

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2024-1-135-151>

УДК 556.16+556.535

## Оценка климатического и антропогенного вкладов в многолетние колебания сезонного стока рек бассейна реки Урал

*Н.М. Юмина<sup>1,2</sup>, Д.В. Магрицкий<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва, Россия;*

*<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
географический факультет, г. Москва, Россия  
yuminanm@mail.ru*

Выполнен анализ многолетних колебаний сезонного стока рек бассейна реки Урал, оценены статистические связи между стоком и основными метеорологическими факторами, температурой воздуха и осадками. Выбраны метеостанции с наиболее тесной связью главных метеофакторов с сезонным стоком рек Урал, Сакмара и Илек. Для трех гидрологических постов, расположенных на этих реках, за период с минимальной антропогенной нагрузкой на водные ресурсы (слабо нарушенный сток) построены эмпирические зависимости сезонного стока от температуры воздуха и сумм осадков. Их статистический и графо-аналитический анализ показал, что для периода весеннего половодья и летне-осеннего сезона они имеют достаточно высокую тесноту связи, для периода зимней межени полученные зависимости гораздо менее точные. На основе построенных зависимостей для периода значительной антропогенной нагрузки на водные ресурсы региона выполнен сравнительный анализ рассчитанного (условно естественного) сезонного стока рек Урал, Сакмара и Илек с фактическим.

*Ключевые слова:* Урал, сезонный сток, температура воздуха, осадки, эмпирические зависимости, корреляция

## Assessment of the climatic and anthropogenic contribution to long-term fluctuations in seasonal river runoff in the Ural river basin

*N.M. Yumina<sup>1,2</sup>, D.V. Magritsky<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Hydrometeorological Research Center of Russian Federation,  
Moscow, Russia;*

*<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University,  
Faculty of Geography, Moscow, Russia  
yuminanm@mail.ru*

The analysis of long-term fluctuations in seasonal runoff of the Ural basin rivers is performed, statistical relationships between runoff and the main meteorological factors (air temperature and precipitation) are estimated. Weather stations with the highest correlation between the main meteorological factors and seasonal runoff of the Ural, Sakmara, and Ilek rivers are selected. Empirical dependences of seasonal runoff on air temperature and total precipitation are substantiated for three hydrological stations located on these rivers during the period with minimum anthropogenic load on water resources (slightly disturbed runoff).

Their statistical and graph-analytical analysis showed that they have a fairly high correlation for the period of spring flooding and the summer-autumn season, and the dependences for the period of winter low water are much less accurate. Based on the constructed dependences for a period of significant anthropogenic load on the water resources of the region, a comparative analysis of the calculated (undisturbed) seasonal runoff of the Ural, Sakmara, and Ilek rivers with the observed one is performed.

*Keywords:* Ural, seasonal runoff, air temperature, precipitation, empirical dependences, correlation

## Введение

Бассейн реки Урал – трансграничный объект, который характеризуется крайне неравномерным пространственно-временным распределением и, в целом, дефицитом водных ресурсов, наличием обширных засушливых районов и водоемкого социально-хозяйственного комплекса [6, 14, 16, 22]. Менее 4 млн чел. проживает на территории бассейна. Речная сеть хорошо развита в верхней и средней части бассейна. Основная роль в питании реки Урал принадлежит ее правым притокам, и прежде всего р. Сакмара. Хотя ее водосборная площадь занимает восьмую часть бассейна Урала, на ней формируется около 40 %, а в иные годы более половины суммарного стока нижнего Урала. В отличие от всех других крупных притоков р. Урал, Сакмара остается до настоящего времени практически незарегулированной рекой [21, 22]. Лишь с 2005 г. в верховьях реки функционирует сравнительно небольшое Сакмарское водохранилище объемом около 30 млн м<sup>3</sup>. Самую большую из всех притоков р. Урал водосборную площадь имеет река Илек – более 41 тыс. км<sup>2</sup>. По длине Илек уступает только Сакмаре. Превосходя Сакмару по площади бассейна на одну треть, он несет в Урал в 3,2 раза меньше воды, чем Сакмара.

Под влиянием климатических изменений и на фоне сравнительно устойчивых объемов водопользования водно-ресурсное обеспечение населения, промышленности, теплоэнергетики, сельского хозяйства и природных экосистем в бассейне р. Урал в последние 15–20 лет серьезно уменьшилось. Средняя водность периода с 2008 по 2020 г., по новым оценкам авторов, варьирует для разных рек и подбассейнов в пределах от 0,50 до 0,85 (средний модульный коэффициент), т. е. наблюдается глубокое маловодье. Это могло иметь негативное воздействие на общее состояние рек, особенно малых, на связанные с ними подземные воды, на работу водохранилищ, сельское хозяйство, водные и околородные биоценозы. Больше появилось вопросов относительно рационального и справедливого трансграничного водопользования: не все полагают, что текущее маловодье вызвано прежде всего климатическими нарушениями условий стокоформирования, а не деятельностью водохозяйственного комплекса на территории Российской Федерации, например, Ириклинского водохранилища и одноименной ГРЭС. Тем не менее в предыдущей работе, посвященной поиску и анализу связей годового стока рек бассейна Урала с метеорологическими показателями [24], авторы наглядно показали, что эта связь тесная,

и восстановленный с ее помощью естественный годовой сток для периода значительной антропогенной нагрузки демонстрирует, во-первых, минимальную разницу с фактическим стоком как раз с конца 1990-х и в начале XXI в., т. е. минимальное антропогенное влияние на сток, во-вторых, снижение годового стока с конца 2000-х гг. Это же подтверждают и другие исследования авторов, посвященные как изучению многолетней изменчивости стока рек в бассейне Урала [12], так и анализу водохозяйственной деятельности [10, 25, 26]. Это есть и в материалах сторонних специалистов [2–5, 18, 19].

Характер современных колебаний годового стока воды формирует изменения сезонного стока, перечень и иерархия факторов которого, как и уровень антропогенного воздействия на внутригодовой водный режим реки, другие. Наглядный и известный пример – влияние Ириклинского водохранилища на сток половодья и меженного сезона среднего Урала [6, 12, 15–17, 23]. Тем не менее климатический фактор многолетней изменчивости сезонного стока – один из основных по значимости, но оценить его вклад не совсем тривиальная задача. Либо необходимо использовать гидрологическое моделирование и делать оценки на основе моделей формирования стока на водосборе, либо построить эмпирические связи между стоком и основными метеорологическими факторами, влияющими на формирование стока. Именно второе решение выбрали авторы настоящего исследования.

