УДК 556.01

О ВКЛАДЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ В ИЗМЕНЕНИЯ СТОКА КРУПНЫХ РЕК РУССКОЙ РАВНИНЫ И СИБИРИ

А. Г. Георгиади*, Н. И. Коронкевич, Е. А. Барабанова,
Е. А. Кашутина, И. П. Милукова

Представлено академиком РАН В.М. Котляковым 31.03.2019 г.

Поступило 05.04.2019 г.

На основе двух независимых методов оценены изменения годового, а также сезонного стока Волги, Дона, Енисея и Лены. Один из них основан на восстановлении естественного стока последних десятилетий, в течение которых происходили его существенные антропогенные изменения. Для этих целей использованы данные о стоке рек (притоков рассматриваемых рек и их верхних частей), водный режим которых относительно слабо изменён антропогенным воздействием. В другом, для этого использованы данные водохозяйственной статистики. В последующем, данные о восстановленном речном стоке сравнивались с антропогенно-изменённым стоком за этот период и за предшествующий ему базовый период, когда антропогенным воздействием можно пренебречь. Показано, что климатические и антропогенные факторы действуют на сток как однонаправлено, увеличивая или уменьшая его, так и в противоположных направлениях. При этом влияние антропогенных факторов, главным образом водохранилищ и водопотребления, соизмеримо с влиянием климатических факторов, а во многих случаях превосходит его.

Ключевые слова: изменения речного стока, водохозяйственная статистика, методы восстановления стока, антропогенные и климатические факторы.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524885539-545>

ВВЕДЕНИЕ

Изменение стока крупных рек России в последние десятилетия обусловлено влиянием как климатических факторов, так и антропогенных воздействий. Выявить их роль чрезвычайно важно для понимания генезиса уже произошедших и возможных в будущем гидрологических изменений, а также для принятия мер по снижению или даже полному устранению их нежелательных последствий. Сложность решения этой задачи заключается в том, что климатические и антропогенные изменения речного стока тесно взаимосвязаны и часто воздействуют на сток не непосредственно, а косвенно — через рельеф, почву, биоту. Поэтому невозможно абсолютно точно разделить вклад климатических и антропогенных факторов в формирование и изменение речного стока и приходится довольствоваться относительными оценками. Обычно они представляют собой величину отклонений стока от неких базовых значений (например, от его нормы, среднего многолетнего стока или стока какого-либо другого периода), рассчитываемых разными методами. Оценке соотношения климатических и антропогенных факторов в гидрологических изменениях посвящено довольно боль-

шое число работ, в том числе и авторов данной работы ([3, 6, 7, 10–12] и др.). Однако этот вопрос требует дальнейшего изучения. В работе предпринята попытка оценить вклад климатических и антропогенных факторов в изменение годового стока и стока за наиболее контрастные по водности периоды — половодье и зиму — на примере крупных европейских (Волга, Дон) и азиатских (Енисей, Лена) рек России, общий сток которых составляет около одной трети её общего речного стока, а также проанализировать возникающие при этом сложности.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сначала для каждой реки были определены границы базовых периодов (когда антропогенным воздействием можно пренебречь) и периодов естественного антропогенного воздействия. Для этих периодов были рассчитаны средние значения стока, а также их разница. Она показывает суммарные изменения стока, произошедших под влиянием как антропогенных воздействий, так и климатических факторов (табл. 1, 2). При этом, как видно, границы периодов отличаются на рассматриваемых реках, что объясняется временем начала естественного антропогенного воздействия, а время окончания наличием (отсутствием) данных.

