29	33.74	8.53	1.97	0.70	0.07	8.2	35.7	3264	2986
2004	233.6	15.93	41.00	13.31	4.24	0.80	0.08	6.0	18.8	3263	2763
2005	231.2	14.87	39.36	11.11	2.32	0.82	0.08	7.3	35.1	3262	2908
2006	228.8	14.18	42.81	13.52	3.65	1.15	0.11	8.5	31.4	3260	3560
2007	226.4	11.51	28.19	9.46	2.09	0.81	0.08	8.6	38.7	3259	3822
2008	224.0	11.21	30.96	10.45	2.51	0.79	0.08	7.6	31.7	3257	3357
2009	221.6	11.51	27.56	10.41	3.32	0.61	0.06	5.9	18.5	3255	3216
2010	219.2	13.65	33.73	13.02	3.56	1.11	0.11	8.5	31.2	3253	3456
2011	216.8	12.50	26.17	10.43	2.90	0.88	0.09	8.4	30.3	3250	3494
2012	214.4	9.61	28.21	9.58	2.60	0.90	0.09	9.4	34.4	3247	3788
2013	212.0	9.84	26.71	8.81	2.58	0.62	0.06	7.0	23.9	3244	3373
2014	209.6	13.11	29.13	11.61	2.34	0.93	0.09	8.0	39.5	3241	3761
2015	207.2	9.61	24.27	10.38	2.20	0.97	0.10	9.3	43.9	3238	3660
2016	204.8	12.43	24.72	9.61	3.29	0.83	0.08	8.7	25.3	3234	3503
2017	202.4	14.03	26.94	9.65	2.25	0.96	0.10	10.0	42.8	3230	3519
2018	200.0	13.95	36.62	10.44	2.29	0.87	0.09	8.4	38.1	3226	2837
\bar{X}	226.4	11.98	32.34	9.43	2.71	0.80	0.08	8.9	32.8	3209	3155
макс	243.2	17.08	48.06	14.40	5.04	1.15	0.11	16.4	62.6	3265	3822
мин	200.0	6.79	20.38	5.06	0.99	0.55	0.05	4.6	13.3	3048	2644
σ_X	10.6	10.67	35.20	7.94	2.26	0.86	0.09	2.3	12.1	62.9	340.9
C_v	0.05	0.20	0.21	0.22	0.31	0.16	0.16	0.26	0.37	0.02	0.11
C_s	-0.44	0.12	0.30	0.35	0.43	0.46	0.46	0.87	0.68	-1.16	0.31

Vol. 1 – сток р. Кубань (гп Тиховский), данные за 2006–2018 гг. восстановлены по связи со стоком Vol. 3; Vol. 2 – сток рек Кубань и Дон; Vol. 3 – годовой приток в Краснодарское водохранилище из верховьев Кубани и рек Белая и Лаба; Vol. 4 – приток в Краснодарское водохранилище из верховьев Кубани и рек Белая и Лаба за июль–сентябрь; Vol. 5 – ледниковый сток в бассейне Кубани; Vol. 6 – приток в Азовское море в устье Кубани; Var 1 – отношение Vol. 5/Vol. 3; Var 2 – отношение Vol. 5/Vol. 4; Var 3 – высота фирновой границы; Var 4 – максимальная высота ELA ; \bar{X} – среднее значение; σ_X – среднеквадратичное отклонение; C_v – коэффициент вариации, C_s – коэффициент асимметрии.

Vol. 1 – runoff of the Kuban River (Tikhovsky gauging station), data for 2006–2018 reconstructed by relation with the runoff Vol. 3; Vol. 2 – runoff of the Kuban and Don rivers; Vol. 3 – annual inflow to the Krasnodar reservoir from the upper reaches of the Kuban and the Belaya and Laba rivers; Vol. 4 – inflow to the Krasnodar reservoir from the upper reaches of the Kuban and the rivers Belaya and Laba for July–September; Vol. 5 – glacial runoff in the Kuban basin; Vol. 6 – inflow to the Sea of Azov at the mouth of the Kuban; Var 1 – ratio Vol. 5/Vol. 3; Var 2 – ratio Vol. 5/Vol. 4; Var 3 – the firn line elevation; Var 4 – maximum ELA ; \bar{X} is the average value; σ_X is the standard deviation; C_v is the coefficient of variation, C_s is the coefficient of asymmetry.

Расчёт осадков. По средним многолетним данным 10 метеостанций из работы (Лурье, 2003) установлено, что пространственное изменение осадков (мм/год) в бассейнах рек Кубани и Терека в интервале высот $Z = 500\text{--}3500$ м. над ур. моря описывает одномерная зависимость (8):

$$Pr(Z) = 0.245 \cdot Z + 683.5. \quad (8)$$

Статистические характеристики уравнения (8) равны: средняя годовая сумма осадков – 1134 мм, коэффициент вариации – 0.56, коэффициент детерминации – 0.26, среднее квадратичное отклонение – 476 мм, среднее квадратичная ошибка расчёта Pr – 410 мм/год. Поскольку использование (8) не обеспечивает удовлетворительного качества расчётов Pr , далее изложены результаты оценки пространственно-временных многолетних изменений Pr по уравнению множественной линейной регрессии вида

$$Pr(k) = Const + c_1z + c_2\phi + c_3\lambda, \quad (9)$$

где $Const$, $c_1\text{--}c_3$ – локальные эмпирические параметры, которые определены по программе “STATISTICA” (StatSoft, Inc., 2007); z , ϕ и λ – соответственно высота над уровнем моря, широта и долгота. Для расчёта многолетних изменений параметров $Const$, $c_1\text{--}c_3$ использованы измерения годовых осадков на метеостанциях.

