DOI 10.21513/2410-8758-2016-2-55-78 УДК 551.579.4

ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИЕ И АНТРОПОГЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СТОКА ВОЛГИ И ДОНА

А.Г. Георгиади, Н.И. Коронкевич, Е.А. Кашутина, Е.А. Барабанова

Институт географии РАН,
Россия, 109017, г. Москва, Старомонетный пер. 29; *hydro-igras@yandex.ru*

Резюме. Анализируется соотношение вклада природно-климатических и антропогенных факторов в многолетние изменения годового и сезонного стока Волги и Дона, происходившие с конца XIX до начала XXI века. Учитываются долговременные фазы повышения и понижения стока, влияние на их характеристики хозяйственной деятельности как в гидрографической сети, так и на водосборах. Показано, что антропогенное воздействие на сток этих рек в отдельные периоды соизмеримо с природно-климатическим или даже превосходит его.

Ключевые слова. Годовой и сезонный речной сток, долговременные изменения, природно-климатические и антропогенные факторы, реки-индикаторы, разностно-интегральная кривая, водно-балансовые методы, водохозяйственная статистика.

NATURAL CLIMATIC AND ANTHROPOGENIC CHANGES IN THE VOLGA AND THE DON RIVERS RUNOFF

A.G. Georgiadi, N.I.Koronkevich, E.A. Kashutina, E.A. Barabanova

Institute of Geography, Russian Academy of Science
29, Staromonetny, 109017, Moscow, Russia; *hydro-igras@yandex.ru*

Summary. The ratio of contribution of natural climatic factors and anthropogenic factors to the long-term changes in the annual and seasonal runoff of the rivers Volga and Don is analyzed over the period since the end of the 19 century till the beginning of the 21 century. Long-term phases of the runoff increase and decrease, as well as anthropogenic impact in the hydrographic network and watershed are studied. It is shown that human-induced anthropogenic effect on the runoff of these rivers is comparable with that of natural (climatic) factors for some periods, or may even exceed them.

Key words. Annual and seasonal river runoff, long-term changes, natural climatic and anthropogenic factors, rivers-indicators, cumulative sum of normalized annual values of runoff, water balance methods, water use sector economy statistics.

Введение

Сток основных рек южного макросклона Русской равнины – Волги и Дона, дренирующих территорию площадью около 2 млн. км^2, характеризу-

ется заметными долговременными изменениями. Они обусловлены как природно-климатическими, так и антропогенными факторами. Несмотря на то, что динамике многолетних изменений речного стока, роли отдельных факторов таких изменений уделено большое внимание в целом ряде исследований (Водные ресурсы России и их использование, 2008; Зайцева, 1990; Шикломанов, 1976, 1979 и др.), выявление вклада климатических и антропогенных факторов в эти изменения остается одной из актуальных проблем. Это обусловлено объективной сложностью разделения их влияния на сток, поскольку зачастую действуют одновременно и тесно переплетены между собой. Существующие оценки часто приурочены к разным временным срезам и остаются периоды, недостаточно охваченные исследованиями. Это, например, относится к долговременным фазам повышения и понижения стока. Оценки изменения годового стока не всегда сопровождаются оценками изменения сезонного стока. Существенно порой отличается перечень учитываемых антропогенных факторов, редко принимаются во внимание косвенные антропогенные воздействия на сток. Применяются разные методы выявления гидрологической роли климатических и антропогенных факторов. Все это во многом объясняет расхождения в оценке гидрологической роли тех и других факторов в работах отдельных авторов.

В данной статье с учетом наших прежних публикаций по рассматриваемой проблеме (Георгиади, Кашутина, 2011, 2014; Георгиади и др., 2008; 2011; 2012; 2013; 2014; Коронкевич и др., 2013) предпринята еще одна попытка комплексного ее рассмотрения.

Методические основы

Анализ многолетних изменений годового и сезонного стока рек, которые обусловлены изменениями климата и антропогенных воздействий, основан на использовании разностно-интегральных кривых; на независимом восстановлении годового и сезонного стока по регрессионным связям со стоком рек-индикаторов и на основе воднобалансовых методов и данных воднобалансовых экспериментальных станций и водохозяйственной статистики; сравнительном анализе изменения условно-естественного (восстановленного) и антропогенно-измененного стока.

Оценка изменений речного стока, обусловленных климатическими и антропогенными факторами, основана на использовании двух независимых подходов восстановления естественного (точнее условно-естественного) стока. В одном из них оценка интегрального влияния природно-климатических и антропогенных факторов стока основана на восстановлении естественного годового и сезонного стока по связям с показателями климатических условий их формирования. Разница восстановленного и фактического стока характеризует антропогенное влияние в общем изменении стока по сравнению со стоком за какой-либо исходный период, например, период исчисления его нормы, а разница фактического стока и стока за исходный период (за вычетом антропогенной составляющей его изменений) – климатическое влияние. При этом допускаем, что произошедшие кли-

матические изменения стока обусловлены в основном естественными процессами, хотя и сознаем, что этот вопрос достаточно дискуссионен.

Другой подход, включающий в себя в основном балансовые методы, данные воднобалансовых станций и водохозяйственной статистики, позволяет непосредственно оценить влияние на сток как отдельных антропогенных факторов, так и всего их комплекса.

Многолетняя динамика соотношения природных и антропогенных факторов в современных изменениях речного стока исследуется для *набора периодов*, отличающихся между собой особым характером природно-климатических условий и динамики антропогенных воздействий. С этих позиций особый интерес представляют следующие периоды. *С позиций воздействия климата* – долговременные фазы снижения (ФСС) и повышения (ФПС), последняя из которых, начавшаяся в 1970 – 1980 гг., приурочена к периоду современного потепления климата. До этого наблюдалось многолетнее снижение температуры воздуха и атмосферного увлажнения, продолжавшееся несколько десятилетий (Георгиади и др., 2014; Кляшторин, Любушин, 2005 и др.).

Главное внимание в нашем исследовании уделено *долговременным фазам многолетних изменений* условно-естественного годового и сезонного стока и их трансформациям, обусловленным антропогенными воздействиями. Речь идет о фазах продолжительностью 20 – 30 лет и более. Исключение составляет последняя фаза изменений некоторых характеристик стока (например, стока за год и другие сезоны), которая короче, но, вероятно, еще будет продолжаться. Такое понимание долговременных фаз близко соотносится с *фазами повышения и снижения внутривековых и вековых циклов гидроклиматических характеристик* В.Г. Андреянова (1959) и А.Н. Афанасьева (1967). П.С. Кузин (1970) выделял, как правило, более короткие фазы (от нескольких лет до 10-15 лет или циклы продолжительностью до 20 – 30 лет для стока всего меженного периода). Их можно ассоциировать с внутривековыми циклами. Отметим важность учета долговременных фаз при расчете так называемых норм характеристик стока, на что обращали внимание В.Г. Андреянов (1959), А.В. Агупов (1960), А.Н. Афанасьев (1967) и другие.

К числу основных характеристик таких фаз относятся их продолжительность и интенсивность изменений (измеряемая средней за многолетие интенсивностью изменений) и их статистические характеристики (среднее многолетнее значение, коэффициент вариации и др.), а также временные границы смены направленности фаз. Влияние антропогенных факторов оценивается на указанные выше характеристики долговременных фаз многолетних изменений условно-естественного годового и сезонного стока.

Для выявления долговременных фаз авторы используют разностно-интегральные кривые. Они представляют собой нарастающую сумму отклонений какой-либо характеристики от ее среднего многолетнего значения. Зачастую отклонения нормируются на коэффициент вариации для более удобного сравнения временных изменений разнородных характеристик (Андреянов, 1959).

Разностно-интегральные кривые уже многие десятилетия весьма плодотворно используются гидрологами для изучения многолетних ритмов измене-

ния стока. Этот метод был предложен В.Г. Глушковым (Афанасьев, 1967) и был развит в 1950–1970-е гг. (Андреянов, 1959; Афанасьев, 1967; Кузин, 1970 и др.). Такой подход использовался также в климатологии (Афанасьев, 1967 и др.). С конца 1980-х до середины первого десятилетия 2000-х гг. этот метод применялся существенно реже, но в последние годы интерес к нему среди гидрологов и климатологов снова возрос (Бубин, Рассказова, 2013; Георгиади, Кашутина, 2011; Георгиади и др., 2008; 2011; 2012; Горошко, 2010; Мурашенкова, 2007; Справочно-аналитический…, 2008; Ясинский, 2009 и др.).

Значения нормированной разностно-интегральной кривой рассчитываются по следующей формуле:

$$CQS_i = \sum \frac{K_i - 1}{C_v}, \quad (1)$$

$$K_i = \frac{E_i}{E_m}, \quad (2)$$

где C_v – коэффициент вариации, E_i – значение элемента в i-й год, E_m – среднее многолетнее значение элемента, K_i – модульный коэффициент элемента, CQS_i – значения нарастающей суммы нормированных значений элемента.

