

УДК 556.535

## ИЗМЕНЕНИЕ МИНИМАЛЬНОГО СТОКА В БАССЕЙНЕ РЕКИ УРАЛ

© 2021 г. Ж. Т. Сивохи́п<sup>а</sup>, \*, В. М. Павлейчик<sup>а</sup>, Ю. А. Падалко<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт степи УрО РАН, Оренбург, Россия

\*e-mail: sivohip@mail.ru

Поступила в редакцию 16.11.2020 г.

После доработки 29.08.2021 г.

Принята к публикации 07.09.2021 г.

Рассмотрены особенности трансформации параметров минимального стока в бассейне р. Урал с учетом современных тенденций изменения водного режима рек Европейской территории России. Проблема пространственно-временных изменений речного стока (в том числе и минимального) особенно актуальна для регионов с недостаточным и неустойчивым увлажнением. К подобным территориям относится бассейн р. Урал, большая часть которого расположена в пределах степной, полупустынной и пустынной зон. Проведен анализ динамики среднемесячных и 30-суточных расходов воды периода низкого стока для рек исследуемого бассейна. Установлены изменения параметров маловодных фаз, в частности, смещение дат наступления периода минимального 30-суточного стока летне-осенней и зимней межени. Представлены статистические характеристики минимального стока зимнего сезона в бассейне р. Урал в различные периоды с 1950 по 2018 г. Отмечено устойчивое сокращение изменчивости минимального стока маловодных фаз, в первую очередь, зимней межени. Актуализирована необходимость учета современной динамики минимального стока для решения задач сохранения и комплексного использования водных ресурсов трансграничных речных бассейнов степной зоны.

*Ключевые слова:* водный режим, степная зона, минимальный сток, межень, маловодный период, нулевой сток, использование водных ресурсов

DOI: 10.31857/S2587556621060133

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Водный режим рек отражает сезонную специфику поступления воды из речного бассейна, обуславливающую устойчивое чередование фаз повышенного и пониженного стока. В условиях значительных колебаний стока актуальной водохозяйственной проблемой является обеспечение гарантированных объемов воды для нужд экономики и населения. Соответственно, чем менее значительны вариации годового и экстремального стока воды, тем реальнее возможность организации экономически эффективного и экологически безопасного водопользования (Закономерности ..., 2012), в том числе и в лимитирующий период.

Характерная тенденция современного водного режима, установленная для большинства рек Европейской территории России (ЕТР) заключается в сокращении доли весеннего стока и увеличении доли стока маловодных периодов, что приводит к выравниванию годового гидрографа (Болгов и др., 2014; Георгиади и др., 2016; Джамалов и др., 2015; Дмитриева, Нефедова, 2018; Магрицкий и др., 2018; Сивохи́п и др., 2018; Фролова и др., 2010; Sivokhip et al., 2017). Основная причина данной

трансформации — существенный многолетний рост значений приземной температуры воздуха в холодный сезон с закономерным увеличением частоты оттепелей и расходов зимней межени (Джамалов и др., 2017; Закономерности ..., 2012). Кроме того, наблюдаемые гидрофизические процессы приводят к увеличению естественных (возобновляемых) ресурсов подземных вод (Джамалов и др., 2017). Отметим, что на преобладающей части ЕТР произошло увеличение стока и в период летне-осенней межени — наиболее значительное (40–100%) на реках лесостепной и степной зон (Закономерности ..., 2012). Таким образом, современные тенденции изменения водного режима рек юга ЕТР характеризуются положительным трендом значений минимального стока.

Минимальный сток летне-осеннего и зимнего сезонов имеет различную генетическую структуру, в связи с чем их пространственно-временные аспекты исследуются отдельно. Но, в целом, продолжительность и устойчивость периода низкого стока определяются стокообразующими факторами, из которых ключевое значение имеют атмосферные осадки и подземные воды, непосредственно участвующие в формировании приходной части

стока. С учетом региональных особенностей распределения атмосферных осадков формируются условия естественного увлажнения, влияющие на устойчивость и экстремальность маловодных сезонов. Важно, что в формировании подземной составляющей стока заметную роль играют осадки не только за текущий год, но и за предыдущие 2–3 года (Сивохиц и др., 2018). Исходя из разнообразия и генезиса факторов формирования стока, необходимо обратить внимание на трудности при определении синхронности колебания стоковых и метеорологических характеристик (Джамалов и др., 2017). Отдельно отметим, что при исследованиях характеристик стока за период осреднения, меньший, чем год, влияние местных особенностей бассейнов рек значительно возрастает и, в первую очередь, это относится к межени и минимальному стоку (Комлев, 2002).

Влияние атмосферных осадков на сезонный сток различно для зон избыточного и недостаточного увлажнения вследствие существенного отличия величин испарения (Владимиров, 1976). Кроме того, районы, имеющие незначительные запасы водных ресурсов, характеризуются и максимальной многолетней изменчивостью речного стока в условиях неустойчивого увлажнения. К подобным территориям относится бассейн р. Урал, большая часть которого расположена в пределах степной (75%), полупустынной и пустынной природных зон (рис. 1). Водный режим большинства рек бассейна р. Урал относится к казахстанскому типу с преобладанием снегового питания, доля которого повышается от верховий к приустьевой части. Характерной особенностью рек данного типа является наличие продолжительного маловодного периода, объединяющего две фазы – летне-осенней и зимней межени. Фаза летне-осенней межени в верховьях исследуемого бассейна может прерываться дождевыми паводками, которые к низовьям реки практически не нарушают гидрограф межени (Магрицкий и др., 2018). На отдельных реках бассейна р. Урал межень сопровождается периодами нулевого стока – полного пересыхания или промерзания рек.

Основным способом гарантированного обеспечения водными ресурсами экономики и населения для территорий с неравномерным речным стоком является аккумуляция объемов воды в водохранилищах. В бассейне р. Урал наиболее крупные водохранилища расположены в верхнем течении главной реки (Верхнеуральское, Магнитогорское и Ириклинское), обеспечивающие потребности в воде промышленных предприятий и коммунального хозяйства Южного Зауралья. Самым значимым искусственным водоемом является Ириклинское вдхр. на р. Урал (1957), объем которого (3.26 км<sup>3</sup>) позволяет осуществлять многолетнее регулирование стока, срезая пики весеннего половодья и увеличивая меженный сток.

Цель данной работы – выявление современных тенденций изменения минимального стока в бассейне р. Урал. Основными задачами являются установление степени пространственной согласованности многолетних изменений минимального стока в исследуемом бассейне; оценка вклада антропогенных и природно-климатических факторов в многолетние изменения сезонного стока; сравнительный анализ параметров минимального стока; анализ динамики среднесуточных и абсолютных минимумов речного стока в гидрологические сезоны.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения задач исследования были использованы многолетние данные гидрологических наблюдений (Гидрологический ежегодник, 1950–1982; Государственный ..., 1983–2018). Основными методами анализа исходных данных стали стандартные гидрологические расчеты согласно рекомендациям (Свод ..., 2004).

