

ОБОСНОВАНИЕ И АНАЛИЗ СТАТИСТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ГОДОВОГО СТОКА РЕК БАССЕЙНА УРАЛА ОТ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

*Н.М. Юмина^{1,2}, Д.В. Магрицкий¹

¹Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, Москва

²ФГБУ «Гидрометцентр России», Россия, Москва

e-mail: *yuminanm@mail.ru

В работе приведены результаты сравнительного анализа многолетних колебаний температуры воздуха, сумм осадков и годового стока рек в бассейне р. Урал, поиска статистической связи между ними. По данным 15 метеостанций для годовых и сезонных температур воздуха и осадков выполнен детальный корреляционный анализ. Выбраны метеостанции с наиболее тесной связью главных метеофакторов с годовым стоком рр. Урал, Сакмара и Илек. Для трех гидрологических постов, расположенных на этих реках, за период слабо нарушенного стока обоснованы эмпирические зависимости годового стока от температуры воздуха и сумм осадков. Их статистическая и графическая проверка показала, что они имеют достаточно высокую точность и оправдываемость. На основе построенных зависимостей для периода значительной антропогенной нагрузки на водные ресурсы региона выполнен сравнительный анализ рассчитанного (ненарушенного) годового стока рр. Урал, Сакмара и Илек с фактическим.

Ключевые слова: Урал, годовой сток, температура воздуха, осадки, эмпирические зависимости, погрешность расчета.

Введение

Река Урал является трансграничной рекой со значительной антропогенной нагрузкой на водные ресурсы, большой численностью населения и хозяйственным освоением территории. Для экономически эффективного и экологически безопасного использования водных ресурсов региона в условиях изменяющегося климата важно знать степень реального антропогенного воздействия на природные водные объекты, характер произошедших антропогенных нарушений стока и водного режима рек, их реакцию на региональные климатические и ландшафтные изменения. Решению таких задач способствуют надежные данные по самому стоку, сведения по величине и структуре водопользования. В то же время открытых и полноценных данных водохозяйственного учета не так много, и к их достоверности имеются вопросы [1]. В связи с этим для исследуемой территории задача поиска связи стока рек бассейна Урала с основными климатическими факторами и восстановления условно-естественного стока, сравнения его с фактическим стоком и оценка величины антропогенного изменения является важной и актуальной. Именно поиск и построение таких статистических связей, отбор для них оптимального числа предикторов (среди метеовеличин), проверка связей на тесноту, эффективность и совпадение рассчитываемых по ним расходов воды с фактическими данными, сравнительный анализ восстановленного и антропогенно нарушенного стока (за разные периоды) и стали целью и основными задачами приводимого исследования.

Верхнее и среднее течение реки Урал расположено на территории Российской Федерации, а нижнее течение находится в Республике Казахстан. Природные условия стокоформирования осложняются особым местоположением бассейна, большой неоднородностью рельефа и ландшафтного строения, значительными размерами засушливых территорий [2-5]. Бассейн р. Урал лежит в умеренном климатическом поясе, на стыке областей умеренно континентального и континентального климата. Область формирования

стока занимает верхнюю горную часть бассейна Урала и равнинный участок между городами Орск и Уральск. Большинство рек исследуемого бассейна по классификации водного режима Б.Д. Зайкова относятся к казахстанскому типу рек с весенним половодьем. Основное питание рек идет за счет талых снеговых вод (60-80 % объема годового стока); дождевые осадки составляют 2-12 %, подземные воды – 13-38 % [2, 4, 6]. Количество атмосферных осадков варьирует от 350 мм/год до 700-800 мм/год в Уральских горах, являющихся препятствием для движения воздушных масс с запада на восток. По территории проходит так называемая ось Воейкова, разделяющая регион на зоны влияния Исландского минимума и Азорского максимума [7, 8].

В бассейне Урала расположены крупные промышленные центры – Магнитогорск, Новотроицк, Орск, Оренбург, Уральск, Атырау и Актобе. Здесь много предприятий обрабатывающей и добывающей промышленности, теплоэлектростанций, развитое сельское хозяйство. В пределах территории бассейна проживает около 4 млн чел. [9-11].

Водные ресурсы бассейна р. Урал активно используются для орошения земель, водоснабжения предприятий и населенных пунктов. В бассейне создано значительное число водохранилищ и прудов разного назначения, регулирующих сток главной реки и притоков. Заметный рост водопотребления в бассейне Урала произошел во второй половине 1950-х и в 1960-х гг. Он был вызван заполнением Ириклинского и Верхнеуральского водохранилищ; ростом забора свежей воды Магнитогорским, Орско-Новотроицким и Оренбургским промышленными узлами [12].

