

## ДИНАМИКА ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 556.512

СВЯЗЬ МЕЖДУ ОСАДКАМИ, РЕЧНЫМ СТОКОМ И ИСПАРЯЕМОСТЬЮ  
НА ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ И ЕЕ ИЗМЕНЧИВОСТЬВ.Ю. Григорьев<sup>1</sup>, Н.Л. Фролова<sup>2</sup>, А.А. Сазонов<sup>3</sup>, О.М. Пахомова<sup>4</sup>, С.П. Поздняков<sup>5</sup>, Ван Пин<sup>6</sup><sup>1–4</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши*<sup>1,3</sup> *Институт водных проблем Российской академии наук*<sup>5</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра гидрогеологии*<sup>6</sup> *Институт географических наук и исследований природных ресурсов, Китайская академия наук*<sup>1</sup> *Науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: vadim308g@mail.ru*<sup>2</sup> *Проф., д-р геогр. наук; e-mail: frolova\_nl@mail.ru*<sup>3</sup> *Ст. преподаватель, канд. геогр. наук; e-mail: sazonov.lesha@gmail.com*<sup>4</sup> *Науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: olpah@mail.ru*<sup>5</sup> *Проф., д-р геол.-минерал. наук; e-mail: spozd@mail.ru*<sup>6</sup> *Проф., канд. геол.-минерал. наук; e-mail: wangping@igsnr.ac.cn*

Для 225 водосборов, расположенных на европейской части России (ЕЧР) севернее 48° с. ш. и не имеющих в своих границах крупных водохранилищ, было рассмотрено изменение годовых сумм осадков, испарения, речного стока и испаряемости за 1946–1979 и 1980–2021 гг. В целом на ЕЧР второй период отличается большими величинами всех составляющих водного баланса. Для северной части ЕЧР (главным образом бассейны арктических рек, а также бассейны рек верхней и средней Волги, Балтийского моря) был выявлен незначительный рост слоя стока, на южной половине ЕЧР преобладало снижение (реки бассейнов Дона, Урала, нижней Волги). Наиболее заметен был рост стока в средней полосе ЕЧР. При этом его рост для большинства водосборов опережал рост осадков – медианная величина коэффициента стока среди 225 водосборов выросла с 0,37 до 0,40. Через модифицированное уравнение Будыко для каждого водосбора была получена зависимость коэффициента стока от степени аридности климата, выражаемая через параметр  $\omega$ , определяющий долю осадков, расходуемую на испарение при заданной величине индекса сухости. Для северной части ЕЧР зависимость не претерпела изменений, в центральной части трансформация осадков в сток стала эффективней, а в южной части, напротив, менее эффективной. Пространственное распределение параметра  $\omega$  показало тесную, с коэффициентом детерминации более 0,76, связь степени синхронности наступления максимумов испаряемости и осадков, площади водосбора, занятой лесом и оголенной почвой (территорией, не занятой растительным покровом), температуры воздуха в январе – феврале и долей твердых осадков в годовой сумме. Однако применение полученной зависимости для оценки изменения  $\omega$  показало неудовлетворительные результаты. Вероятно параметры, определяющие изменчивость  $\omega$  в пространстве, не определяют его изменчивость во времени. На основе оценки параметра  $\omega$  за 1980–2021 гг. и климатических сценариев изменения слоя осадков и испаряемости была рассчитана величина изменения стока в XXI в. Ожидается, что сток большинства рек ЕЧР в XXI в. вырастет вне зависимости от сценария изменения климата. В среднем для 76% водосборов направленность изменения речного стока за 2020–2100 гг. будет совпадать с таковой за 1946–2021 гг. Прогнозная величина изменений будет также близка к наблюдаемой за 1946–2021 гг.

**Ключевые слова:** европейская часть России, водный баланс, годовой сток, формула Будыко, климатические изменения

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.6.5

## ВВЕДЕНИЕ

Годовой сток рек ( $R$ ) является наиболее точной оценкой возобновляемых водных ресурсов территории. Одним из регионов, где его изменения за последние десятилетия были наиболее заметными,

является ЕЧР [Фролова и др., 2022]. Наблюдаемое изменение климата в целом для ЕЧР привело к росту водных ресурсов за счет роста количества осадков. Однако, этот рост был выявлен главным образом для северной половины ЕЧР, не являющейся

вододефицитным районом. Для ряда рек юга ЕЧР, главным образом бассейна Дона, преобладала тенденция к снижению годового стока. Наибольшие различия были выявлены для объемов стока до и после 1978 и 1985 гг. Однако зачастую изменения не носили монотонный характер. Так, максимум стока в бассейне Волги наблюдался в 1990-х гг.

Результаты гидрологического моделирования показывают, что тенденция к росту годового стока рек может смениться снижением уже при росте глобальной температуры воздуха на 1,5 и 2°C относительно доиндустриального уровня [Калугин, 2023]. Так, сток Волги и Северной Двины может уменьшиться на 10–11%, а Дона – на 21–24%. Из крупных речных бассейнов рост  $R$  прогнозируется лишь для бассейна Печоры – на 5–7%. Использование гидрологических моделей для оценки текущих и будущих изменений годового стока на ЕЧР имеет ряд ограничений: отсутствие в открытом доступе рядов суточных наблюдений за расходами воды, низкая плотность сети метеостанций, относительно низкая детальность и точность баз данных по свойствам почвы, растительного покрова и рельефа. Эти факторы снижают как пространственный охват, так и доступный временной диапазон для калибровки и валидации моделей.

Одним из методов исследования изменения годового стока рек и факторов, его определяющих, является уравнение Будыко и связанные с ним методы, получившие заметное развитие в последние годы благодаря созданию глобальных баз данных о климате и свойствах подстилающей поверхности [Gan et al., 2021]. Упрощенное представление процесса формирования стока в виде эмпирической зависимости позволяет существенно сократить требования по детальности исходной информации, что дает возможность проводить оценки изменения стока на уровне малых и средних водосборов для районов, не обеспеченных достаточной густотой сети метеорологических наблюдений и сведениями о свойствах подстилающей поверхности.

В этой работе мы предполагаем, что средне-многолетние величины осадков ( $P$ ) и потенциального испарения ( $PET$ ) в рамках метода уравнения Будыко могут достоверно воспроизводить прошлые и будущие изменения годового стока рек и испарения ( $E$ ). Основными задачами являются: 1) выявление изменения составляющих водного баланса рек ЕЧР за два исторических периода 1946–1979 и 1980–2021 гг.; 2) оценка возможности экстраполяции параметра в уравнении Будыко, оцененного по одному периоду, на другой период; 3) оценка изменения речного стока рек ЕЧР в XXI в. при различных сценариях изменения климата.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Использовались данные о годовом стоке рек на 225 постах (рис. 1) в пределах ЕЧР за 1946–2021 гг., расположенных северней 48° с. ш. и не зарегулированных крупными водохранилищами. Средняя продолжительность наблюдений составила 73,6 года. Площадь водосборов изменялась от 2000 до 348 000 км<sup>2</sup>. Средняя и медианная площади составили 22,4 тыс. км<sup>2</sup> и 6725 км<sup>2</sup> соответственно. Минимальный коэффициент вариации годового стока оказался равен 0,1, а максимальный – 1,14.