Институт географии Российской Академии наук, Москва

*E-mail: hydro-igras@yandex.ru

Таблица 1. Изменение объёма годового стока под влиянием суммарного воздействия климатических и антропогенных факторов относительно базового периода

Река—створ	Базовый период		Период существенного антропогенного воздействия		Изменение стока		
	годы	объём стока, км ³ /год	годы	объём стока, км ³ /год	среднее за год		всего, км ³
					км ³	%	
Волга—Волгоград	1879—1929	270,5	1930—2014	240,3	–30,2	–11,2	–2567
Дон—Раздорская	1876—1929	28,9	1930—2014	22,1	–6,8	–23,5	–578
Енисей—Игарка	1936—1960	575,0	1961—2004	599,6	24,6	4,3	1082
Лена—Кюсюр	1936—1967	517,3	1968—2007	538,6	21,3	4,1	852

Для определения вклада антропогенных и климатических факторов в произошедшее суммарное изменение стока, представленное в табл. 1 и 2, применены два независимых подхода. Один базируется на данных водохозяйственной статистики, имеющейся в различных справочниках [2, 9], а также в литературных источниках ([3, 4] и др.), другой — на восстановлении естественного (точнее условно-естественного) стока исследуемой реки. В обоих случаях оценки вклада антропогенных воздействий и климатических изменений в суммарные изменения стока основаны на сравнении стока за базовый период, относительно слабо затронутый хозяйственной деятельностью, с фактическим и восстановленным (условно-естественным) стоком за период существенного антропогенного воздействия. При этом разница восстановленного (условно-естественного) стока для периода интенсивного антропогенного воздействия и стока базового периода характеризует влияние климатических изменений (при допущении, что они не являются следствием деятельности человека), а разница восстановленного (условно-естественного) и фактического (наблюдённого) стока периода интенсивного антропогенного воздействия — вклад антропогенного влияния на суммарные изменения стока.

При использовании данных водохозяйственной статистики ключевым вопросом является определение так называемого безвозвратного расхода воды при водопотреблении, эквивалентного уменьшению речного стока. Обычно его принято рассчитывать по разнице водозабора и величины сброса сточных вод в реки и водоёмы. При этом величина безвозвратного расхода преуменьшается за счёт того, что не все водопотребители дают сведения для формы 2ТП Водхоз, не учитывается повышенная температура ряда видов сточных вод, например, от предприятий теплоэнергетики, способствующая росту испарения, и преувеличивается из-за вовлечения в водозабор подземных вод, нередко не связанных с речным стоком. В оценке влияния водохранилищ на сток не всегда учитывается, что пойма рек и при-

легающие территории и до создания водохранилища испаряли много воды, подчас больше, чем с зеркала водохранилищ. Заметим, что водохозяйственные сведения не всегда надёжны. Существенно и то, что водохозяйственная статистика не учитывает изменений речного стока, обусловленных изменением ландшафтов (мероприятиями неорошаемого земледелия, лесного хозяйства, а также под влиянием урбанизированных территорий). В данной работе эти изменения, которые рассчитываются водно-балансовым путём, не учитывались ввиду отсутствия исходных данных по бассейнам Енисея и Лены. Для бассейнов Волги и Дона соответствующие расчёты были выполнены ранее и показали, что влияние этих видов хозяйственной деятельности на годовой сток разнонаправлено и в основном за длительные периоды взаимокompенсирется, хотя в ряде случаев такой компенсации не происходит, что может повлиять на оценку вклада климатических и антропогенных факторов [6]. К сожалению, данные водохозяйственной статистики в отношении расходования воды на различные нужды в отдельные сезоны или отсутствуют, или весьма ненадёжны. Поэтому в расчётах были использованы лишь годовые значения.