Для анализа многолетних изменений годового и сезонного стока в исследуемом бассейне определены следующие гидрологические посты: Урал (Оренбург), Сакмара (Татарская Каргала) и Зилаир (Зилаир) – 1950–2018 гг.; Илек (Веселый) – 1951–2018 гг., Орь (Истемес) – 1957–2018 гг. и Салмыш (Буланово) – 1960–2018 гг. Выбор гидропостов основан на различиях физико-географических условий формирования стока и степени антропогенного воздействия на него; сток рр. Урал и Илек зарегулирован водохранилищами многолетнего регулирования (см. рис. 1). Для подтверждения выявленных закономерностей дополнительно принимались во внимание и производились расчеты показателей по другим рекам рассматриваемого бассейна и гидропостам.

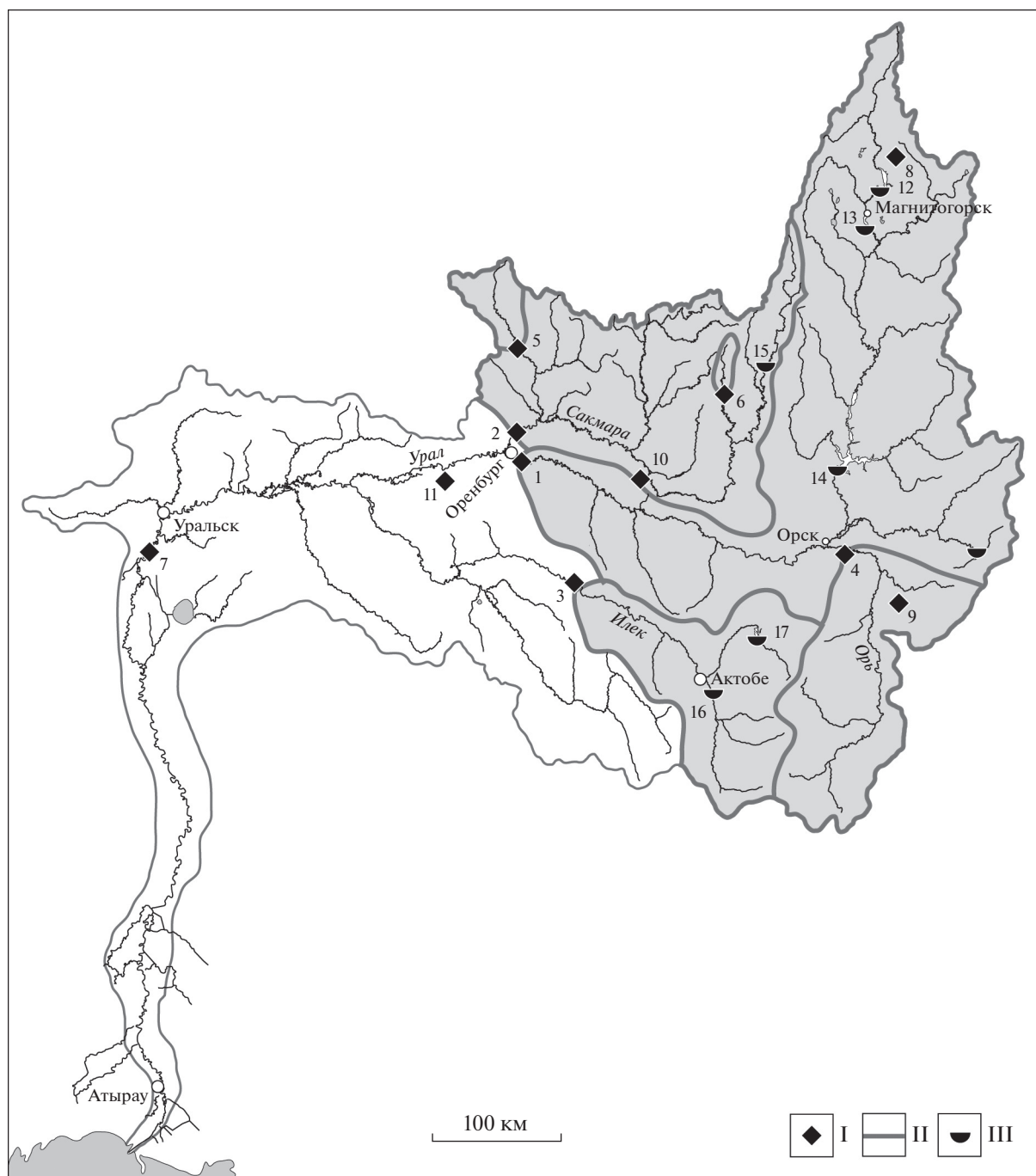
Анализ многолетних (максимальный период – 1927–2018 гг.) изменений годового и сезонного стока в бассейне р. Урал основан на использовании разностно-интегральных кривых, значения которых рассчитывались по следующей формуле:

$$S_t = \sum (K_{Q_i} - 1),$$

где модульный коэффициент  $K_{Q_i}$  равен отношению  $Q_i/\bar{Q}$ , в котором  $\bar{Q}$  – среднее арифметическое значений всего ряда;  $S_t$  – кривая накопления стока в косоугольных координатах с масштабом  $Q_0 = 1$ .

По нормированным значениям выявлены особенности многолетней динамики в различных створах рек, включая синхронность наблюдаемых изменений. Построены матрицы парных коэффициентов корреляции, рассчитаны коэффициенты линейной детерминации.

Для определения нормы стока принят расчетный период 1950–2008 гг. (продолжительность наблюдений 59 лет), включающий полные циклы



**Рис. 1.** Бассейн р. Урал. I – гидропосты; II – границы водосборов; III – створы водохранилищ. Гидропосты: 1 – Урал (Оренбург); 2 – Сакмара (Татарская Каргала); 3 – Илек (Веселый); 4 – Орь (Истемес); 5 – Салмыш (Буланово); 6 – Зилаир (Зилаир); 7 – Урал (Кушум); 8 – Урляда (Новоахуново); 9 – Кугутык (Домбаровский); 10 – Чертанка (Желтое); 11 – Черная (Красный Холм). Водохранилища: р. Урал: 12 – Верхнеуральское; 13 – Магнитогорское; 14 – Ириклинское; р. Сакмара: 15 – Сакмарское; р. Илек: 16 – Актюбинское; р. Жаксы Каргала: 17 – Каргалинское.

колебания водности. Для рек ЕТР 1978 г. установлен как пороговый год изменения водности (Джамалов и др., 2017), поэтому сравнительный анализ отдельных параметров минимального стока выполнен для двух периодов близких по продолжительности – 1950–1977 гг. (28 лет); 1978–

2008 гг. (31 год). Период с ноября по март принят за зимний сезон, июнь–октябрь – за летне-осенний сезон.