Оценка антропогенных изменений стока для отдельных фаз и для других периодов основана, как отмечено выше, на восстановлении условно-естественного годового и сезонного стока и сопоставлении его с фактическим (антропогенно-измененным).

С позиций антропогенных воздействий выделяется условно естественный период (окончание которого условно отнесено к 1930 г.), когда эти воздействия были относительно невелики, десятилетие 1980-х гг. – время наибольшей антропогенной нагрузки на водные ресурсы (за исключением периода максимального изъятия воды на заполнение водохранилищ) и период, начиная с 1991 г., характеризующийся резким ослаблением этой нагрузки на сток. Кроме того, интересен период с конца XIX века до начала 1960-х гг., принятый в свое время в качестве основного для исчисления нормы стока (Воскресенский, 1962), а также период 1930 – 1980 гг., принятый сейчас в качестве базисного для расчета современной нормы стока (Водные ресурсы России и их использование, 2008). В ряде случаев границы периодов несколько смещаются.

Характеристика метода восстановления условно-естественного стока на основе рек-индикаторов климатических условий

Одним из первых этот метод применил И.А. Шикломанов (1979). В настоящей работе он получил свое развитие применительно к особенностям решаемых задач. Подробнее о нем ниже. Здесь же лишь отметим ограничение этого метода восстановления стока, связанное с тем, что в нем не учитывается в явном виде влияние антропогенных факторов, которые влияют на сток рек-индикаторов. И чем интенсивнее это воздействие или же оно меняется в многолетней ретроспективе, тем в меньшей степени сток рек-индикаторов отражает влияние только климатических изменений.

Для восстановления годового стока и стока основных гидрологических сезонов (зима, половодье, лето-осень) использованы многолетние данные по среднемесячному стоку рек. Границы сезонов определялись на основе многолетних гидрографов и данных о среднемноголетних датах начала и окончания половодья и ледостава.

Водосборы рек-индикаторов климатических условий относятся к основной области формирования стока Волги и Дона. Для Волги у Волгограда в качестве предикторов использовались Ока у Калуги, Вятка у Кирова и Белая у Бирска, а для Дона у Раздорской – Дон у Казанской и Хопер у Бесплемяновского. Отметим, что меженный сток Белой у Бирска все же испытывает влияние небольших водохранилищ, но это, видимо, не оказывает значительного влияния на рассматриваемые нами характеристики восстановленного стока Волги у Волгограда. На Дону водосборы рек-индикаторов, расположенных в лесостепной и степной зонах, издавна использовались в неорошаемом земледелии, агротехнологии которого изменялись со временем, что, по-видимому, оказывает некоторое воздействие на результаты восстановления стока Дона у Раздорской, о чем подробнее будет сказано ниже.

Годовой сток и сток каждого из основных сезонов Волги у Волгограда восстанавливался на основе независимых регрессионных связей. Восстановление стока Дона у Раздорской проводилось несколько по-другому. Годовой сток и сток половодья рассчитывались по данным о соответствующем виде стока Дона у Казанской и Хопра у Бесплемяновского. По разности между восстановленным годовым стоком и стоком половодья (как остаточный член годового баланса) определялся сток за всю межень (зимнюю и летне-осеннюю). Далее по связи между суммарным стоком за всю межень и стоком за лето-осень определялся сток за летне-осенний период, затем это значение вычиталось из восстановленного стока за всю межень, и таким образом рассчитывался зимний сток.

Поскольку в рядах стока главных рек и рек-индикаторов имелось достаточно много пропусков, то для их заполнения использовались регрессионные связи со стоком других рек. При этом они характеризовались коэффициентами парной корреляции от 0.8 и выше. Так, пропуски в рядах стока Дона у Раздорской (1918 г., 1922 – 1924 гг., 1927 г.) заполнялись по регрессионным зависимостям со стоком в створе Калач-на-Дону; Дона у Казанской (1919 – 1927 гг., 1942 – 1944 гг.) по стоку в створе Лиски (кроме летне-осеннего стока) или в створе Калач-на-Дону (летне-осенний сток, а также другие характеристики стока), если нельзя было использовать данные по створу Лиски. Отметим также, что не было лет, когда по створу Калач-на-Дону одновременно восстанавливался сток Дона у Казанской и Дона у Раздорской. Сток Хопра у Бесплемяновского 1891 – 1929 гг. оценивался по стоку Хопра у Балашова и у Поворино, а также Вороны у Чутановки.

После восстановления стока для рассматривавшихся створов удалось сформировать ряды сезонного и годового стока с небольшим числом про-

пусков по отдельным сезонам (1920 – 1922 и 1924 гг.), которые не удалось заполнить или из-за очень слабых связей, или из-за отсутствия данных.

Годовой и сезонный сток Волги у Волгограда за периоды 1938 – 1952 и 1959 – 1960 гг. был восстановлен по данным нижележащего створа Верхнее Лебяжье. Коэффициенты корреляции между стоком в этих створах для всех сезонов составляли 0.95 – 0.98.

Уравнения регрессии для восстановления стока Волги у Волгограда характеризуются достаточно высокими коэффициентами множественной линейной корреляции и вполне приемлемыми ошибками регрессий. Для Волги параметры уравнений регрессии (для годового и сезонного стока) оценивались на основе многолетних данных, охватывающих базовый период 1882 – 1935 гг. Для Дона параметры уравнений регрессии (для годового и сезонного стока) оценивались на основании многолетних данных, охватывающих период 1891 – 1929 гг.

Уравнения регрессии характеризуются достаточно высокими коэффициентами множественной линейной корреляции и приемлемыми средними ошибками аппроксимации (Шалабанов, Роганов, 2008), которые составляют для Волги у Волгограда и Дона у Раздорской соответственно 0.85/7.4 % и 0.92/12.1 % (для годового стока), 0.88/7.4 %, и 0.9/14.8 % (для половодья), 0.8/16.6% (для зимы для Волги), 0.86/10.3 % и 0.84/9.7 % (для летне-осеннего периода, для Дона приведены характеристики для регрессии стока летне-осенней межени от стока за всю межень). При этом ошибки коэффициентов регрессии в несколько раз меньше их абсолютных значений.

О достаточной надежности восстанавливаемых значений стока говорят и результаты анализа многолетних рядов разницы между годовым стоком, рассчитанным по регрессии с годовым стоком рек-индикаторов, и оцененным как сумма сезонных составляющих стока, каждая из которых была определена по независимым связям со стоком соответствующих сезонов рек-индикаторов. Он показал, что отсутствуют систематические отклонения при восстановлении годового стока Волги у Волгограда, рассчитанного двумя упомянутыми выше способами.

Особенности многолетних изменений условно-естественного стока

Сравнение разностно-интегральных кривых стока Волги у Волгограда и Дона у Раздорской показывает, что за 120-летний период в долговременных изменениях годового стока и стока основных гидрологических сезонов на каждой из рек выделяются длительные фазы повышения и снижения стока разной продолжительности (рис. 1).

Главное различие между ними проявляется в особенностях долговременных фаз изменения годового стока и стока половодья, тогда как фазы зимнего и летне-осеннего стока на этих реках практически синхронны. Отметим, что относительно кратковременные фазы повышения 1920-х гг. и снижения стока 1930-х гг. на Дону более сглажены по сравнению с Волгой. На Волге длительная фаза снижения стока лета-осени и зимы наблю-

далась с конца XIX столетия и продолжалась (с 10 летним перерывом в 1920 – 1930 гг.) вплоть до начала-середины 1970-х гг. При этом до начала 1930-х гг. она была выражена гораздо слабее для летне-осеннего стока, и указанный период изменений стока этого сезона можно было бы отнести также и к фазе квазистабильного стока. Для годового стока Волги и Дона с конца XIX и до начала 1930-х гг. отмечается долговременная фаза квазистабильного стока, в пределах которого выделяются более короткие фазы снижения (1891 – 1910 гг.) и повышения стока (1911 – 1929 гг.). С 1930 г. до начала 1970 г. на Дону наблюдалась фаза квазистабильного годового стока, тогда как на Волге началась фаза его снижения, продолжавшаяся до середины 1970-х гг. С начала 1970-х гг. на Дону происходит снижение годового стока, а на Волге с середины 1970-х гг. наступила фаза его повышения.

На Дону фаза долговременного снижения зимнего и летне-осеннего стока также продолжалась с конца XIX века до середины 1970-х гг. Тогда как сток половодья повышался с конца XIX века до начала 1970-х гг. и затем началось его снижение, которое продолжалось, по крайней мере, до 2006 г. (с 2007 г. данные не анализировались).