К числу наиболее крупных притоков реки Урал относится река Сакмара. Несмотря на то, что ее водосборная площадь занимает восьмую часть площади Уральского бассейна, в бассейне Сакмары формируется около 40 %, а в иные годы более половины суммарного стока р. Урала ниже г. Оренбурга. В отличие от других притоков Урала, Сакмара с притоками остается до настоящего времени практически незарегулированной рекой [5, 13]. Лишь с 2005 г. р. Сакмара была зарегулирована сравнительно небольшим Сакмарским водохранилищем объемом около 30 млн м³, находящимся в верховьях реки. В бассейне реки есть также Аксаровское, Отрадинское, Зилаирское водохранилища и довольно много прудов. Самую большую из всех притоков р. Урал водосборную площадь имеет река Илек – более 41 тыс. км². 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.

Материалы и методы исследования

В исследовании использованы среднемесячные и среднегодовые температуры воздуха, месячные и годовые слои осадков с 13 метеорологических станций на российской части бассейна р. Урал (и вблизи него) и с 2 метеостанций в Казахстане (рис. 1). Источники данных – РОСГИДРОМЕТ и КАЗГИДРОМЕТ. Выбранные метеостанции сравнительно равномерно покрывают исследуемую территорию, расположены на высотах от –23 (м/с Атырау) до 522 м (м/с Зилаир) и 551 м (м/с Тукан), среднее расстояние между ними варьирует в диапазоне 70-100 км. Выбран максимальный период наблюдений с 1936 по 2020 гг. В целом, длительность периода наблюдений для рядов осадков составляет 55-79 лет, для температуры воздуха – 84 года. Месячные суммы осадков взяты с учетом исключения из них систематических погрешностей осадкомерных приборов. По этим данным были проанализированы теснота линейной связи и рассчитаны парные коэффициенты корреляции для годовых и сезонных сумм осадков, среднегодовой и среднесезонной температуры воздуха.

Для анализа связи годового стока рек бассейна Урала с основными метеорологическими характеристиками были выбраны три гидрологических поста, расположенных на главной реке (пост г. Оренбург) и ее основных притоках – р. Сакмара (с. Каргала) и р. Илек (пос. Веселый 1). Пост на реке Урал в г. Оренбург находится в нижнем

бьефе Ириклинского водохранилища, в 9,6 км выше устья реки Сакмара. Наблюдения за водным режимом Урала на посту начались в 1927-1930 гг. Начиная с 1958 г. и, особенно, с середины 1960-х гг., на сток и водный режим Урала влияет эксплуатация Ириклинского водохранилища. Пост на реке Сакмара в с. Каргала расположен в 32 км выше устья притока. Гидрологические наблюдения на посту ведутся с 1920 г. Правда с 1920 г. по 1965 г. пост располагался в п. Сакмара, в 23 км выше по течению от поста в с. Каргала. Пост на реке Илек в пос. Веселый 1 расположен ниже Актюбинского водохранилища (введено в эксплуатацию в 1988 г.) и Каргалинского водохранилища на р. Каргала (с 1975 г.). Таким образом, начиная с 1976 г., сток реки Илек становится зарегулированным. Ряд наблюдений за расходами воды на гидрологическом посту начинается с 1949 г.



Рисунок 1 – Метеостанции и гидрологические посты в бассейне р. Урал и на соседних территориях. Условные обозначения: 1 – метеостанции, 2 – гидрологические посты, 3 – населенные пункты, 4 – государственная граница, 5 – границы областей, 6 – граница бассейна р. Урал

Основными методами обработки и анализа данных стали стандартные статистические расчеты с применением статистических критериев при 5%-ном уровне значимости. В качестве эмпирической зависимости годового 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, входящие в эмпирическую зависимость, их состав подбирались отдельно для каждого поста и в зависимости от 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.

Качество и точность полученных зависимостей оценивались с помощью множественного коэффициента корреляции (R), показателя эффективности методики (Eff) и обеспеченности прогноза ($P\%$) [14, 15]. В соответствии с принятыми требованиями погрешность расчета (прогноза) характеризовалась средней квадратической погрешностью его ошибки S . При получении оценки S использовалась теоретическая формула, которая учитывает не только разности между фактическими и рассчитанными расходами воды, но и соотношение между длиной использованного ряда наблюдений и числом оцениваемых параметров:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-k} \sum_{j=1}^n (Q_j - Q_{\text{пр}})^2}, \quad (2)$$