Для оценки антропогенного вклада в многолетние (1927–2018) изменения сезонного стока был использован подход, основанный на незави-

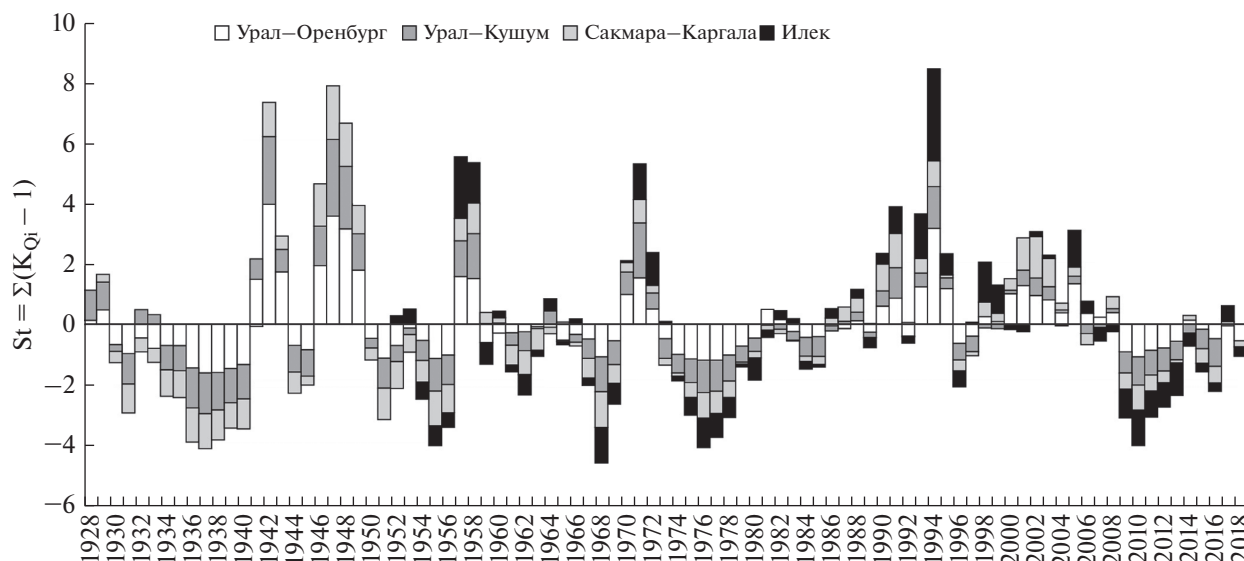


Рис. 2. Динамика водности рек бассейна р. Урал за 1927–2018 гг.

симом восстановлению стока по регрессионным связям со стоком реки-аналога. Дополнительно проведен анализ многолетних изменений в долях годового стока, позволивший подтвердить вклад наиболее значительных антропогенных трансформаций (например, заполнение Ириклинского вдхр. в 1957 г.).

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для рек бассейна р. Урал характерны многолетние колебания речного стока, а наиболее значительные вариации наблюдаются на притоках восточного и юго-восточного секторов исследуемой территории. Как установлено ранее (Сивохип и др., 2018), для большинства водотоков, вне зависимости от площади бассейна и физико-географических условий водосборной территории, отмечается синфазность стока.

В результате анализа многолетних данных выделены фазы различной водности, при этом временные границы циклов по отдельным рекам могут быть смещены относительно выявленных совокупных на 2–3 года. Отмечено, что в пределах продолжительных однонаправленных фаз довольно часто отмечаются годы или серии лет (не более 2–3-х), характеризующиеся аномальной для данной фазы водностью. Синфазный характер многолетних колебаний речного стока исследуемых рек иллюстрирует динамика значений модульных коэффициентов (рис. 2).

В частности, с 1927 по 2018 г. отмечается пять маловодных периодов, различных по продолжительности и устойчивости. Наиболее продолжительный период наблюдался в 1950–1977 гг. (пре-

обладали годы 75–90% обеспеченности), что обусловлено не только условиями естественного увлажнения, но и значительными объемами забора воды.

Синхронность фаз водности определяется как общей направленностью нормированных значений стока, так и высокой теснотой связей между рядами данных этих показателей. Как показывают расчеты, наиболее статистически значимы коэффициенты корреляции стока рек со сходными условиями формирования стока. При этом более однороден сток рек лесостепи (Сакмара, Зилаир) с коэффициентом корреляции 0.7–0.9, тогда как для типично степных рек этот показатель не превышает 0.6–0.8.

Несомненно, что многолетняя динамика водности рек казахстанского типа определяется спецификой внутригодового распределения стока, основная доля которого приходится на период весеннего половодья. По мере истощения весенне-половодного стока общей характеристикой рек казахстанского типа становится сокращение расходов, вплоть до начала половодья следующего года. Маловодный период, как правило, прерывается в предзимнее время (октябрь–декабрь) относительным увеличением объемов стока, обусловленным более благоприятными условиями увлажнения. Наиболее явно предзимний период повышения стока выражен на рр. Сакмара и Зилаир, водосборная территория которых расположена в пределах горнолесных ландшафтов Южного Урала.

Для большинства рек исследуемого бассейна (с условно-естественным режимом) установлено сокращение доли весеннего стока и увеличение доли стока маловодных периодов (рр. Орь, Жар-

лы и др.) (Сивохип и др., 2018). Еще более значительные изменения выявлены для рек с зарегулированным режимом. Так, доля весеннего половодья р. Илек (п. Веселый) сократилась с 77 (1950–1977 гг.) до 56% (современный период), а доля летне-осеннего стока увеличилась с 12 до 24% (Актюбинское водохранилище введено в эксплуатацию в 1988 г.). В то же время главный приток р. Сакмара характеризуется отсутствием устойчивой тенденции сокращения доли весеннего половодья, в том числе и в различные по водности годы.

Минимальный сток является составляющей годового стока, что определяет достаточно высокую степень тесноты связей между этими параметрами (Васильев и др., 2020). Вместе с тем период низкого стока отличается особыми условиями и факторами формирования, не проявляющимися в остальные сезоны года. В частности, продолжительность маловодных фаз определяется в первую очередь устойчивостью межени – зимняя межень зависит от длительности периода с отрицательными температурами, а летне-осенняя – от интенсивности атмосферных осадков (Закономерности ..., 2012). С учетом местных физико-географических условий и площади действующего водосбора, маловодные фазы на реках исследуемого бассейна отличаются по срокам наступления, продолжительности и устойчивости (рис. 3). В частности, р. Урал характеризуется менее продолжительной зимней меженью по сравнению с крупными притоками (рр. Сакмара, Салмыш и Орь), которые отличаются более растянутой фазой с минимальными значениями стока во второй половине сезона. Для периода зимней межени рр. Илек и Зилаир характерно интенсивное сокращение стока на протяжении всего сезона, начиная с первой–второй декад ноября.

Влияние местных физико-географических условий на особенности развития маловодных фаз в бассейне р. Урал подтверждают изменения в датах наступления периода минимального 30-суточного стока зимней и летне-осенней межени (см. рис. 3).

Наиболее значимые изменения установлены для р. Илек. Если в 1950–1977 гг. даты минимумов стока приходились на август, то в последующий период – на октябрь, что свидетельствует об ослаблении роли атмосферных осадков в формировании осеннего стока на фоне существенного увеличения водности в летне-осенний период. Даты наступления максимального истощения речного стока сместились с первых декад марта на вторую–третью декады февраля.