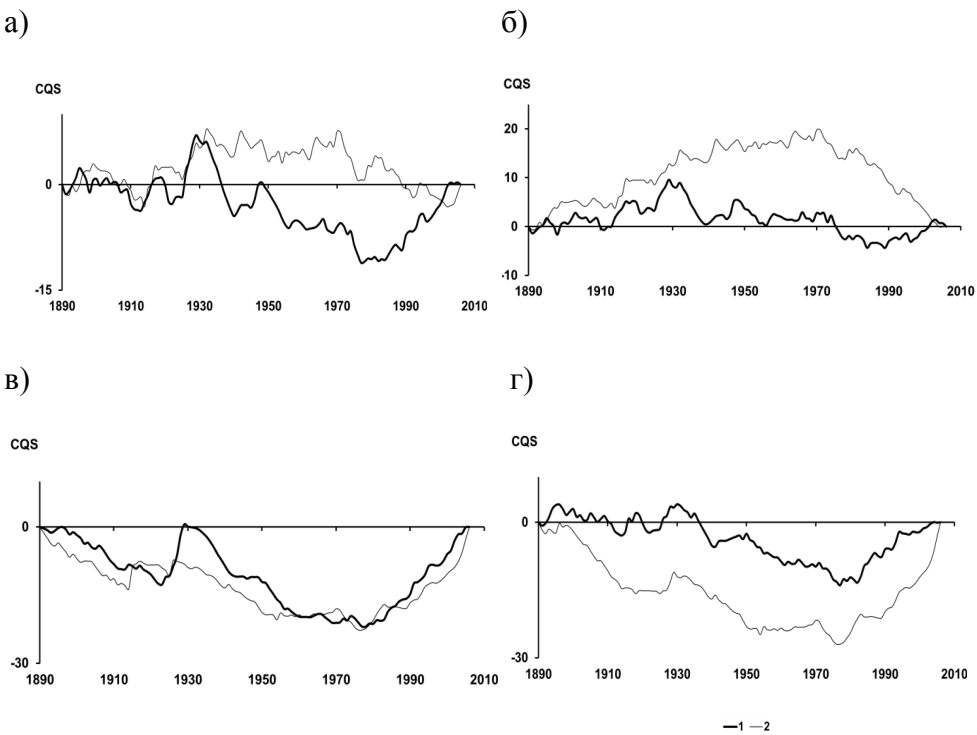


Рисунок 1. Долговременные фазы повышения и снижения условно-естественного годового и сезонного стока Волги (1) и Дона (2)
а – год, б – половодье, в – зима, г – лето-осень

$CQS_i = \sum_{i=1}^{t} \left(\frac{X_i}{\overline{X}} - 1 \right)$ – значения нормированной разностно-интегральной кривой, где X_i – годовая сумма атмосферных осадков за конкретный год, $\overline{X}$ – средняя многолетняя годовая сумма атмосферных осадков.

Таблица 1. Долговременные фазы изменения условно-естественного годового и сезонного стока Волги у Волгограда и Дона у Раздорской

Водосбор, створ	Фазы, годы	
	Дон – Раздорская	**Волга – Волгоград**
Анализировавшийся период	1891 – 2006	1891 – 2007
Фаза повышения условно-естественного стока		
год / ФПС2	нв*	1978 – 2003
половодье / ФПС1	1893 – 1971	1891 – 1929
половодье / ФПС2	нв	1990 – 2003
лето-осень / ФПС2	1978 – 2006	1978 – 2007
зима / ФПС2	1978 – 2006	1978 – 2007
Фаза снижения условно-естественного стока		
год / ФСС	1972 – 2002	1930 – 1977
половодье / ФСС	1972 – 2006	1930 – 1989
лето-осень / ФСС	1897 – 1977	1931 – 1977
зима / ФСС	1891 – 1977	1931 – 1977
Фаза условно-естественного квазистабильного стока		
год ФКСС1	1896 – 1926	1891 – 1926
год ФКСС2	1933 – 1971	нв
половодье ФКСС	нв	нв
лето-осень ФКСС	нв	1897 – 1930
зима ФКСС	нв	1892 – 1930

* фаза не выявлена

Таблица 2. Продолжительность долговременных фаз изменения условно-естественного годового и сезонного стока Волги у Волгограда, Дона у Раздорской

Сток	Фаза	Волга 1891 – 2007 гг.	Дон 1891 – 2006 гг.
Годовой	ФПС	26	нв
	ФСС	48	31
Половодья	ФПС	14; 39	79
	ФСС	60	35
Летне-осенний	ФПС	30	29
	ФСС	47	81
Зимний	ФПС	30	29
	ФСС	47	87

В табл. 1 показана календарная продолжительность выделенных долговременных фаз повышения (ФПС) и снижения стока (ФСС), а в табл. 2 – их продолжительность, из которой видно, что на Волге ФПС короче, чем ФСС для годового и всех его сезонных составляющих. На Дону наблюдаются те же соотношения для зимы и лета-осени, а вот для половодья картина оказывается обратной.

Таблица 3. Средний многолетний условно-естественный сток Волги у Волгограда за избранные долговременные фазы, км^3

Фаза	Годовой сток и его сезонные составляющие			
	год	зима	лето-осень	половодье
ФПС1	нв	нв	нв	177
ФПС2	275	40	61	182
ФСС	241	27	49	164
ФКСС	259	32	54	нв

Таблица 4. Средний многолетний условно-естественный сток Дона у Раздорской за избранные долговременные фазы, км^3

Фаза	Годовой сток и его сезонные составляющие			
	год	зима	лето-осень	половодье
ФПС1	нв	нв	нв	18
ФПС2	нв	4	9	нв
ФСС	23	2	6	12
ФКСС1	27	нв	нв	нв
ФКСС2	26	нв	нв	нв

Из табл. 3 и 4 следует, что условно-естественный средний многолетний сток, характерный для ФПС и ФСС, значительно отличается. Так, годовой сток во время ФПС выше (относительно стока во время ФСС) на Волге и Дону соответственно на 14 и 13 %, зимний сток почти на 50 % и в два раза, сток за лето-осень на 25 и 50 %, а сток половодья на 10 и 50 % (относительно стока для ФСС).

Влияние антропогенных факторов на долговременные фазы изменений годового и сезонного стока

Антропогенные факторы оказывают значительное воздействие на характер долговременных фаз изменения стока. Прежде всего, в результате их воздействия (главным образом регулирующей роли Волжско-Камского каскада водохранилищ и Цимлянского водохранилища) границы долговременных фаз снижения и повышения стока смещаются на более ранние годы. Наиболее заметно это проявляется на Волге для зимнего стока, а на Дону – для стока

летне-осеннего периода, когда антропогенные факторы приводят к тому, что современная фаза долговременного повышения стока этих сезонов начинается более чем на 20 лет раньше, чем это могло быть в условно-естественной природной обстановке. Коренные антропогенные изменения проявляются в многолетних изменениях стока половодья, долговременная фаза снижения которого на Дону также началась более чем на 20 лет раньше условно-естественной, а на Волге начиная с 1980-х гг. ход его изменений стал асинхронен направлению изменений условно-естественного стока.

Долговременные же фазы годового стока как на Волге, так и на Дону практически не смещаются во времени.

Таблица 5. Средний многолетний условно-естественный (в числителе) и фактический/ антропогенно-измененный (в знаменателе) сток Волги у Волгограда за избранные долговременные фазы, км^3

Фаза	**Годовой сток и его сезонные составляющие**			
	год	**зима**	**лето-осень**	**половодье**
ФПС1	нв/нв	нв/нв	нв/нв	177/177
ФПС2	275/263	40/68	61/66	182/137
ФСС	241/228	27/43	49/51	164/132
ФКСС	259/259	32/32	54/54	нв/нв

На Волге под влиянием антропогенных факторов во время ФПС и ФСС снижается годовой сток и сток половодья и повышается зимний и летне-осенний сток (табл. 5). При этом под влиянием антропогенных факторов различия стока между этими фазами возрастают для годового, зимнего и летне-осеннего стока, а для стока половодья снижаются.