где k – число параметров, входящих в формулу получения прогноза $Q_{\text{пр}}$ и рассчитанных по массиву многолетних гидрометеорологических наблюдений за прогнозируемой величиной и характеристиками факторов ее формирования. Эффективность расчета (прогноза) определялась соотношением:

$$\text{Eff} = \frac{S}{\sigma} \sqrt{\frac{(n-1)}{(n-k-1)}} \quad (3)$$

где $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (Q_j - \bar{Q})^2}$ характеризует среднеквадратическое отклонение прогнозируемой величины. При величине Eff менее 0,6 точность методики расчета (прогноза) считается хорошей, 0,6-0,8 – удовлетворительной, более 0,8 – расчет (прогноз) считается неудовлетворительным. Другой важной характеристикой, определяющей качество методики прогноза, является обеспеченность (оправдываемость) прогнозов ($P\%$) – доля случаев, когда ошибка прогноза по абсолютной величине не превышает допустимую, равную $0,674\sigma$.

В связи с тем, что годы начала значимой антропогенной нагрузки на водные ресурсы реки Урал и ее притоков различные, для решения задачи восстановления условно-естественного (ненарушенного) стока и сравнение 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.

Результаты и обсуждение

Корреляционный анализ рядов среднегодовой температуры воздуха показал высокую скоррелированность многолетних колебаний температур на близко расположенных метеостанциях: коэффициенты корреляции (r) преимущественно $> 0,95$. Наиболее тесная зависимость обнаружена для метеостанций Оренбург, Зилаир, Акбулак, Сорочинск, Стерлитамак и Тукан ($r > 0,96$). Наименее синхронны колебания температуры воздуха на метеостанциях Атырау, Верхнеуральск, Троицк, Бреды ($r = 0,66-0,93$). Для среднесезонных

температур воздуха наиболее тесные зависимости фиксируются в осенне-зимний сезон. Летом, наоборот, теснота связи уменьшается.

Для многолетних рядов с годовыми суммами осадков приемлемые коэффициенты корреляции ($r > 0,7$) наблюдаются лишь у некоторых соседних метеостанций – Оренбурга, Зилаира и Акбулака. Наиболее тесная связь годовых сумм осадков ($r = 0,83$) у метеостанций Акбулак и Оренбург. Также как и для температуры воздуха, наиболее тесные зависимости сезонных осадков присущи осеннему и зимнему сезонам, а летом – связь наименее тесная. Парные коэффициенты корреляции между осадками на метеостанциях Оренбург – Зилаир, Оренбург – Акбулак, Акбулак – Зилаир составляют соответственно 0,81, 0,78 и 0,69 осенью, 0,68, 0,80 и 0,86 зимой и 0,73, 0,77 и 0,77 весной.

По результатам выполненного корреляционного анализа, принимая во внимание совместную продолжительность рядов данных, близость к исследуемым гидрологическим постам, были выбраны три метеостанции для поиска связи годового стока рек бассейна Урала с основными метеофакторами и построения эмпирических зависимостей. Это метеостанции в г. Оренбург, с. Зилаир и пос. Акбулак.

Первой была обоснована эмпирическая модель формирования годового стока р. Урал для поста в г. Оренбург. Учитывая разные продолжительности рядов наблюдений за стоком, осадками и температурой воздуха, а также время начала интенсивной антропогенной нагрузки на сток среднего Урала, для решения поставленной задачи был выбран совместный период гидрометеорологических наблюдений с 1937 г. по 1957 г. продолжительностью 21 год. При этом ввиду того, что на метеостанции Акбулак ряд наблюдений за осадками начинается только с 1960 г., данный пункт в дальнейших расчетах не использовался.

В итоге для годового стока реки Урал – г. Оренбург на основе корреляционного анализа данных были построены эмпирические зависимости вида (1). Исходя из общей продолжительности совместных рядов гидрометеорологических наблюдений, число предикторов, входящих в эмпирическую зависимость вида (1), подбиралось не более двух. Также были построены и проанализированы эмпирические зависимости для годового стока реки Урал в г. Оренбург в случае использования в качестве предикторов метеоданных только на метеостанции в г. Оренбург или при объединении данных по двум метеостанциям – в г. Оренбург и с. Зилаир.

В результате наиболее точная зависимость для расчета годового стока реки Урал в створе поста г. Оренбург получается при использовании в качестве предикторов суммы осадков за предшествующий осенне-зимний сезон и средней температуры воздуха за теплый период предыдущего года, объединенных по двум метеостанциям (г. Оренбург и с. Зилаир). В таблице 1 приведен состав подобранных предикторов, вошедших в эмпирические зависимости для расчета годового стока рек бассейна Урала, в том числе для поста г. Оренбург. В таблице 2 приведены значения полученных методом наименьших квадратов коэффициентов регрессии (a_i), а также показатели качества и точности полученных методик расчета (R , Eff, $P\%$). Согласно последним, множественный коэффициент корреляции (R) между фактическими расходами воды (пост г. Оренбург) и рассчитанными по зависимости достаточно высок и равен 0,84. Показатель эффективности методики (Eff) $< 0,60$. Это говорит о хорошем качестве построенной зависимости; оправдываемость расчетов (P) составляет 90 %.