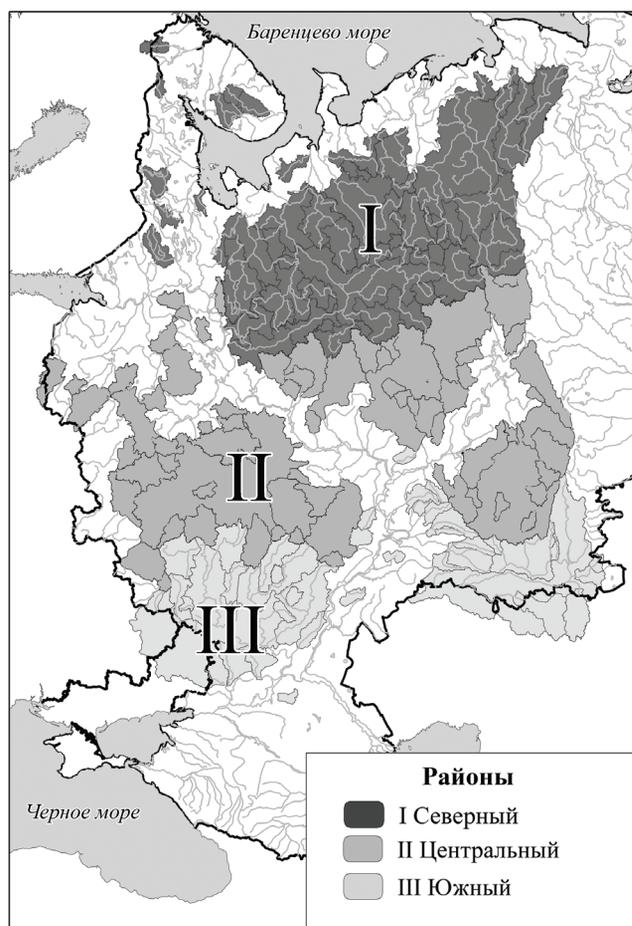


Рис. 1. Район исследований

Fig. 1. Studied area

Для расчета  $PET$  за 1946–2021 гг. использовались данные реанализа ERA5 [Григорьев и др., 2022] по минимальной ( $t_n$ ) и максимальной ( $t_x$ ) суточным температурам воздуха. Данные о  $t_n$  и  $t_x$  использовались для расчета величин потенциального испарения согласно формуле [Hargreaves, Samani, 1982]:

$$PET = aH_0(t_{\text{mean}} + 17,8)(t_x - t_n)^{0,5}, \quad (1)$$

где  $PET$  – величина потенциального испарения, мм/сут;  $t_{\text{mean}}$  – средняя температура воздуха за сутки,  $H_0$  – радиация на внешней границе атмосферы, вы-

раженная через теплоту парообразования, мм/сут.,  $a$  – коэффициент, в среднем равный 0,0023. Данные ERA5 имеют систематическую ошибку, а коэффициент  $a$  в формуле (1) также может несколько отличаться от 0,0023. Кроме того, пространственное разрешение данных ERA5 составляет 0,25°, т. е. около 600 км<sup>2</sup> или порядка трех узлов сетки на водосбор минимальной площади, рассматриваемой в работе. По этим причинам рассчитанные по данным ERA5 величины  $PET$  могут иметь существенную систематическую ошибку. Для устранения систематической ошибки в рядах *осадков и температуры воздуха* (взяты из ERA5) использовались данные WorldClim 2 [Fick, Hijmans, 2017]. WorldClim 2 предоставляет усредненные за 1970–2000 гг. среднемесячные величины в узлах в 30" сетки. WorldClim 2 был получен на основе данных наземных наблюдений, однако при их интерполяции использовались дистанционные данные. Для расчета систематической ошибки ERA5 в каждом из узлов 30" сетки ее данные были усреднены по времени и деагрегированы в пространстве до разрешения WorldClim 2. Систематическая ошибка ERA5 для осадков рассчитывалась как

$$P_{\Delta}^i = P_{ERA5}^i - P_{WorldClim}^i, \quad (2)$$

где  $P_{WorldClim}^i$  – месячная норма осадков по данным WorldClim 2,  $P_{ERA5}^i$  – месячная норма осадков по данным ERA5 за  $i$ -й месяц. Аналогичным образом расчет производился для  $t_n$ ,  $t_x$  и  $PET$ , с той разностью, что для  $PET$  в качестве истинных значений выступали данные Global-AI\_PET\_v3 [Zomer et al., 2022], рассчитанные с помощью уравнения Пенмана – Монтиса на основе данных WorldClim 2.

Для прогноза изменения  $R$  в XXI в. использовались величины  $P$ ,  $t_n$  и  $t_x$ , полученные из сценариев CMIP 6 с устраненной систематической ошибкой на основе данных WorldClim 2 [CMIP 6..., 2023]. Рассчитанные величины  $PET$  корректировались по данным Global-AI\_PET\_v3 согласно (2). Использовались данные для четырех базовых периодов (2021–2040, 2041–2060, 2061–2080, 2081–2100), четырех климатических моделей (GFDL-ESM4, HadGEM3-GC31-LL, IPSL-CM6A-LR, MIROC6) и четырех сценариев развития (SSPs (Shared Socioeconomic Pathways): 1-й – 2.6, 2-й – 4.5, 3-й – 7.0 и 4-й – 8.5). При дальнейшей работе результаты расчета по четырем климатическим моделям усреднялись. Выбранные модели показывают наименьшую величину ошибки для ЕЧР и использовались в ряде исследований [Калугин, 2023; Kalugin, 2019].

В качестве источника информации о площади лесов, недревесной растительности и открытой почвы использовались спутниковые данные [Vegetation

Continuous Fields..., 2022]. В качестве цифровой модели рельефа использовалось Hydrography 90 m [Amatulli et al., 2022].

Метод Будыко заключается в представлении доли осадков, идущих на испарение и речной сток, как функции от осадков, потенциального испарения и параметра, учитывающего специфичную форму зависимости для конкретного водосбора [Bai et al., 2023]. Мы использовали не оригинальное уравнение Будыко, не имеющее параметров, а его модификацию:

$$R_i = P_i \left[ 1 + \left( \frac{PET_i}{P_i} \right)^{\omega_i} \right]^{\frac{1}{\omega_i}} - PET_i, \quad (3)$$

где  $\omega$  – эмпирический параметр,  $i$  – индекс периода. Параметр  $\omega$  определялся путем подбора (калибровки) по известным величинам  $P$ ,  $PET$  и  $R$  для каждого водосбора по данным за 1980–2021 гг. ( $\omega_2$ ) и 1946–1979 гг. ( $\omega_1$ ).

Для того чтобы оценить вклад изменения среднесуточных величин  $P$  и  $PET$  в изменение  $R$ , по формуле (3) была рассчитана величина  $R_2^{P, PET}$  – величина стока, которая наблюдалась бы при среднесуточных величинах второго периода ( $P_2$  и  $PET_2$ ), но всех прочих факторах, интегрально описываемых параметром  $\omega$ , первого периода:

$$R_2^{P, PET} = P_2 \left[ 1 + \left( \frac{PET_2}{P_2} \right)^{\omega_1} \right]^{\frac{1}{\omega_1}} - PET_2. \quad (4)$$

Вклад изменения  $\omega$  в изменение  $R$  рассчитывался как

$$\Delta R_{\omega, \%} = 100 \cdot \left( \frac{|R_2 - R_2^{P, PET}|}{|R_2 - R_2^{P, PET}| + |R_2^{P, PET} - R_1|} \right), \quad (5)$$

где числитель – вклад изменения  $\omega$  в изменение  $R$  ( $R_2 - R_1$ ), второе слагаемое в знаменателе – вклад изменения  $PET$  и  $P$  в изменение  $R$ .