Ледниковый сток. Первоначально полученная по формуле (9) величина годовых осадков $Pr^\#$ с низким коэффициентом детерминации 0.17 была откалибрована по формуле (10):

$$Pr^* = Pr^\# + (Pr^\# + Pr^+) \cdot \mu, \quad (10)$$

где Pr^* , $Pr^\#$ и Pr^+ соответственно откалиброванные, первоначальные и условные значения осадков, μ – эмпирический индекс, обеспечивающий наилучший прирост первоначального коэффициента детерминации $R^2 = 0.17$. Значение Pr^+ определено по уравнению (11)

$$Pr^+(k) = W_{\text{run}} - Ev \cdot (F_{\text{bas}}) + W_{\text{gl}} + \Delta U \cdot (F_{\text{bas}}), \quad \text{в км}^3. \quad (11)$$

В результате численных экспериментов установлено $\mu = 0.5$, при котором $R^2 = 0.41$, а среднее Pr^* за 1960–2000 гг. равно 0.934 км^3 . Затем откалиброванное значение Pr^* и рассчитанные значения других составляющих в правой части (1) были вставлены в уравнение водного баланса (1) и определён $KG^* = 0.51$ – уточнённый индекс Клинга–Гупты качества моделирования годового стока р. Теберда по методу, изложенному в работах (Kling et al., 2012; Knoben et al., 2019).

Расчёт испарения. Общий вид формулы для определения объёма испарения Ev ($\text{км}^3/\text{год}$) на площади F_{bas} таков:

$$Ev_k = E \cdot F_{\text{bas}}. \quad (12)$$

Здесь E – суммарный за k год слой испарения в мм. Подробно методика расчёта E , основанная на использовании уравнения Ольдекопа, описана в работах (Коновалов, Рудаков, 2018; Konovalov, 2024). Здесь приведено только конечное выражение для оценки E на средней взвешенной высоте \bar{z} в бассейне Теберды.

$$E(\bar{z})_k = PE(\bar{z}) \text{th}[P(\bar{z})/PE(\bar{z})], \quad (13)$$

$$PE(\bar{z})_k = 0.0018(25 + T)^2(100 - H_R). \quad (14)$$

В (13)–(14): $P(\bar{z})$ – осадки, PE – потенциальное испарение, T – температура воздуха, H_R – относительная влажность воздуха в %. Все переменные определяются на высоте \bar{z} . Исследование и контроль различных методов расчёта испарения показали (Ху С.-Y., Singh V.P., 1998), что формула (14) позволяет получать результаты, близкие к данным испарителя. Параметры зависимости $E = f(Z)$, которые получены в результате извлечения и обработки многолетних данных в климатической базе CRU (Harris et al., 2020), приняты приемлемыми для расчётов объёма испарения Ev по формуле (12).

Подземный сток. На основании анализа графика внутригодового распределения месячных объёмов стока р. Теберда (г/п Теберда), в качестве предварительной оценки среднего значения подземного питания в 1960–2000 гг. принят объём стока р. Теберда за январь–март. Судя по графику на рис. 2, источники внешнего питания поверхностного речного стока в январе–марте практически отсутствуют. Статистические параметры этого временного ряда следующие: среднее 0.035 км^3 , стандарт отклонения 0.006 , коэффициент вариации 0.16 .

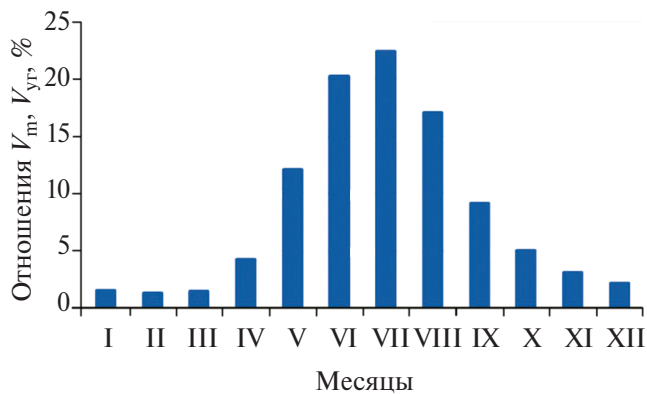


Рис. 2. Среднее отношение месячных объемов V_m к годовому V_{yr} стока р. Теберда (гп Теберда) в течение января–декабря за 1948–2005 гг.

Fig. 2. Mean relations of monthly V_m volumes to the V_{yr} year volume of Teberda river runoff during January–December, 1948–2005

РЕЗУЛЬТАТЫ

Основные результаты решения поставленных в работе задач характеризуют рис. 3 и 4 и табл. 2 и 3. На указанных рисунках годы с 1960 по 2000 г. выбраны для обеспечения единого временного интервала для всех переменных. Данные (см. табл. 2–3) упрощают применение статистических коэффициентов и критериев с целью

численного описания природных связей и зависимостей в бассейне р. Кубани. Показано это на примере расчёта коэффициента регрессии m линейного однофакторного уравнения зависимости $Y = f(X)$:

$$Y = mX + b, \tag{15}$$

где
$$m = (\overline{YX} - \bar{X} * \bar{Y}) / (\overline{X^2} - \bar{X}^2), \tag{16}$$

$$b = \bar{Y} - m\bar{X}, \tag{17}$$

где символ тильда над переменной означает осреднение. Учитывая, что для возрастающих функций $Y = f(X)$ коэффициент m имеет положительное значение, а для убывающих – отрицательное, представляет интерес оценка m при описании притока $V_{gl}(in)$ ледникового стока V_{gl} в Азовское море через устье Кубани. Так, после применения данных (см. формулы (15)–(17); табл. 3) установлено, что m близок к нулю для зависимостей $V_{gl}(in)$ от площади оледенения, речного стока за июль–сентябрь, максимальных значений ELA , высоты фирновой границы. Пригодная для расчётов $V_{gl}(in)$ – зависимость от средней летней температуры воздуха на высоте фирновой границы с коэффициентом детерминации 0.91 и $m = 0.012$.