Сравнение восстановленного и фактического стока показало, что начавшееся в 1958 г. заполнение Ириклинского водохранилища и нарастающее до 1970-1980-х гг. (с максимумом в 1980-х гг.) водопотребление, безусловно, способствовали уменьшению годового стока реки Урал в г. Оренбург. Разность составила в среднем 30 %; дисперсия годового стока также уменьшилась – примерно на 40 % (рис. 2-а). При этом наибольшая разница между рассчитанным и фактическим (нарушенным) годовым стоком реки Урал наблюдалась в период до 1990-х гг. После эта разница не превышает 20 %, что может быть связано как с наблюдаемыми климатическими изменениями в регионе и их возрастающей ролью в

колебаниях годового стока р. Урал, так и с существенным сокращением водопотребления на водосборе [1, 9, 16]. В таблице 3 приведено сравнение рассчитанного (условно-естественного) и фактического (в период значительной антропогенной нагрузки на водные ресурсы) годового стока рек бассейна Урала по десятилетиям.

Вторая эмпирическая зависимость между метеовеличинами и годовым стоком была построена для поста с. Каргала на р. Сакмара, с преобладанием условно-естественных условий стокоформирования. Несмотря на высокую корреляцию метеоданных между собой на ближайших к посту с. Каргала метеостанциях Тукан, Зилаир, Оренбург и Акбулак, из-за того, что на метеостанциях Тукан и Акбулак ряд осадков начинается только с 1960 г., для построения эмпирической зависимости были использованы данные по осадкам и температуре воздуха только по метеостанциям Оренбург и Зилаир. При этом для решения поставленной задачи был выбран совместный период гидрометеорологических наблюдений с 1937 г. по 1965 г. (период наименьшего хозяйственного освоения бассейна и единой методики измерения осадков) продолжительностью 29 лет. Были рассмотрены разные варианты, в том числе с объединением/осреднением данных по двум метеостанциям – в г. Оренбург и с. Зилаир.

Таблица 1 – Состав предикторов для расчета годового стока рек бассейна Урала

Обозначение	Пояснение
река Урал – г. Оренбург	
осадки (ос) за месяцы IX-III	сумма осадков по двум метеостанциям (г. Оренбург и с. Зилаир) с сентября предыдущего года по март текущего года
температура воздуха (те) за IV-X	средняя по двум метеостанциям (г. Оренбург и с. Зилаир) температура воздуха за предыдущий год (апрель-октябрь)
река Сакмара – с. Каргала	
осV-IX	сумма осадков по двум метеостанциям (г. Оренбург и с. Зилаир) за предыдущий год (май-сентябрь)
осX-IV	сумма осадков по двум метеостанциям (г. Оренбург и с. Зилаир) с октября предыдущего года по апрель текущего года
река Илек – пос. Веселый 1	
осIX-III	сумма осадков по двум метеостанциям (г. Оренбург и с. Зилаир) с сентября предыдущего года по март текущего года
теIII-IV	средняя по двум метеостанциям (г. Оренбург и с. Зилаир) температура воздуха текущего года за март и апрель

Таблица 2 – Параметры эмпирических зависимостей для расчета годового стока рек бассейна Урала и оценка их качества

Период	n	a_0	a_1	a_2	R	Eff	$P\%$
река Урал – г. Оренбург							
			осIX-III	теIV-X			
1937-1957	21	517	0,32	-42,2	0,84	0,59	90
река Сакмара – с. Каргала							
			осV-IX	осX-IV			
1937-1965	29	-136	0,19	0,30	0,92	0,40	93
река Илек – пос. Веселый 1							
			осIX-III	теIII-IV			
1949-1975	27	-13,6	0,05	-1,18	0,83	0,59	89