Анализ многолетней динамики 30-суточного минимального стока в бассейне р. Урал иллюстрирует стабильный рост значений для большинства исследуемых рек (рис. 4, табл. 1). Мак-

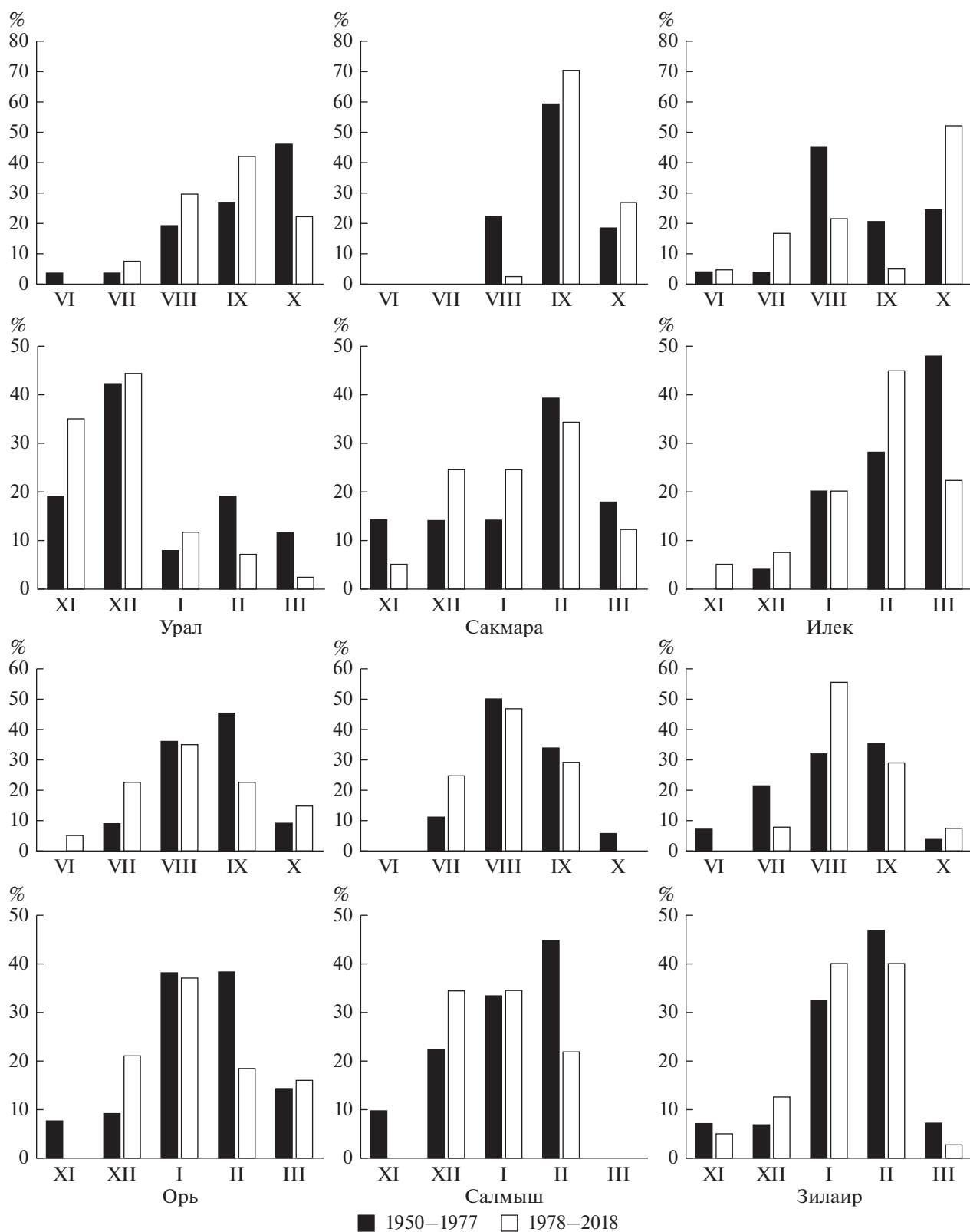
симальное увеличение минимального стока установлено для зимнего сезона у р. Илек (более чем на 90%) и р. Салмыш (60%). На реках Урал и Сакмара прирост менее существенный (в пределах 30–35%), что объясняется обширностью водосборных площадей и разнообразием условий стокоформирования. Минимальный рост 30-суточных значений зимнего стока установлен для р. Орь – менее 10%. Практически полное отсутствие положительной динамики значений 30-суточного минимального стока демонстрирует р. Зилаир.

Выявленная динамика объемов и долей стока в зимний период в итоге приводит к выравниванию соотношения между значениями летне-осеннего и зимнего стока. Сходная тенденция наблюдается и применительно к значениям 30-суточных минимальных расходов маловодных фаз. Соотношение этих значений (летне-осенняя межень к зимней) за 1950–2018 гг. максимально сократилось для р. Илек – 7.5 и 2.1. Менее значительные изменения соотношения расходов летне-осеннего и зимнего сезона отмечены для р. Урал – с 2.0 до 1.0; р. Сакмара с 1.7 до 1.2; р. Салмыш – с 1.87 до 1.28; Зилаир – с 3.6 до 1.7.

Положительную динамику подтверждают отклонения значений минимального стока современного периода от среднемноголетних величин (за период 1950–2008 гг.). Максимальные отклонения от нормы характерны, в первую очередь, для расходов зимней межени. Если в период 1950–1977 гг. значения модульных коэффициентов ( $K$ ) для рр. Урал, Сакмара, Илек, Салмыш и Зилаир составляли 0.74, 0.74, 0.16, 0.47 и 0.84 соответственно, то для следующего тридцатилетнего периода (1978–2008 гг.) – 1.17, 1.24, 1.74, 1.32 и 1.21. Исключение составляет р. Орь, модульные коэффициенты стока которой демонстрируют отрицательную динамику – 1.12 и 0.96 соответственно.

Выявленные тенденции изменения параметров маловодных фаз являются непосредственным отражением многолетних трансформаций внутригодового распределения стока, в частности – колебаний минимального стока в летне-осенний и зимний сезоны. В связи с разнообразием метеорологических факторов и форм их воздействия, многолетняя изменчивость летне-осеннего стока зачастую выше изменчивости зимнего стока (Закономерности ..., 2012). В целом рост значений минимального стока приводит к сокращению сезонной изменчивости расходов воды (табл. 2), что согласуется с ранее выявленной тенденцией снижения межгодовой изменчивости речного стока в бассейне р. Урал (Сивохип и др., 2018).

По данным табл. 2, максимальное сокращение изменчивости минимального стока маловодных фаз (в первую очередь зимней межени) характерно для рр. Илек и Орь, водосборные территории



**Рис. 3.** Распределение дат наступления периода минимального 30-суточного стока зимней и летне-осенней межени за 1950–1977 и 1978–2018 гг., %.