Таблица 6. Средний многолетний условно-естественный (в числителе) и фактический (в знаменателе) сток Дона у Раздорской за избранные долговременные фазы, км^3

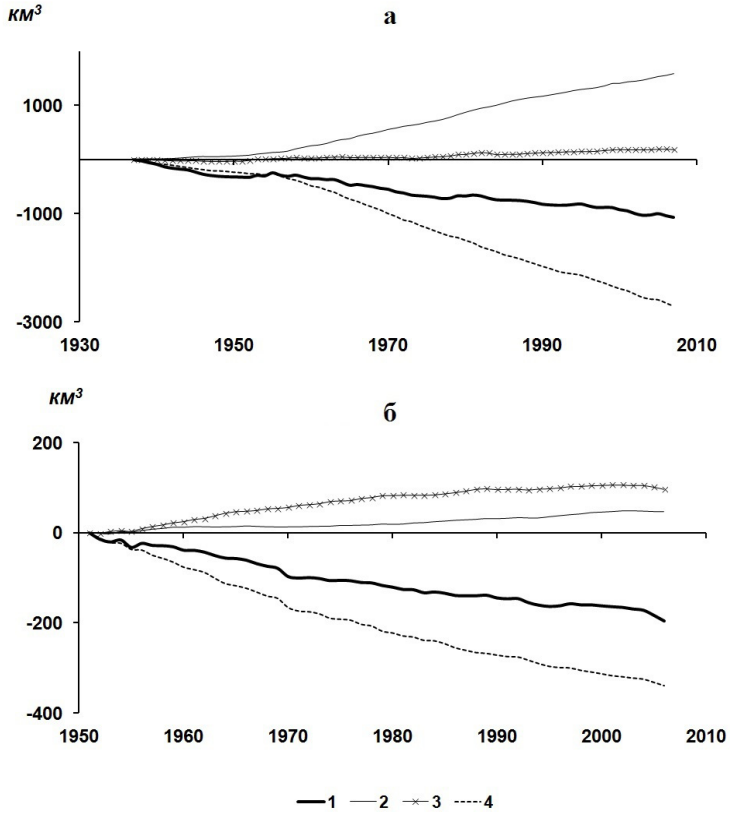
Фаза	**Годовой сток и его сезонные составляющие**			
	год	**зима**	**лето-осень**	**половодье**
ФПС1	нв/нв	нв/нв	нв/нв	18/16
ФПС2	нв/нв	4/5	9/10	нв/нв
ФСС	23/21	2/3	6/7	12/7
ФКСС1	27/27	нв/нв	нв/нв	нв/нв
ФКСС2	26/23	нв/нв	нв/нв	нв/нв

На Дону антропогенные факторы повышают сток (по сравнению с условно-естественными условиями) зимой и летом-осенью и незначительно снижают летом-осенью (повышая зимой) относительную разницу между стоком во время ФПС и ФСС (табл. 6). Но они одновременно с этим сни-

жают сток половодья и для ФПС и для ФСС, увеличивая разницу между стоком половодья, характерную для этих долговременных фаз по сравнению с условно-естественным стоком. Годовой сток для ФСС под влиянием антропогенных факторов также снижается.

Интегральный вклад антропогенных факторов в изменения годового и сезонного речного стока

Анализ кривых нарастающих сумм отклонений фактического (наблюденного) годового и сезонного стока от восстановленного (условно-естественного) стока показывает динамику изменения интегрального эффекта антропогенного воздействия (рис. 2а). На Волге влияние антропогенных факторов в наибольшей степени сказывается на стоке половодья (объем суммарного снижения стока за весь рассматриваемый период, начиная с 1930 г., составил 2620 км^3) и годовом стоке (суммарное снижение – 1044 км^3), тогда как зимний сток в общей сложности вырос на 1487 км^3, а интегральный эффект антропогенного воздействия на сток за летне-осенний период (приведший к его росту) оказался относительно невелик (около 196 км^3).



1 – год; 2 – зима; 3 – лето-осень; 4 – половодье

Рисунок 2. Нарастающая сумма отклонений фактического годового и сезонного стока Волги у Волгограда (а) и Дона у Раздорской (б) от восстановленного (условно-естественного стока), км^3

Относительно наибольшее интегральное снижение стока на Дону (рис. 2б) также характерно для годового (196 км^3) стока и стока половодья (340 км^3). Но в отличие от Волги на Дону наибольшим суммарным увеличением стока характеризуется сток лета-осени (144 км^3). При этом сток летне-осеннего периода увеличился в два раза больше, чем зимний сток. Для Волги же характерно прямо противоположное соотношение, что связано, прежде всего, с региональными особенностями регулирования стока водохранилищами.

Соотношение вклада антропогенного и климатического факторов в изменения стока

Полученные данные об условно-естественном годовом и сезонном стоке позволяют выявить соотношение вклада антропогенных и природно-климатических факторов в его общие изменения.

Сравнивая между собой фактический средний многолетний годовой и сезонный сток за 1891 – 1929 гг. (принятый нами в качестве условно-естественного периода с относительно небольшим антропогенным влиянием) и восстановленный по уравнениям регрессии сток за 1930 – 2006 гг. можно оценить, какой вклад внесли изменения климата и антропогенных факторов этого периода в изменение стока. Оказалось, что на Волге и на Дону природно-климатические и антропогенные факторы, действуя в одинаковом направлении, снижали сток половодья, а, следовательно, и годовой сток (рис. 3.). При этом вклад в изменения стока каждого из факторов был примерно одинаков для годового стока, а в снижении стока половодья существенно более заметную роль сыграли антропогенные факторы. В то же время соотношение вклада этих факторов в изменения меженного (зимнего и летне-осеннего) стока на Волге и на Дону характеризуются значительными различиями, но в целом они компенсировали снижение стока половодья. На Дону они вносят одинаковый вклад в повышение стока каждого из меженных сезонов (более значительного в летне-осенний период), тогда как на Волге увеличение стока зимней межени целиком обусловлено антропогенным влиянием, а суммарное малозаметное повышение стока летне-осенней межени было обусловлено антропогенными факторами

Изменения стока в период 1930 – 1980 гг. происходили на фоне снижения среднегодовой температуры воздуха и годовой суммы атмосферных осадков (рис. 4), а в 1981 – 2006 гг. на фоне их повышения (рис. 5). Для Дона оба рассматриваемых периода характеризуются однонаправленными воздействиями климатических и антропогенных факторов, увеличивающих летне-осенний и зимний (климатические условия во второй период привели к его слабозаметному снижению) сток, сокращающих сток половодья и суммарный годовой сток. В первом периоде более значителен вклад антропогенных факторов, которые приводят к снижению стока половодья и к компенсирующему этот эффект повышению стока летне-осенней и зимней межени.

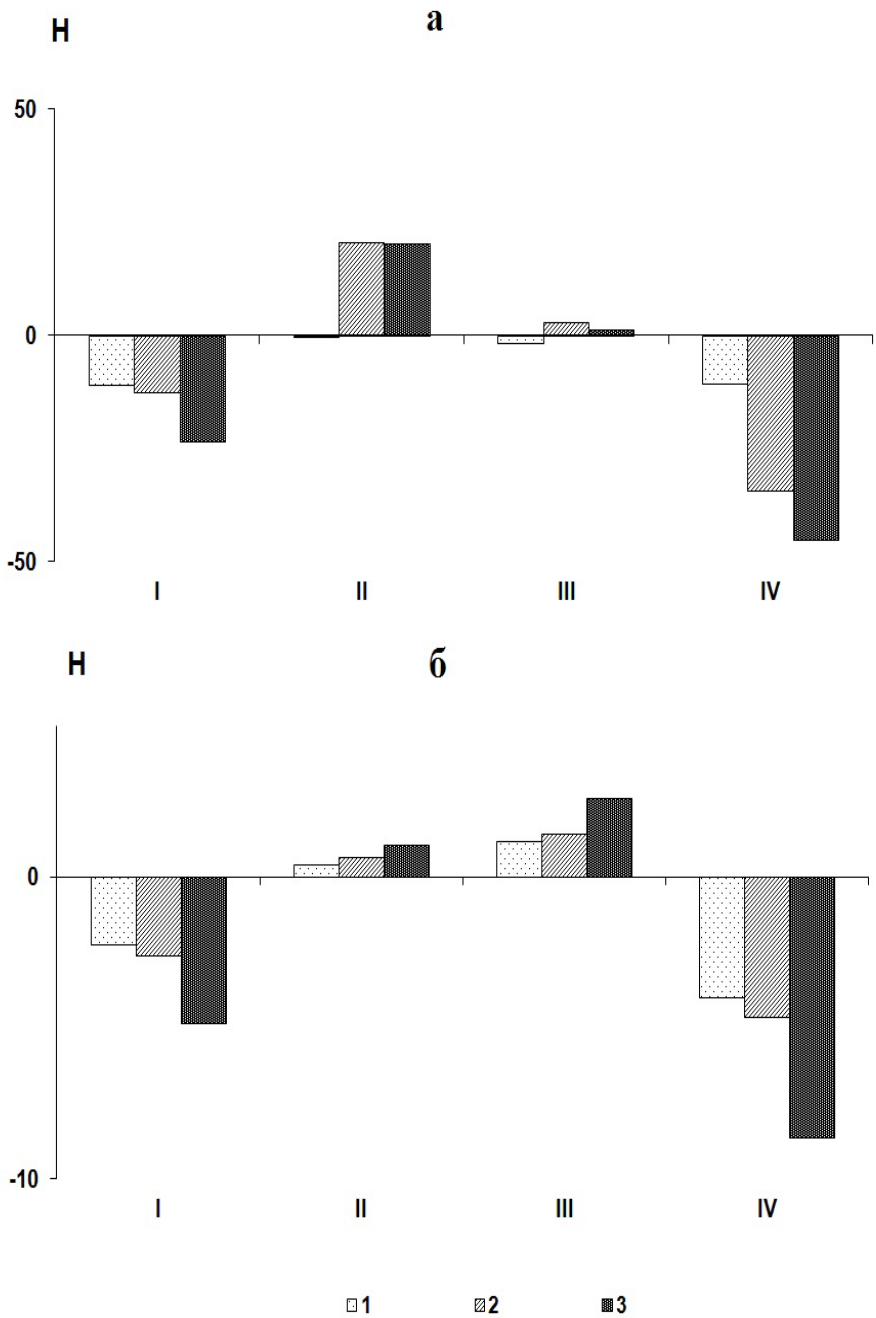


Рисунок 3. Климатические и антропогенные изменения стока (Н-км^3/год) Волги у Волгограда (а) и Дона у Раздорской (б) за период 1930 – 2006 гг. по сравнению с 1891 – 1929 гг.