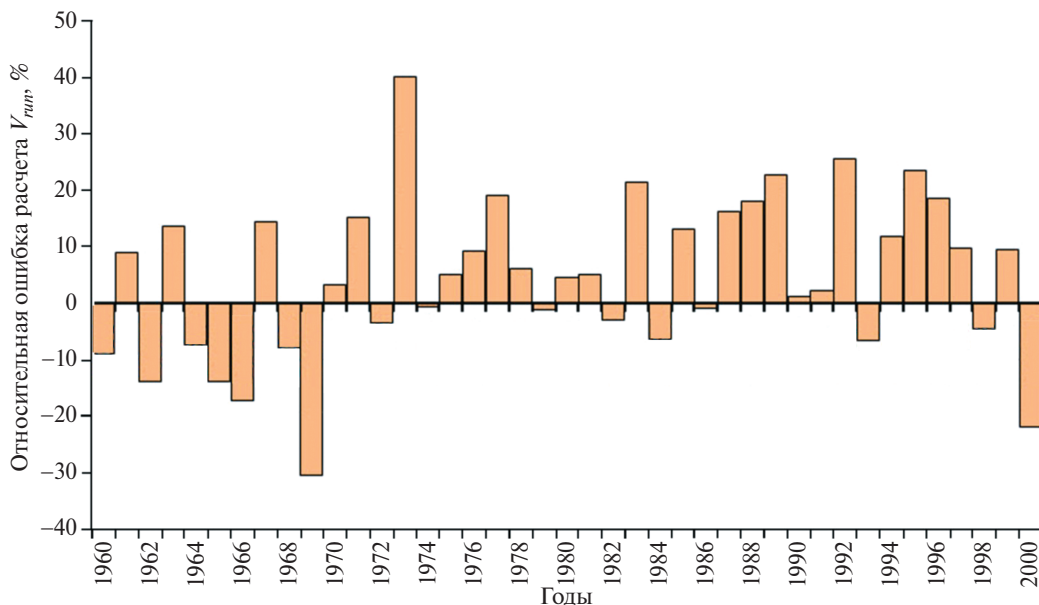


Рис. 3. Многолетнее изменение относительной ошибки ΔW_{run} расчёта годового объёма поверхностного речного стока с площади F_{bas} в бассейне р. Теберда. По оси ординат ΔW_{run} в %, по оси абсцисс – годы. Среднее абсолютных значений ΔW_{run} за 1960–2000 гг. равно 11.8%

Fig. 3. Long-term changes in the relative error ΔW_{run} in calculating the annual volume of surface river runoff from the F_{bas} area in the basin of the Teberda river. On the ordinate axis ΔW_{run} in %, on the abscissa axis – years. The average absolute values of ΔW_{run} for 1960–2000 is 11.8%.

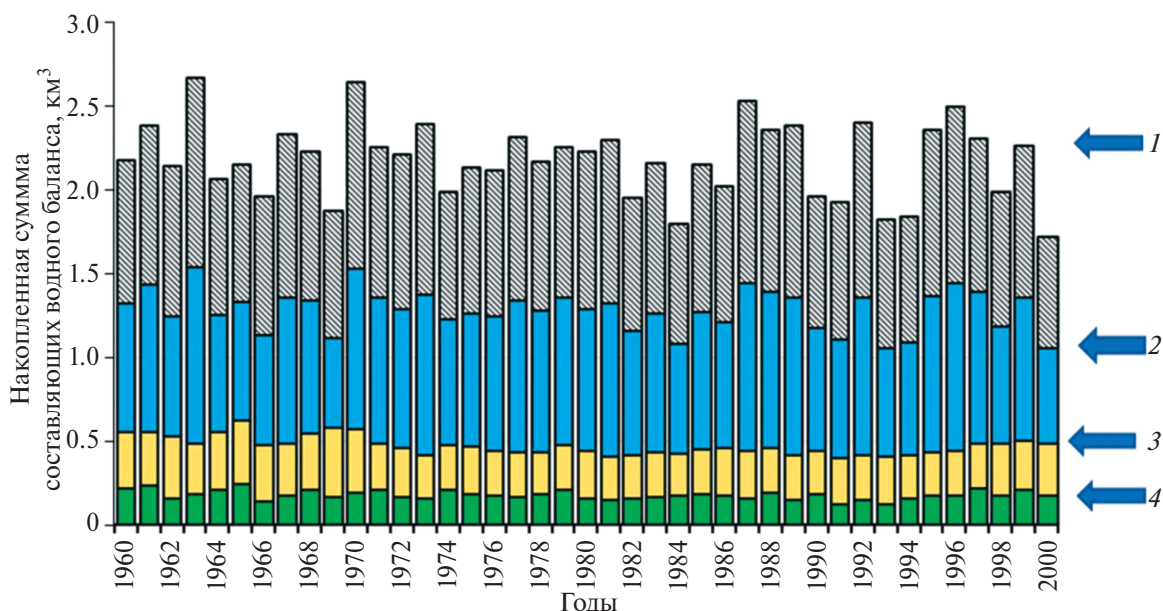


Рис. 4. Сводные результаты расчета годового водного баланса в бассейне р. Теберда в течение 1960–2000 гг. Условные обозначения годовых сумм: 1 – осадки, 2 – речной сток, 3 – испарение, 4 – ледниковый сток
Fig. 4. Summary results of the calculation of the annual water balance during of 1960–2000 in the basin of the Teberda river. Symbols of annual amounts: 1 – precipitation, 2 – river runoff, 3 – evaporation, 4 – glacial runoff