При восстановлении условно-естественного стока учитывается, что многолетние гидрологические ряды рассматриваемых рек неоднородны с точки зрения воздействия на него антропогенных факторов и состоят из двух частей. Первая часть ряда включает в себя многолетние данные, относящиеся к периоду до начала заметного воздействия антропогенных факторов. Вторая часть состоит из многолетнего ряда, ежегодный сток в котором изменён в разной степени в результате воздействия антропогенных факторов. Годовой и сезонный сток этого периода восстанавливался двумя методами. Один из них исходит из регрессионных связей между стоком главной реки и стоком рек-индикаторов климатических условий (притоков и верхних частей главной реки), характеризующихся относительно слабыми антропогенными нарушениями водного режима. Одним

Таблица 2. Изменение среднего за сезон объёма зимнего стока и стока половодья под влиянием суммарного воздействия климатических и антропогенных факторов относительно стока базового периода

Река—створ	Базовый период, км ³		Период существенного антропогенного воздействия, км ³		Изменение стока			
	зима	половодье	зима	половодье	зима		половодье	
					км ³	%	км ³	%
Волга—Волгоград	32,3	181	55,1	130,1	22,8	70,7	-50,9	-28,1
Дон—Раздорская	2,4	20,1	3,6	9,9	1,2	48,1	-10,2	-50,7
Енисей—Игарка	74,9	414,4	128,2	394,0	53,3	71,2	-20,4	-4,9
Лена—Кюсюр	33,8	383,1	44,0	393,1	10,2	30,1	10,0	2,6

из первых его применил И.А. Шикломанов [10]. Этот метод получил дальнейшее развитие, в том числе в работах [5, 6]. Полученные при этом регрессионные связи характеризуются довольно высокой надёжностью. Так, коэффициенты множественной линейной корреляции находятся в диапазоне 0,8–0,9 и более, а ошибки коэффициентов регрессии в подавляющем своём большинстве в два и более раза меньше их абсолютных значений.

В данной работе в качестве рек-индикаторов климатических условий для восстановления годового и сезонного (зимнего и за период половодья) стока Волги у Волгограда использовались данные по Оке у Калуги, Вятке у Кирова и Белой у Бирска, а для восстановления стока Дона у ст. Раздорской — Дона у Казанской и Хопра у Бесплемяновского. Конечно, и в бассейнах рек-индикаторов имеет место хозяйственная деятельность, что, по-видимому, оказывает некоторое воздействие на результаты восстановления стока Волги и Дона.

Оценки изменений стока Енисея и Лены, основывались на полученных А.И. Шикломановым с коллегами восстановленных многолетних рядах средних суточных расходов воды [14, 15]. Для этого применялся несколько иной метод восстановления — метод трансформации годового гидрографа стока с использованием функции влияния Г.П. Калинина и П.И. Милокова [8]. Калибровка параметров проводилась на основе данных параллельных наблюдений за годы с отсутствием заметного влияния антропогенных факторов по верхнему и нижнему створам расчётных участков с учётом боковой приточности между ними. Значения коэффициента Нэша—Сатклиффа [13], используемого для оценки точности восстановления стока, находятся в диапазоне 0,82–0,98, что говорит о достаточной надёжности расчётов, а по методу, используемому в гидрологических прогнозах [1], точность восстановления, характеризуется как удовлетворительная или хорошая.

Часть многолетнего ряда годового и сезонного стока, восстановленного одним из указанных выше

способов, объединялась с другой его частью, сток которой не был заметно нарушен антропогенным воздействием. Так компоновались общие ряды условно-естественного стока, осреднённые значения которого сравнивались с базовым и фактическим стоком за период существенного антропогенного воздействия.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как следует из табл. 1, изменения *годового стока* на рассматриваемых реках носили разнонаправленный характер — у Волги и Дона суммарный сток в период существенного антропогенного воздействия снижался, а у Енисея и Лены повышался. При этом наиболее заметно изменился сток Волги и Дона. Так, сток Волги у Волгограда за 1930–2014 гг. уменьшился по сравнению с базовым периодом более чем на 2500 км³ (свыше 30 км³/год), а на Дону у ст. Раздорской за эти годы его снижение составило 600 км³ (около 7 км³/год), что весьма негативно сказалось на водохозяйственной и гидроэкологической ситуациях в южных частях их бассейнов, состоянии Каспийского и Азовского морей.