Значение  $\omega$  может меняться во времени в результате изменения особенностей внутригодового распределения осадков и потенциального испарения, растительного покрова и типа землепользования [Григорьев и др., 2020]. Для оценки  $\omega$  при отсутствии данных наблюдений за  $R$  были получены зависимости между  $\omega$  и рядом параметров водосбора:

1) модифицированным коэффициентом сезонности климата  $SAI$ , равным

$$SAI = \left( \delta_P^2 - 2\delta_P\delta_{PET}DI \cos\left(\frac{\pi}{6}(S_P - S_{PET})\right) + (\delta_{PET}DI)^2 \right)^{1/2}, \quad (6)$$

где  $\delta_p$ ,  $\delta_{PET}$ ,  $S_p$  и  $S_{PET}$  находятся как коэффициенты уравнений;

$$P(t) = \bar{P} \cdot \left[ 1 + \delta_p \sin \left( \frac{\pi}{6} (t - S_p) \right) \right], \quad (7)$$

$$PET(t) = \overline{PET} \cdot \left[ 1 + \delta_{PET} \sin \left( \frac{\pi}{6} (t - S_{PET}) \right) \right], \quad (8)$$

где  $P(t)$  и  $PET(t)$  – среднееголетний сезонный ход  $P$  и  $PET$ ,  $\bar{P}$  и  $\overline{PET}$  – среднегодовые величины  $P$  и  $PET$ ,  $\delta_p$  и  $\delta_{PET}$  – параметры, отражающие сезонную амплитуду колебаний,  $S_p$  и  $S_{PET}$  – параметры сдвига, отражающие время наступления максимумов и минимумов  $P$  и  $PET$  относительно границ года,  $DI$  – индекс сухости, равный  $\overline{PET}/\bar{P}$ ;

2) топографическим индексом увлаженности ( $CTI$ ):

$$CTI = \ln \frac{a}{\text{tg} b}, \quad (9)$$

где  $a$  – площадь площадки (ячейки раstra),  $\text{tg} b$  – тангенс угла наклона площадки. Для водосбора  $CTI$  рассчитывался как среднее между всеми ячейками раstra в его пределах;

3) долей площади водосбора, занятой лесами ( $A_{лес}$ ), недревесной растительностью ( $A_{куст}$ ) и оголенной почвой ( $A_{огол}$ );

4) средней температурой воздуха за январь – февраль  $T_{I-II}$ ;

5) долей твердых осадков в годовой сумме осадков  $P_{тв}$ .

Для получения зависимости между  $\omega$  и вышеперечисленными параметрами водосборов ( $SAI$ ,  $CTI$ ,  $A_{лес}$ ,  $A_{куст}$ ,  $A_{огол}$ ,  $T_{I-II}$ ,  $P_{тв}$ ) использовались различные методы, такие как обычная множественная линейная регрессия (OLSR), регрессия частично наименьших квадратов (PLSR), древо решений (DT), древо решений с предварительным выделением главных компонент (DT\_PCA), случайный лес (RF), градиентный бустинг (GB) [James et al., 2023; Жерон, 2020]. При этом для OLSR рассматривались все возможные комбинации переменных, таким образом, для OLSR составлялось  $2^{7+1} - 1 = 127$  уравнений. Для PLSR рассматривалось семь уравнений (использовалось до семи главных компонент). Оценка параметров производилась по данным за 1980–2021 гг. Для оценки точности использовалась кросс-валидация. Модель обучалась на 90% данных, а оценка точности выполнялась по оставшимся 10%. Эта процедура повторялась 10 раз, после чего полученные оценки ошибок усреднялись. Отклонение от полученной зависимости для каждого водосбора имеют как систематическую, так и случайную составляющие. Поскольку случайная ошибка в среднем равна 0, систематическая составляющая может быть оценена как величина

ошибки за 1980–2021 гг. Эта величина вносилась как поправка при расчете  $\omega$  за 1946–1979 гг. В качестве базового периода для расчета  $\omega$  был принят 1980–2021 гг., а не 1946–1979 гг. как при расчете изменения водного баланса. Это связано с большей продолжительностью второго периода и с тем, что используемые данные о растительном покрове относятся к периоду после 1979 г.

В качестве параметров точности использовались абсолютная систематическая ошибка ( $bias$ ), относительная систематическая ошибка ( $ubias$ , %), абсолютная случайная ошибка ( $std$ ), относительная случайная ошибка ( $ustd$ , %), равные соответственно

$$bias = \overline{\omega_{расч}} - \overline{\omega_{ист}}, \quad (10)$$

$$ubias = 100\% \cdot \frac{\overline{(\omega_{расч} - \omega_{ист})}}{\overline{\omega_{ист}}}, \quad (11)$$

$$std = \sqrt{\overline{(\omega_{расч} - \omega_{ист})^2}}, \quad (12)$$

$$ustd = 100\% \cdot \sqrt{\overline{\left( \frac{(\omega_{расч} - \omega_{ист})}{\omega_{ист}} \right)^2}}, \quad (13)$$

где верхняя черта обозначает оператор осреднения,  $\overline{\omega_{расч}} - \omega$  – рассчитана по статистической модели,  $\overline{\omega_{ист}}$  – рассчитана обратным пересчетом через  $P$ ,  $PET$  и  $R$ . Испарение ( $E$ ) определялось по уравнению водного баланса за многолетний период как разность между  $P$  и  $R$ .

Значимость изменений речного стока, осадков и испаряемости выполнялась с помощью критерия Стьюдента. Для испарения, в силу отсутствия временного ряда по нему, значимость изменений не оценивалась.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Изменение водного баланса рек ЕЧР.** По данным измерений период 1980–2021 гг. на ЕЧР отличается большей водностью по сравнению с 1946–1979 гг. При этом для рек северной части ЕЧР рост стока практически повсеместный, в то время как для южной половины (Дон, Урал, Днепр) присутствуют области как пониженного, так и повышенного стока (табл. 1).

Сток рек Кольского полуострова вырос на 10–20%, однако в силу его существенной зарегулированности озерами и водохранилищами для этого региона выводы о статистической значимости изменений требуют дальнейшего уточнения. В замыкающих створах Северной Двины и Онеги изменения годового стока практически не произошло. В бассейне Северной Двины размах изменения  $R$  составил от –2% в бассейне р. Ваги до +25% в бассейне р. Лузы.

Таблица 1

Среднемноголетние (1946–1979) величины осадков ( $P$ ), испарения ( $E$ ), потенциального испарения ( $PET$ ), речного стока ( $R$ ) на ряде водосборов ЕЧР, а также их изменение за 1980–2021 гг.