Таблица 3. Статистические параметры и парные корреляционные связи гидрологических характеристик в бассейне Кубани

Table 3. Statistical parameters and pair correlation relationship of hydrological characteristics in the Kuban River basin

X	σX	F_{gl}	$X1$	$X2$	$X3$	$X4$	$X5$	$X6$	$X7$	$X8$	$X9$	$X10$	$X11$
226.4	10.60	1	0.03	0.22	0.06	0.01	-0.09	-0.02	0.08	-0.09	0.49	-0.04	-0.37
11.98	2.37	0.03	1	0.43	0.85	0.76	0.07	-0.72	-0.63	0.07	0.05	-0.38	0.05
32.34	6.69	0.22	0.43	1	0.32	0.30	-0.11	-0.37	-0.26	-0.11	-0.03	-0.29	-0.17
9.43	2.11	0.06	0.85	0.32	1	0.76	0.22	-0.77	-0.59	0.22	0.32	-0.15	0.17
2.71	0.85	0.01	0.76	0.30	0.76	1	-0.07	-0.71	-0.87	-0.07	-0.03	-0.45	-0.08
0.80	0.13	-0.09	0.07	-0.11	0.22	-0.07	1	0.39	0.40	1.00	0.16	0.43	0.95
8.86	2.28	-0.02	-0.72	-0.37	-0.77	-0.71	0.39	1	0.82	0.39	-0.15	0.40	0.38
32.79	12.10	0.08	-0.63	-0.26	-0.59	-0.87	0.40	0.82	1	0.40	0.14	0.56	0.36
0.08	0.01	-0.09	0.07	-0.11	0.22	-0.07	1.00	0.39	0.40	1	0.16	0.43	0.95
3209.0	62.85	0.49	0.05	-0.03	0.32	-0.03	0.16	-0.15	0.14	0.16	1	0.44	0.00
3154.5	340.87	-0.04	-0.38	-0.29	-0.15	-0.45	0.43	0.40	0.56	0.43	0.44	1	0.40
6.21	0.94	-0.37	0.05	-0.17	0.17	-0.08	0.95	0.38	0.36	0.95	0.00	0.40	1

X – среднее значение; σX – среднее квадратичное отклонение; F_{gl} – площадь оледенения; $X1$ – годовой сток (гп Тиховский); $X2$ – суммарный годовой сток рек Дон и Кубань; $X3$ – сумма годового стока в верховье Кубани (гп Ладожская), рек Лаба (гп хутор Догужиев) и Белая (гп хутор Грозный); $X4$ – сумма стока за июль–сентябрь в верховье Кубани (гп Ладожская), рек Лаба (гп хутор Догужиев) и Белая (гп хутор Грозный); $X5$ – ледниковый сток в бассейне Кубани; $X6$ – отношение $X5/X3$; отношение $X5/X4$; $X7$ – отношение $X5$ к $X3$ за июнь–август; $X8$ – поступление ледникового стока в Азовское море из устья Кубани; $X9$ – высота фирновой границы; $X10$ – максимальная высота ELA ; $X11$ – средняя температура воздуха июня–августа на высоте фирновой границы. Жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции ≥ 0.50 .

X – the average value; σX – the standard deviation; F_{gl} – the glaciation area; $X1$ – the annual runoff (Tikhovsky GS); $X2$ – the total annual runoff of the Don and Kuban rivers; $X3$ – the sum of the annual runoff in the upper Kuban (Ladozhskaya GS), Laba rivers (Doguzhiev Farm) and Belaya (gp khutor Grozny); $X4$ – the sum of runoff for July–September in the upper Kuban (GS Ladozhskaya), Laba rivers (GS khutor Doguzhiev) and Belaya (GS khutor Grozny); $X5$ – glacial runoff in the Kuban basin; $X6$ – ratio $X5/X3$; ratio $X5/X4$; $X7$ – the ratio of $X5$ to $X3$ for June–August; $X8$ – the flow of glacial runoff into the Sea of Azov from the mouth of the Kuban; $X9$ – the firm line altitude; $X10$ – the maximum ELA ; $X11$ – the average air temperature of June–August at the firm line altitude. Correlation coefficients ≥ 0.50 are highlighted in bold.

Непрерывным условием оценки составляющих уравнения водного баланса (1) служит расчёт относительной разности ΔW_{run} между измеренным W_{meas} и рассчитанным W_{calc} речным стоком: $\Delta W_{\text{run}} = (W_{\text{calc}} - W_{\text{meas}})/W_{\text{meas}} \cdot 100$, в % (см. рис. 3). Абсолютное среднее значение этого параметра за 1960–2000 гг. для бассейна р. Теберда оказалось равным 11.8%, что можно считать приемлемым результатом, учитывая невысокий уровень информационного обеспечения методов расчёта правой части уравнения (1). Многолетнее изменение составляющих уравнения (1) в единой вертикальной шкале на примере бассейна р. Теберда иллюстрирует рис. 4.