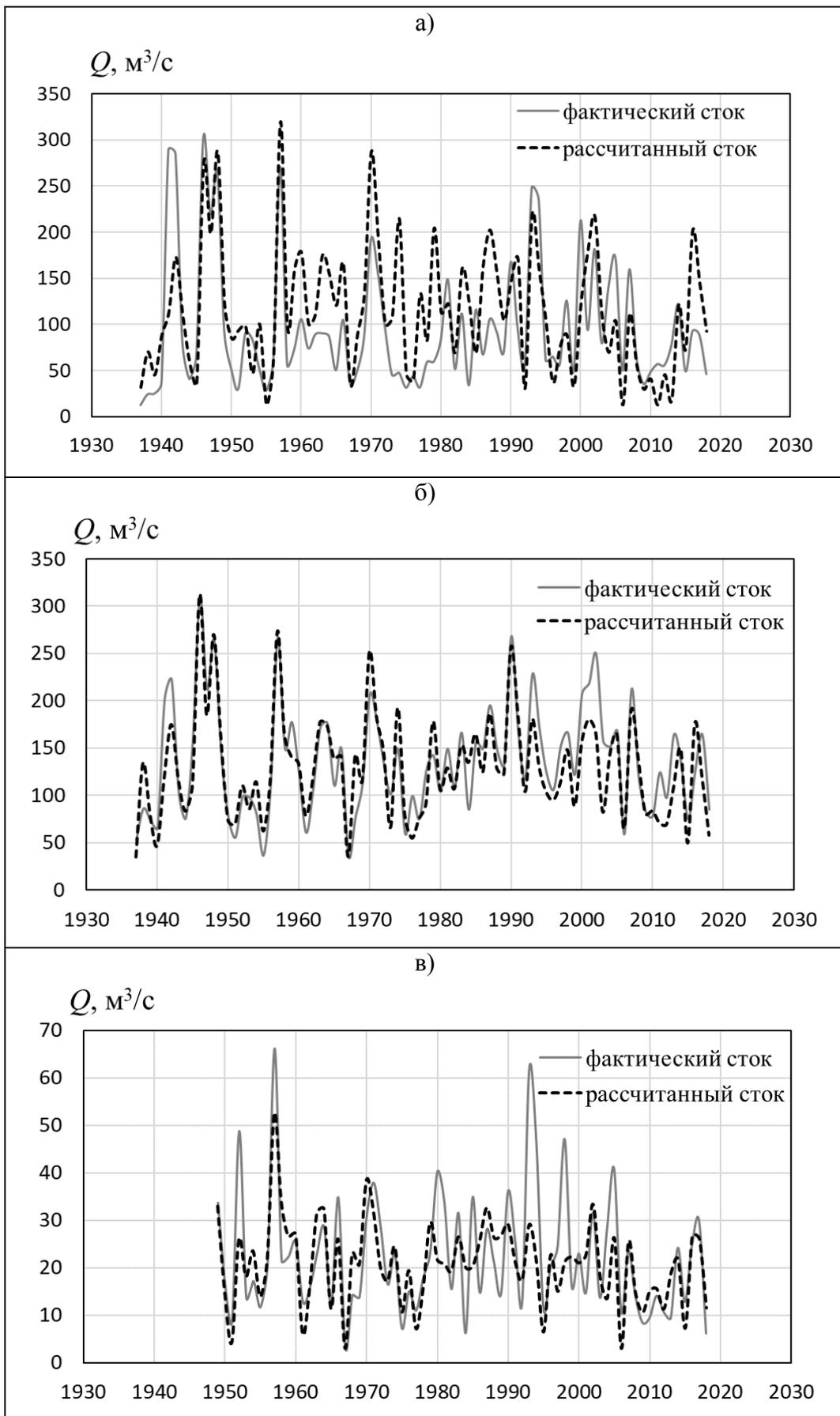


Рисунок 2 – Сравнение фактического и рассчитанного годового стока рек бассейна Урала: а) река Урал – г. Оренбург; б) река Сакмара – с. Каргала; в) река Илек – пос. Веселый № 1

Таблица 3 – Сравнение фактического и рассчитанного годового стока рек бассейна Урала в период значительной антропогенной нагрузки

Период	Факт, м ³ /с	Расчет, м ³ /с	Разница, м ³ /с	Разница, %
река Урал – г. Оренбург				
1960-1969	77,5	126	-48,7	-63
1970-1979	76,4	141	-64,3	-84
1980-1989	88,3	128	-40,1	-45
1990-1999	116	106	9,7	8
2000-2009	119	101	18,0	15
2010-2019	71,0	83,6	-12,6	-18
река Сакмара – с. Каргала				
1970-1979	127	132	-5,16	-4
1980-1989	139	136	3,4	2
1990-1999	162	140	21,6	13
2000-2009	162	137	25,7	16
2010-2019	116	98,5	17,7	15
река Илек – пос. Веселый 1				
1980-1989	24,0	24,0	0,0	0
1990-1999	30,1	20,6	9,5	32
2000-2009	20,8	18,9	1,9	9
2010-2019	15,6	17,1	-1,5	-10

В результате наиболее точная зависимость для расчета годового стока реки Сакмара получается при использовании в качестве предикторов суммы осадков за предшествующий период увлажнения (с мая по сентябрь предыдущего года и с октября предыдущего года по апрель текущего года), объединенных по двум метеостанциям (Оренбург и Зилаир) (таблицы 1 и 2). Множественный коэффициент корреляции между фактическими расходами воды и построенной зависимостью высок и равен 0,92; показатель эффективности методики менее 0,60, что говорит о хорошем качестве построенной зависимости; оправдываемость расчетов составляет 93 %.