Другая важная польза таких связей – это возможность рассчитать естественный сток, сравнение которого с наблюдаемыми значениями позволяет оценить величину антропогенной нагрузки на сток, поскольку открытых и полноценных данных водохозяйственного учета не так много, и к их достоверности для бассейна р. Урал имеются вопросы [10]. Кроме того, водохозяйственные данные публикуются главным образом с годовым осреднением, и такие связи – не просто альтернативный, а, по сути, единственный источник наших знаний о внутригодовой структуре водопользования. Третий момент связан с возможностью использовать подобные статистические связи для оценок будущего климатического изменения стока на основе данных климатического прогнозирования. В итоге, поиск и построение таких статистических связей, отбор для них оптимального числа предикторов (среди метеорологических факторов), проверка связей на тесноту и совпадение рассчитываемых по ним расходов воды с фактическими данными, сравнительный анализ восстановленного (условно естественного) и антропогенно нарушенного стока (за разные периоды) и стали целью и основными задачами приводимого исследования.

### **Материалы и методы исследования**

Для анализа связи сезонного стока рек с основными метеорологическими характеристиками были выбраны три гидрологических поста, расположенных на главной реке и ее основных притоках (р. Урал

– г. Оренбург, р. Сакмара – г. Каргала и р. Илек – пос. Веселый №1). Пост в г. Оренбург находится в нижнем бьефе Ириклинского водохранилища и в 9,6 км выше впадения в р. Урал р. Сакмары. Строительство Ириклинского водохранилища началось в 1949 г., агрегаты ГЭС были пущены в 1958 г., заполнение водохранилища завершилось в 1966 г. Таким образом, начиная с 1958 г. сток р. Урал в г. Оренбург становится зарегулированным. Наблюдения за водным режимом на гидрологическом посту начались в 1927–1930 гг. Пост на р. Сакмара в с. Каргала находится в 32 км от устья реки. Наблюдения за водным режимом на посту ведутся с 1920 г. Гидрологический пост на реке Илек в пос. Веселый №1 расположен ниже Актюбинского водохранилища на р. Илек (введено в эксплуатацию в 1988 г.) и Каргалинского водохранилища на р. Каргала (правый приток Илека, введено в эксплуатацию в 1975 г.). Таким образом, начиная с 1976 г. сток р. Илек становится зарегулированным. Ряд наблюдений за расходами воды на гидрологическом посту начинается с 1949 года.

В связи с тем, что годы начала значимой антропогенной нагрузки на водные ресурсы р. Урал и ее притоков различные, для решения задачи восстановления условно-естественного (ненарушенного) стока и сравнения его с фактическим (зарегулированным) стоком, для каждого выбранного гидрологического поста эмпирические зависимости строились за разные по продолжительности периоды, когда влияние хозяйственной деятельности было несущественным и основной вклад в колебания стока вносили климатические факторы. Для поиска связей стока с метеофакторами использованы среднемесячные и среднегодовые температуры воздуха, месячные и годовые слои осадков с метеорологических станций, расположенных в бассейне р. Урал. Период наблюдений за осадками и температурой воздуха на метеостанциях выбран с 1936 по 2020 г. Месячные суммы осадков взяты с учетом исключения из них систематических погрешностей осадкомерных приборов.

На основе корреляционного анализа метеофакторов, результаты которого приводятся в [24], а также с учетом совместной продолжительности гидрометеорологических рядов данных и близости расположения метеостанций к гидрологическим постам, для поиска связи сезонного стока рек бассейна Урала с основными метеофакторами и построения эмпирических зависимостей были выбраны две метеостанции: в г. Оренбург и с. Зилаир. Для построения зависимостей использовались годовые и месячные суммы осадков и среднегодовые и среднемесячные температуры воздуха.

Для построения зависимостей стока от основных метеорологических показателей за период незначительной антропогенной нагрузки на водные ресурсы для поста на р. Урал в г. Оренбург был выбран совместный период гидрометеорологических наблюдений с 1937 по 1957 г. продолжительностью 21 год; для поста на р. Сакмара в г. Каргала – с 1937 по 1965 г. (период наименьшего хозяйственного освоения бассейна и единой методики измерения осадков) продолжительностью 29 лет; для поста на р. Илек в пос. Веселый №1 – с 1949 по 1975 г. продолжительностью 27 лет.

Сезонный сток рек бассейна Урала подразделялся на сток половодья (апрель–июнь), летне-осенний сток (июль–октябрь) и зимний сток (ноябрь предыдущего года – март текущего года).

Основными методами обработки и анализа данных стали стандартные статистические расчеты с применением статистических критериев при 5%-ном уровне значимости. В качестве эмпирической зависимости сезонного стока от основных климатических факторов использовалась зависимость вида:

$$Q_{\text{пр}} = a_0 + \sum a_i x_i, \quad (1)$$

где  $a_0$  и  $a_i$  – коэффициенты регрессионной зависимости, полученные методом наименьших квадратов;  $x_i$  – предикторы. Если рассчитанный с помощью зависимости (1) сток окажется меньше минимального за весь период наблюдений стока, то расчетное значение стока следует заменять на данное минимальное значение стока. Предикторы подбирались отдельно для каждой зависимости исходя из наибольшей корреляции с предсказываемой величиной стока. В качестве предикторов рассматривались как годовые величины осадков и температуры воздуха на выбранных метеостанциях, так и различные комбинации месячных данных. Исходя из общей продолжительности совместных рядов гидрометеорологических наблюдений, число предикторов, входящих в эмпирические зависимости вида (1), подбиралось не более двух. Оценка качества полученных зависимостей оценивалось с помощью множественного коэффициента корреляции ( $R$ ), характеризующего тесноту линейной связи [1, 20].

### Результаты исследования и их обсуждение

Реки бассейна Урала, согласно классификации водного режима Б.Д. Зайкова [8], относятся к казахстанскому типу группы рек. Исключением составляют реки верховьев Урала и Сакмары, которые принадлежат к восточно-европейскому типу. Тем не менее и первый, и второй типы – это группа рек с хорошо выраженным весенним половодьем. Поэтому основное питание рек идет за счет талых снеговых вод (60–80 % объема годового стока); дождевые осадки составляют 2–12 %, подземные воды – 13–38 %. Основной фазой водного режима большинства рек бассейна является весеннее половодье, во время которого проходит 70–80 % годового стока. На летне-осенний период приходится 15–20 %, на период зимней межени – 5–10 % годового стока [6, 7, 16].