ОБСУЖДЕНИЕ

Качество расчётов водного баланса в бассейне Кубани (см. рис. 3) объективно соответствует региональному уровню информационной обеспеченности климатических переменных (осадки, температура воздуха, упругость водяного пара в воздухе), основанной на редкой сети метеостанций и базе данных CRU (Harris et al., 2020) с пространственным разрешением 0.5 градуса по широте и долготе. Незначительный относительный вклад V_{gl} в сумму правой части уравнения (4) указывает на переоценку влияния ледникового стока на региональные и глобальное изменение уровня “моря” (sea level) в работах (Radic, Hock, 2011; Zemp et al., 2019) путём расчёта вместо V_{gl} некоторого суррогата, именуемого SLE – Sea Level Equivalent

$$SLE = -BS/\rho S_{\text{ocean}} \text{ в мм}, \quad (18)$$

где BS – разность между величинами годового B_a и зимнего B_w балансов массы заданного числа ледников (м^3), ρ – плотность воды, S_{ocean} – площадь океана ($362 \times 10^{12} \text{ м}^2$). Затем конвертационной формуле (18) был присвоен статус зависимости $SLE = f(BS)$ и таким способом выполнены расчёты многолетнего изменения уровня океана ΔH_o для 19 географо-политических макрорегионов Земли (Dyurgerov, 2010; Radic, Hock, 2011; Zemp et al., 2019).

Недостатки и ошибки этого способа подробно описаны в работах (Коновалов, 2011; Konovalov et al., 2019); отметим здесь наиболее важные:

а) в 19 географо-политических регионах Земли отсутствует понятие речных бассейнов;

б) применение SLE вместо V_{gl} игнорирует уравнение эвстатического изменения уровня

океана Δh_o (Малинин, 2009), согласно которому Δh_o зависит от суммарного объёма выпавших осадков, суммарного испарения, материкового стока, состоящего из поверхностных и подземных вод, айсбергового стока, изменения объёма Мирового океана за счёт таяния (намерзания) шельфовых ледников Антарктиды. В итоге качество и репрезентативность полученных значений SLE не подтверждены определением составляющих уравнения Δh_o ;

в) включение баланса массы оледенения в бессточных речных бассейнах в глобальную/региональную оценку ΔH_o . В частности, по данным из (Коновалов, 2011) число, площадь и объём ледников в бессточных (замкнутых) речных бассейнах составляет соответственно 57, 56 и 62% от общего оледенения материковой Евразии. Для расчёта годового преувеличения ΔH_o при использовании BS на площади оледенения в замкнутых речных бассейнах предлагаются формулы:

$$\Theta = SLE/W_{\text{gl}}(\text{total}), \text{ в км}^3, \quad (19)$$

$$\Delta SLE(\text{closed}) = \Theta \times (W_{\text{gl}}(\text{total}) - W_{\text{gl}}(\text{closed})), \quad (20)$$

где $\Delta SLE(\text{closed})$ – объём $\text{км}^3/\text{год}$ либо слой $\text{мм}/\text{год}$ SLE в замкнутых речных бассейнах, Θ – удельная величина SLE на 1 км^2 $W_{\text{gl}}(\text{total})$, $W_{\text{gl}}(\text{total})$ – общая площадь оледенения в регионе/речном бассейне, км^2 , $W_{\text{gl}}(\text{closed})$ – площадь оледенения в замкнутых (бессточных) речных бассейнах, км^2 . После применения в (19)–(20) суммы $W_{\text{gl}}(\text{closed}) = 38590 \text{ км}^2$, установленной в бассейнах рек Амударья, Сырдарья, Заилийского Алатау, внутреннего Китая, Каспийского моря, $W_{\text{gl}}(\text{total})$ и рассчитанных значений Θ в регионе Высокогорная Азия (Dyurgerov, 2010), получено преувеличение объёма, влияющего на региональный уровень океана, ориентировочно равное 16.2 км^3 или 30.2% от $W_{\text{gl}}(\text{total})$ и относящееся к началу 1970-х годов. Небольшая корректировка SLE в бессточных бассейнах предложена и в работе (Rounce et al, 2025);

г) определение BS для современного числа 215547 ледников Земли (RGI Consortium, 2017) основано на выборке от десятков до сотен “справочных” ледников, репрезентативность которых и качество измерений баланса массы на них подвергались критике (Коновалов, 2011; Zemp et al., 2019);

д) средние значения BS и их многолетние изменения в течение 1946–2016 гг., рассчитанные по неоднородным и неполным десятилетним выборкам (Zemp et al, 2019), являются статистически некорректными (Kononov et al., 2019).

Исследование поставленной проблемы показывает, что “слабое звено” в современных методах расчёта и моделирования V_{gl} – это ежегодное определение пространственно-временных изменений высотно-площадных параметров региональных совокупностей ледников. Другим источником неопределённости в связи между притоком $V_{gl}(in)$ и уровнем Азовского и других морей служит применение ограниченного числа береговых станций. В бассейне Азовского моря таких станций всего восемь, только по этим восьми станциям доступны средние годовые уровни моря за 1977–2018 гг. с небольшим числом пропусков в рядах наблюдений. (esimo.ru..., 2025). Этого явно недостаточно для полноценного исследования многолетней и сложной динамики уровня моря и связей его с определяющими факторами даже для небольшого по площади Азовского моря (около 39 тыс. км²).

