

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 556.048

ОЦЕНКА СТОКА В БАССЕЙНЕ р. ДОН: НЕОБХОДИМОСТЬ СМЕНЫ ПАРАДИГМЫ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ¹

© 2020 г. Е. А. Коробкина^а, *, И. А. Филиппова^а, М. А. Харламов^а

^аИнститут водных проблем РАН, Москва 119333, Россия

*e-mail: elenakorobkina@mail.ru

Поступила в редакцию 10.02.2020 г.

После доработки 19.03.2020 г.

Принята к публикации 23.03.2020 г.

Обсуждены результаты анализа изменений среднего годового и минимального стока осенне-зимней и летней межени в бассейне р. Дон. Изучены пространственно-временные закономерности изменений среднего годового и среднего минимального 30-дневного стока, определены даты нарушений однородности в рядах многолетних наблюдений за стоком. Результаты исследования, основанного на статистическом анализе данных о многолетних колебаниях стока средних рек бассейна Дона, дали возможность оценить интенсивность современных климатически обусловленных изменений стока рек рассматриваемой территории и сформировать новые идеи относительно выбора подходов к расчетам стока в зависимости от характера нарушения стационарности в рядах наблюдений.

Ключевые слова: климатические изменения, река Дон, минимальный сток, средний годовой сток, речной сток, стохастическое моделирование, водохозяйственные расчеты.

DOI: 10.31857/S0321059620060073

ВВЕДЕНИЕ

Бассейн Дона охватывает один из наиболее экономически освоенных регионов России с интенсивным водопользованием. Оценка перспектив использования водных ресурсов в таких регионах — сложная, комплексная задача, связанная как со сценариями развития водопотребляющих отраслей экономики, так и с необходимостью учета изменений, происходящих в гидролого-климатической системе. Подобные изменения, сказывающиеся на условиях формирования стока, способны приводить к существенной трансформации водного режима. Эта проблема особенно значима для бассейнов с невысокой обеспеченностью населения водными ресурсами, такой бассейн имеет р. Дон.

Управление крупной водохозяйственной системой, обеспечивающей водой население и экономику региона, должно гарантировать стабильное поступление потребителям воды определенного количества и качества. Основной вопрос при этом — как обеспечить оптимальное использование водных ресурсов в условиях их дефицита.

Ответ на этот вопрос во многом связан с методическими проблемами определения лимитирующих величин сезонного и годового стока, которые лежат в основе проектирования и эксплуатации гидротехнических сооружений, а также ведения любой водохозяйственной деятельности на водосборе.

В практике управления водными ресурсами сложилась система требований и ограничений на изменения параметров состояния водного объекта. В первую очередь, к ним относится ограничение на минимальные расходы воды в реках, их поддержание гарантирует удовлетворение интересов водопользователей и функционирование водных экосистем. Минимальный допустимый расход в реке определяется как доля расхода определенной обеспеченности, например 95%, в соответствии с [15]. Расчет этих величин не вызывает трудностей для изученных рек — при наличии продолжительных ненарушенных (с точки зрения однородности) рядов наблюдений за стоком он проводится с помощью кривых распределения вероятностей и вычисления параметров и квантилей по фактическим данным. Вместе с тем важная характеристика водных ресурсов бассейна и региона в целом — величина среднего годового стока, на основе которой рассчитываются основные параметры регулирования водохозяйственными системами.

¹ Работа выполнена при частичном финансировании из средств государственного бюджета в рамках государственного задания ИВП РАН (тема 0147-2019-0003, государственная регистрация АААА-А18-118022090105-5).