**Для периода весеннего половодья**, вносящего определяющий вклад в формирование годового стока, наиболее точные зависимости, как выяснено авторами, получаются при использовании в качестве предикторов суммы осадков за предшествующий период увлажнения и средней температуры воздуха за теплые месяцы, объединенных по двум метеостанциям (г. Оренбург и с. Зилаир). При этом для реки Сакмара основную роль

в колебаниях весеннего стока играют осадки. В табл. 1 приведен состав подобранных предикторов, вошедших в эмпирические зависимости для расчета сезонного стока рек бассейна Урала.

**Таблица 1.** Состав предикторов для расчета сезонного стока рек бассейна Урала

**Table 1.** Composition of predictors for calculating seasonal river runoff in the Ural basin

	$a_1$	$a_2$
Период весеннего половодья		
р. Урал – г. Оренбург	Сумма осадков по двум метеостанциям с сентября предыдущего года по март текущего года	Средняя по двум метеостанциям температура воздуха за предыдущий год (апрель-октябрь)
р. Сакмара – с. Каргала	Сумма осадков по двум метеостанциям за предыдущий год (май-сентябрь)	Сумма осадков по двум метеостанциям с октября предыдущего года по апрель текущего года
р. Илек – пос. Веселый №1	Сумма осадков по двум метеостанциям с сентября предыдущего года по март текущего года	Средняя по двум метеостанциям температура воздуха текущего года за март и апрель
Летне-осенний период		
р. Урал – г. Оренбург	Сумма осадков по двум метеостанциям за текущий год (май-июль)	Сумма осадков по двум метеостанциям с октября предыдущего года по апрель текущего года
р. Сакмара – с. Каргала	Сумма осадков по двум метеостанциям с сентября предыдущего года по март текущего года	Средняя по двум метеостанциям температура воздуха текущего года за теплый период (апрель-октябрь)
р. Илек – пос. Веселый №1		
Зимний период		
р. Урал – г. Оренбург	Сумма осадков по двум метеостанциям за предыдущий год (апрель-ноябрь)	Средняя температура воздуха по двум метеостанциям за предыдущий год (апрель-октябрь)
р. Сакмара – с. Каргала		
р. Илек – пос. Веселый №1	Сумма осадков по двум метеостанциям за предыдущий год (октябрь-ноябрь)	Средняя по двум метеостанциям температура воздуха текущего года за март и апрель

В табл. 2 приведены значения полученных методом наименьших квадратов коэффициентов регрессии ( $a_i$ ), а также множественного коэффициента корреляции ( $R$ ), характеризующего тесноту построенной зависимости. Согласно последнему, все зависимости для расчета весеннего стока рек бассейна Урала получились достаточно тесные. Множественный коэффициент корреляции между фактическими расходами воды и построенными

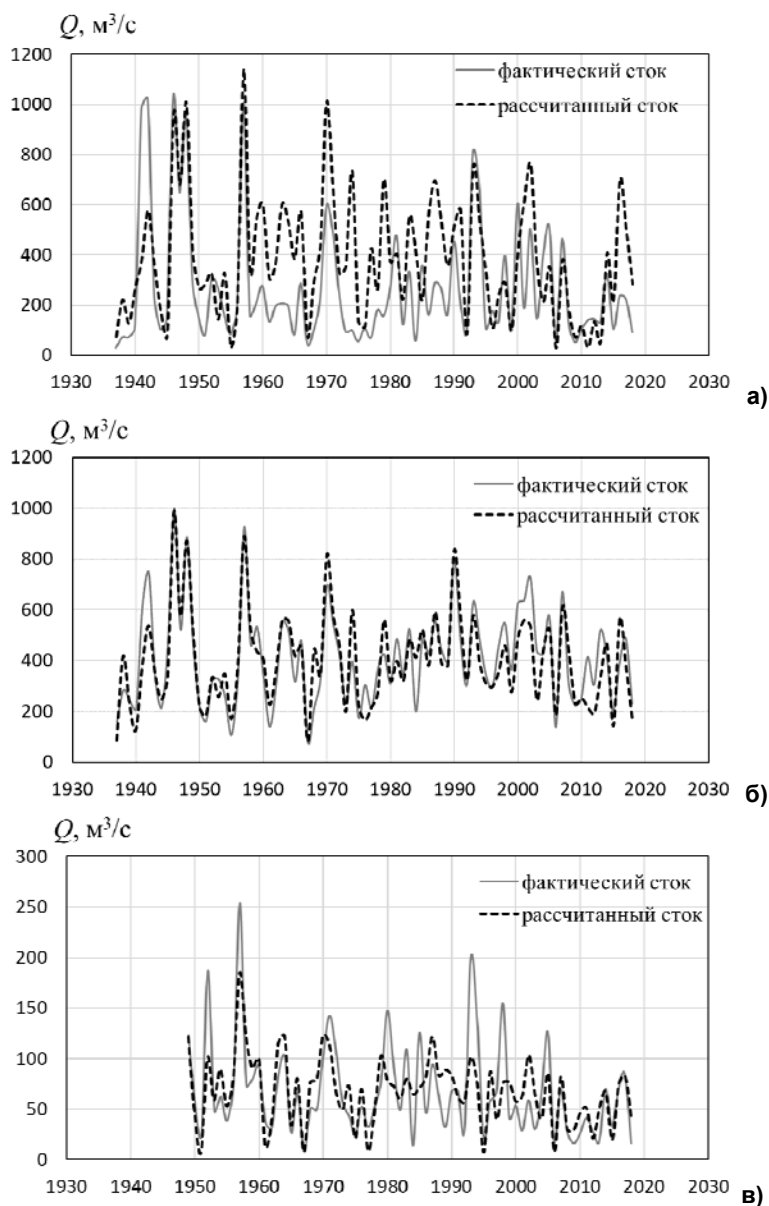
зависимостями ( $R$ ) достаточно высок и равен 0,83–0,93. При этом наиболее тесная зависимость получена для р. Сакмара, самой незарегулированной реки бассейна Урала, а для гораздо меньшей по водности реки Илек получена менее тесная зависимость.