Принимая во внимание полученные в работе сведения о вкладе ледникового стока в изменение объёма и уровня Азовского моря, необходимо на региональном уровне более тщательно, чем теперь, исследовать проблему влияния $V_{gl}(in)$ на изменение уровня и объёма морей Земли. Проблема эта – не предмет настоящего исследования, но очевидно, что прежде всего не следует применять распространённую схему деления оледенения в глобальном масштабе на 19 регионов (Dyurgerov, 2010; Radic, Hock, 2011; Zemp et al., 2019), поскольку в этих регионах отсутствует понятие речного бассейна, а ледниковый сток упоминается только в общих декларативных утверждениях о критической важности его для промышленного и бытового водоснабжения. В процессе многоэтапной “перезагрузки” упомянутой выше проблемы, по мнению автора, целесообразно применять подход к исследованию составляющих гидрологического цикла Земли, достигнутый в фундаментальной монографии (Мировой водный баланс..., 1974).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе впервые получены следующие важные результаты: 1) многолетние изменения составляющих правой части уравнения годового водного баланса (1), привязанные

к гидрологическим постам в бассейне Кубани; 2) многолетняя оценка качества расчётов речного стока за 1960–2000 гг. (см. рис. 3) по формуле $\Delta W_{run} = (W_{calc} - W_{run})/W_{run}$, которая показывает их приемлемость в первом приближении; 3) характеристики гидрологического режима Кубани в 1957–2018 гг., включая ледниковый сток V_{gl} (см. табл. 2); 4) удобные и полезные для гидрологических расчётов составляющих уравнения (1) параметры линейной корреляционной связи $Y = f(X)$ (см. табл. 3). Установлено, что многолетний приток V_{gl} в Азовское море через устье Кубани $V_{gl}(in)$ практически не влияет на изменения объёма и уровня Азовского моря.

Изложенные методы расчёта климатических составляющих уравнения водного баланса (1) ориентированы на использование сетевых данных по стоку, температуре воздуха и упругости водяного пара в воздухе, которые достаточно адекватно описывают устойчивую пространственно-временную вариацию полей этих переменных. В этом случае первоначальные оценки годовых осадков можно калибровать как остаточный член уравнения водного баланса.

Удовлетворительная оценка качества рассчитанного стока (см. рис. 3) позволяет рекомендовать для применения в водохозяйственных и гидропроектных организациях методику определения составляющих уравнения (1) в речных бассейнах снеголедникового типа питания.

Благодарности. Статья подготовлена по материалам исследований по теме Государственного задания Института географии РАН “Криосфера в условиях изменения климата” – FMWS-2024-0004.

Acknowledgments. The research was conducted as part of the Institute of Geography RAS State Assignment, Project No. FMWS-2024-0004.

ЛИТЕРАТУРА

- Бердников С.В., Кулыгин В.В., Дашкевич Л.В. Причины стремительного роста солёности воды Азовского моря в XXI веке // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39. № 6. С. 760–778.
- Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Современные проблемы гидрологии. М.: Изд-во Центр “Академия”, 2008. 320 с.
- 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.

- Каталог ледников СССР. Том 8. Северный Кавказ. Части 1–4. Бассейн реки Кубани / Ред. В.Д. Панов, В.И. Кравцова. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 123 с.
- Каталог ледников России // Электронный ресурс. URL: <https://www.glacrus.ru> (Дата обращения: 05.12.2022).
- Коновалов В.Г. Таяние и сток с ледников в бассейнах рек Средней Азии. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 237 с.
- Коновалов В.Г. Новые данные о влиянии ледникового стока на уровень Мирового океана. В сб.: Полярная криосфера и воды суши. / Ред. В.М. Котляков. М.—СПб.: Paulsen Editions, 2011. С. 70–86.
- Коновалов В.Г. Расчёт и прогноз составляющих стока в бассейнах рек Центральной Азии // Изв. РАН. Сер. географическая. 2015. № 3. С. 72–84.
- Кренке А.Н. Массообмен в ледниковых системах на территории СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 287 с.
- Лурье П.М. Оценка современного состояния и прогноз водных ресурсов Кавказа. Дис. ... докт. геогр. наук. Ростов на Дону: Северо-Кавказское межрегиональное территориальное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 2003. 108 с.
- Малинин В.Н. Изменчивость глобального водообмена в условиях меняющегося климата // Водные ресурсы. 2009. Т. 36. № 1. С. 15–28.
- Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 637 с.
- Михаленко В.Н., Кутузов С.С., Лаврентьев И.И., Торопов, П.А. Ледники и климат Эльбруса. М.—СПб.: Нестор-История, 2020. 327 с.
- esimo.ru. // Электронный ресурс. URL: http://www.esimo.ru/atlas/spravochnik_azov/. (Дата обращения: 05.12.2022).
- Погода и климат // Электронный ресурс. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/history.php> (Дата обращения: 05.12.2022).
- Рец Е.П. Сток рек бассейна Терека. Дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ им. Ломоносова, 2013. 277 с.
- Юмина Н.М. Водный режим рек Северного Кавказа. Дис. канд. геогр. наук. М.: МГУ им. Ломоносова, 2008. 195 с.
- Bodo B.A. Monthly Discharges for 2400 Rivers and Streams of the former Soviet Union (FSU). Toronto, Canada. 2000. V.1.0.
- Dai and Trenberth. Global River Flow and Continental Discharge Dataset. d551000. // Электронный ресурс. URL: <https://doi.org/10.5065/D6V69H1T> (Дата обращения: 05.12.2022).
- Dyrgerov M.B. Reanalysis of Glacier Changes: From the IGY to the IPY, 1960–2008 // МГИ, 2010. 116 с.
- ISC(WDS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/WMO, World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland. 2016–2017. № 3. 274 p. <https://wgms.ch/links/>
- Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset // Scientific Data. 2020. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>.
- Knoben W., Freer J., Woods R. Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores // Hydrol. Earth System Science. 2019. № 23. P. 4323–4331. <https://doi.org/10.5194/hess-23-4323-2019>
- Kling H., Martin F., Maria P. Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios // Journ. of Hydrology. 2012. № 424. P. 264–277.
- Konovalov V., Rets E., Pimankina N. Interrelation between Glacier summer balance and runoff in mountain river basins // Geography, Environment, Sustainability. 2019. V. 12. № 1. P. 23–33. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-26>
- Konovalov V.G. Characteristics of glacial feeding of rivers // Earth's Cryosphere. 2023. V. XXVII. No. 3. P. 28–35.
- Konovalov V.G. Calculation and forecast of glacial feed within river basins // Water Resources. 2024. V. 51. № 1. P. S25–S33.
- Radie V. Hock R. Regionally differentiated contribution of mountain glaciers and ice caps to future sea-level rise // Nature Geoscience. 2011. V 4. P. 91–94.
- RGI Consortium. 2017. Randolph Glacier Inventory (RGI) – A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0. Technical Report. Global Land Ice Measurements from Space. Boulder, Colorado, USA. Digital Media, 2017. 71 p. <https://doi.org/10.7265/N5-RGI-60>
- Rounce D.R., Hock R., Prusevich A.A., Grogan D.S., Lammers, R.B., Huss, M., Bliss A., Zanet B. Downstream hydrology reduces glaciers' direct contribution to sea-level rise // Geophys. Research Letters. 2025. № 52. e2025GL114866. <https://doi.org/10.1029/2025GL114866>
- Xu C.-Y., Singh V.P. Dependence of evaporation on meteorological variables at different time-scales and intercomparison of estimation methods // Hydrological Processes. 1998. № 12. P. 429–442.
- Zemp M., Huss M., Thibert E., Eckert N., McNabb R., Huber J., Barandun M., Machguth H., Nussbaumer S. U., Gärtner-Roer I., Thomson L., Paul F., Maussion F., Kutuzov S., Cogley J. G. Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016 // Nature. 2019. № 568. P. 382–386.