1- климатические изменения, 2 – антропогенные изменения, 3 – суммарные изменения. I – год; II – зима; III – лето-осень; IV – половодье.

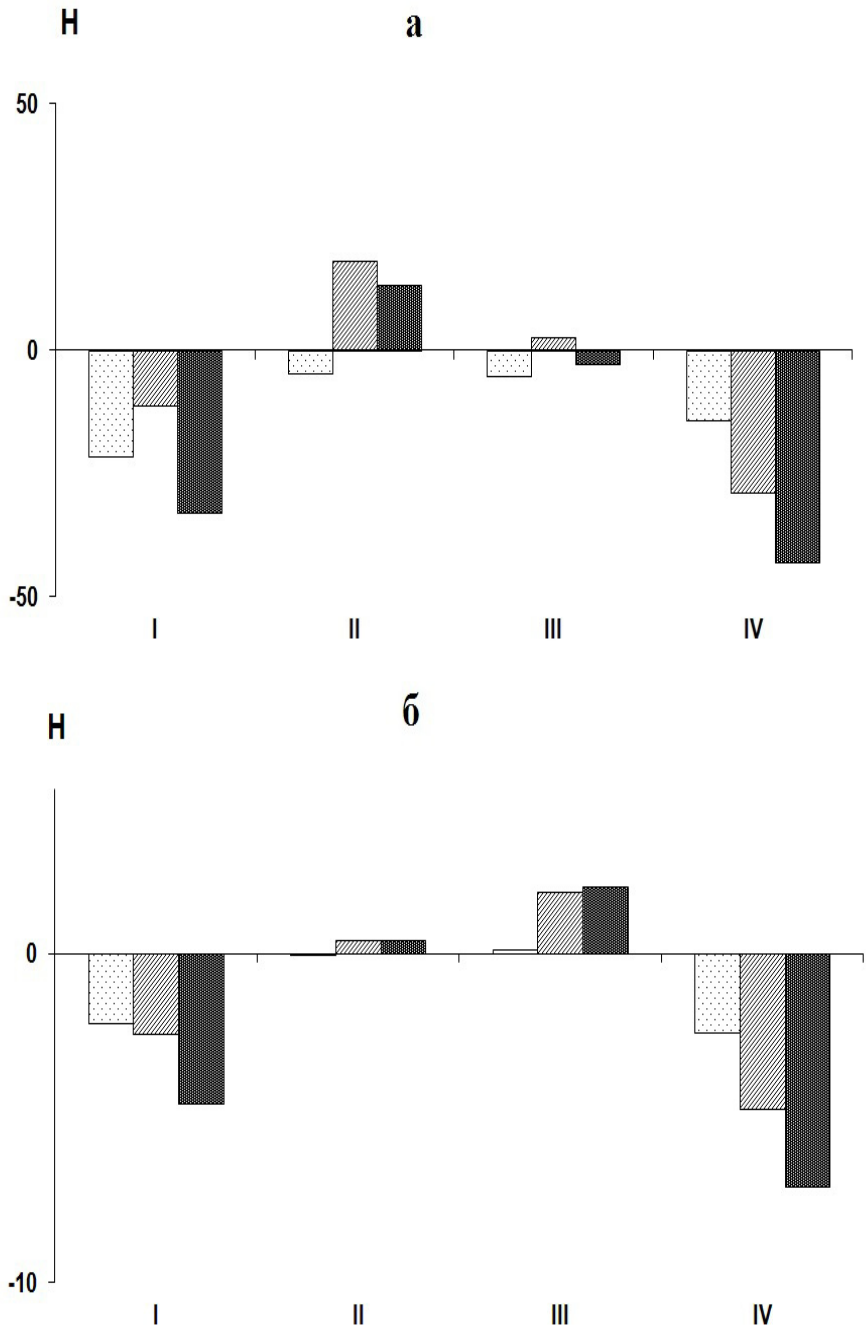


Рисунок 4. Климатические и антропогенные изменения стока (Н-км^3/год) Волги у Волгограда (а) и Дона у Раздорской (б) за период 1930 – 1980 гг. по сравнению с 1891 – 1929 гг.

1 – климатические изменения, 2 – антропогенные изменения, 3 – суммарные изменения. I – год; II – зима; III – лето-осень; IV – половодье

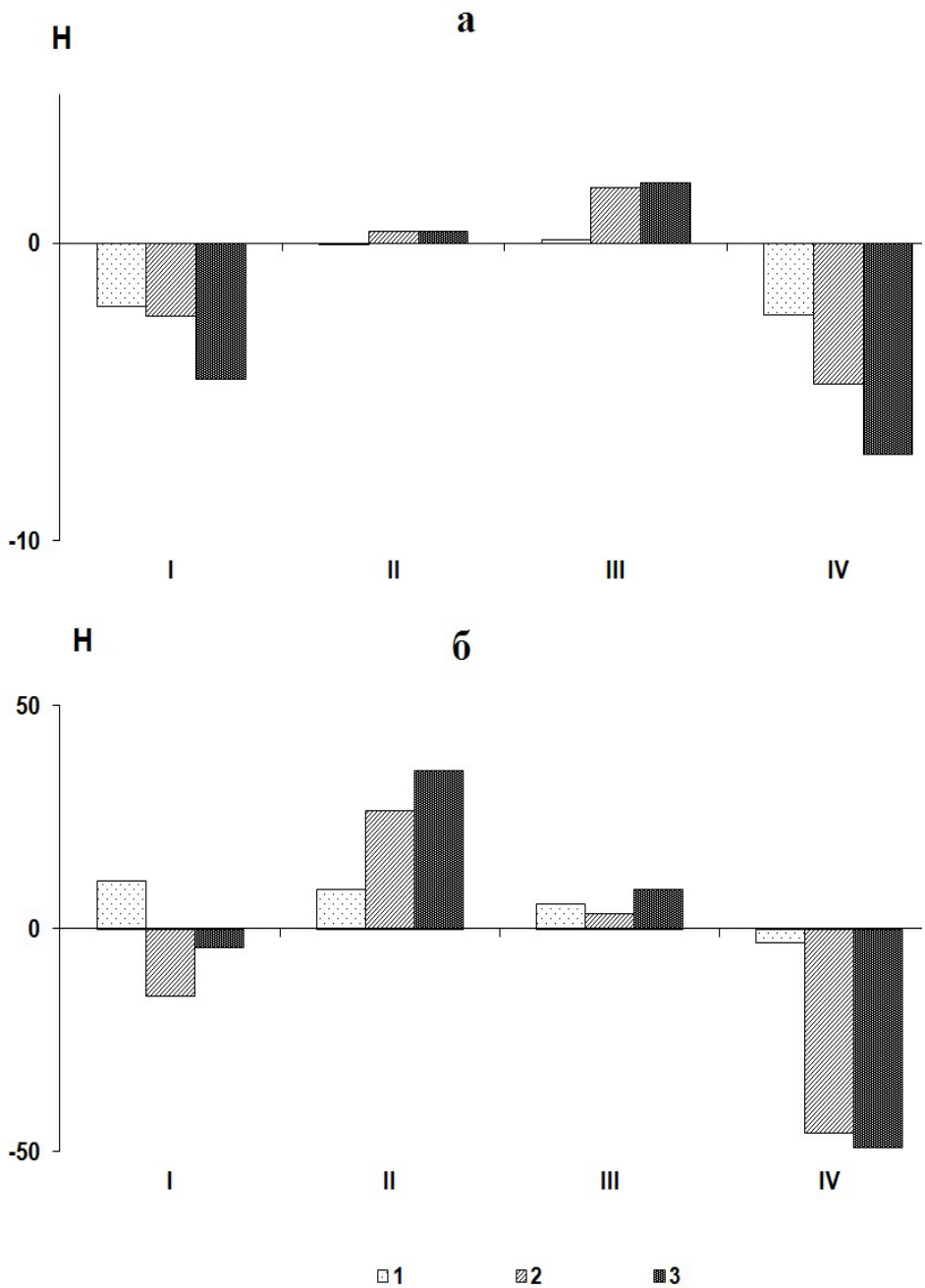


Рисунок 5. Климатические и антропогенные изменения стока (Н-км^3/год) Волги у Волгограда (а) и Дона у Раздорской (б) за период 1981 – 2006 гг. по сравнению с 1891 – 1929 гг.