**Таблица 2.** Параметры эмпирических зависимостей для расчета сезонного стока рек бассейна Урала и оценка их качества

**Table 2.** Parameters of empirical dependencies for calculating seasonal river runoff in the Ural basin and assessment of their quality

	Период	$n$	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$R$
Период весеннего половодья						
р. Урал – г. Оренбург	1937-1957	21	1693	1,19	-145	0,85
р. Сакмара – с. Каргала	1937-1965	29	-484	0,60	1,03	0,93
р. Илек – пос. Веселый №1	1949-1975	27	-51,0	0,18	-7,54	0,83
Летне-осенний период						
р. Урал – г. Оренбург	1937-1957	21	-52,7	0,16	0,07	0,85
р. Сакмара – с. Каргала	1937-1965	29	267	0,06	-20,4	0,91
р. Илек – пос. Веселый №1	1949-1975	27	8,55	0,004	-0,59	0,84
Зимний период						
р. Урал – г. Оренбург	1937-1957	21	47,2	0,03	-3,67	0,62
р. Сакмара – с. Каргала	1937-1965	29	55,5	0,07	-5,27	0,72
р. Илек – пос. Веселый №1	1949-1975	27	-1,78	0,04	2,05	0,61

Сравнение восстановленного и фактического стока показало следующие результаты. Начавшееся в 1958 г. заполнение Ириклинского водохранилища и нарастающее до 1970-1980-х гг. водопотребление привели к уменьшению весеннего стока р. Урал в г. Оренбург в среднем на 40 %, дисперсия стока за период половодья также уменьшилась примерно на 40 % (рис. 1а). При этом наибольшая разница (в 1,7–2,5 раза) между рассчитанным и фактическим (нарушенным) весенним стоком р. Урал наблюдалась в период до 1990-х гг., особенно в 1960-х и 1970-х гг. В 1990-х и 2000-х гг. эта разница не превышает 15 %, что может быть связано как с наблюдаемыми климатическими изменениями в регионе и их возрастающей ролью в колебаниях весеннего стока р. Урал, так и с существенным сокращением водопотребления на водосборе [9–11]. В последнее десятилетие наблюдаемый сток р. Урал опять становится существенно меньше рассчитанного. В табл. 3 приведено сравнение рассчитанного (условно-естественного) и фактического (в период значительной антропогенной нагрузки на водные ресурсы) сезонного стока рек бассейна Урала по десятилетиям.



**Рис. 1.** Сравнение фактического и рассчитанного стока рек бассейна Урала за период весеннего половодья: р. Урал – г. Оренбург (а); р. Сакмара – с. Каргала (б); р. Илек – пос. Веселый №1 (в).

**Fig. 1.** Comparison of the actual and calculated river runoff of the Ural basin during the spring flood period: the Ural River – Orenburg (а); the Sakmara River – Kargala (б); the Ilek River – Veselyy no. 1 (в).



Для р. Сакмара за период после 1965 г. различия среднего и дисперсии рассчитанного и фактического весеннего стока незначительные и не превышают 10 % (рис. 16). Это подтверждает тезис о незначительной вплоть до настоящего времени степени влияния хозяйственной деятельности на весенний сток реки, а также о существенном вкладе в колебания стока за половодье климатических факторов, преимущественно осадков. С началом 2000-х гг. разница рассчитанного и фактического весеннего стока р. Сакмара стала возрастать, не превышая при этом 20 % (табл. 3). Возможное объяснение этого – значительные климатически обусловленные изменения формирования стока в регионе и, как следствие, нарушение ранее существовавших связей [10, 11, 13]. Это требует дополнительных исследований в отношении возможностей использования полученной (по данным до 1965 г.) эмпирической зависимости для текущего и будущего периодов.

**Таблица 3.** Сравнение фактического и рассчитанного сезонного стока рек бассейна Урала в период значительной антропогенной нагрузки  
**Table 3.** Comparison of the actual and calculated seasonal river runoff in the Ural basin during a period of significant anthropogenic load

Период	Период весеннего половодья				Летне-осенний период			
	Факт, м <sup>3</sup> /с	Расчет, м <sup>3</sup> /с	Разница		Факт, м <sup>3</sup> /с	Расчет, м <sup>3</sup> /с	Разница	
			м <sup>3</sup> /с	%			м <sup>3</sup> /с	%
р. Урал – г. Оренбург								
1960-1969	175	418	-243	-139	45,2	38,1	7,1	16
1970-1979	210	474	-263	-125	31,3	38,1	-6,8	-22
1980-1989	250	434	-183	-73	31,4	31,0	0,4	1
1990-1999	316	354	-37,5	-12	45,4	38,3	7,2	16
2000-2009	305	338	-32,9	-11	58,5	40,8	17,7	30
2010-2019	168	272	-105	-62	42,2	18,8	23,3	55
р. Сакмара – с. Каргала								
1970-1979	377	410	-34	-9	48,5	47,6	1,0	2
1980-1989	417	421	-4	-1	55,3	42,5	12,8	23
1990-1999	471	441	30,2	6	63,9	41,1	22,8	36
2000-2009	477	426	50,7	11	63,2	31,9	31,3	49
2010-2019	357	302	56	16	38,5	20,3	18,2	47
р. Илек – пос. Веселый №1								
1980-1989	77,0	80,6	-3,5	-5	8,2	3,9	4,3	53
1990-1999	84,3	66,7	17,5	21	15,8	3,6	12,2	77
2000-2009	49,2	56,5	-7,3	-15	12,5	3,4	9,1	73
2010-2019	42,6	50,6	-7,9	-19	8,8	2,8	6,0	68