Citation: *Konovalov V.G. Evaluation of Water Balance Components in the Kuban River Basin. Led i Sneg. Ice and Snow. 2026, 66 (2): 254–268. [In Russian]. doi: 10.7868/S2412376526020035*

Evaluation of Water Balance Components in the Kuban River Basin

© 2026 V. G. Konovalov

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
e-mail: vladgeo@gmail.com

Received August 26, 2025; revised December 12, 2025; accepted March 23, 2026

The objectives of this study are to establish physico-statistical-model of river runoff and glaciation regime factors, develop a calculation method, and identify the long-term changes in the main components of the annual water balance equation within the Kuban basin. These components include river runoff, precipitation, evaporation, groundwater runoff, and glacial runoff V_{gl} , as well as an assessment of V_{gl} impact on the volume and level of the Sea of Azov. To determine in the F_{gl} glaciation area, where the main components of glacial runoff are formed, the study includes an annual calculation of the maximum *ELA* (Equilibrium Line Altitude) based on the annual accumulation and ablation balance index I_B . To assess the components of the local balance index, multi-year sums and average values of air temperature and precipitation over characteristic time intervals, were derived from representative weather stations. The sources for the glaciological and hydrological calculations were: a) cataloged morphometric data on glaciers and remote measurements of glaciation parameters; b) long-term monthly averages: air temperatures at weather stations within the Kuban basin and the surrounding area; water runoff at gauging stations the Don and Kuban basins. For the Teberda River basin (a tributary of the Kuban), long-term and average values for 1960–2000 were determined for annual precipitation, river runoff, evaporation, glacial runoff, and groundwater runoff. The annual volume of V_{gl} in the F_{gl} area in the Kuban basin varied from 0.5424 to 1.1432 km³. The relative volume V_{in} of V_{gl} inflow into the Sea of Azov, calculated at the mouth of the Kuban in 1966–2017, varied in the range of 1.3–41.6% of the total annual balance of the Sea of Azov. The results of calculations of the hydrological regime of the Kuban are intended for water management and hydro-design organizations.

Keywords: glaciers runoff, Sea of Azov, Kuban River, long-term information, characteristics of glaciation and runoff, inflow to the Sea of Azov