Бассейн	Река – пост	Площадь, км <sup>2</sup>	$P$		$E$		$PET$		$R$	
			Среднее, мм	Изменение, %						
Кольский п-ов	Поной – Каневка	10 200	462	7,1	125	-1,9	480	3,2	337	10,5
	Варзуга – Варзуга	7940	436	10,0	128	-10,5	501	3,3	308	18,5
	Чирко-Кемь – Юшкозеро	8220	532	11,5	235	2,2	593	4,2	297	18,8
Онега	Онега – Череповская	29 500	597	4,1	305	3,5	629	5,2	292	4,4
Северная Двина	Луза – Красавино	16 300	565	7,5	321	-6,0	701	4,3	244	25,1
	Северная Двина – Усть-Пинега	348 000	563	5,3	274	8,2	627	4,6	289	2,5
	Вага – Филяевская	13 200	602	3,2	332	7,3	630	5,6	269	-2,0
Между Северной Двиной и Печорой	Сояна-Сояна	5570	473	6,2	162	18,4	539	3,5	310	-0,1
	Мезень – Малонисогорская	56 400	573	2,0	205	10,0	579	4,1	368	-2,4
	Пеза – Игумново	12 000	527	2,4	203	-6,9	553	3,9	324	8,0
	Пеша – Волоковская	2780	488	6,0	98	-22,1	512	3,7	389	13,1
Печора	Ижма – Усть-Ухта	15 000	599	6,2	285	-0,5	591	3,9	313	12,2
	Печора – Усть-Цильма	248 000	564	5,3	123	7,4	542	4,8	441	4,7
Балтийское море	Сорогь – Осинкино	3170	616	7,7	425	-4,7	720	5,3	191	35,3
	Великая – Пятоново	20 000	577	8,6	377	2,4	731	5,4	199	20,4
	Оять – Акулова-Гора	4830	685	4,9	361	-3,0	651	5,1	338	9,0
Верхняя Волга	Кема – Левково	4160	587	5,5	384	-6,7	645	5,4	205	27,5
	Волга – Старица	21 100	590	9,9	370	2,2	703	5,6	220	22,8
	Унжа-Кологрив	11 500	570	5,0	305	6,0	663	5,9	265	3,9
Ока	Выша – 10-й Октябрь	2190	482	6,0	437	-15,5	851	4,9	89	59,5
	Ока – Горбатов	244 000	521	7,1	368	5,9	783	5,3	153	10,2
	Ока – Беляев	17 500	554	4,4	413	6,9	814	5,1	141	-2,9
Кама	Вятка – Вятские Поляны	124 000	526	8,8	303	1,5	751	4,0	224	18,7
	Белая – Бирск	121 000	509	4,4	296	4,1	806	3,6	214	4,7
	Чермасан – Новоюмраново	3570	449	1,8	392	-6,1	860	4,3	62	44,3
	Чусовая – Староуткинск	5450	534	5,0	374	8,8	730	3,7	160	-3,9
Средняя и нижняя Волга	Ветлуга – Ветлужский	27 500	554	6,6	325	1,2	716	5,4	229	14,3
	Самара – Елшанка	22 800	371	5,9	302	7,2	1041	4,6	70	0,2
	Большой Кинель – Тимашево	12 000	456	4,7	357	3,7	953	4,5	98	8,4
	Большой Караман – Советское	3470	363	7,2	344	9,7	1159	3,1	19	-37,9
Дон	Красивая Меча – Ефремов	3240	508	4,7	389	-5,9	924	4,7	137	21,7
	Дон – Беляевский	204 000	459	5,7	375	8,0	946	4,9	84	-4,9
	Есауловский Аксай – Водянский	2110	313	10,4	289	13,6	1183	4,3	28	-41,1
Урал	Жарлы – Адамовка	2490	285	7,1	237	4,2	1009	2,8	48	21,4
	Урал – Кушум	190 000	323	5,0	272	5,7	1080	3,6	51	5,8
	Орь – Истемес	13 000	245	13,0	228	15,6	1211	2,4	17	-20,3
Черное море	Днепр – Дорогобуж	6390	587	9,5	377	2,3	721	5,4	210	22,4
	Десна – Брянск	13 700	567	8,1	387	12,7	762	5,1	180	-1,7
	Сейм – Рыльск	18 100	571	2,5	445	8,1	865	4,5	126	-22,2

Примечание. Курсивом выделено изменение, статистически значимое по критерию Стьюдента на 5%-ном уровне. Для  $E$  оценка значимости не выполнялась.

Изменение стока согласуется с изменением слоя осадков и потенциального испарения по направлению (водосборы с большим ростом  $P$  и меньшим ростом  $PET$  отличаются наибольшим ростом  $R$ ), однако размах изменений слоев осадков и стока значительно отличается. Величина изменения стока рек арктического побережья близка к 0% к западу от р. Мезени и порядка 10–15% к востоку. Сток р. Печоры вырос в среднем на 5%.

Наибольшее увеличение  $R$  было выявлено в средней полосе ЕЧР, на реках бассейна Балтийского моря, верхней Волги и Вятки, где оно составило 20–30%. Этот же район отличается значимым ростом слоя осадков. Для бассейнов рек Оки и Белой также был выявлен рост стока, в среднем на 5–10%, со значимой пространственной изменчивостью. Для района средней и нижней

Волги, а также Дона в целом характерно снижение  $R$ , на отдельных водосборах достигающее 30–40%, связанное в первую очередь со снижением стока половодья [Варенцова и др., 2021]. Однако, из-за разнонаправленности изменений на малых и средних реках, уменьшение стока крупных рек не столь существенно. Так, сток р. Дон у х. Беляевского уменьшился лишь на 5%. Сток многих рек бассейнов Днепра и Урала претерпел существенные изменения, превышающие 20%. При этом в среднем для этих территорий величина речного стока не изменилась.

В целом рост  $R$  в относительном выражении превышал рост  $P$ , что выражается в росте коэффициента стока. Так, если его медианная величина за первый период составила 0,37, то за второй период она достигла 0,40 (рис. 2).

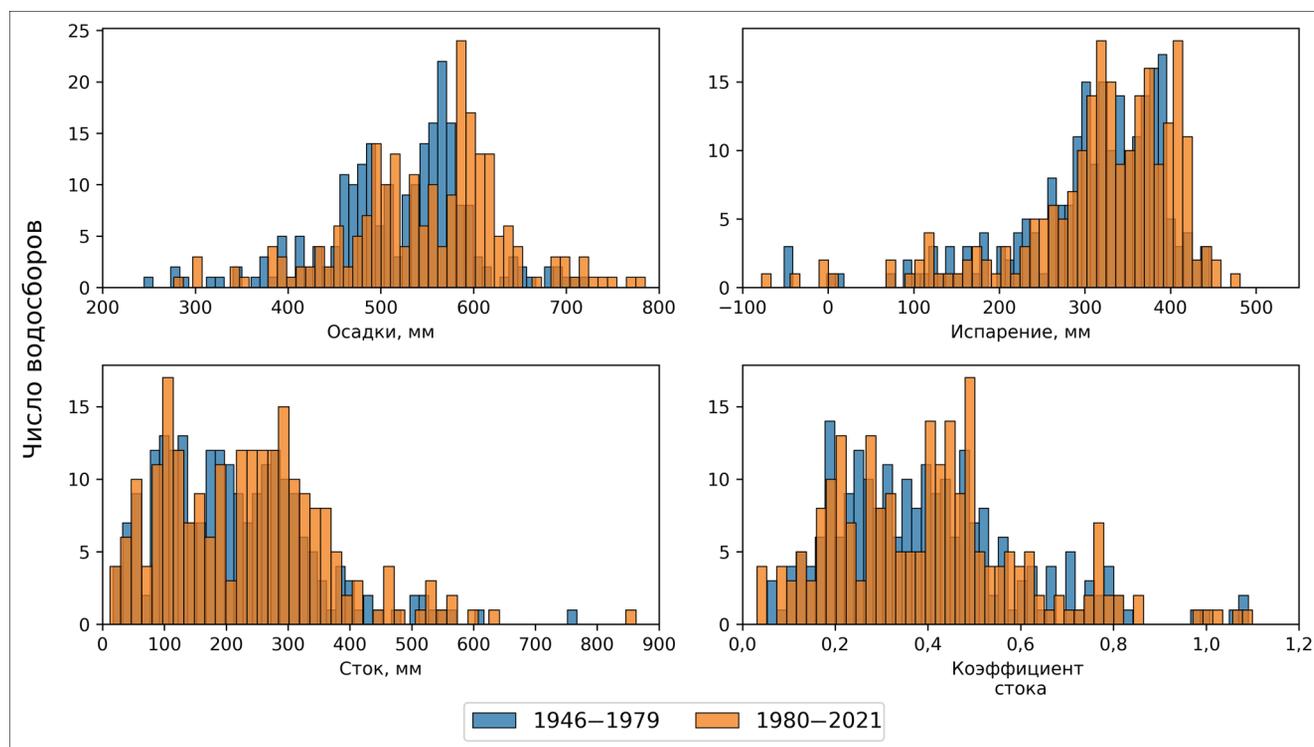


Рис. 2. Распределение числа водосборов на ЕЧР по величине слоя осадков, испарения, речного стока и коэффициента стока за 1946–1979 и 1980–2021 гг.