Полученные различия среднего и дисперсии рассчитанного и фактического годового стока реки Сакмара за период после 1965 г. в целом незначительны (менее 10 %) (рис. 2-б). Это подтверждает тезис о незначительной вплоть до настоящего времени антропогенной нагрузке на водные ресурсы реки и о существенном вкладе в колебания годового стока климатических факторов. Преимущественную роль в зависимости играют осадки. При этом разница рассчитанного и фактического годового стока реки Сакмара после 1990 г. несколько возрастает, но все равно не превышает 20 % (табл. 3). Одно из объяснений – серьезные климатически обусловленные изменения формирования стока в регионе и возможное – нарушение ранее существовавших связей [7-9]. Это требует дополнительных исследований в отношении возможностей использования полученной (по данным до 1965 г.) эмпирической зависимости для текущего и будущего периодов.

Третья зависимость была построена для второго по величине притока р. Урал, наиболее освоенного в водохозяйственном отношении – р. Илек (п. Веселый 1). Для построения эмпирических зависимостей стока от основных климатических факторов были использованы данные по осадкам и температуре воздуха на ближайших к посту метеостанциях (г. Оренбург, с. Зилаир, пос. Акбулак). При этом рассматривались три варианта зависимостей: с учетом использования данных только одной метеостанции Акбулак; с учетом использования данных по двум метеостанциям (Оренбург – Зилаир и Оренбург – Акбулак). Но продолжительность совместного периода гидрометеорологических

наблюдений с метеостанцией Акбулак, используемых при построении зависимостей, составляет всего 16 лет, тогда как с метеостанциями в г. Оренбург и с. Зилаир – 27 лет.

Наиболее точная зависимость для расчета годового стока реки Илек получается при использовании только одного предиктора с одной метеостанции в пос. Акбулак (суммы осадков за предшествующий осенне-зимний сезон). В этом случае множественный коэффициент корреляции между фактическими расходами воды и построенной зависимостью достаточно высок и равен 0,87; показатель эффективности методики равен 0,50; оправдываемость расчетов составляет 88 %. Однако, зависимость основывается на использовании достаточно короткого ряда данных. Если в качестве предикторов использовать суммы осадков за предшествующий осенне-зимний сезон и средней температуры воздуха за весенние месяцы года, объединенных по метеостанциям в г. Оренбург и с. Зилаир, то полученная эмпирическая зависимость имеет несколько меньшую точность, но опирается на гораздо более длинные ряды данных. В этом случае множественный коэффициент корреляции между фактическими и рассчитанными расходами воды равен 0,83; $Eff = 0,59$; $P = 89$ %. В обоих случаях полученные зависимости хорошего качества, так как $Eff < 0,60$. В целях наиболее полного использования исходных гидрометеорологических данных и приведения предложенных методик расчета годового стока рек бассейна Урала к некоторому единообразию, для расчета стока реки Илек было принято решение использовать зависимость с двумя предикторами, т.е. по двум метеостанциям (таблицы 1 и 2).

В среднем за период после 1975 г. рассчитанный годовой сток реки Илек незначительно (на 10 %) отличается от наблюдаемого. Дисперсия же рассчитанного (условно-естественного) годового стока в 3 раза меньше дисперсии фактического (зарегулированного) годового стока реки Илек (рис. 2-в). Наибольшие различия среднего и дисперсии рассчитанного и фактического годового стока реки Илек наблюдаются в 1990-е гг., в следующее после введения в эксплуатацию Актюбинского водохранилища десятилетие (табл. 3).

Выводы

Для основных рек бассейна Урала на основе корреляционного анализа гидрометеорологических данных были построены эмпирические зависимости годового стока от температуры воздуха и осадков. Для всех выбранных гидропостов эмпирические зависимости строились для периода с минимальной антропогенной нагрузкой на водные ресурсы бассейна и рассчитывался так называемый условно-ненарушенный сток рек, обусловленный в основном климатическими факторами. Точность построенных зависимостей проверялась тремя критериями. Она оказалась высокой, методики признаны хорошего качества, эффективность построенных методик тоже высокая.