1 – климатические изменения, 2 – антропогенные изменения, 3 – суммарные изменения. I – год; II – зима; III – лето-осень; IV – половодье

Оценка отдельных антропогенных воздействий на годовой сток, основанная на водохозяйственной статистике и воднобалансовых методах

Влияние на сток крупных рек различных водопотребителей после 1960 г. оценивалось по данным содержащейся в справочниках водохозяйственной статистики. При этом безвозвратный расход рассчитывали по разнице водозабора и сброса сточных вод. До 1960-х гг. – по косвенным данным (численности населения, индексам изменения отраслей хозяйства). Воздействие водохранилищ оценено по данным ГГИ (Водные ресурсы России и их использование, 2008). Расчет изменения стока мероприятиями агротехники выполнен на основе воднобалансового метода (Львович, 1963; Коронкевич, 1990); осушения земель – методом О.М. Новикова, Д.С. Гончаровой (1978); эксплуатации леса и его восстановления – методом О.И. Крестовского (1986); урбанизированных площадей – методом М.И. Львовича (1986) с учетом корректив, изложенных в работе Н.И. Коронкевича, К.С. Мельника (2015). При этом динамика хозяйственной деятельности на водосборах почерпнута из статистических справочников.

Бассейн Волги. Хозяйственная деятельность на водосборах разнонаправлено воздействует на годовой сток и в значительной мере приводит к взаимной компенсации, хотя в целом можно говорить о преобладании снижения стока в целом за период 1931 – 2005 гг. по сравнению с 1880 – 1930 гг. в размере 1.5 – 2 %. (рис. 6). Наибольший вклад в это снижение вносят неорошаемое земледелие (мероприятия по задержанию стока на сельскохозяйственных полях) и лесное хозяйство (в результате омоложения лесов и роста их биологической продуктивности).

Основное влияние на сток Волги оказывали традиционное водное хозяйство и водохранилища. Что касается сезонных воздействий, то вопрос влияния хозяйственной деятельности на водосборах на сток нуждается в дальнейшем исследовании.

Наибольшее общее антропогенное воздействие на сток Волги пришлось на период 1981 – 1990 гг., когда оно выразилось в среднем в уменьшении годового стока в размере несколько более 10 %. До этого, начиная с 1930-х гг., был период нарастания изъятий стока, сменившийся с 1990-х гг. снижением размеров этого изъятия.

Основной вклад в снижение стока Волги внесли безвозвратное изъятие вод на различные нужды, главным образом орошаемого земледелия, и влияние водохранилищ (потери на заполнение мертвого объема, особенно в 1950-е гг. и на дополнительное испарение с акватории).

Бассейн Дона. Как уже отмечено выше, антропогенное воздействие на сток в бассейне Дона было во все периоды. Наименьшим оно было в 1881 – 1930 гг., составляя в совокупности примерно 1 % годового стока, максимальным – в 1981 – 1990 гг., приводя к его уменьшению на 1/3 и

вновь снижаясь почти в 2 раза и имея тенденцию к дальнейшему снижению (рис. 7). Наибольший вклад в снижение стока вносят орошаемое земледелие (около 38 %) и водохранилища (24 %). Хозяйственная деятельность на водосборах в совокупности дает около 18 %, промышленное водопотребление – около 15 %, хозяйственно-бытовой сектор – несколько более 5 %.

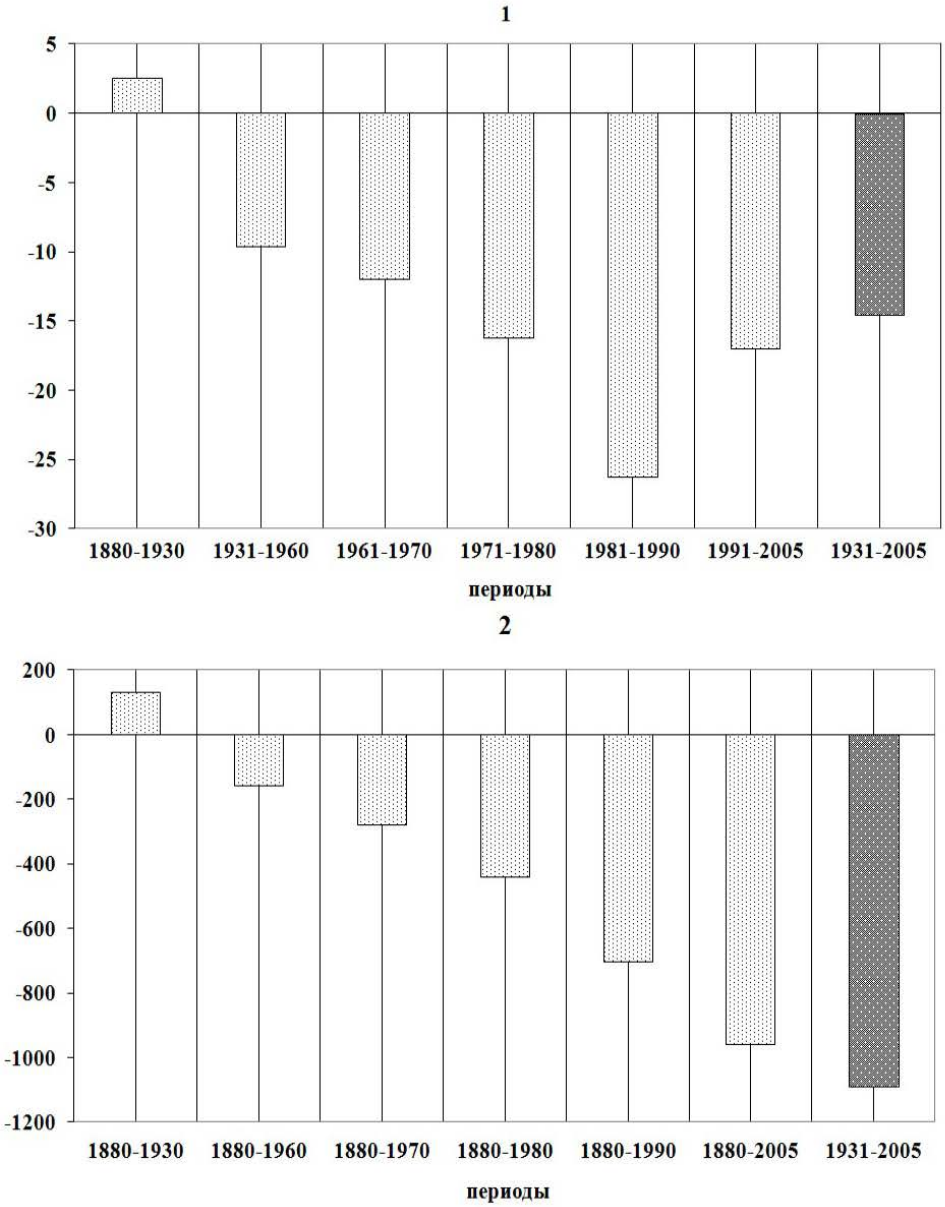


Рисунок 6. Влияние на сток Волги у Волгограда суммарных антропогенных воздействий, км^3:
1 – среднее за год, 2 – нарастающим итогом