Fig. 2. Distribution of the catchments in the ER in terms of precipitation, evaporation, streamflow and runoff coefficient for 1946–1979 and 1980–2021

Медианная, рассчитанная по  $P$ ,  $PET$  и  $R$  величина  $\omega$  за второй период составила 1,80, уменьшившись с 1,84 за первый. Таким образом, рост стока за 1980–2021 гг. связан не только с ростом количества осадков, но и с уменьшением параметра  $\omega$ . При этом на водосборах с наибольшим изменением  $R$  вклад  $\omega$  в это изменение наибольший. Изменение  $\omega$  по территории было неравномерным. Для рек бассейна Северного Ледовитого океана  $\omega$  практи-

чески не изменилось, составив 1,48. Рост стока для этого региона связан главным образом с уменьшением индекса сухости  $DI=PET/P$ . Наиболее заметные изменения произошли для рек средней полосы ЕЧР – верхней Волги, Оки, Вятки, рек бассейна Балтийского моря и Днепра (рис. 3). Для этого региона заметно не только снижение индекса сухости, но и заметное уменьшение  $\omega$ , в среднем с 1,81 до 1,76. Это выражается в заметном изменении слоя

стока, на 3,5% при неизменных  $P$  и  $PET$ . Для южной части ЕЧР (Дон, Урал, средняя и нижняя Волга) характерно увеличение индекса сухости и некоторый рост  $\omega$ , в среднем с 2,12 до 2,14. Снижение  $\omega$  в средней полосе ЕЧР и рост в южной могут быть связаны с различной глубиной промерзания почвы. Так, при глубине промерзания почвы менее 30 см, что характерно для южных районов ЕЧР, слой стока пологая становится мало зависим от величин запаса воды в снеге и в почве [Барабанов, Петелько, 2023].

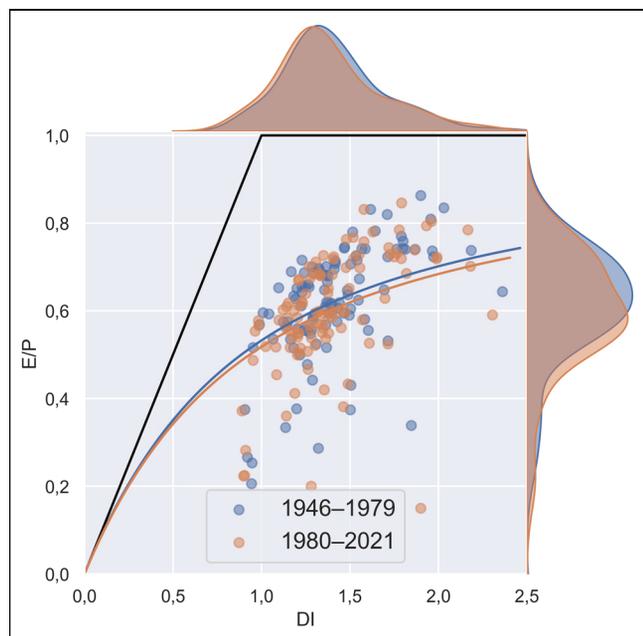


Рис. 3. Зависимость между отношением испарения ( $E$ ) к осадкам ( $P$ ) и индексом сухости ( $DI$ ), обобщающая кривая  $E/P = f(DI)$ , а также их плотности распределения для бассейнов рек средней полосы ЕЧР за 1946–1979 и 1980–2021 гг.

Fig. 3. Relationship between evaporation ( $E$ ) to precipitation ( $P$ ) ratio and dryness index ( $DI$ ), generalizing curve  $E/P = f(DI)$ , and their distribution densities for river basins of the middle zone of ER for 1946–1979 and 1980–2021

Однозначной связи между вкладом изменения параметра  $\omega$  в величину изменение  $R$  выявлено не было, однако, чем больше изменение  $R$ , тем больший вклад в него вносит изменение  $\omega$  (рис. 4). Максимальная величина изменения  $R$ , не сопровождаемая изменением  $\omega$ , составляет порядка 13%. Дальнейший рост изменения  $R$  сопровождается практически линейным ростом  $\Delta R_{\omega}$  – при величине изменения  $R$  на более чем 40%, вклад изменения  $\omega$  уже превышает 80%. Отметим, что используемая методика не учитывает возможность нестационарных систематических и случайных ошибок в рядах речного стока и, таким образом, изменения в величине ошибок включаются в изменения речного стока, связанные с  $\omega$ .

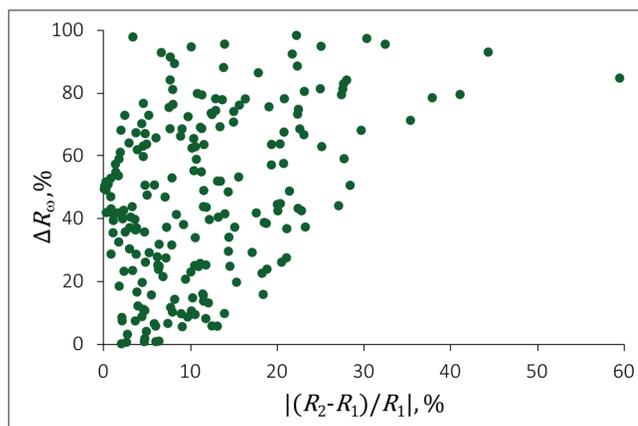


Рис. 4. Связь между вкладом изменения параметра  $\omega$  (согласно (5)) и величиной изменения речного стока, выраженной в процентах и взятой по модулю  $|(R_2 - R_1)/R_1|$

Fig. 4. Relationship between the contribution of the  $\omega$  parameter change (according to (5)) and the magnitude of streamflow change, expressed as a percentage and taken modulo  $|(R_2 - R_1)/R_1|$

#### Зависимость $\omega$ от особенностей бассейна.

Оценка точности с помощью кросс-валидации выявила четыре метода расчета  $\omega$  с практически идентичными результатами – OLSR (рис. 5), PLSR, RF и GB (табл. 2). OLSR показала наименьшую величину систематической ошибки, но RF и GB показали несколько меньшую величину случайной ошибки. PLSR как по величине систематической, так и по величине случайной ошибки немного уступает OLSR. Остальные DT и DT\_PCA показали заметно меньшую точность. При этом все шесть методов показывают существенно меньшую точность по сравнению с использованием параметров  $\omega$ , рассчитанных путем калибровки за первый период.

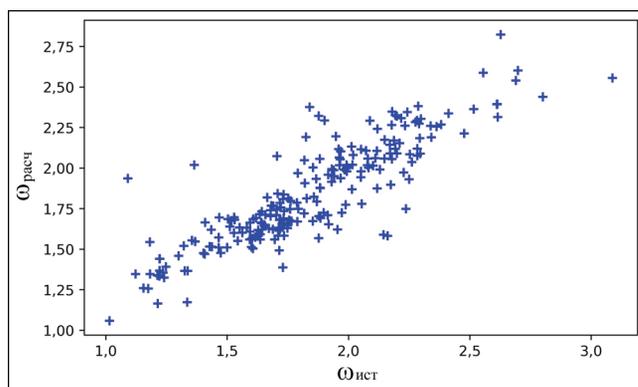


Рис. 5. Зависимость между рассчитанными с помощью OLSR ( $\omega_{\text{расч}}$ ) и с помощью обратного пересчета ( $\omega_{\text{ист}}$ ) величинами  $\omega$  за 1980–2021 гг.