При сравнении восстановленного по построенным зависимостям условно-естественного годового стока рек бассейна Урала с фактическим (зарегулированным) стоком получено, что в период возрастающей антропогенной нагрузки на водные ресурсы бассейна Урала произошло уменьшение годового стока реки Урал (г. Оренбург) и его дисперсии по сравнению с возможным естественным стоком. Годовой сток и его дисперсия для реки Сакмары, мало освоенной в водохозяйственном отношении реки бассейна, в среднем практически не изменились. Изменения годового стока реки Илек, крупного, но меньшего по водности притока реки Урал, также в среднем незначительные. Однако для реки Илек существенно увеличилась дисперсия годового стока по сравнению с возможным естественным (климатически обусловленным) стоком.

Если сравнивать изменения годового стока рек по десятилетиям, то на реке Урал наибольшие изменения происходили в период с начала ввода в эксплуатацию Ириклинского водохранилища до 1990-х гг. После 1990 г. разница фактического и восстановленного по

зависимости годового стока не превышает 20 %, что возможно связано с наблюдаемыми климатическими изменениями в регионе и их возрастающей ролью в колебаниях годового стока реки Урал, а также с уменьшением масштабов водопотребления в бассейне реки. Для реки Сакмара, наоборот, отличие фактического от рассчитанного годового стока после 1990 г. несколько увеличивается, не превышая при этом 20 %. На реке Илек в 1990-е гг., в ближайшее после введения в эксплуатацию Актюбинского водохранилища десятилетие, наблюдаемый годовой сток в среднем на 32 % превышал восстановленный по зависимости сток, далее эта разница становится несущественной и не превышает 10 %. При этом дисперсия фактического годового стока реки Илек после 1980 г. становится в разы больше дисперсии восстановленного (климатически обусловленного) стока.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы (I.10, ЦИТИС 121051400038-1) и Научной школы МГУ – Климат и окружающая среда.

Список литературы

1. 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.
2. Вода России. Речные бассейны / Под науч. ред. А.М. Черняева; ФГУП РосНИИВХ. Екатеринбург: Издательство «АКВА-ПРЕСС», 2000. 536 с.
3. Национальный атлас России. Т. 2. М., 2007. 496 с.
4. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 12. Нижнее Поволжье и Западный Казахстан. Вып. 2. Урало-Эмбинский район. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 515 с.
5. Чибилев А.А. Бассейн Урала: история, география, экология. Екатеринбург, 2008. 312 с.
6. Водные ресурсы России и их использование / под ред. И.А. Шикломанова. СПб: ГГИ, 2008. 598 с.
7. Васильев Д.Ю., Бабков О.К., Давлиев И.Р., Семенов В.А., Христодуло О.И. Пространственно-временная структура колебаний приземной температуры на Южном Урале // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 4. С. 294-302.
8. Васильев Д.Ю., Павлейчик В.М., Семенов В.А., Сивохиц Ж.Т., Чибилев 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
9. 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.
10. 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: Оренбург, 2021. С. 1008-1009.
11. 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
12. 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: Издательство Лик, 2021. С. 402-406.

13. Чибилев А.А. Река Урал. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 168 с.

14. Борщ С.В., Христофоров А.В. Оценка качества прогнозов речного стока / Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. Специальный выпуск 355. М: Издательство «ТРИАДА ЛТД», 2015. 198 с.

15. Христофоров А.В. Надежность расчетов речного стока. М.: Издательство МГУ, 1993. 166 с.

16. Демин А.П. Использование водных ресурсов России: современное состояние и перспективные оценки: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. М., 2011. 51 с.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию 20.06.2023

Принята к публикации 11.09.2023

SUBSTANTIATION AND ANALYSIS OF STATISTICAL DEPENDENCIES OF THE ANNUAL RUNOFF OF THE RIVERS OF THE URAL BASIN ON METEOROLOGICAL INDICATORS

*N. Yumina^{1,2}, D. Magritsky¹

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Russia, Moscow

² Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Russia, Moscow

e-mail: *yuminanm@mail.ru

The paper presents the results of a comparative analysis of long-term fluctuations in air temperature, precipitation amounts and annual runoff of rivers in the Ural River basin, and the search for a statistical relationship between them. According to the data of 15 meteorological stations, a detailed correlation analysis was performed for annual and seasonal air temperatures and precipitation. The weather stations with the closest connection of the main meteorological factors with the annual runoff of the Ural, Sakmara and Ilek rivers were selected. Empirical dependences of annual runoff on air temperature and precipitation amounts are substantiated for three hydrological stations located on these rivers during the period of slightly disturbed runoff. Their statistical and graphical verification showed that they have a sufficiently high accuracy and justifiability. Based on the constructed dependencies for a period of significant anthropogenic load on the water resources of the region, a comparative analysis of the calculated (undisturbed) annual runoff of the Ural, Sakmara and Ilek rivers with actual one was performed.