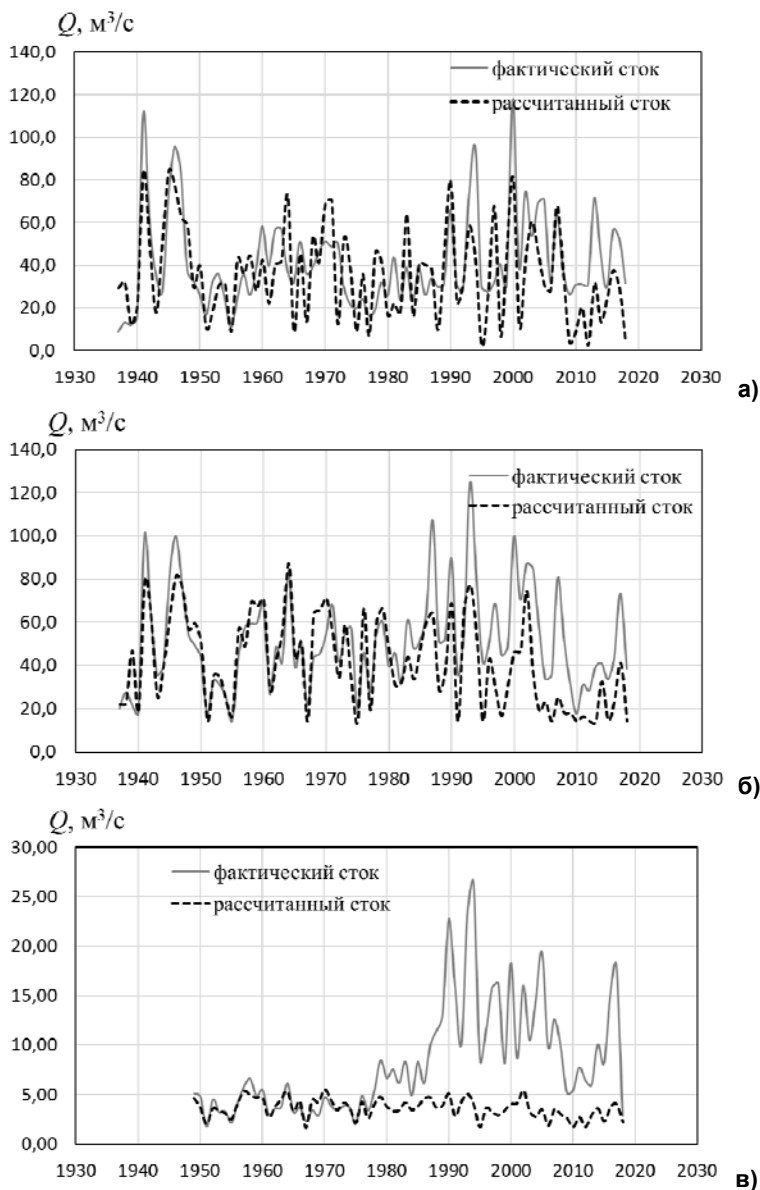
Весенний сток р. Илек, рассчитанный за период после 1975 г., в среднем не отличается от наблюдаемого, дисперсия же рассчитанного (условно-естественного) весеннего стока в 3 раза меньше дисперсии фактического (зарегулированного) стока р. Илек (рис. 1в). Наибольшие различия среднего и особенно дисперсии рассчитанного и фактического стока за половодье р. Илек наблюдаются в 1980-х и 1990-х гг., в первые десятилетия после введения в эксплуатацию Каргалинского и Актюбинского водохранилищ.

**Для периода летне-осенней межени** наиболее точные зависимости стока рек бассейна Урала были получены при использовании в качестве предикторов суммы осадков за предшествующий период увлажнения и средней температуры воздуха за теплый период текущего года (табл. 1). При этом для самой р. Урал вклад в колебания летне-осеннего стока температуры воздуха оказался несущественным и основную роль здесь играют осадки. Все построенные зависимости для расчета летне-осеннего стока рек бассейна Урала получились достаточно тесные (табл. 2). Множественный коэффициент корреляции между фактическими расходами воды и построенными зависимостями ( $R$ ) достаточно высок и равен 0,84–0,91. Так же как и для весеннего стока, наиболее тесная зависимость получена для р. Сакмара, самой незарегулированной реки бассейна Урала, а для гораздо меньшей по водности р. Илек получена менее тесная зависимость.

Активная хозяйственная деятельность в бассейне Урала привела к существенным изменениям летне-осеннего стока основных рек бассейна. Строительство Ириклинского водохранилища на р. Урал привело к увеличению летне-осеннего стока в среднем на 22 % и уменьшению его дисперсии на 16 % (рис. 2а). Наибольшие изменения стока р. Урал по сравнению с рассчитанным стоком за летне-осенний сезон характерны для периода после начала 1990-х гг., когда превышение фактически наблюдаемого стока над расчетным увеличилось к 2010 г. до двух раз (табл. 3). Увеличение летне-осеннего стока может быть связано со значительным сокращением водопотребления на водосборе реки [9–11] при регулировании стока выше-расположенными водохранилищами.

Летне-осенний сток р. Сакмара за период после 1965 г. в среднем примерно на 40 % превышает рассчитанный сток, при этом разница дисперсии фактического и рассчитанного стока не столь значительна и не превышает 20 % (рис. 2б). Начиная с 1980-х гг. отличие наблюдаемого летне-осеннего стока р. Сакмара от рассчитанного (условно-ненарушенного) стока стало возрастать, и после 2000 г. это превышение составляет около 2 раз (табл. 3). Связано это может быть как со значительными климатически обусловленными изменениями формирования стока в регионе и, как следствие, нарушением ранее существовавших связей [10, 11, 13], так и с хозяйственной деятельностью на водосборе реки, в большей степени проявляющейся

в летне-осенний период, нежели чем в период весеннего половодья или в целом за год.



**Рис. 2.** Сравнение фактического и рассчитанного стока рек бассейна Урала за летне-осенний период: р. Урал – г. Оренбург (а); р. Сакмара – с. Каргала (б); р. Илек – пос. Веселый №1 (в).

**Fig. 2.** Comparison of the actual and calculated river runoff of the Ural basin for the summer-autumn period: the Ural River – Orenburg (а); the Sakmara River – Kargala (б); the Ilek River –Veselyy no.1 (в)

Все это требует дополнительных исследований в отношении возможностей использования полученной (по данным до 1965 г.) эмпирической зависимости для текущего и будущего периодов.

Летне-осенний сток р. Илек после 1975 г. претерпел значительные изменения по сравнению с предыдущим периодом (до 1975 г.), в среднем наблюдаемый сток в 3 раза превышает рассчитанный (условно-ненарушенный) сток, дисперсия его также гораздо больше дисперсии условно-ненарушенного стока (рис. 2в). Наибольшие различия (в 4,5 раза) рассчитанного и фактического летне-осеннего стока р. Илек наблюдаются в конце 1980-х и в первой половине 1990-х гг., в первое десятилетие после введения в эксплуатацию Актюбинского водохранилища.