Fig. 5. The relationship between the OLSR-calculated and true values of  $\omega$  for 1980–2021

Оценка точности расчета параметра  $\omega$  за 1946–1979 гг. различными методами

$\omega$	$std(KB)$	Не скорректированные				Исправленная $\omega$	
		$bias$	$bias, \%$	$std$	$std, \%$	$std$	$std, \%$
1980–2021	–	–0,009	–0,5	0,116	5,6	–	–
OLSR	0,178	–0,063	–2,6	0,180	9,8	0,124	6,2
PLSR	0,179	–0,068	–2,9	0,181	9,9	0,123	6,2
DT	0,198	–0,075	–3,5	0,206	11,2	0,194	10,7
DT_PCA	0,212	–0,076	–3,3	0,241	13,0	0,236	12,7
RF	0,179	–0,082	–3,8	0,168	9,0	0,131	6,7
GB	0,187	–0,073	–3,1	0,168	9,3	0,128	6,6

*Примечание.* OLSR – множественная линейная регрессия; PLSR – регрессия частично наименьших квадратов; DT – древо решений; DT\_PCA – древо решений с предварительным выделением главных компонент; RF – случайный лес; GB – градиентный бустинг; 1980–2021 гг. – использование рассчитанных за 1980–2021 гг. значений  $\omega$ ; KB – оценка, полученная с помощью кросс-валидации за 1980–2021 гг.; исправленная  $\omega$  –  $\omega$  с устраненной систематической ошибкой;  $bias$  для скорректированной и нескорректированной оценок практически равны.

Корректировка результатов расчета по величинам систематической ошибки, полученным за 1980–2021 гг., существенно уменьшила ошибку расчета  $\omega$  за второй период, при этом наибольший прирост точности был получен для OLSR и PLSR.

Полученное уравнение множественной линейной регрессии имеет вид:

$$\omega_{расч} = 3,28 + 0,62 \cdot SAI - 0,46 \cdot A_{лес} + 1,4 \cdot A_{огол} + 45 \cdot 10^{-4} \cdot T_{I-II} - 7,14 \cdot P_{ТВ}. \quad (14)$$

Согласно (6) при росте разности в фазах колебаний  $PET$  и  $P$ , выражаемых через  $SAI$ , происходит рост потерь стока на испарение, что является типичным для мира в целом [Liu et al., 2018]. Отметим, однако, что полученная связь носит вероятностный характер. При наступлении максимумов  $P$  и  $PET$  в один и тот же сезон года испарение оказывается наибольшим, поскольку величина испарения одновременно не лимитирована количеством доступной влаги и тепла. Но поскольку районы с максимальными величинами  $SAI$  – это аридные районы, то большим величинам  $SAI$  соответствуют большие величины  $\omega$ , что и было выявлено OLSR. Этим же, вероятно, объясняется положительная связь  $\omega$  с площадью оголенной почвы и отрицательная – с площадью, занятой древесной растительностью, поскольку при прочих равных условиях испарение с территории, занятой лесом, как правило, выше и, соответственно, при  $A_{лес}$  в (14) должен был бы стоять знак «+». Влияние климатических факторов,  $T_{I-II}$  и  $P_{ТВ}$ , на  $\omega$  более закономерно. Рост зимних температур ведет к росту потерь талого стока на увлажнение почвы и заполнение бессточных понижений.

Рост доли твердых осадков в годовой сумме, напротив, ведет к росту доли талого стока, величина потерь на испарение которого, как правило, ниже, чем для дождевого.  $P_{ТВ}$  и  $A_{лес}$  являются главными факторами, определяющими изменчивость  $\omega$ . Так, уравнение множественной регрессии, учитывающее эти две переменные, при кросс-валидации показывает ошибку в 0,2, что лишь на 11% больше, чем при использовании пяти переменных.

**Сценарные изменения слоя годового стока.**

По данным о прогнозных величинах  $R$ ,  $PET$  и  $\omega$  (по итогу оценки точности различных методов использовались величины, полученные за 1980–2021 гг. с помощью калибровки) была рассчитана величина стока. Для большинства водосборов вне зависимости от сценария SSP и периода прогнозирования, прогнозируется рост  $R$  (табл. 3).

В большинстве случаев для северной половины ЕЧР SSP 245 показывает больший, по сравнению с SSP 370, рост на 2021–2040 гг., но меньший для более поздних сроков прогнозирования. Для южной половины ЕЧР рост согласно SSP 370 практически всегда превышает рост при реализации SSP 245. При обоих сценариях для рек севера ЕЧР прогнозируется рост величины речного стока в течение всего XXI в. Для рек средней полосы и юга ЕЧР монотонные изменения  $R$  не выявлены. Максимум  $R$  для отдельных водосборов может наблюдаться на любом из четырех сроков прогнозирования.

В среднем для всех сценариев и сроков прогноза на 76% водосборов величина будущих изменений по знаку совпадает с изменениями за 1946–2021 гг. При этом величина изменения в среднем в половине случаев будет меньше, чем за рассматриваемый период измерений. Наиболее выраженные изменения ха-

рактены для конца столетия при сценарии SSP 585. При его реализации величина изменения слоя стока к 2100 г. превысит изменения за 1946–2021 гг. на 71% водосборов, для 79% из которых это изменение будет также совпадать по направлению. Наименее заметные изменения по сравнению с произошедшими за 1946–2021 гг. прогнозируются к середине XXI в. в сценарии SSP 245, при котором величина изменений будет превышена лишь на 36% водосборов.

Полученные результаты согласуются с предыдущими оценками для северной и центральной частей ЕЧР, но расходятся для южной. Так, в [Магрицкий и др., 2018] на основе схожей методики был получен сценарный прогноз уменьшения стока р. Урал к середине XXI в. на 10–20%. Различия могут быть связаны как с выбором данных – различные периоды осреднения и сценарные изменения климата (СМIP3 и СМIP6), так и с особенностями методики.

Таблица 3

**Сценарные изменения величины речного стока при SSP 245 и SSP 370 для крупных речных бассейнов по отношению к 1980–2021 гг.**

Река – пост	Изменение за 1946–2021 гг., %	SSP 245				SSP 370			
		2021–2040	2041–2060	2061–2080	2081–2100	2021–2040	2041–2060	2061–2080	2081–2100
Варзуга – Варзуга	18,5	5,2	7,5	8,2	8,2	2,2	4,6	10,3	16,7
Онега – Череповская	4,4	2,2	2,7	4,9	7,3	3,5	6,2	6,8	10,6
Северная Двина – Усть-Пинега	2,5	2,6	2,3	5,9	6,7	2,4	5,3	5,2	9,8
Мезень – Малонисогорская	–2,4	4,3	4,8	9,3	9,5	2,5	5,4	5,2	12,4
Печора – Усть-Цильма	4,7	9,0	11,4	18,5	18,7	6,4	11,1	14,0	22,0
Великая – Пятоново	20,4	–0,2	–0,6	0,1	2,7	4,0	5,4	6,8	10,6
Волга – Старица	22,8	2,7	2,0	3,0	7,0	3,8	7,4	6,9	9,9
Ока – Горбатов	10,2	9,2	6,7	9,5	11,8	11,2	13,8	11,4	13,4
Вятка – Вятские Поляны	18,7	5,4	3,9	8,4	9,8	4,6	7,6	7,1	12,2
Белая – Бирск	4,7	13,0	13,5	20,1	20,8	12,7	14,9	16,5	19,4
Самара – Елшанка	0,2	12,3	9,5	14,0	21,4	14,3	12,6	14,3	17,9
Большой Кинель – Тимашево	8,4	11,2	7,4	12,8	17,4	14,2	11,8	12,2	15,6
Большой Караман – Советское	–37,9	11,7	7,6	6,9	15,0	20,7	14,4	11,4	12,4
Дон – Беляевский	–4,9	12,3	6,9	9,4	12,3	16,1	15,4	12,3	11,8
Урал – Кушум	5,8	12,9	13,1	16,2	22,7	13,6	16,7	16,4	21,7
Десна – Брянск	–1,7	6,5	1,3	3,4	6,5	9,3	13,7	9,0	10,8
Сейм – Рыльск	–22,2	18,5	7,7	9,5	13,1	23,3	27,5	17,2	16,7