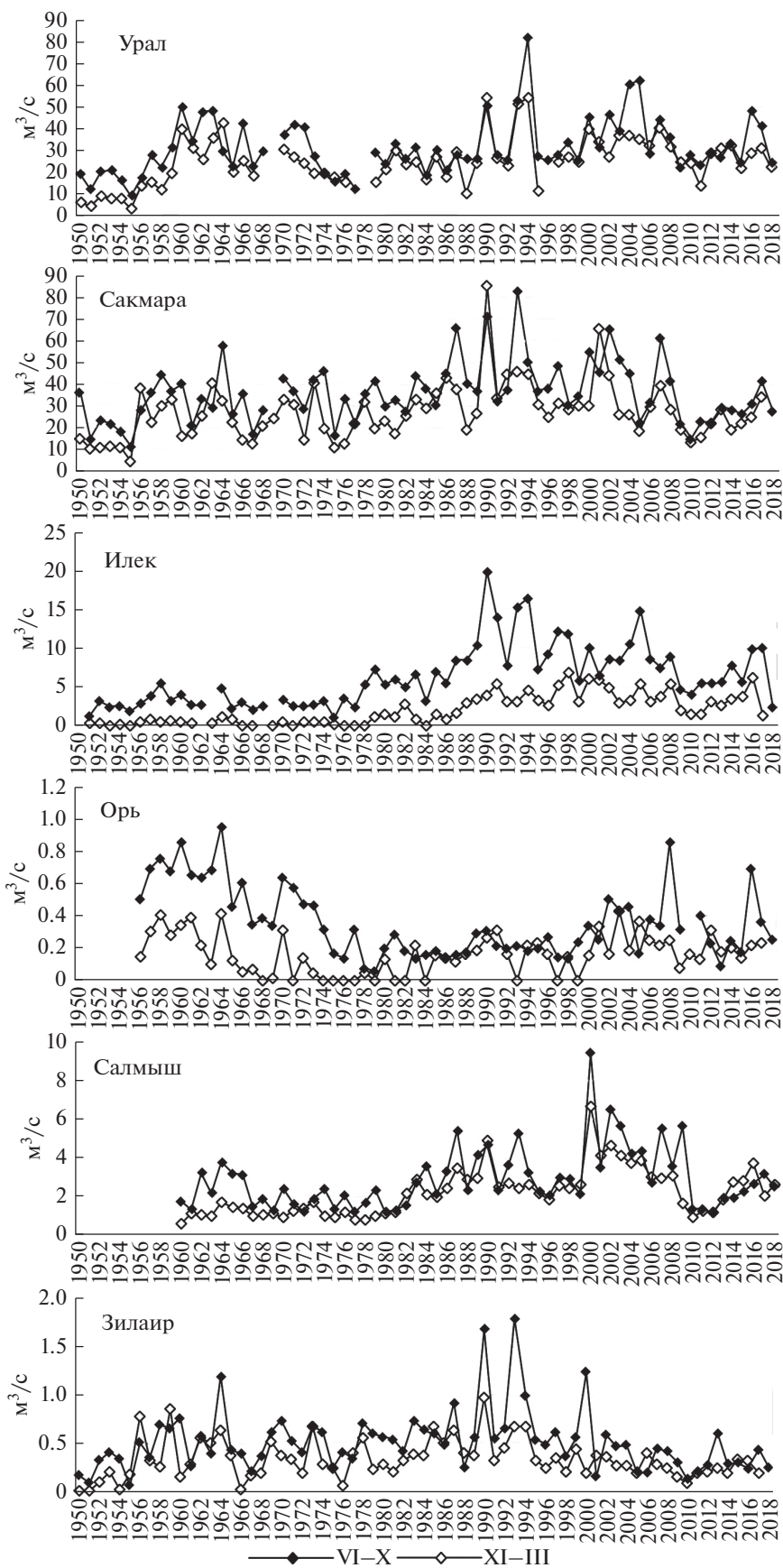


Рис. 4. Динамика средних 30-суточных значений минимального стока.

**Таблица 1.** Статистические характеристики минимального стока зимнего сезона в бассейне р. Урал

Река–пункт	Период	Q, м/с (средний, минимальный)	C <sub>V</sub>	Расход воды в годы различной обеспеченности, %		
				80	90	95
<b>Минимальный суточный сток</b>						
Урал–Оренбург	1950–1977	15.80 (2.30)	0.55	8.48	5.60	3.90
	1978–2008	24.34 (7.68)	0.44	16.60	13.40	9.30
	1950–2018	20.50 (2.30)	0.45	11.90	6.97	3.90
Сакмара–Тат. Каргала	1950–1977	17.70 (4.12)	0.45	10.50	9.25	5.39
	1978–2008	29.70 (11.80)	0.39	21.60	16.80	15.50
	1950–2018	23.20 (4.12)	0.53	14.00	10.90	10.10
Илек–Веселый	1951–1977	0.26 (0.00)	0.83	0.06	0.01	0.01
	1978–2008	2.89 (0.00)	0.59	1.37	0.60	0.18
	1951–2018	1.79 (0.00)	1.00	0.18	0.06	0.03
Орь–Истемес	1957–1977	0.15 (0.00)	0.97	0.00	0.00	0.00
	1978–2008	0.14 (0.00)	0.79	0.00	0.00	0.00
	1957–2018	0.15 (0.00)	0.79	0.00	0.00	0.00
Салмыш–Була- ново	1960–1977	0.89 (0.45)	0.32	0.60	0.52	0.45
	1978–2008	2.51 (0.48)	0.44	1.87	1.01	0.87
	1960–2018	1.88 (0.45)	0.60	0.86	0.68	0.52
Зилаир–Зилаир	1950–1977	0.20 (0.002)	0.80	0.022	0.005	0.002
	1978–2008	0.29 (0.002)	0.54	0.16	0.11	0.037
	1957–2018	0.23 (0.002)	0.67	0.11	0.022	0.005
<b>Минимальный 30-суточный сток</b>						
Урал–Оренбург	1950–1977	19.53 (2.70)	0.56	7.73	5.71	3.90
	1978–2008	29.26 (10.20)	0.39	20.88	15.40	10.80
	1950–2018	25.15 (2.70)	0.46	15.40	10.00	7.00
Сакмара– Тат. Каргала	1950–1977	21.40 (4.46)	0.49	11.70	11.00	9.80
	1978–2008	33.98 (17.62)	0.41	25.30	19.00	18.60
	1950–2018	27.22 (4.46)	0.48	15.90	12.50	11.00
Илек–Веселый	1951–1977	0.33 (0.00)	0.85	0.20	0.10	0.10
	1978–2008	3.22 (0.00)	0.57	1.50	0.80	0.00
	1951–2018	2.05 (0.00)	0.95	0.34	0.00	0.00
Орь–Истемес	1957–1977	0.16 (0.00)	0.94	0.00	0.00	0.00
	1978–2008	0.17 (0.00)	0.68	0.00	0.00	0.00
	1957–2018	0.17 (0.00)	0.74	0.02	0.00	0.00
Салмыш–Була- ново	1960–1977	1.14 (0.58)	0.26	0.94	0.81	0.60
	1978–2008	2.84 (0.80)	0.43	1.98	0.96	0.81
	1960–2018	2.18 (0.58)	0.57	1.07	0.94	0.81
Зилаир–Зилаир	1950–1977	0.31 (0.01)	0.77	0.10	0.02	0.01
	1978–2008	0.39 (0.19)	0.45	0.25	0.21	0.20
	1957–2018	0.34 (0.01)	0.60	0.19	0.10	0.03



**Таблица 2.** Изменчивость суточных расходов маловодных периодов в бассейне р. Урал (числитель – 1950–1977 гг.; знаменатель – 1978–2008 гг.)