**Для периода зимней межени** более-менее точные зависимости стока рек Урал и Сакмара были получены при использовании в качестве предикторов суммы осадков за предшествующий период увлажнения и средней температуры воздуха за теплый период предыдущего года (табл. 1). Для р. Илек зависимости были построены на основе использования сумм осадков за осенние месяцы предыдущего года и средней температуры воздуха за весенние месяцы текущего года. Теснота построенных зависимостей невысокая (табл. 2). Множественный коэффициент корреляции между фактическими расходами воды и построенными зависимостями ( $R$ ) равен 0,61–0,72. Низкое качество расчетов, основанных на использовании метеорологических величин, обусловлено значительной долей в формировании зимнего стока рек грунтового питания, не учитываемого при построении методик расчета.

В этой ситуации можно дать лишь очень приблизительные оценки изменения зимнего стока рек бассейна Урала под влиянием хозяйственной деятельности. Так, для р. Урал за период после 1958 г., когда было введено в эксплуатацию Ириклинское водохранилище, зимний сток в 3 раза превышает рассчитанный по климатическим показателям сток, а дисперсия наблюдаемого стока превышает дисперсию рассчитанного стока в 7 раз. Для р. Сакмара за период после 1965 г. превышение фактического стока над рассчитанным составляет 1,5 раза в среднем и в 2 раза по дисперсии. При этом с конца 1980-х гг. наблюдаемый зимний сток превышает рассчитанный примерно в 2 раза. Для гораздо меньшей по водности р. Илек наблюдаемый в зимний период сток отличается от рассчитанного лишь по дисперсии, что в 1,5 раза больше.

### Выводы

В рамках проделанной работы удалось получить эмпирические зависимости сезонного стока основных рек бассейна Урала от основных климатических факторов. Зависимости подбирались по данным для периода с минимальной антропогенной нагрузкой на сток рек, что позволило впоследствии для современного периода рассчитать так называемый

условно-ненарушенный сток. Точность построенных зависимостей для периода весеннего половодья и летне-осенней межени высокая.

При сравнении восстановленного условно-естественного стока с фактическим показано, что строительство водохранилищ на р. Урал привело к уменьшению весеннего стока в среднем на 40 %, увеличению летне-осеннего стока на 22 % и зимнего стока примерно в 3 раза. Дисперсия стока половодья уменьшилась на 40 %. Для летне-осеннего сезона наблюдается небольшое уменьшение дисперсии ( $< 20\%$ ), а для зимнего сезона дисперсия наблюдаемого стока в несколько раз больше. Наибольшая разница между наблюдаемым и рассчитанным весенним стоком фиксируется в 1960–1970-х гг., т. е. в первые десятилетия после ввода Ириклинского водохранилища. Для летне-осеннего периода наибольшие изменения стока наблюдаются после 1990 г., когда превышение наблюдаемого стока над расчетным увеличилось к 2010 г. двухкратно. Последнее можно объяснить значительным сокращением водопотребления на водосборе реки в условиях сохраняющегося регулирования стока.

Рассчитанный за сезон весеннего половодья сток р. Сакмара, самого крупного и незарегулированного притока р. Урал, незначимо отличается от фактически наблюдаемого, что говорит о незначительном хозяйственном влиянии на весенний сток реки. В летне-осенний сезон фактический сток р. Сакмара после 1965 г. увеличился в среднем на 40 % по сравнению с ненарушенным стоком. При этом дисперсия изменилась незначительно – в пределах 20 %. Превышение наблюдаемого стока над рассчитанным после 1980 г. постепенно возрастает и за период после 2000 г. увеличивается до 2 раз, что может быть связано как со значительными климатически обусловленными изменениями формирования стока в регионе, так и с хозяйственной деятельностью на водосборе реки, в большей степени проявляющейся в летне-осенний период, нежели чем во время весеннего половодья или в целом за год. Зимний наблюдаемый сток примерно в 1,5 раза превышает рассчитанный; превышение по дисперсии составляет около 2 раз.

Для р. Илек, второго по величине притока р. Урал с гораздо меньшей водностью, чем у Сакмары, разница фактического и рассчитанного стока за весеннее половодье в среднем незначительная, при этом дисперсия наблюдаемого весеннего стока в 3 раза превышает дисперсию рассчитанного весеннего стока. Летне-осенний сток под влиянием хозяйственной деятельности (период после 1975 г.) в среднем увеличился в 3 раза по сравнению с рассчитанным стоком; дисперсия стока при этом также в разы увеличилась. Наибольшие различия рассчитанного и фактического весеннего и летне-осеннего стока наблюдаются в 1980-х и 1990-х гг., в первые десятилетия после введения в эксплуатацию Каргалинского и Актюбинского водохранилищ. Зимний наблюдаемый сток отличается от рассчитанного только по дисперсии, что примерно в 1,5 раза больше.

Таким образом, хозяйственная деятельность в бассейне р. Урал привела к внутригодовому перераспределению стока основных рек бассейна.

Значительные изменения стока произошли на самой р. Урал, характеризующиеся уменьшением стока в период весеннего половодья и увеличением стока в летне-осенний и особенно зимний периоды. Для р. Сакмара наблюдается увеличение среднего значения и размаха колебаний летне-осеннего и зимнего стока. В летне-осенний период также значительно увеличился сток р. Илек. При этом для сезонного стока р. Илек характерно существенное увеличение его дисперсии.

### Благодарность

Исследование выполнено в рамках темы государственного задания I.10, ЦИТИС 121051400038-1.

**Acknowledgments:** The research was carried out within the framework of the topic of state assignment I.10, CITIS 121051400038-1.