В табл. 3 и 4, рис. 1 приведены результаты оценки вклада климатических и антропогенных факторов в эти изменения, рассчитанного с использованием данных водохозяйственной статистики и метода восстановления условно-естественного стока. Как следует из табл. 3 антропогенные и климатические изменения годового стока на Волге и Дону были однонаправлены — в сторону его уменьшения. Причём доля первых из них в изменении годового стока составила более 36% у Волги и свыше 40% у Дона. Практически равное воздействие на годовой сток в бассейне Волги оказало влияние водохранилищ (особенно Волжско-Камского каскада) и безвозвратное водопотребление при использовании воды на различные хозяйственные нужды. На Дону безвозвратное водопотребление в 1,5 раза превысило влияние водохранилищ (главным образом Цимлянского). На Енисее и Лене действие антропогенных и климати-

Таблица 3. Изменение годового стока за период существенного антропогенного воздействия, рассчитанное по данным водохозяйственной статистики относительно базового периода, км³

Река–створ	Антропогенные изменения				Климатические изменения	
	Влияние водохранилищ (заполнение мёртвого объёма и дополнительное испарение)	Безвозвратное водопотребление	Всего	Среднее за год	Всего	Среднее за год
Волга–Волгоград	–450	–476	–926	–10,9	–1641	–19,3
Дон–Раздорская	–94,3	–146	–240	–2,8	–338	–4,0
Енисей–Игарка	–308	–39,7	–348	–7,9	1430	32,5
Лена–Кюсюр	–29,9	–3	–32,9	–0,8	885	22,1

Рис. 1. Изменение годового стока под влиянием антропогенных и климатических факторов в процентах от стока базового периода. 1 – изменение стока, определённое с использованием данных водохозяйственной статистики; 2 – изменение стока, определённое методом восстановления его условно-естественных значений.

ческих факторов было разнонаправленным при преобладающем влиянии климатических факторов, которое оказалось у Енисея почти в 4 раза больше антропогенного, а у Лены более чем в 20 раз. В антропогенном воздействии у сибирских рек явно преобладает влияние водохранилищ, главным образом вследствие заполнения так называемого мёртвого объёма водохранилищ Ангара-Енисейского каскада, а также Вилюйского водохранилища на притоке Лены Вилюе. Причём масштаб антропо-

генного воздействия на Енисее на порядок выше, чем на Лене.

На основе метода восстановления условно-естественных значений стока получены близкие оценки вклада климатических и антропогенных факторов в общее изменение стока к тем, что были определены с использованием водохозяйственной статистики, особенно для Дона и сибирских рек, причём результаты расчёта по обоим методам для Лены и Дона практически совпали (табл. 4, рис. 1). Несколько бóльшие различия в оценках, особенно вклада антропогенных воздействий, оказались для бассейна Волги. Это в значительной мере можно объяснить ландшафтными преобразованиями в её бассейне, влияние которых на сток не учитывается в водохозяйственной статистике. Следует также отметить довольно существенные отличия в результатах расчётов антропогенных изменений стока Енисея, полученных по двум рассмотренным методам. По-видимому, это главным образом следствие некоторого завышения оценок безвозвратных потерь стока за счёт дополнительного испарения с акватории водохранилищ в этом регионе.

Изменения *сезонного стока* под влиянием антропогенных и климатических факторов представлены в табл. 2 (суммарные изменения) и на рис. 2, на котором представлен вклад каждого из них. На Волге и Дону антропогенные и климатические факторы действуют в одном направлении, снижая сток половодья. А на Енисее, Оби и Лене они оказывают воздействие в разных направлениях (климатические факторы повышают сток, а антропогенные, напротив, его снижают). В результате преобладающего влияния антропогенных факторов на Енисее сток половодья уменьшается, а на Лене он растёт. Отметим, что на реках Сибири масштаб относительных изменений стока половодья существенно меньше, чем на реках Русской равнины.