Key words: Ural, annual runoff, air temperature, precipitation, empirical dependencies, error of estimation.

References

1. Magritskii D.V. Vodokhozyaistvennaya deyatel'nost' v rossiiskoi chasti basseina r. Urala: proshloe i nastoyashchee // Sovremennye problemy vodokhranilishch i ikh vodosborov: trudy IX Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Perm', 2023. S. 270-275.

2. Voda Rossii. Rechnye basseiny / Pod nauch. red. A.M. Chernyaeva; FGUP RosNIIVKh. Ekaterinburg: Izdatel'stvo "AKVA-PRESS", 2000. 536 s.

3. Natsional'nyi atlas Rossii. T. 2. M., 2007. 496 s.

4. Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. T. 12. Nizhnee Povolzh'e i Zapadnyi Kazakhstan. Vyp. 2. Uralo-Embinskii raion. L.: Gidrometeoizdat, 1970. 515 s.
5. Chibilev A.A. Bassein Urala: istoriya, geografiya, ekologiya. Ekaterinburg, 2008. 312 s.
6. Vodnye resursy Rossii i ikh ispol'zovanie / pod red. I.A. Shiklomanova. SPb: GGI, 2008. 598 s.
7. Vasil'ev D.Yu., Babkov O.K., Davliev I.R., Semenov V.A., Khristodulo O.I. Prostranstvenno-vremennaya struktura kolebaniy prizemnoi temperatury na Yuzhnom Urale. Optika atmosfery i okeana. 2018. T. 31. N 4. S. 294-302.
8. Vasil'ev D.Yu., Pavleichik V.M., Semenov V.A., Sivokhip Zh.T., Chibilev A.A. Mnogoletnii rezhim temperatury vozdukhа i atmosferynykh osadkov na territorii Yuzhnogo Urala. Doklady Akademii nauk. 2018. T. 478. N 5. S. 588-592. DOI: 10.7868/S0869565218050201
9. Magritskii D.V., Evstigneev V.M., Yumina N.M., Toropov P.A., Kenzhebaeva A.Zh., Ermakova G.S. Izmeneniya stoka v basseine r. Ural. Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya. 2018. N 1. S. 90-101.
10. Magritskii D.V., Kenzhebaeva A.Zh., Yumina N.M., Moreido V.M., Efimova L.E. Klimaticheskie izmeneniya i vodokhozyaistvennaya deyatel'nost' v basseine r. Ural i ikh vliyanie na vodnyi rezhim rek. Stepi Severnoi Evrazii: materialy IX mezhdunarodnogo simpoziuma. T. 1. Orenburg: Orenburg, 2021. S. 1008-1009.
11. 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
12. Yumina N.M., Magritskii D.V., Efimova L.E. Problemy vodopol'zovaniya v nizov'yakh reki Ural (Zhaiyk). Transgranichnye vodnye ob"ekty: ispol'zovanie, upravlenie, okhrana: sbornik materialov Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, g. Sochi, 20-25 sentyabrya 2021 g. Novocherkassk: Izdatel'stvo Lik, 2021. S. 402-406.
13. Chibilev A.A. Reka Ural. L.: Gidrometeoizdat, 1987. 168 s.
14. Borshch S.V., Khristoforov A.V. Otsenka kachestva prognozov rechnogo stoka. Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossiiskoi Federatsii. Spetsial'nyi vypusk 355. M.: Izdatel'stvo "TRIADA LTD", 2015. 198 s.
15. Khristoforov A.V. Nadezhnost' raschetov rechnogo stoka. M.: Izdatel'stvo MGU, 1993. 166 s.
16. Demin A.P. Ispol'zovanie vodnykh resursov Rossii: sovremennoe sostoyanie i perspektivnye otsenki: Avtoref. dis. ... d-ra geogr. nauk. M., 2011. 51 s.

Сведения об авторах:

Наталья Михайловна Юмина

К.г.н., старший научный сотрудник кафедры гидрологии суши географического факультета, МГУ имени М.В. Ломоносова; зав. отделом речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России»

ORCID 0000-0002-4815-1356

Natalia Yumina

Candidate of Geographical Sciences, Senior Researcher of the Department of Hydrology, of the Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University; Head of the Department of River Hydrological Forecasts, Hydrometeorological Research Center of Russian Federation (Hydrometcenter of Russia)

Дмитрий Владимирович Магрицкий

К.г.н., доцент кафедры гидрологии суши географического факультета, МГУ имени М.В. Ломоносова

ORCID 0000-0002-4953-8376

Dmitry Magritsky

Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor of the Department of Hydrology,
of the Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University

Для цитирования: 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