### Список литературы

1. *Борщ С.В., Христофоров А.В.* Оценка качества прогнозов речного стока // Труды Гидрометцентра России. 2015. Специальный выпуск 355. 198 с.
2. *Васильев Д.Ю., Бабков О.К., Давлиев И.Р., Семенов В.А., Христуло О.И.* Пространственно-временная структура колебаний приземной температуры на Южном Урале // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31, № 4. С. 294-302.
3. *Васильев Д.Ю., Водопьянов В.В., Закирзянов Ш.И., Кенжебаева А.Ж., Семенов В.А., Сивохин Ж.Т.* Корреляционные связи многолетних колебаний месячного и годового стока в бассейне реки Урал // Известия РАН. Серия географическая. 2020. Том 84, № 3. С. 414-426.
4. *Васильев Д.Ю., Павлейчик В.М., Семенов В.А., Сивохин Ж.Т., Чибилёв А.А.* Многолетний режим температуры воздуха и атмосферных осадков на территории Южного Урала // Доклады Академии наук. 2018. Т. 478, № 5. С. 588-592. DOI: 10.7868/S0869565218050201
5. *Васильев Д.Ю., Сивохин Ж.Т., Чибилёв А.А.* Динамика климата и внутриведовые колебания стока в бассейне реки Урал // Доклады Академии наук. 2016. Т. 469, № 1. С. 102-107. DOI: 10.7868/S0869565216190245.
6. Вода России. Речные бассейны. Екатеринбург: АКВА-ПРЕСС, 2000. 536 с.
7. Водные ресурсы России и их использование. СПб: ГГИ, 2008. 598 с.
8. *Давыдов Л.К.* Гидрография СССР (Воды суши). Л.: ЛГУ, 1955. 600 с.
9. *Дёмин А.П.* Использование водных ресурсов России: современное состояние и перспективные оценки: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. М., 2011. 51 с.
10. *Магрицкий Д.В.* Водохозяйственная деятельность в российской части бассейна р. Урала: прошлое и настоящее // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: Труды IX Всероссийской научно-практической конференции. Пермь, 2023. С. 270-275.
11. *Магрицкий Д.В., Евстигнеев В.М., Юмина Н.М., Торопов П.А., Кенжебаева А.Ж., Ермакова Г.С.* Изменения стока в бассейне р. Урал // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2018. № 1. С. 90-101.
12. *Магрицкий Д.В., Кенжебаева А.Ж.* Закономерности, характеристики и причины изменчивости годового и сезонного стока воды рек в бассейне р. Урал // Наука. Техника. Технология (политехнический вестник). Краснодар: Издательский Дом-Юг, 2017. №. 3. С. 39-61.

13. Магрицкий Д.В., Кенжебаева А.Ж., Юмина Н.М., Морейдо В.М., Ефимова Л.Е. Климатические изменения и водохозяйственная деятельность в бассейне р. Урал и их влияние на водный режим рек // Степи Северной Евразии: материалы IX международного симпозиума. Т. 1. Оренбург, 2021. С. 1008-1009.
14. Национальный атлас России. Т. 2. М., 2007. 496 с.
15. Павлейчик В.М., Сивохин Ж.Т. Водно-хозяйственные и трансграничные аспекты регулирования стока в бассейне реки Урал // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2012. Т. 14, № 1 (9). С. 2367-2371.
16. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 12. Нижнее Поволжье и Западный Казахстан. Вып. 2. Урало-Эмбинский район. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 515 с.
17. Сивохин Ж.Т. Трансграничные аспекты регулирования стока в бассейне р. Урал // Степи Северной Евразии: материалы VI международного симпозиума и VIII междунар. школы-семинара молодых ученых «Геоэкологические проблемы степных районов». Оренбург, 2012. С. 671-674.
18. Сивохин Ж.Т. Устойчивое водопользование как фактор гидроэкологической безопасности в трансграничном бассейне р. Урал // Вестник Оренб. гос. ун-та. 2016. № 7 (195). С. 78-84.
19. Сивохин Ж.Т., Павлейчик В.М. Современные тенденции изменения климата в бассейне реки Урал // Известия Иркутского гос. ун-та. Сер. Науки о Земле. 2022. Т. 41. С. 106-117.
20. Христофоров А.В. Надежность расчетов речного стока. М.: Издательство МГУ, 1993. 166 с.
21. Чибилев А.А. Река Урал. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 168 с.
22. Чибилев А.А. Бассейн Урала: история, география, экология. Екатеринбург, 2008. 312 с.
23. Чибилёв А.А., Сивохин Ж.Т. Урало-Каспийский трансграничный бассейн: современное геоэкологическое состояние и перспективы российско-казахстанского сотрудничества // Современные проблемы аридных и семиаридных экосистем юга России: Сб. научн. Статей. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2006. С. 290-301.
24. Юмина Н.М., Магрицкий Д.В. Обоснование и анализ статистических зависимостей годового стока рек бассейна Урала от метеорологических показателей // Вопросы степеведения. 2023. № 3. С. 13-25. DOI: 10.24412/2712-8628-2023-3-13-25.
25. Юмина Н.М., Магрицкий Д.В., Ефимова Л.Е. Проблемы водопользования в низовьях реки Урал (Жайык) // Трансграничные водные объекты: использование, управление, охрана: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, г. Сочи, 20-25 сентября 2021 г. Новочеркасск: Лик, 2021. С. 402-406.
26. Magritsky D.V., Kenzhebaeva A.K., Yumina N.M., Efimova L.E., Moreido V.M. Climatic changes and water management in the Ural River basin and their impact on the river water regime // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 817. P. 1-10. DOI: 10.1088/1755-1315/817/1/012062.

## References

1. Borsch S.V., Khristoforov A.V. Hydrologic flow forecast verification. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2015, vol. 355, 198 p. [in Russ.].