Река	$C_v$ (лето–осень)					$C_v$ (зима)				
	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III
Урал	<u>0.18</u>	<u>0.14</u>	<u>0.11</u>	<u>0.08</u>	<u>0.07</u>	<u>0.16</u>	<u>0.14</u>	<u>0.07</u>	<u>0.06</u>	<u>0.33</u>
	0.22	0.14	0.07	0.06	0.03	0.14	0.12	0.10	0.07	0.23
Сакмара	<u>0.23</u>	<u>0.16</u>	<u>0.12</u>	<u>0.07</u>	<u>0.10</u>	<u>0.22</u>	<u>0.15</u>	<u>0.07</u>	<u>0.05</u>	<u>0.39</u>
	0.21	0.15	0.10	0.07	0.10	0.14	0.16	0.08	0.07	0.25
Илек	<u>0.28</u>	<u>0.19</u>	<u>0.13</u>	<u>0.09</u>	<u>0.16</u>	<u>0.30</u>	<u>0.36</u>	<u>0.39</u>	<u>0.22</u>	<u>0.86</u>
	0.13	0.11	0.11	0.08	0.08	0.20	0.14	0.12	0.14	0.70
Орь	<u>0.35</u>	<u>0.24</u>	<u>0.17</u>	<u>0.15</u>	<u>0.22</u>	<u>0.10</u>	<u>0.21</u>	<u>0.37</u>	<u>0.17</u>	<u>0.85</u>
	0.26	0.20	0.12	0.14	0.09	0.09	0.10	0.16	0.08	0.42
Салмыш	<u>1.05</u>	<u>0.92</u>	<u>1.24</u>	<u>0.52</u>	<u>0.61</u>	<u>1.06</u>	<u>0.95</u>	<u>0.77</u>	<u>1.12</u>	<u>1.49</u>
	0.49	0.66	0.60	0.61	0.76	0.62	0.70	0.52	0.65	1.47
Зилаир	<u>0.46</u>	<u>0.30</u>	<u>0.26</u>	<u>0.30</u>	<u>0.29</u>	<u>0.28</u>	<u>0.31</u>	<u>0.38</u>	<u>0.38</u>	<u>0.44</u>
	0.31	0.30	0.23	0.32	0.50	0.35	0.18	0.22	0.28	0.19

**Таблица 3.** Параметры истощения зимнего стока в бассейне р. Урал

Река	Период	Продолжительность, сут	Амплитуда, м <sup>3</sup> /с	Интенсивность истощения, м <sup>3</sup> /с/сут
Урал	1950–1977	51	22.2	0.85
	1978–2008	31	20.4	1.02
	1950–2017	41	21.5	0.95
Сакмара	1950–1977	76	46.7	0.84
	1978–2008	67	53.0	1.38
	1950–2017	68	46.0	1.04
Илек	1951–1977	105	4.8	0.04
	1978–2008	95	6.9	0.08
	1950–2017	98	5.8	0.06
Орь	1957–1977	80	0.5	0.007
	1978–2008	66	0.2	0.004
	1957–2017	70	0.3	0.005
Салмыш	1960–1977	82	2.4	0.03
	1978–2008	64	2.9	0.05
	1960–2017	68	2.5	0.04
Зилаир	1950–1977	90	1.4	0.015
	1978–2008	82	1.9	0.039
	1957–2017	84	1.8	0.055

**Таблица 4.** Характеристика параметров нулевого стока в зимний период в бассейне р. Урал

Река, пост, период наблюдений	Водосборная площадь, км <sup>2</sup>	Среднее число суток с нулевым стоком		Дата начала		Дата окончания	
		до 1977 г.	после 1978 г.	до 1977 г.	после 1978 г.	до 1977 г.	после 1978 г.
Урляда (Новоахуново), 1949–2008	281	79	115	2.01	8.12	21.03	2.04
Черная (Красный Холм), 1948–2014	988	80	99	8.01	12.12	31.03	20.03
Чертанка (Желтое), 1949–2008	66	103	114	4.12	9.12	24.03	3.04
Кугутык (Домбаровский), 1941–2008	798	102	110	19.12	10.12	29.03	31.03

которых охватывают засушливые сухостепные ландшафты Зауралья. Коэффициенты вариации минимальных расходов рр. Урал и Сакмара за рассматриваемый период не претерпели значительных изменений за исключением последней декады марта.

На основе выявленных тенденций изменения минимального стока можно утверждать о закономерном сокращении экстремальности маловодного периода. В то же время степень истощения речного стока в бассейне р. Урал по-прежнему крайне вариабельна и в отдельные годы довольно значительна, что подтверждают результаты оценки параметров истощения стока (табл. 3).

Продолжительность истощения зимнего стока (период между датами максимального и минимального расхода воды) сократилась, что согласуется с установленным ранее смещением дат начала наступления 30-суточных минимумов стока. Обращает внимание увеличение интенсивности истощения зимнего стока (кроме р. Орь), что связано с увеличением амплитуды колебаний расходов воды в условиях сокращения продолжительности истощения. Исходя из того, что амплитуда колебаний расходов холодного сезона определяется изменчивостью их максимальных значений, фиксируемых в начале сезона (Комлев, 2006), можно сделать вывод об увеличении суточных расходов в первой–второй декадах ноября.

Для многих рек бассейна р. Урал маловодная фаза сопровождается прекращением поверхностного стока. В целом, нулевой сток рек имеет повсеместное распространение на малых и средних реках ЕТР и Северного Казахстана в летне-осеннюю и зимнюю межень (Киреева, Фролова, 2010). В

пределах бассейна р. Урал периодическое и эпизодическое прекращение стока установлено для 32 рек с площадью водосборов от 60 до 37300 км<sup>2</sup> (Гидрологический ежегодник, 1950–1982; Государственный ..., 1983–2018). Из рек с периодическим отсутствием стока наибольшими площадями водосборов отличаются расположенные в южной и юго-восточной частях бассейна р. Урал (бассейны рр. Илек, Орь, Большой Кумак и др.).

Установлено, что продолжительность периода нулевого стока малых рек в зимний сезон повсеместно увеличивается; данные по четырем наиболее характерным рекам с продолжительным и относительно непрерывным рядом наблюдений приведены ниже (табл. 4). Максимальное увеличение продолжительности суток с промерзанием стока (>30 сут) отмечается в верховьях бассейна р. Урал (р. Урляда) и в среднем течении (р. Черная) – более 14 сут. Кроме увеличения продолжительности периода прекращения стока выявлено календарное смещение сроков промерзания русла с первой декады января на первую декаду декабря.

Таким образом, на фоне общего роста значений минимального стока крупных и средних рек, на малых реках наблюдается обратная динамика – увеличение продолжительности нулевого стока. Такое несоответствие может быть обусловлено различными факторами, связанными с особенностями формирования стока малых рек в зимний период. Несответствие в динамике минимального стока крупных рек и бессточных периодов малых рек отмечается и в бассейне р. Дон (Киреева, Фролова, 2010).

В целом, полученные результаты подтверждают пространственную согласованность многолет-

них изменений минимального стока в исследуемом бассейне. Выявленные изменения статистически значимы — в первую очередь установлена тесная внутригодовая связь между минимальным стоком маловодных сезонов и средних значений 30-суточных минимумов за соответствующие периоды. Наиболее высокими значениями коэффициенты корреляции этих рядов данных отличаются рр. Илек — 0.88 и 0.88 (VI—X и XI—III соответственно), Салмыш — 0.85 и 0.84, Зилаир — 0.79 и 0.73. В связи с частым прекращением стока в зимний период для р. Орь коэффициенты корреляции достигают лишь 0.54 и 0.62. Менее тесная связь между данными значениями установлена для рек, формирование стока которых происходит в пределах обширных и неоднородных (площадь бассейна, густота речной сети, ландшафтная структура и др.) водосборных территорий. Так, для р. Урал коэффициенты корреляции составляют 0.51 и 0.70 (VI—X и XI—III), а для горно-лесостепной р. Сакмары еще меньше — 0.36 и 0.33.