До недавнего времени гипотеза стационарности колебаний речного стока была основной при обосновании водохозяйственных мероприятий. Традиционные методы гидрологического расчета для оценки водных ресурсов и их долгосрочного прогнозирования, изложенные в нормативных методических документах Минстроя и Росгидромета, базируются на представлении о стационарности происходящих случайных колебаний речного стока. Однако наблюдаемые изменения гидрологических характеристик, происходящие в бассейнах европейских рек под воздействием непрерывного и возрастающего антропогенного воздействия и меняющегося климата [1, 5–7, 10, 11, 16], ставят, как минимум, под сомнение правомерность использования гипотезы стационарности при анализе изменений стока в долгосрочной перспективе; тем более что методы теории вероятностей и математической статистики, привлекавшиеся для анализа гидрологических данных, разрабатывались преимущественно для однородных данных. Происходящие скачкообразные, ступенчатые, изменения в рядах характеристик стока делают их неоднородными, или нестационарными, и требуют других подходов к анализу. К тому же при современном уровне развития теории климата можно только предполагать – этот процесс необратим или он часть циклических крупномасштабных колебаний, которые трудно оценить, находясь “внутри” этого временного цикла. Каковы механизмы происходящих изменений, до каких пределов может увеличиваться зимний сток и уменьшаться сток половодья при прогнозируемом климатологами увеличении зимней температуры воздуха, безвозвратны ли эти изменения и ограничены ли они ресурсными возможностями бассейнов – это только часть вопросов, которые возникают при определении расчетных характеристик стока. Постановка этих вопросов должна обратить внимание на необходимость тщательного изучения происходящих процессов, прежде чем признать сток нестационарным и сформулировать гипотезу относительно механизмов этого явления.

Изменения климата, антропогенное воздействие, повлекшие за собой существенные изменения характеристик стока и затронувшие весь спектр водохозяйственных расчетов в бассейне Дона, приводят к необходимости смены парадигмы гидрологических расчетов. Масштабы изменений и характер выявляемой нестационарности существенно различаются для изучаемых характеристик речного стока. Наличие нестационарных рядов, с точки зрения гидрологической практики, требует пересмотра существующих и разработки новых методик для оценивания характеристик стока и вероятностного прогнозирования водных

ресурсов. Для бассейна р. Дон подход к оценке и прогнозированию водных ресурсов, учитывающий нестационарность гидролого-климатических процессов на водосборе, пока применяется недостаточно широко. Можно отметить работы [3, 7–9, 11], в которых делаются первые шаги в разработке новых моделей и методов оценки гидрологических последствий ожидаемых глобальных климатических изменений.

Минимальный сток и средний годовой сток относятся к категории основных расчетных гидрологических параметров, это важнейшие показатели гидрологического режима в теории формирования и использования водных ресурсов. Особенности происходящих изменений минимального 30-дневного стока и среднего годового стока рек бассейна р. Дон, а также возможности эффективного их учета в оценках и прогнозах с учетом изменения климата составляют цель данной статьи.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основа для изучения влияния климата на сток рек бассейна р. Дон в данной работе – многолетние данные наблюдений сети Росгидромета. Разработка вероятностных моделей сезонных и многолетних колебаний гидрологических характеристик основана на статистическом анализе рядов минимального и годового стока.

Использовались данные наблюдений за стоком на 50-ти гидрологических постах в бассейне р. Дон с продолжительностью наблюдений более 50 лет (до 2018 г.) и минимальным числом пропусков в наблюдениях с площадью водосбора от 1000 до 50000 км². Такие реки, как правило, дренируют основные водоносные горизонты, и свойства колебаний стока отражают физико-географическую зональность. Динамика их стока определяется прежде всего климатическими факторами; следовательно, можно ожидать большей чувствительности стока этих рек к изменениям климата. Кроме того, средние реки в целом менее зарегулированы, что позволяет считать антропогенное влияние несущественным.

Все имеющиеся ряды проанализированы на стационарность (однородность) с использованием критериев Стьюдента и Фишера. Хронологические графики и разностные интегральные кривые (РИК) в совокупности со статистическим анализом рядов дают возможность проанализировать изменения в рядах наблюдаемых величин стока рек бассейна р. Дон и определить даты перехода к новым условно стационарным состояниям. Даты нарушения стационарности обобщены по территории с учетом физико-географических особенностей бассейна.

Изменения минимального и среднего годового стока рек в бассейне Дона оценены в долях среднесуточного стока базового периода и выражены в виде коэффициента K , который отражает тенденции увеличения или сокращения стока по всему бассейну. Базовым периодом считается период до даты нарушения стационарности, причем для каждого ряда эта дата определяется индивидуально. Результаты территориального обобщения изменений минимального и среднего годового стока представлены в виде тематических цифровых карт, подготовленных в ArcGIS.