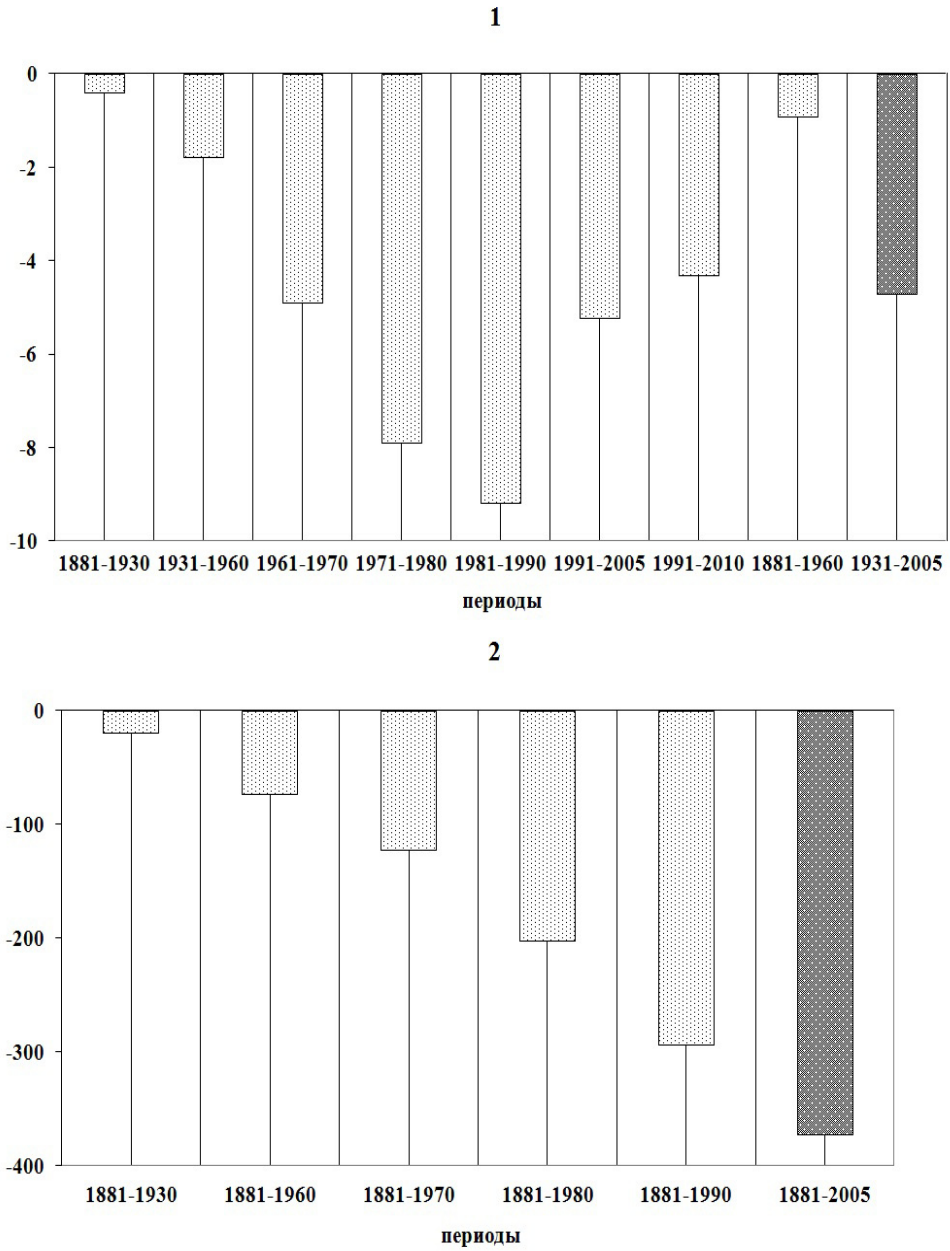


Рисунок 7. Суммарное воздействие всех видов хозяйственной деятельности на сток Дона, км^3: 1 – среднее за год, 2 – нарастающим итогом

Оценка антропогенных воздействий на сток Дона в створе Раздорская. Площадь бассейна Дона в створе ст. Раздорская приблизительно на 10 % меньше общей площади бассейна Дона. Соответственно для этого створа следует принять меньшим совокупное воздействие хозяйственной деятельности на водосборах (в основном агротехники на неорошаемых землях и

роста урбанизированных площадей). За период 1931 – 2005 гг. это выражается в величине среднего ежегодного уменьшения стока в размере 0.8 км^3/год. Ролью водохранилищ ниже Раздорской можно пренебречь и полагать общее их воздействие, равное тому, что рассчитано для всего бассейна Дона – 1.0 км^3/год.

Долю хозяйственно-бытового и промышленного водоснабжения можно оценить приблизительно в 70 % от водопотребления всего бассейна Дона, т.е. на бассейн Дона выше Раздорской приходится за рассматриваемый период соответственно 0.2 и 0.5 км^3 ежегодных безвозвратных изъятий. Гораздо меньше процент влияния на сток Дона орошаемого земледелия в створе Раздорская, т.к. в нижней части бассейна Дона расположена значительная часть орошаемых массивов. Выше створа Раздорская их менее 40 %, для орошения которых безвозвратно изымалось в среднем за 1931 – 2005 гг. около 0.8 км^3/год. Итого за этот период среднее уменьшение стока Дона в створе Раздорская оценивается в 3.3 км^3 ежегодно, а всего – в 245 – 250 км^3.

Сравнение результатов полученных оценок антропогенных изменений годового стока

Бассейн Волги. Получены в целом близкие между собой значения суммарного за 1935 – 2005 гг. антропогенного уменьшения годового стока Волги – 1044 км^3 по рекам-индикаторам климатических условий и 1090 км^3 (на основе водохозяйственной статистики и методов водного баланса), по сравнению с условно-естественным периодом, когда годовой сток Волги был равен 268 км^3. Это уменьшение оценивается в размере примерно 5 % в среднем за год. В отдельные периоды и сезоны изменения были значительно больше, что требует дальнейших исследований.

Сопоставление суммарного антропогенного изменения годового стока за период 1956 – 2005 гг., полученного на основе суммирования изменений, вызванных отдельными видами антропогенных воздействий (результаты наших расчетов и оценок из работ «Водные ресурсы России и их использование», 2008, «Справочно-аналитический…», 2008) с результатами расчетов, выполненных нами на основе регрессионных связей со стоком рек-индикаторов, показало, что получены близкие результаты. Также близки между собой результаты, полученные на основе разных вариантов регрессий со стоком рек-индикаторов за период 1956 – 1973 гг. (используемых нами и приведенных в работе И.А. Шикломанова, 1976) для отдельных периодов и не только для годового стока, но и стока половодья.

Бассейн Дона. Получены следующие значения среднего за год суммарного антропогенного уменьшения годового стока Дона у Раздорской за период 1930 – 2005 гг. – 3.3 км^3 (по сумме изменений, обусловленных влиянием отдельных видов антропогенных воздействий) и 2.6 км^3 (по связям со стоком рек-индикаторов климатических условий), что составляет соответственно 12 и 9.5 % относительно среднего многолетнего годового стока условно-естественного периода 1891 – 1929 гг.

Оценки изменения годового стока за период после заполнения Цимлянского водохранилища (1956 – 2005 гг.), полученные по сумме изменений, вызванных отдельными видами антропогенных воздействий, представленные в этом разделе и приведенные в работе «Водные ресурсы России и их использование» (2008) весьма близки между собой. В то же время эти методы, по-видимому, дают несколько завышенные оценки снижения стока Дона, обусловленного антропогенными факторами. Об этом говорит то обстоятельство, что согласно этим расчетам антропогенные изменения стока за указанный выше период оказываются равными общему изменению фактического стока по сравнению с предшествующим периодом наблюдений. На самом деле в это снижение стока вносит свой вклад и изменение климата, которое, как было показано выше также способствовало уменьшению годового стока (в этот период преобладала долговременная фаза снижения условно-естественного стока).

В свою очередь метод, основанный на связях стока главной реки со стоком рек-индикаторов климатических условий, несколько занижает его антропогенные изменения из-за того, что сток рек-индикаторов в некоторой степени уже изменен хозяйственной деятельностью на водосборах в сторону уменьшения (в основном, мероприятиями неорошаемого земледелия).

Заключение

Предложены методы анализа долговременных изменений годового и сезонного стока Волги и Дона, произошедших за более чем столетний период (с конца XIX до первого десятилетия XXI века), которые были вызваны изменениями климата и антропогенных факторов.

Начиная с конца XIX до начала XXI века условно-естественный годовой и сезонный сток (восстановленный на основе регрессионных связей с реками-индикаторами климатических условий) характеризовался сменой долговременных фаз их повышения и снижения продолжительностью, достигавшей более 80 лет.

Наиболее выражены такие фазы в многолетних изменениях стока половодья, зимы и лета-осени. При этом фазы изменений зимнего стока и стока летне-осеннего периода весьма синхронны между собой, тогда как фазы многолетних изменений стока половодья противоположны им. Указанные фазы годового стока (который включает в себя генетически разнородные гидрологические сезоны года) сильно «зашумлены» более короткопериодными ритмами и поэтому гораздо менее выражены.

Многолетние долговременные фазы изменения восстановленного речного стока приурочены к соответствующим фазам изменения температуры воздуха и атмосферных осадков. Начало последней многолетней фазы изменений восстановленного стока сопряжено с начавшимся в 1970 – 1980 гг. современным потеплением климата. До этого преобладала долговременная фаза понижения температуры воздуха и уменьшения атмосферных осадков. Отметим, что период инструментальных наблюдений за характеристиками водного режима

рек на основной массе гидрометрических станций на Русской равнине до 1970 – 1980 гг. относился именно к этой фазе изменений климата. При этом долговременная фаза потепления климата последних десятилетий сопровождается ростом зимнего и летне-осеннего стока Дона и Волги. На Волге годовой сток и сток половодья в этот периода также повышались, тогда как на Дону происходило их снижение.

Разница среднемноголетнего условно-естественного стока Волги и Дона между долговременными фазами его повышения и снижения достигает соответственно для годового стока более 10 %, стока половодья 10 и 50 %, зимнего стока около 50 % и 100 %, а летне-осеннего стока 25 и 50 %.

Воздействие антропогенных факторов (главным образом регулирования стока водохранилищами) приводит к значительному смещению начала последней долговременной фазы изменений стока на более ранние годы, что наиболее заметно для зимнего, летне-осеннего стока и стока половодья.