Расчет нормированных значений стока за 30-суточный минимальный период зимней межени позволил оценить степень общности рядов многолетних данных. Парные корреляции данных нормированных значений доказывают наличие достаточно тесной взаимосвязи между стоком маловодных периодов крупных рек (Урал и Сакмара, 0.64) и рек с лесостепными условиями стокообразования (Сакмара, Салмыш и Зилаир, в диапазоне 0.60–0.75). Многолетняя динамика объемов минимального стока имеет сложный и неоднозначный характер и в большей степени зависит от смены долговременных фаз водности, чем от направленности макрорегиональных процессов формирования стока. В то же время несомненным остается факт климатически обусловленного роста годовой доли зимнего стока.

При этом нельзя отрицать, что выявленные тенденции в изменении параметров минимального стока для ряда рек являются также следствием различных видов антропогенного воздействия на условия стока и стокообразования. Наиболее важные антропогенные трансформации происходили во второй половине 1950-х годов. В 1957 г. начинается заполнение Ириклинского вдхр., 1954–1965 гг. — период массового освоения целинных земель, в этот же период активно развиваются крупные водоемкие промышленные центры и городские агломерации, начинают формироваться системы лиманного орошения.

Оценка вклада антропогенного фактора в многолетние изменения минимального стока проведена по двум главным рекам исследуемого бассейна — рр. Урал и Сакмара, параметры стока которых, несмотря на различия в условиях стокообразования, достаточно близки. Так, значения коэффициентов корреляции и линей-

ной детерминации за условно-естественный период (1927–1956), имеющий статистически значимую продолжительность, составляет 0.93 и 0.87 (годовой сток), 0.95 и 0.90 (июнь–октябрь), 0.88 и 0.78 (ноябрь–март) соответственно.

Построенные графики восстановленного стока по рассматриваемым периодам свидетельствуют о том, что режим эксплуатации Ириклинского вдхр. вносит значительный вклад в трансформацию внутригодового стока, усиливая климатически-обусловленные изменения. По полученным данным, после образования водохранилища в период зимней межени отмечается рост значений стока на 35–40%, при том что в летне-осенний период сток не претерпевает существенных изменений. Несмотря на то, что используемый метод, по данным (Родионов, 1977), имеет определенные недостатки при расчете параметров восстановленного стока для среднего и нижнего течения р. Урал, сам факт увеличения зимнего стока в результате эксплуатации водохранилища является неоспоримым. Это доказывает и произведенный расчет долей годового стока за 1928–2018 гг.: именно в 1957 г. отмечается значительный рост доли зимнего стока, увеличивающийся с 8.0 (1928–1957) до 21.6% (1958–2018).

Остальные водотоки не имеют столь продолжительного ряда наблюдений и существенно отличаются по параметрам однородности стока, несмотря на определенную схожесть в зонально-географических и климатических условиях формирования стока. Вместе с тем, анализ многолетней динамики межени стока рр. Орь, Илек и Салмыш доказывает правильность выбора двух сравниваемых временных периодов (1950–1977 и 1978–2008 гг.) и их репрезентативность. Именно периоды 1977–1981 и 2002–2009 гг. стали переломными для минимального стока этих рек. Для рр. Салмыш и Илек период 1978–2008 гг. (в среднем, с разбросом в 1–3 года) являлся многоводным, а для р. Орь — маловодным.

## ВЫВОДЫ

Полученные результаты подтверждают значительные изменения внутригодового распределения стока рек бассейна р. Урал, обусловленные макрорегиональными трансформациями климата. Наиболее устойчивыми из рассматриваемых рек по параметрам межени стока являются рр. Зилаир и Сакмара, дренирующие южноуральские лесостепные низкогорья. Для р. Урал ниже створа Ириклинского вдхр. эти изменения усиливаются особенностями режима эксплуатации водохранилища.

Выявленные тенденции в трансформации внутригодовых значений речного стока, хотя и объективно присутствуют, но при этом не являются

ся однонаправленными (линейными) и однородными. В связи с этим возможность использования методов статистического анализа для подтверждения наблюдаемых тенденций ограничена. Заметим, что трансформация объемов и долей межennaleго стока, смещение дат наступления сезонных минимумов за рассматриваемый период происходят на фоне синхронных изменений водности отдельных групп лет (фаз).

С учетом выявленной тенденции увеличения минимального стока (прежде всего зимнего сезона) необходимо отметить закономерные изменения параметров стока маловодных периодов, в частности – рост значений абсолютных минимумов и смещение сроков их наступления, сокращение изменчивости суточных расходов маловодных периодов и др. В то же время для отдельных рек (рр. Орь, Зилаир) характерно отсутствие отчетливой тенденции роста значений минимального стока, а для малых рек – увеличение продолжительности периода нулевого стока.

Современные изменения внутригодового распределения речного стока обуславливают определенное выравнивание гидрографа годового стока. Полученные результаты свидетельствуют об изменениях основных характеристик водного режима рек казахстанского типа – сокращение доли весеннего половодья и увеличение доли межennaleго периода.

Динамику величин минимального стока и, в первую очередь, лимитирующего периода, необходимо принять во внимание при расчете предельных объемов использования водных ресурсов, что особенно важно для отраслей с безвозвратным изъятием речного стока. Отметим, что исследования трансформаций параметров минимального стока актуальны с позиции трансграничного положения бассейна р. Урал и должны учитываться при разработке долгосрочных программ межгосударственного взаимодействия в сфере комплексного использования водных ресурсов.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Статья подготовлена в рамках темы госзадания Института степи УрО РАН на 2021–2025 гг. № АААА-А21-121011190016-1.

#### FUNDING

This work was prepared within the framework of a state project no. АААА-А21-121011190016-1 of the Institute of the Steppe, Ural Branch, Russian Academy of Sciences.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Болгов М.В., Коробкина Е.А., Трубецкова М.Д., Филимонова М.К., Филиппова И.А.* Современные изменения

минимального стока на реках бассейна р. Волга // Метеорология и гидрология. 2014. № 3. С. 75–85.

*Васильев Д.Ю., Водопьянов В.В., Закирзянов Ш.И., Кенжебаева А.Ж., Семенов В.А., Сивохиц Ж.Т.* Корреляционные связи многолетних колебаний месячного и годового стока в бассейне реки Урал // Изв. РАН. Сер. геогр. 2020. № 3. С. 414–426.

*Владимиров А.М.* Сток в маловодный период года. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 295 с.

*Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Кашутина Е.А., Барбанова Е.А.* Природно-климатические и антропогенные изменения стока Волги и Дона // Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. № 2. С. 55–78.

Гидрологический ежегодник. Л.: Гидрометиздат, 1950–1982. Т. 4. Вып. 8–9.

Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Приволжское УГМС, 1983–2018. Т. 1. Вып. 24. Бассейны Волги (среднее и нижнее течение) и Урала.

*Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Телегина Е.А.* Изменение зимнего стока рек Европейской части России // Водные ресурсы. 2015. Т. 42. № 6. С. 581–588.

*Джамалов Р.Г., Сафронова Т.И., Телегина Е.А.* Внутригодовое распределение стока рек с оценкой роли зимней межени // Водные ресурсы. 2017. Т. 44. № 6. С. 603–611.

*Дмитриева В.А., Нефедова Е.Г.* Гидрологическая реакция на меняющиеся климатические условия и антропогенную деятельность в бассейне Верхнего Дона // Вопросы географии. 2018. Сб. 145: Гидрологические изменения. С. 285–297.