Предлагаемые подходы к оценке и прогнозу климатически обусловленных изменений стока методически завершают исследование.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Минимальный сток

Анализ рядов 30-дневного минимального стока за зимний период и период открытого русла средних рек бассейна показал, что в рядах имеется статистически подтвержденное нарушение стационарности по среднему и по дисперсии. Нарушение стационарности в рядах, происходящее вследствие климатических изменений, графически может быть выявлено с помощью разностных интегральных кривых, наглядно демонстрирующих смену периодов пониженного и повышенного стока. Обнаруженные изменения происходят практически синхронно на больших территориях, что позволяет исключить антропогенную составляющую из совокупности факторов, определяющих этот процесс. Смена режима минимального стока обусловлена ростом доли подземного питания средних рек, произошедшего в результате повышения приземной температуры воздуха в зимний период и учащения зимних оттепелей. Потепление вызвало изменение механизма формирования минимального стока за счет перераспределения стока из поверхностного в подземный: интенсивное снеготаяние в период половодья замещается медленной отдачей воды из снега в периоды зимней оттепели, что сокращает сток половодья, увеличивает питание подземных вод и тем самым увеличивает как базовый сток, так, соответственно, и сток межени (как зимней, так и летней) [4, 11]. Именно это обстоятельство дает право рассматривать изменчивость минимального стока как последовательную смену двух стационарных периодов, представляющих собой не только различные фазы водности, но и периоды с различным механизмом формирования минимального стока. Момент смены одного периода другим возможно довольно точно определить по РИК, где он выглядит как точка перелома.

Разделив в точке перелома временной ряд на условно стационарные части, можно сравнить параметры полученных частей. Изменения параметров (среднего и дисперсии) условно стационарных периодов существенны: увеличение стока в современный период по отношению к предыдущему (базовому) оценивается в среднем как двукратное (рис. 1).

Картирование изменений характеристик минимального стока для зимнего периода и периода открытого русла дает визуальное представление о его увеличении на всей исследуемой территории; причем, наибольший рост отмечается в зимний период (рис. 1). Как отмечалось выше, этот рост обусловлен увеличением питания грунтовых вод за счет роста частоты и продолжительности оттепелей, уменьшения промерзания почвы. Тем самым создаются благоприятные условия для повышения запасов грунтовых вод и возрастания доли подземного стока в питании рек. Это относится к средним и большим рекам, дренирующим основные водные горизонты [6, 10].

Интересно сравнить полученные карты с картами дат смены условно стационарных периодов (рис. 2). Районирование территории и по изменению минимального стока, и по дате нарушения стационарности в рядах минимального стока (фактически по дате наступления этого изменения) выделяет схожие области на исследуемой территории бассейна р. Дон. Так, область наибольших изменений протянулась широкой полосой в средней части бассейна с ЮЗ на СВ. В пределах этой полосы находится так называемая зона наибольшей трансформации водного режима рек [11]. К ЮВ от нее в зимний период не формируется устойчивый снежный покров, в то время как к СЗ снежный покров образуется даже в последние 30 лет, отмеченные существенным потеплением. Это отражается и на картах дат нарушения стационарности и позволяет условно разделить территорию на две области с различными сроками смены фазы водности минимального стока. На основе анализа распределения дат нарушения стационарности приняты две обобщенные даты нарушения стационарности — 1980 и 1990 гг. для зимнего стока и 1976 и 1986 гг. для летне-осеннего (рис. 2). При этом надо отметить, что расчеты стока по предлагаемому ниже методу выполняются отдельно для каждой реки в соответствии с индивидуально установленной датой нарушения стационарности.

Средний годовой сток

Гипотеза стационарности годового стока остается рабочей для многих водосборов (в том числе и по причине ограниченности рядов наблюде-