На Волге влияние антропогенных факторов в наибольшей степени сказывается на стоке половодья (объем суммарного снижения стока за весь рассматриваемый период, начиная с 1930 г., составил более 2600 км^3) и годовом стоке (суммарное снижение – более 1000 км^3), тогда как зимний сток в общей сложности вырос почти на 1500 км^3, а интегральный эффект антропогенного воздействия на сток за летне-осенний период (приведший к его росту) оказался относительно невелик (около 200 км^3).

Наибольшее интегральное снижение стока на Дону также характерно для годового стока (около 200 км^3) и стока половодья (340 км^3). Но в отличие от Волги на Дону наибольшим суммарным увеличением характеризуется сток лета-осени (около 150 км^3). При этом сток летне-осеннего периода увеличился в два раза больше, чем зимний сток. Для Волги же характерно прямо противоположное соотношение, что связано, прежде всего, с региональными особенностями регулирования стока водохранилищами.

Соотношение изменений стока (произошедших за 1930 – 2006 гг. по сравнению с базовым периодом 1891 – 1929 гг.), обусловленных климатическими и антропогенными факторами, весьма различно применительно к стоку за год и основные его сезоны. На Волге и на Дону природно-климатические и антропогенные факторы, действуя в одинаковом направлении, снижали сток половодья, а, следовательно, и годовой сток. При этом вклад в изменения стока каждого из факторов был примерно одинаков для годового стока, а в снижении стока половодья существенно более заметную роль сыграли антропогенные факторы. В то же время соотношение вклада этих факторов в изменения меженного (зимнего и летне-осеннего) стока на Волге и на Дону характеризуется значительными различиями, но в целом они компенсировали снижение стока половодья. На Дону они вносят одинаковый вклад в повышение стока каждого из меженных сезонов (более значительное в летне-осенний период), тогда как на Волге увеличение стока зимней межени целиком обусловлено антропогенным влиянием, а суммарное малозаметное повышение стока летне-осенней межени было связано с антропогенными факторами.

Развитие методических основ предлагаемых подходов к исследованию современных изменений видится в следующих направлениях. Для восстановления многолетних рядов стока и для оценки на этой основе соотношения климатических и антропогенных факторов в произошедших многолетних изменениях стока крупных рек имеет перспективу применение связей стока с его климатическими факторами с использованием для этого методов (моделей), с разной степенью детализации описывающих процессы формирования стока. Одно из возможных направлений – восстановление среднесуточных расходов воды крупных рек на основе методов трансформации гидрографа, которые уже используются для восстановления многолетних рядов стока. Однако следует иметь в виду, что такие подходы также имеют ограничения и поэтому важно использование нескольких методов для взаимного контроля результатов.

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований №10 Отделения наук о земле РАН «Оценка роли водных ресурсов с позиций национальной безопасности России» (проект «Региональные особенности сценарного прогнозирования изменений водных ресурсов») и при финансовой поддержке РФФИ гранты 14-05-00761 и 15-05-04207.

Список литературы

Агупов А.В. 1960. Нормы стока и колебания водности рек Западной Сибири. – В кн.: Колебания и изменения речного стока. – М., АН СССР, с. 5 – 47.

Андреянов В.Г. 1959. Циклические колебания годового стока, их изменения по территории и учет при расчётах стока. - В кн.: Труды III Всесоюз. гидролог. съезда, т. II. –Л., Гидрометеоиздат.

Афанасьев А.Н. 1967. Колебаний гидрометеорологического режима на территории СССР. – Изд-во «Наука», М., 232 с.

Бубин М.Н., Рассказова Н.С. 2013. Ритмичность многолетних колебаний стока рек как интегральный показатель изменчивости климата (на примере Урала). – Издательство Томского политехнического университета, 279 с.

Водные ресурсы России и их использование. 2008. – СПб., Государственный гидрологический институт, 600 с.

Воскресенский К.П. 1962. Норма и изменчивость годового стока рек Советского Союза. – Л., Гидрометеоиздат, 548 с.

Георгиади А.Г., Кашутина Е.А. 2011. Региональные особенности временных изменений притока речных вод в Северный ледовитый океан. – В кн.: Вклад России в международный полярный год 2007/08. Полярная криосфера и воды суши. – М.-СПб., Издательство Paulsen, с. 252 – 264.

Георгиади А.Г., Кашутина Е.А. 2014. Особенности многолетних изменений годового и сезонного стока рек бассейна Лены. – Изв. РАН, сер. географ., № 2, с. 71 – 83.

Георгиади А.Г., Милюкова И.П., Кашутина Е.А. 2008. Реакция речного стока в бассейне р. Лена на современное и возможное в будущем глобальное потепление климата. – В кн.: Изменение окружающей среды и климата: Природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Т. III, часть II, "Природные процессы в полярных областях Земли". – М., ИГ РАН, ИФЗ РАН, с.167 – 179.

Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Зайцева И.С., Кашутина Е.А., Барабанова Е.А. 2013. Климатические и антропогенные факторы в многолетних изменениях стока реки Волги. – Водное хозяйство России, № 4, с. 4 – 19.

Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милюкова И.П., Кашутина Е.А., Барабанова Е.А. 2014. Современные и сценарные изменения речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Часть 2. Бассейны рек Волги и Дона. – М., МАКС Пресс, 214 с.

Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Кашутина Е.А., Барабанова Е.А., Зайцева И.С., Долгов С.В. 2012. О соотношении природно-климатических и антропогенных факторов в многолетних изменениях речного стока. – В кн.: Вода и водные ресурсы: Системообразующие функции в природе и экономике. – Новочеркасск, ЮРГТУ (НПИ), с. 41 – 47.

Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милюкова И.П., Кислов А.В., Анисимов О.А., Барабанова Е.А., Кашутина Е.А., Бородин О.О. 2011. Сценарная оценка вероятных изменений речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Часть 1. Бассейн реки Лены. – М., Макс Пресс, 179 с.

Горошко Н.В. 2010. Способы оценки пространственно-временных колебаний стока (на примере бассейна Верхней Оби). – Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата, №1, с. 55 – 65.

Зайцева И.С. 1990. Маловодные годы в бассейне Волги: природные и антропогенные факторы. – М., Институт географии АН СССР, 184 с.

Кляшторин Л.Б., Любушин А.А. 2005. Циклические изменения климата и рыбопродуктивности. – М., Издательство ВНИРО, 258 с.

Коронкевич Н. И. 1990. Водный баланс Русской равнины и его антропогенные изменения. – М., Наука, 205 с.

Коронкевич Н.И., Мельник К.С. 2015. Антропогенные воздействия на сток реки Москвы. – М., МАКС Пресс, 168 с.

Коронкевич Н.И., Георгиади А.Г., Милюкова И.П., Кашутина Е.А., Барабанова Е.А., Вишневская И.А., Долгов С.В., Зайцева И.С. 2013. Изменения условий формирования стока в бассейне Волги и их гидрологические последствия. – В кн.: Водная стихия: опасности, возможности прогнозирования, управления и предотвращения угроз. Материалы Всероссийской научной конференции, 7 – 12 октября 2013 г. г. Краснодар. – Новочеркасск, Издательство «Лик», с. 121 – 127.

Крестовский О.И. 1986. Влияние вырубок и восстановления лесов на водность рек. – Л., Гидрометеоиздат, 119 с.

Кузин П.С. 1970. Циклические колебания стока рек Северного полушария. – Л., Гидрометеоиздат, 179 с.

Львович М. И. 1963. Человек и воды. – М., Географгиз, 568 с.

Львович М.И. 1986. Вода и жизнь: (Водные ресурсы, их преобразование в охрана). – М., Мысль, 254 с.

Мурашенкова Н. В. 2007. Оценка характеристик речного стока в изменяющихся природно-хозяйственных условиях: Автореф. … дисс. канд. тех. наук. – М., 28 с.

Новиков С.М., Гончарова Ж.С. 1978. Прогноз изменений водных ресурсов крупных рек СССР под влиянием осушительных мелиораций. – В кн.: Труды ГГИ. Вып. 255. С. 54 – 68.

Справочно-аналитический обзор гидрологического режима в устьях Волги, Терека, Сулака. 2008. – Москва, ГОИН.

Шалабанов А.К., Роганов Д.А. Практикум по эконометрике с применением MS EXCEL. Линейные модели парной и множественной регрессии. 2008. – Казань, Академия управления «ТИСБИ», 53 с.

Шикломанов И.А. 1976. Гидрологические аспекты проблемы Каспийского моря. – Л., Гидрометеоиздат, 79 с.

Шикломанов И.А. 1979. Антропогенные изменения водности рек. – Ленинград, Гидрометеоиздат, 304 с.

Ясинский С.В. 2009. Формирование гидрологического режима водосборов малых равнинных рек: Автореф. … дисс. д-ра географ. наук. – М., 52 с.

Статья поступила в редакцию: 22.03.2016. *После переработки: 22.09.2016.*