### ВЫВОДЫ

В период с 1946 по 2021 г. произошел рост нормы осадков и потенциального испарения. Для большинства водосборов также был выявлен рост слоя стока. Для рек арктического бассейна изменение стока практически полностью определяется изменением годовых величин осадков и потенциального испарения. Рост стока в средней полосе России превысил рост, ожидаемый при наблюдаемом росте осадков и потенциального испарения. Для бассейнов рек юга ЕЧР ситуация обратная – на многих водосборах было выявлено сокращение слоя стока, не

объяснимое исключительно изменением годовых величин осадков и потенциального испарения.

Для параметра  $\omega$ , определяющего долю осадков, расходуемую на испарение при заданной величине индекса сухости, была выявлена тесная связь с рядом физико-географических особенностей водосборов, прежде всего долей снега в годовой сумме осадков и площади водосбора, занятой древесной растительностью. При расчете по этой зависимости  $\omega$  за предыдущий период (1946–1979) получены ошибки, которые носят систематический характер (см. табл. 2). Они связа-

ны с тем, что изменения  $\omega$  во времени оказались не столь чувствительны к изменению доли снега в годовой сумме осадков, средней температуре воздуха за январь – февраль и коэффициенту сезонности климата, по сравнению с изменением в пространстве. Это может быть связано как с тем, что рассмотренные климатические параметры скоррелированы с рядом других физико-географических характеристик водосборов, не учтенных в данной работе и не меняющихся также быстро, как климат (свойства почвы, видовой состав растительного покрова, структура русловой сети и др.), так и с

не учетом иных факторов, таких как изменение интенсивности транспирации в результате изменения концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере.

Использование полученных зависимостей вместе со сценарными прогнозами изменения климата показало, что сток большинства рек ЕЧР в XXI в. вырастет вне зависимости от сценария изменения климата. В среднем на 76% водосборов направленность изменения речного стока за 2020–2100 гг. будет совпадать с таковой за 1946–2021 гг. Прогнозная величина изменений будет также близка к наблюдаемой за 1946–2021 гг.

**Благодарность.** Анализ изменений речного стока был проведен при финансовой поддержке РНФ (проект № 24-17-00102), методологические и методические вопросы были рассмотрены также при поддержке РНФ (проект № 24-17-00084).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барабанов А.Т., Петелько А.И. Факторы склонового весеннего стока на серых лесных почвах в центральной лесостепи // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2023. № 4. С. 18–27. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.4.2.
- Варенцова Н.А., Гречушников М.Г., Повалишников Е.С. и др. Влияние климатических и антропогенных факторов на весенний сток в бассейне Дона // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2021. № 5. С. 91–108.
- Григорьев В.Ю., Миллионщикова Т.Д., Сазонов А.А. и др. Оценка влияния изменения климатических параметров на сток рек бассейна Байкала во второй половине XX – начале XXI вв. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2020. № 5. С. 3–11.
- Григорьев В.Ю., Фролова Н.Л., Куреева М.Б. и др. Пространственно-временная изменчивость ошибки воспроизведения слоя осадков реанализом ERA5 на территории России // Известия РАН. Серия географическая. 2022. Т. 86. № 3. С. 435–446.
- Жерон О. Прикладное машинное обучение с помощью Scikit-Learn, Keras и TensorFlow: концепции, инструменты и техники для создания интеллектуальных систем. 2-е изд. М.: Диалектика-Вильямс, 2020. 1040 с.
- Калугин А.С. Сток рек европейской части России при глобальном потеплении на 1,5 и 2 градуса // Водные ресурсы. 2023. Т. 50. № 4. С. 451–464.
- Магрицкий Д.В., Евстигнеев В.М., Юмина Н.М. и др. Изменения стока в бассейне р. Урал // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2018. № 1. С. 90–101.
- Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Куреева М.Б. и др. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. 1. Оценка изменений водного режима рек России по данным наблюдений // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. № 3. С. 251–269. DOI: 10.31857/S032105962203004X.
- Amatulli G., Garcia M.J., Sethi T. et al. Hydrography 90 m: a new high-resolution global hydrographic dataset, *Earth Syst. Sci. Data*, 2022, vol. 14, p. 4525–4550, DOI: 10.5194/essd-14-4525-2022.
- James G., Witten D., Hastie T. et al. *An Introduction to Statistical Learning: with Applications in Python*, New York, Springer International Publ., 2023, 607 p.
- Bai B., Huang Q., Wang P. et al. Long-Term Variability of the Hydrological Regime and Its Response to Climate Warming in the Zhizdra River Basin of the Eastern European Plain, *Water*, 2023, vol. 15, p. 2678, DOI: 10.3390/w15152678.
- Fick S.E., Hijmans R.J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas, *International Journal of Climatology*, 2017, vol. 37, no. 12, p. 4302–4315, DOI: 10.1002/joc.5086.
- Gan G., Liu Y., Sun G. Understanding interactions among climate, water, and vegetation with the Budyko framework, *Earth-Science Reviews*, 2021, vol. 212, 103451, DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103451.
- Hargreaves G.H., Samani Z.A. Estimating potential evapotranspiration, *J. Irrig. Drain. Eng.*, 1982, vol. 108, p. 225–230.
- Liu J., Zhang Q., Singh V.P. et al. Hydrological effects of climate variability and vegetation dynamics on annual fluvial water balance in global large river basins, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2018, vol. 22, no. 7, p. 4047–4060, DOI: 10.5194/hess-22-4047-2018.
- Kalugin A.S. The Impact of Climate Change on Surface, Subsurface, and Groundwater Flow: A Case Study of the Oka River (European Russia), *Water Resources*, 2019, vol. 46 (suppl. 2), p. 31–39, DOI: 10.1134/S0097807819080104.
- Zomer R.J., Xu J., Trabucco A. Version 3 of the Global Aridity Index and Potential Evapotranspiration Database, *Sci Data* 9, 2022, vol. 409, DOI: 10.1038/s41597-022-01493-1.
- Электронные ресурсы*  
 CMIP6, CMIP6 downscaled future climate projections, URL: <https://worldclim.org/data/index.html> (дата обращения 10.04.2023).  
 Vegetation Continuous Fields (VCF) Version 1 data product (VCF5KYR), NASA, URL: <https://lpdaac.usgs.gov/products/vcf5kyrv001/> (дата обращения 15.05.2022).