2. Vasil'ev D.Yu., Babkov O.K., Davliev I.R., Semenov V.A., Christodulo O.I. Spatio-temporal structure of surface air temperature fluctuations in the Southern Urals. *Optika Atmosfery i Okeana [Atmospheric and Oceanic Optics]*, 2018, vol. 31, no. 04, pp. 294-302. DOI: 10.15372/AOO20180408 [in Russ.].
3. Vasil'ev D.Yu., Vodopyanov V.V., Zakirzyanov Sh.I., Kenzhebaeva A.Zh., Semenov V.A., Sivohip Zh.T. Correlation of the Monthly and Annual Runoff Multiple-Year Variation in the Ural River Basin. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geography]*, 2020, vol. 84, no. 3, pp. 414-426. DOI: 10.31857/S2587556620030103 [in Russ.].
4. Vasil'ev D.Y., Chibilev A.A., Pavleychik V.M., Sivohip J.T., Semenov V.A. The long-term pattern of temperature and precipitation in the southern Urals. *Doklady Earth Sciences*. 2018, vol. 478, no. 2, pp. 245-249.
5. Vasil'ev D.Y., Sivohip J.T., Chibilev A.A. Climate dynamics and interdecadal discharge fluctuations in the Ural river basin. *Doklady Earth Sciences*, 2016, vol. 469, no. 1, pp. 710-715.
6. Voda Rossii. Rechnye basseyny. Ekaterinburg [Water of Russia. River catchments]. Ekaterinburg, AKVA-PRESS, 2000, 536 p. [in Russ.].
7. Vodnye resursy Rossii i ih ispol'zovanie. Saint Petersburg, GGI, 2008, 598 p. [in Russ.].
8. Davydov L.K. *Gidrografiya SSSR (Vody sushi)*. Leningrad, LGU, 1955, 600 p. [in Russ.].
9. Demin A.P. *Ispol'zovanie vodnykh resursov Rossii: sovremennoe sostoyanie i perspektivnye ocenki: Avtoref. dis. ... d-ra geogr. nauk*. Moscow, 2011, 51 p. [in Russ.].
10. Magrickiy D.V. *Vodohozyaystvennaya deyatel'nost' v rossiyskoy chasti basseyna r. Urala: proshloe i nastoyashchee. Sovremennye problemy vodohranilishch i ih vodosborov: Trudy IX Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferencii. Perm'*, 2023, pp. 270-275 [in Russ.].
11. Magritskiy D.V., Evstigneev V.M., Yumina N.M., Toropov P.A., Kenzhebaeva A.Zh., Ermakova G.S. Changes of runoff in the Ural river basin. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya*, 2018, vol. 1, no. 1, pp. 90-101 [in Russ.].
12. Magrickiy D.V., Kenzhebaeva A.Zh. *Zakonomernosti, harakteristiki i prichiny izmenchivosti godovogo i sezonnogo stoka vody rek v basseyne r. Ural. Nauka. Tekhnika. Tekhnologiya (politekhnikheskiy vestnik)*. Krasnodar: Izdatel'skiy Dom-YUG publ., 2017, no. 3, pp. 39-61 [in Russ.].
13. Magrickiy D.V., Kenzhebaeva A.ZH., YUmina N.M., Moreydo V.M., Efimova L.E. *Klimaticheskije izmeneniya i vodohozyaystvennaya deyatel'nost' v basseyne r. Ural i ih vliyanie na vodnyy rezhim rek. Stepi Severnoy Evrazii: materialy IX mezhdunarodnogo simpoziuma. T. 1. Orenburg*, 2021, pp. 1008-1009 [in Russ.].
14. *Nacional'nyy atlas Rossii [The National Atlas of Russia]*. Moscow, 2007, vol. 2, 496 p. [in Russ.].
15. Pavleychik V.M., Sivohip J.T. Water economic and transboundary aspects of regulation the Ural river basin flow. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossiyskoy akademii nauk [Izvestia RAS SamSC]*, 2012, vol. 14, no. 1(9), pp. 2367-2371 [in Russ.].
16. *Resursy poverhnostnykh vod SSSR. T. 12. Nizhnee Povolzh'e i Zapadnyy Kazahstan. Vyp. 2. Uralo-Embinskiy rayon*. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1970, 515 p. [in Russ.].
17. Sivohip Zh.T. *Transgranichnyye aspekty regulirovaniya stoka v basseyne r. Ural // Stepi Severnoy Evrazii: materialy VI mezhdunarodnogo simpoziuma i VIII mezhdunar. shkoly-seminara molodykh uchenykh «Geoekologicheskije problemy stepnykh rayonov»*. Orenburg, 2012, pp. 671-674 [in Russ.].



18. *Sivohip Zh.T.* Ustoychivoe vodopol'zovanie kak faktor gidroekologicheskoy bezopasnosti v transgranichnom bassejne r. Ural. *Vestnik Orenb. gos. un-ta.*, 2016, vol. 195, no. 7, pp. 78-84 [in Russ.].

19. *Sivohip Zh.T., Pavleychik V.M.* Current Climate Change Trends in the Ural River Basin. *Izvestiya Irkutskogo Gos.Universiteta. Seriya Nauki o zemle [The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences]*, 2022, vol. 41, pp. 106-117. DOI: 10.26516/2073-3402.2022.41.106 [in Russ.].

20. *Khristoforov A.V.* Nadezhnost' raschetov rechnogo stoka. Moscow, MSU publ., 1993, 166 p. [in Russ.].

21. *Chibilev A.A.* Reka Ural [The Ural River]. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1987, 168 p. [in Russ.].

22. *Chibilev A.A.* Basseyn Urala: istoriya, geografiya, ekologiya. Ekaterinburg, 2008, 312 p. [in Russ.].

23. *Chibilev A.A., Sivohip Zh.T.* Uralo-Kaspiyskiy transgranichnyy basseyn: sovremennoe geokologicheskoe sostoyanie i perspektivy rossiysko-kazahstanskogo sotrudnichestva // *Sovremennye problemy aridnyh i semiaridnyh ekosistem yuga Rossii: Sb. nauchn. Statey.* Rostov-na-Donu, YUNC RAN publ., 2006, pp. 290-301 [in Russ.].

24. *Yumina N. M., Magritsky D.V.* Substantiation and analysis of statistical dependencies of the annual runoff of the rivers of the Ural basin on meteorological indicators. *Voprosy stepovedeniya [Steppe Science]*, 2023, no. 3, pp. 13-25. DOI: 10.24412/2712-8628-2023-3-13-25 [in Russ.].

25. *Yumina N.M., Magrickiy D.V., Efimova L.E.* Problemy vodopol'zovaniya v nizov'yah reki Ural (ZHayyk) // *Transgranichnye vodnye ob'ekty: ispol'zovanie, upravlenie, ohrana: sbornik materialov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem*, g. Sochi, 20-25 sentyabrya 2021 g. Novochoerkassk, Lik publ., 2021, pp. 402-406 [in Russ.].

26. *Magritsky D.V., Kenzhebaeva A.K., Yumina N.M., Efimova L.E., Moreido V.M.* Climatic changes and water management in the Ural River basin and their impact on the river water regime. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 817, pp. 1-10. DOI: 10.1088/1755-1315/817/1/012062.

*Поступила 19.02.2024; одобрена после рецензирования 15.03.2024;  
принята в печать 10.04.2024.*

*Submitted 19.02.2024; approved after reviewing 15.03.2024;  
accepted for publication 10.04.2024.*