REFERENCES

- Berdnikov S.V., Kulygin V.V., Dashkevich L.V.* Reasons for the rapid increase in the salinity of the Sea of Azov in the 21st century. *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal. Marine Hydrophysical Journal.* 2023, 39 (6): 760–778. [In Russian].
- Vinogradov Yu.B., Vinogradova T.A.* *Sovremennyye problemy gidrologii.* Modern problems of hydrology. Moskva: Publishing house of the Academy Center, 2008: 320 p. [In Russian].
- Gosudarstvennyy vodnyy kadastr, 1997–2007. Ezhegodnye dannye o rezhime i resursah poverhnostnykh vod sushhi.* State Water Cadastre, 1997–2007. Annual data on the regime and resources of surface water inland. Part 1. Vol. 1. Issue 26. Rostov-on-Don, 2000–2009. [In Russian].
- Katalog lednikov SSSR. Tom 8 Severnyy Kavkaz. Chasti 1–4. Bassejn reki Kubani.* Catalogue of Glaciers in the USSR. Vol. 8. The North Caucasus. Parts 1–4. The Kuban River Basin. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1967: 123 p. [In Russian].
- Catalog of glaciers in Russia: official site. Retrieved from: URL: <https://www.glacrus.ru> (Last access: December 5, 2022). [In Russian].
- Konovalov V.G. Tayanie i stok s lednikov v bassejnah rek Srednej Azii.* Melting and runoff from glaciers in the river basins of Central Asia. Leningrad. Hydrometeoizdat, 1985: 237 p. [In Russian].
- Konovalov V.G. Novy'e dannye o vliyaniy lednikovogo stoka na uroven' Mirovogo Okeana. V sb. Polyarnaya kriosfera i vody' sushhi.* New data on the impact of glacial runoff on the global ocean level. In the collection. Polar Cryosphere and Land Water. Moscow – Sankt-Peterburg: Paulsen Editions 2011: 70–86. [In Russian].
- Konovalov V.G.* Calculation and forecast of flow components in the river basins of Central Asia. *Izvestiya Ros. Akad. Nauk. Seriya geograficheskaya.* Proc. of RAS. Geographical series. 2015, 3: 72–84. [In Russian].
- Krenke A.N.* Mass exchange in glacial systems on the territory of the USSR. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1982: 287 p. [In Russian].
- Lurye P.M. Otsenka sovremennogo sostoyaniya i prognoz vodnykh resursov Kavkaza.* Estimation of the current

- state and forecast of water resources in the Caucasus. PhD. Rostov-on-Don: North Caucasus Interregional Territorial Administration for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, 2003: 108 p. [In Russian].
- Malinin V.N.* Global water exchange in the conditions of climate variation. *Vodnye resursy*. Water Resources. 2009, 36 (1): 15–28. [In Russian].
- Mirovoy vodny balance i vodnye resursy Zemli*. World water balance and water resources of the Earth. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1974: 637 p. [In Russian].
- Mikhaleiko V.N., Kutuzov S.S., Lavrent'yev I.I., Toropov P.A.* *Ledniki i klimat El'brusa*. Glaciers and climate of Elbrus. Moscow–Sankt-Peterburg: Nestor-History, 2020: 327 p. [In Russian].
- esimo.ru: official site. Retrieved from: http://www.esimo.ru/atlas/spravochnik_azov (Last access: December 05, 2022). [In Russian].
- Weather and Climate: official site. Retrieved from: <http://www.pogodaiklimat.ru/history.php> (Last access: December 05, 2022). [In Russian].
- Retz E.P.* *Stok rek bassejna Tereka*. The flow of the rivers of the Terek basin. PhD. Moscow: Moscow University Press, 2013: 277 p. [In Russian].
- Yumina N.M.* *Vodnyj rezhim rek Severnogo Kavkaza*. The water regime of the rivers of the North Caucasus. PhD. Moscow: Moscow University Press, 2008. 195 p. [In Russian].
- Bodo B.A.* Monthly Discharges for 2400 Rivers and Streams of the former Soviet Union (FSU). Toronto, Canada. 2000: 1.0.
- Dai and Trenberth*. Global River Flow and Continental Discharge Dataset. d551000. Retrieved from: <https://doi.org/10.5065/D6V69H1T> (Last access: December 05, 2022).
- Dyurgerov M.B.* Reanalysis of Glacier Changes: From the IGY to the IPY, 1960–2008. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2010: 116 p.
- ISC(WDS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/ WMO, World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland. 2016–2017, 3: 274 p. <https://wgms.ch/links/08>
- Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H.* Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset. Scientific Data, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>
- Knoben W., Freer J., Woods R.* Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2019, 23: 4323–4331 <https://doi.org/10.5194/hess-23-4323-2019>
- Kling H., Martin F., Maria P.* Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*. 2012, 424: 264–277.
- Konovalov V., Rets E., Pimankina N.* Interrelation between Glacier summer balance and runoff in mountain river basins // *Geography, Environment, Sustainability*. 2019, 12 (1): 23–33 <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-26>
- Konovalov V.G.* Characteristics of glacial feeding of rivers. *Earth's Cryosphere*. 2023, 27 (3): 28–35.
- Konovalov V.G.* Calculation and Forecast of Glacial Feed within River Basins. *Water Resources*. 2024, 51 (1): S25–S33.
- Radić V., Hock R.* Regionally differentiated contribution of mountain glaciers and ice caps to future sea-level rise. *Nature Geoscience*. 2011, 4: 91–94.
- RGI Consortium. 2017. Randolph Glacier Inventory (RGI) – A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0. Technical Report. Global Land Ice Measurements from Space. Boulder, Colorado, USA. Digital Media. 2017: 71 p. <https://doi.org/10.7265/N5-RGI-60>
- Rounce D.R., Hock R., Prusevich A.A., Grogan D.S., Lammers, R. B., Huss, M., Bliss A., Zanet B.* Downstream hydrology reduces glaciers' direct contribution to sea-level rise. *Geophysical Research Letters*. 2025, 52: e2025GL114866. <https://doi.org/10.1029/2025GL114866>
- Xu C.-Y., Singh V.P.* Dependence of evaporation on meteorological variables at different time-scales and inter-comparison of estimation methods. *Hydrological Processes*. 1998, 12: 429–442.
- Zemp M., Huss M., Thibert E., Eckert N., McNabb R., Huber J., Barandun M., Machguth H., Nussbaumer S. U., Gärtner-Roer I., Thomson L., Paul F., Maussion F., Kutuzov S., Cogley J. G.* (2019). Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016. *Nature*. 2019, 568: 382–386.