Поступила в редакцию 23.08.2024

После доработки 10.09.2024

Принята к публикации 15.10.2024

## RELATIONSHIP BETWEEN PRECIPITATION, RIVER RUNOFF AND EVAPORATION OVER THE EUROPEAN RUSSIA AND ITS VARIABILITY

V.Yu. Grigoriev<sup>1</sup>, N.L. Frolova<sup>2</sup>, A.A. Sazonov<sup>3</sup>, O.M. Pakhomova<sup>4</sup>, S.P. Pozdnyakov<sup>5</sup>, Wang Ping<sup>6</sup>

<sup>1-4</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology

<sup>1,3</sup> Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences

<sup>5</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Department of Hydrogeology

<sup>6</sup> Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences

<sup>1</sup> Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: vadim308g@mail.ru

<sup>2</sup> Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: frolova\_nl@mail.ru

<sup>3</sup> Senior Lecturer, Ph.D. in Geography; e-mail: sazonov.lesha@gmail.com

<sup>4</sup> Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: olupah@mail.ru

<sup>5</sup> Professor, D.Sc. in Geology; e-mail: sppoza@mail.ru

<sup>6</sup> Professor, Ph.D. in Geology; e-mail: wangping@igsnrr.ac.cn

The changes in annual precipitation, evaporation, river runoff, and potential evapotranspiration for 1946–1979 and 1980–2021 were considered for 225 catchments located in European Russia (ER) north of 48°N and without large reservoirs within their boundaries. The ER is generally characterized by higher values of all water balance components in 1980–2021 compared to 1946–1979. A slight increase in river runoff was found for the northern part of the ER, within the Arctic rivers basins and the basins of the Upper and Middle Volga River and the Baltic Sea. A decrease prevailed in the southern part, within the basins of Don, Ural and the Lower Volga rivers. The most notable change was an increase in runoff in the central part of the region. At the same time, its increase for most catchments exceeded the increase in precipitation – the median coefficient of runoff for 225 basins increased from 0,38 to 0,40. The modified Budyko's equation made it possible to calculate the dependence of the runoff coefficient on the degree of climate aridity for each basin in terms of  $\omega$ , which shows the part of precipitation spent on evaporation under a given value of the aridity index. The dependence did not change for the northern ER. The transformation of precipitation into runoff has become more effective in the central part, while in the southern part it became less effective. The spatial distribution of parameter  $\omega$  showed close relationships (determination coefficient more than 0,76) between the degree of synchrony of the maximum potential evapotranspiration and precipitation events, the proportion of forest cover and bare soil in the catchment, air temperatures in January-February, and the fraction of solid precipitation relative to the annual total. However, applying the derived dependence to estimate changes in  $\omega$  has led to unsatisfactory results, suggesting that the spatial parameters which determine  $\omega$  values do not control its temporal variability. Based on the estimated  $\omega$  value for the period of 1980–2021 and climatic scenarios of precipitation and evaporation changes the runoff change for the 21st century was calculated. It is expected that most of the rivers in the ER will increase their runoff in the 21st century regardless of climate change scenarios. On average, 76% of catchments will experience the same direction of river flow changes as in 1946–2021. The forecasted degree of changes will be close to observed during that period.

**Keywords:** European part of Russia, water balance, annual runoff, Budyko's formula, climate change

**Acknowledgements.** Analysis of river flow change was financially supported by the Russian Science Foundation (project no. 24-17-00102); methodological issues were also considered with the support of the RSF (project no. 24-17-00084).

### REFERENCES

- Barabanov A.T., Petelko A.I. Faktory sklonovogo vesnengo stoka na tyazhelykh lesnykh pochvakh tsentral'noy lesostepi [Factors of slope spring runoff on gray forest soils in the central forest-steppe], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2023, no. 4, p. 18–27. (In Russian)
- Varentsova N.A., Grechushnikova M.G., Povalishnikova E.S. et al. Vliyaniye klimaticheskikh i antropogennykh faktorov na vesennyi stok v bassejne Dona [Assessment of climatic and anthropogenic impact on spring runoff in the Don River basin], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2021, no. 5, p. 91–108. (In Russian)
- Grigoriev V.Yu., Millionshchikova T.D., Sazonov A.A., Chalov S.R. Otsenka vliyaniya izmeneniya klimaticheskikh parametrov na stok rek basseyna Baykala vo vtoroy polovine XX – nachale XXI vv. [Impact of changes in the main climatic parameters on river runoff in the Baikal Lake basin during the second half of the 20th and the early 21st century.], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2021, no. 5, p. 3–11. (In Russian)
- Grigoriev V.Yu., Frolova N.L., Kireyeva M.B., Stepanenko V.M. Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' oshibki vosproizvedeniya sloya osadkov reanalizom ERA5 na territorii Rossii [Spatial and Temporal Variability of ERA5 Precipitation Accuracy over Russia], *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk, Seriya Geograficheskaya*, 2022, no. 86(3), p. 435–446. (In Russian)
- Jeroen O. *Applied Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow: Concepts, Tools, and Techniques*

- for *Building Intelligent Systems*, 2nd ed., Moscow, Diagnostics-Williams Publ., 2020, 1040 p.
- Kalugin A.S. River runoff in the European Russia under global warming by 1.5 and 2 degrees Celsius, *Water Resources*, 2023, vol. 50, no. 4, p. 543-556.
- Magritsky D.V., Evstigneev V.M., Yumina N.M. et al. Izmeneniya stoka v bassejne r. Ural [Changes of runoff in the Ural River basin], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2018, no. 1, p. 90–101. (In Russian)
- Frolova N.L., Magritskiy D.V., Kireyeva M.B. et al. Streamflow of Russian Rivers under Current and Forecasted Climate Changes: A Review of Publications. 1. Assessment of Changes in the Water Regime of Russian Rivers by Observation Data, *Water Resources*, 2022, vol. 49, no. 3, p. 333–350.
- Amatulli G., Garcia M. J., Sethi T. et al. Hydrography 90 m: a new high-resolution global hydrographic dataset, *Earth Syst. Sci. Data*, 2022, vol. 14, p. 4525–4550, DOI: 10.5194/essd-14-4525-2022.
- James G., Witten D., Hastie T. et al. *An Introduction to Statistical Learning: with Applications in Python*, New York, Springer International Publishing, 2023, 607 p.
- Bai B., Huang Q., Wang P. et al. Long-Term Variability of the Hydrological Regime and Its Response to Climate Warming in the Zhizdra River Basin of the Eastern European Plain, *Water*, 2023, vol. 15, p. 2678, DOI: 10.3390/w15152678.
- Fick S.E., Hijmans R.J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas, *International Journal of Climatology*, 2017, vol. 37, no. 12, p. 4302–4315, DOI: 10.1002/joc.5086.
- Gan G., Liu Y., Sun G. Understanding interactions among climate, water, and vegetation with the Budyko framework, *Earth-Science Reviews*, 2021, vol. 212, 103451, DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103451.
- Hargreaves G.H., Samani Z.A. Estimating potential evapotranspiration, *J. Irrig. Drain. Eng.*, 1982, vol. 108, p. 225–230.
- Liu J., Zhang Q., Singh V.P. et al. Hydrological effects of climate variability and vegetation dynamics on annual fluvial water balance in global large river basins, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2018, vol. 22, no. 7, p. 4047–4060, DOI: 10.5194/hess-22-4047-2018.
- Kalugin A.S. The Impact of Climate Change on Surface, Subsurface, and Groundwater Flow: A Case Study of the Oka River (European Russia), *Water Resources*, 2019, vol. 46 (suppl. 2), p. 31–39, DOI: 10.1134/S0097807819080104.
- Zomer R.J., Xu J., Trabucco A. Version 3 of the Global Aridity Index and Potential Evapotranspiration Database, *Sci Data* 9, 2022, vol. 409, DOI: 10.1038/s41597-022-01493-1.

#### Web sources

- CMIP 6, CMIP6 downscaled future climate projections, URL: <https://worldclim.org/data/index.html> (access date 10.04.2023).
- Vegetation Continuous Fields, Vegetation Continuous Fields (VCF) Version 1 data product (VCF5KYR), NASA, URL: <https://lpdaac.usgs.gov/products/vcf5kyrv001/> (access date 15.05.2022).

Received 23.08.2024  
 Revised 10.09.2024  
 Accepted 15.10.2024