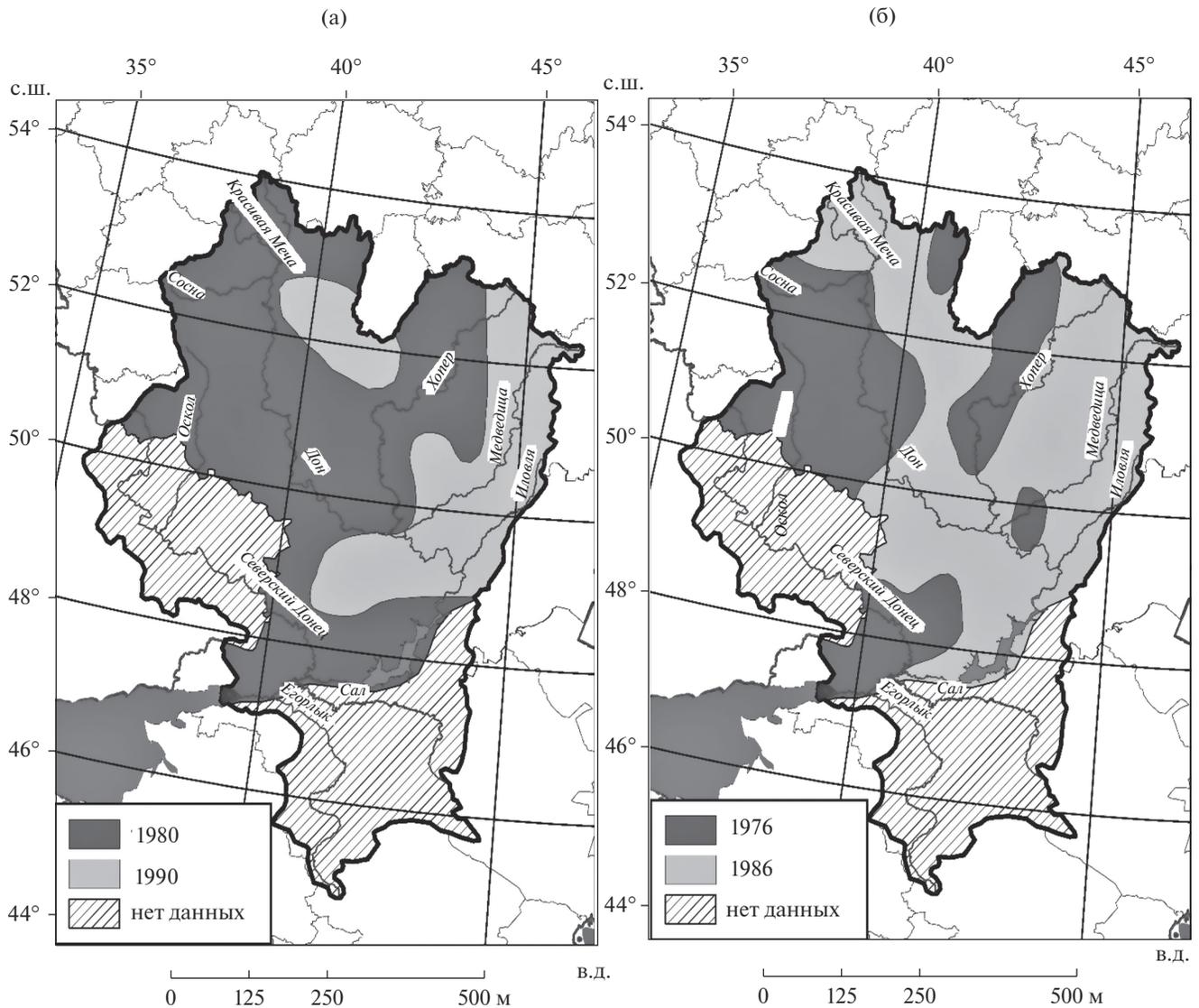


Рис. 2. Распределение даты нарушения стационарности в рядах минимального стока по территории бассейна р. Дон за зимний период (а), за период открытого русла (б).

после 1980 г. В целом колебания годового стока рек бассейна Дона характеризуются низким коэффициентом автокорреляции, однако для большинства рядов заметно его увеличение после 1980 г. по сравнению с базовым периодом с одновременным уменьшением коэффициента вариации. Такое изменение статистических параметров означает увеличение связности в гидрологических рядах при уменьшении вариативности процесса (увеличивается продолжительность группировок маловодных и многоводных лет с меньшей дисперсией величин стока).