С зимним стоком ситуация совершенно иная. Природно-климатические и антропогенные факторы в этом случае “работают” в одном направлении (за

Таблица 4. Изменения годового стока за период существенного антропогенного воздействия, рассчитанные методами восстановления его условно-естественных значений, км³

Река—створ	Антропогенные изменения		Климатические изменения	
	суммарно за период	среднее за год	суммарно за период	среднее за год
Волга—Волгоград	–1190	–14	–1377	–16,2
Дон—Раздорская	–230	–2,7	–348	–4,1
Енисей—Игарка	–237,6	–5,4	1320	30
Лена—Кюсюр	–32	–0,8	884	22,1

исключением Волги, на которой климатические факторы приводят к малозаметному снижению зимнего стока) и увеличивают его. При этом наиболее существенный рост зимнего стока наблюдается на Волге, Дону и Енисее. Однако соотношение вклада климатических и антропогенных факторов в общее увеличение зимнего стока на каждой из рек характеризуется большими различиями. Так, на Волге его рост связан почти исключительно с влиянием антропогенных факторов — главным образом из-за особенностей режима работы ГЭС, связанной с повышенными запросами на электроэнергию в зимний период. Похожая ситуация складывается и на Лене. Тогда как на Енисее и Дону значительный вклад вносят климатические факторы соответственно более 30% и около 50%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные оценки вклада антропогенных и климатических факторов в изменения годового стока, наблюдавшихся в период существенных антропогенных воздействий таких разных по водности и по природным и хозяйственным условиям речных бассейнов, как Волга, Дон, Енисей и Лена, показали в целом близкую оценку их вклада, полученную с использованием данных водохозяйственной статистики и методов восстановления условно-естественного стока. При этом доля антропогенных факторов в уменьшении годового стока Волги при использовании данных водохозяйственной статистики и метода восстановления условно-естественного стока оценены в 36–46%, Дона в 40% и соответственно климатических факторов в 54–64% и 60%.

На Енисее и Лене воздействие антропогенных и климатических факторов на годовой сток было разнонаправленным при преобладающем влиянии климатических факторов.

На основе анализа многолетних рядов восстановленного стока половодья и зимней межени оценен вклад климатических и антропогенных факторов в изменения значительно отличающихся по водности гидрологических сезонов — зимнего и периода половодья. Климатические и антропогенные факторы в

Рис. 2. Изменение зимнего стока и стока половодья под влиянием антропогенных и климатических факторов в процентах от стока базового периода, определенное методом восстановления их условно-естественных значений.

зимний период “работают” на всех реках, как правило, в одном направлении и увеличивают сток в общей сложности более чем на 70% на Волге и Енисее, 40% на Дону и 30% на Лене. При этом вклад антропогенных факторов в суммарные изменения зимнего стока составляет на этих реках соответственно почти 100%, более половины, почти треть и свыше 90%. Сток половодья Енисея, Волги и Дона снижается также при преобладающем влиянии антропогенных факторов. На Лене доминирует влияние климатических факторов, приводящее к росту стока половодья

Дальнейшее совершенствование изложенных методов и более полная исходная информация за последние годы позволит уточнить полученные оценки вклада антропогенных и климатических факторов в изменение речного стока.

Источники финансирования. Исследования выполнены в рамках темы государственного задания