Закономерности гидрологических процессов / под ред. Н.И. Алексеевского. М.: ГЕОС, 2012. 736 с.

*Киреева М.Б., Фролова Н.Л.* Бессточные периоды на реках бассейна Дона // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2010. № 4. С. 47–54.

*Комлев А.М.* Закономерности формирования и методы расчета речного стока. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2002. 163 с.

*Комлев А.М.* Исследования речного стока. Избр. труды. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2006. 308 с.

*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.

*Родионов В.З.* Влияние хозяйственной деятельности на сток р. Урал // Тр. Гос. гидролог. ин-та. 1977. Вып. 239. С. 109–122.

*Сивохиц Ж.Т., Павлейчик В.М., Чибилев А.А., Падалко Ю.А.* Современные изменения водного режима рек бассейна р. Урал // Вопросы географии. 2018. Сб. 145: Гидрологические изменения. С. 298–313.

Свод правил по проектированию и строительству СП 33–101–2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М.: Госстрой России, 2004. 74 с.

*Фролова Н.Л., Нестеренко Д.П., Шенберг Н.В.* Внутригодовое распределение стока рек России // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5: География. 2010. № 6. С. 8–16.

## Change in the Minimum Runoff of the Ural River Basin

Zh. T. Sivokhip<sup>1, \*</sup>, V. M. Pavleichik<sup>1</sup>, and Yu. A. Padalko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Steppe, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia*

\*e-mail: sivokhip@mail.ru

Features of transformation of the minimum runoff parameters in the Ural River basin are considered, taking into account modern trends in the water regime of rivers in the European part of Russia. The problem of spatial and temporal changes in river runoff (including minimum) is especially relevant for regions with insufficient and unstable moisture. Such territories include the Ural River basin, most of which is located within the steppe, semi-desert, and desert zones. The analysis of the dynamics of average monthly and 30-day water discharges during the period of minimum runoff for the rivers of the studied basin is carried out. Changes in the parameters of low water phases have been established, in particular, a shift in the dates of the onset of the period of the minimum 30-day runoff of the summer–autumn and winter low-water periods. Statistical characteristics of the minimum runoff of the winter season in the Ural River basin in various railings are presented. A steady decrease in the variability of the minimum runoff of low-water phases, primarily of the winter low-water period, was noted. In conclusion, the need to consider the modern dynamics of the minimum runoff for solving the problems of the integrated use of water resources of transboundary river basins of the steppe zone is updated.

*Keywords:* water regime, steppe zone, minimum runoff, dry weather runoff, dry period, zero flow, use of water resources

### REFERENCES

- Bolgov M.V., Korobkina E.A., Trubetskova M.D., Filimonova M.K., Filippova I.A. Modern changes in minimum flows on the rivers of the basin of the river Volga. *Meteorol. i Gidrol.*, 2014, no. 3, pp. 75–85. (In Russ.).
- Code of Rules for Design and Construction SP 33-101-2003. Determination of the Main Design Hydrological Characteristics Moscow: Gosstroj Rossii, 2004. 74 p. (In Russ.).
- Dmitrieva V.A., Nefedova E.G. Hydrological response to changing climatic conditions and anthropogenic activities in the Upper don basin. In *Voprosy Geografii* [Problems of Geography]. Vol. 145: *Gidrologicheskie izmeneniya* [Hydrological Changes]. Kotlyakov V.M., Koronkevich N.E., Barabanova E.A., Eds. Moscow: Kodeks Publ., 2018, pp. 285–297. (In Russ.).
- Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Telegina E.A. Winter runoff variations in European Russia. *Water Resour.*, 2015, vol. 42, no. 6, pp. 758–765.
- Dzhamalov R.G., Safronova T.I., Telegina E.A. Annual distribution of river runoff with estimated contribution of winter low-water season. *Water Resour.*, 2017, vol. 44, no. 6, pp. 785–792.
- Frolova N.L., Nesterenko D.P., Schoenberg N.V. Intra-annual distribution of river flow in Russia. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2010, no. 6, pp. 8–16. (In Russ.).
- Georgiadi A.G., Koronkevich N.A., Kashutina E.A., Barabanova E.A. Climatic and anthropogenic changes of the runoff of the Volga and the Don. *Fundam. i Prikladn. Klimatol.*, 2016, no. 2, pp. 55–78. (In Russ.). doi 10.21513/2410-8758-2016-2-55-78
- Gidrologicheskii ezhegodnik* [The Hydrological Yearbook]. Leningrad: Gidrometizdat Publ., 1950–1982, vol. 4, nos. 8–9.
- Gosudarstvennyi vodnyi kadastr. Ezhegodnye dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sushi* [State Water Cadaster. Annual Data on Regime and Resources of Land Surface Water]. Vol. 1, no. 24: *Basseiny Volgi (srednee i nizhnee techenie) i Urala* [Basins of the Volga (middle and lower reaches) and the Urals]. Samara: Privolzhskoe UGMS, 1983–2018.
- Kireeva M.B., Frolova N.L. Non-drainage periods on the rivers of the Don basin. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2010, no. 4, pp. 47–54. (In Russ.).
- Komlev A.M. *Issledovaniya rechnogo stoka. Izbrannyye trudy* [Study of River Runoff. Selected Works]. Perm: Perm. Univ., 2006. 308 p.
- Komlev A.M. *Zakonomernosti formirovaniya i metody rascheta rechnogo stoka* [Regularities of Formation and Methods of Calculating River Flow]. Perm: Perm. Univ., 2002. 163 p.
- Magritsky D.V., Evstigneev V.M., Yumina N.M., Toropov P.A., Kenzhebaeva A.Zh., Ermakova G.S. Changes in runoff in the Ural river basin. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2018, no. 1, pp. 90–101. (In Russ.).
- Rodionov V.Z. The influence of economic activity on the runoff of the Ural River. *Tr. Gos. Gidrolog. Inst.*, 1977, vol. 239, pp. 109–122. (In Russ.).
- Sivokhip Zh.T., Pavleichik V.M., Chibilev A.A., Padalko Yu.A. Problems of dependable water use in the transboundary Ural River basin. *Water Resour.*, 2017, vol. 44, no. 4, pp. 673–684.
- Sivokhip Zh.T., Pavleichik V.M., Chibilev A.A., Padalko Yu.A. Modern changes in the water regime of rivers in the Ural river basin. In *Voprosy Geografii*

- [Problems of Geography]. Vol. 145: *Gidrologicheskie izmeneniya* [Hydrological Changes]. Moscow: Kodeks Publ., 2018, pp. 298–313. (In Russ.).
- Vasil'ev D.Yu., Vodopyanov V.V., Zakirzyanov S.I., Kenzhebaeva A.Zh., Semenov V.A., Sivokhip Zh.T. Correlation of the monthly and annual runoff multiple-year variation in the Ural river basin. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2020, vol. 84, no. 3, pp. 414–426. (In Russ.). doi 10.31857/S2587556620030103
- Vladimirov A.M. *Stok v malovodnyy period goda* [Runoff in the Low-Water Period of the Year]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1976. 295 p.
- Zakonomernosti gidrologicheskikh protsessov* [Regularities of Hydrological Processes]. Alekseevskii N.I., Ed., Moscow: GEOS Publ., 2012. 736 p.