Проведенный анализ выявил изменения среднего годового стока рек в бассейне Дона не одинаковой степени выраженности по территории

(рис. 3). Изменения в целом незначительны, слабое увеличение водных ресурсов наблюдается в верхнем течении Дона и его основных притоков, в нижнем течении – слабое уменьшение. Рост годового стока в верховьях рек бассейна Дона, очевидно, связан со значительным увеличением в этой части бассейна доли меженного стока в объеме годового стока, которое не только компенсировало уменьшенный стока половодья, но и внесло дополнительный вклад в годовой сток.

Приток воды к Цимлянскому водохранилищу

Интересный результат получен при анализе внутригодового распределения притока воды к

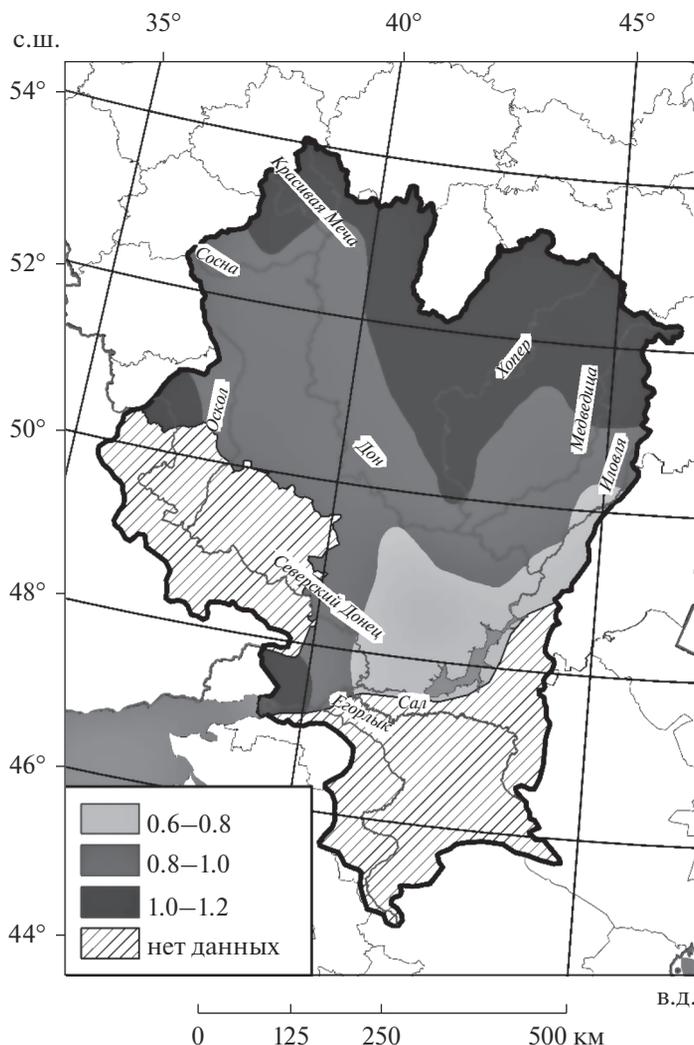


Рис. 3. Изменение среднего годового стока (коэффициент K) относительно предыдущего периода (до 1980 г.) по территории бассейна р. Дон.

Цимлянскому водохранилищу по последовательным 20-летним периодам. Приток изучался по водохозяйственным интервалам — месяцам и декадам в период наполнения водохранилища (май—июнь). Для визуализации наблюдаемых изменений притока использовалась диаграмма Вох-Plot (другое название — “ящик с усами”), которая наглядно и в удобной форме дает представление об основных параметрах распределения числового ряда, в данном случае — притока за исследуемый временной интервал — 20 лет наблюдений. Диаграмма отображает значения среднего, квантили, разброс данных и наличие выбросов и позволяет судить, насколько асимметрично распределение изучаемой характеристики.

Диаграмма на рис. 4 наглядно показывает, что за последние 20 лет произошло наиболее значи-

тельное уменьшение величины притока в период половодья и рост стока в период зимней и летней межени, выражающееся не только в существенном выравнивании внутригодового распределения стока, но и в уменьшении диапазона разброса значений стока в период половодья.

Размах колебаний стока уменьшается в половодье и увеличивается в меженный период, при этом не наблюдается направленных изменений количества выбросов (значений, вылетающих за пределы усов диаграммы, определяемых как ± 1.5 расстояния между первым и третьим квантилем).