№ 0148–2019–0007/AAAA–A19–119021990093–8 (методические подходы) и при финансовой поддержке РФФИ, гранты № 18–05–60240, 17–05–00948 (результаты и их обсуждение).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Апполов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д.* Курс гидрологических прогнозов. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 419 с.
2. Водное хозяйство и водные ресурсы России в 2016 году (Статистический сборник) / Под ред. Н.Г. Рыбальского, А.Д. Думнова, В.А. Омеляненко. М.: НИИ-Природа, 2017. 302 с.
3. Водные ресурсы России и их использование / Под ред. И.А. Шикломанова. СПб.: Гос. Гидрол. ин-т, 2008. 600 с.
4. *Вуглинский В.С.* Водные ресурсы и водный баланс крупных водохранилищ СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 222 с.
5. *Георгиади А. Г., Кашутина Е. А.* Долговременные изменения стока крупнейших сибирских рек // Изв. РАН. Сер. географ. 2016. № 5. С. 70–81.
6. *Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милукова И.П., Кашутина Е.А., Барабанова Е.А.* Современные и сценарные изменения речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Ч. 2. Бассейны рек Волги и Дона. М.: МАКС Пресс, 2014. 214 с.
7. *Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милукова И.П., Кислов А.В., Анисимов О.А., Барабанова Е.А., Кашутина Е.А., Бородин О.О.* Сценарная оценка вероятных изменений речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Ч. 1. Бассейн реки Лены. М.: Макс Пресс, 2011. 179 с.
8. *Калинин Г.П., Милуков П.И.* Приближенный расчет неустановившегося движения водных масс // Тр. ЦИП. 1958. В. 66. 72 с.
9. Каталог водохранилища СССР / Под ред. С.К. Лазарева. М.: Изд-во ОРСИТДММ ин-та “Союзгипроводхоз”, 1988. 276 с.
10. *Шикломанов И.А.* Антропогенные изменения водности рек. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 304 с.
11. *Шикломанов И.А.* Влияние хозяйственной деятельности на речной сток. Л., Гидрометеиздат, 1989. 330 с.
12. *Georgiadi A.G., Kashutina E.A., Milyukova I.P.* Long-Term Changes of Water Flow, Water Temperature and Heat Flux of the Largest Siberian Rivers // Polarforschung. 2018. V. 87 № 2. P. 167–176.
13. *Nash J.E., Sutcliffe J.V.* River Flow Forecasting Through Conceptual Models. Part I. A Discussion of Principles // J. Hydrol. 1970. № 10 (3). P. 282–290.
14. *Shiklomanov A.I., Golovanov O., Lammers R.B., Tretjakov M., Yang D.* Dam. Reservoir-Induced Hydrological Changes in Large Siberian Rivers // Amer. Geophys. Union, Fall Meeting 2011. Abstract #C31B-06. 2011.
15. *Shiklomanov A.I., Lammers R.B., Lettenmaier D.R., Polischuk Yu., et al.* Hydrological Changes: Historical Analysis, Contemporary Status, and Future Projections // Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences. Chapter 4. Springer Science+Business Media Dordrecht, 2013. P. 111–154.

ON THE CONTRIBUTION OF CLIMATIC AND ANTHROPOGENIC FACTORS TO CHANGES IN THE FLOW OF LARGE RIVERS OF THE RUSSIAN PLAIN AND SIBERIA

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

Presented by Academician of the RAS V.M. Kotlyakov March 31, 2019

Received April 5, 2019

Institute of Geography Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Changes of annual and seasonal flow of Volga, Don, Yenisei and Lena are estimated by two methods. One of them is to restore the natural flow of recent decades, during which there were observed its significant anthropogenic changes. For these purposes, we used data on the runoff of rivers (tributaries of the considered rivers and their upper parts), the water regime of which is relatively weakly changed by the anthropogenic impact. Another uses the data of water management statistics. Subsequently, the data on the naturalized river flow were compared with the anthropogenic-modified runoff for this and for the previous base period, when anthropogenic impact can be neglected. It is shown that climatic and anthropogenic factors perform either unidirectionally, increasing or decreasing the flow, or in opposite directions. Moreover, the impact of anthropogenic factors, mainly of reservoirs and water consumption, is of the same scale as the influence of climatic factors, while in many cases exceeds it.

Keywords: river flow changes, water management statistics, flow naturalization methods, anthropogenic and climatic factors.