Сравнение статистических параметров распределения среднего годового притока к Цимлянскому водохранилищу, определенных по рядам притока по р. Дон за два периода: базовый —

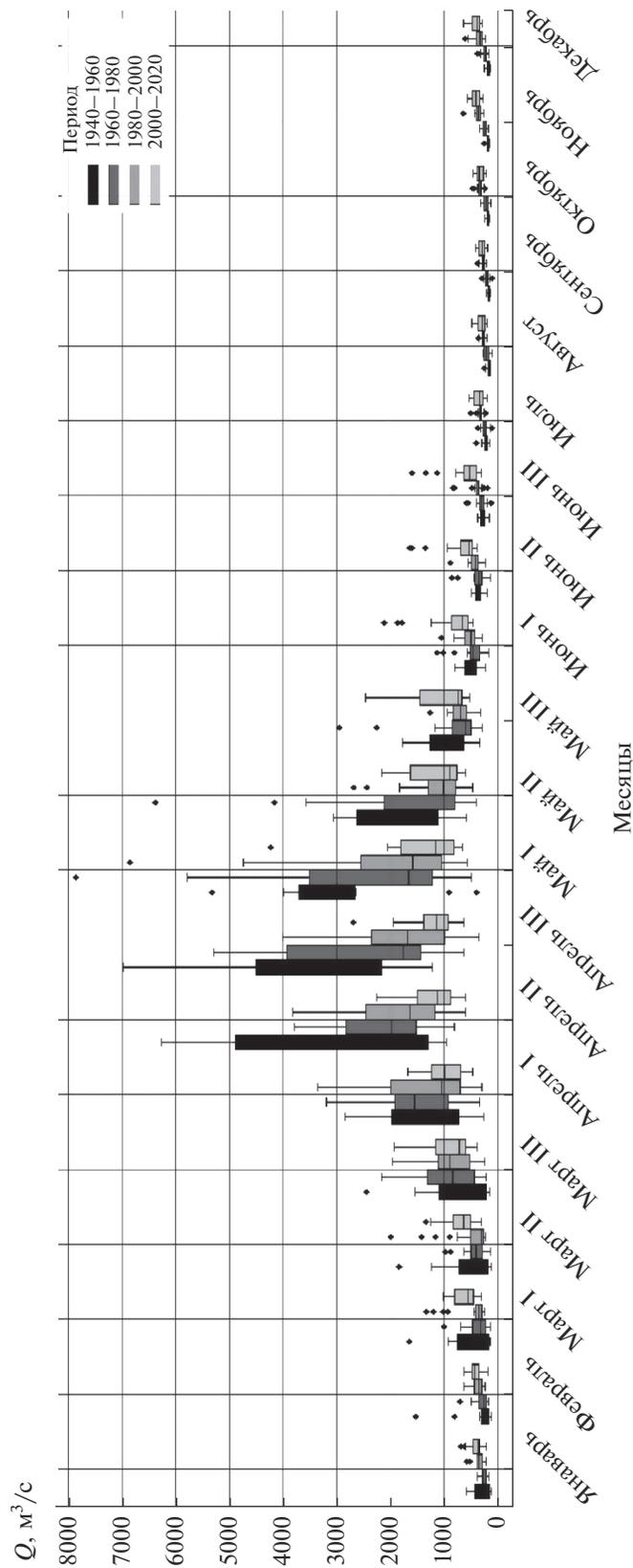


Рис. 4. Внутригодовое распределение притока к Цимлянскому водохранилищу по периодам 20 лет.

до 1980 г. и текущий – после 1980 г. – показало существенное изменение коэффициентов вариации C_v и автокорреляции $r(1)$ при неизменном среднем. Если в базовом периоде годовой приток характеризуется нулевой автокорреляцией, то после 1980 г. значение $r(1)$ увеличилось до 0.19, C_v уменьшился, соответственно, с 0.35 до 0.25. Этот вывод полностью согласуется с обсуждаемой выше направленностью изменений параметров рядов годового стока рек бассейна: рост $r(1)$ обусловлен усилением регулирующей роли подземного стока в формировании стока рек в бассейне Дона.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В настоящее время для расчетов стока важно выявить тенденции развития гидролого-климатической системы и, соответственно, возможность качественной и количественной оценки (прогноза) стока. Отсутствие линейных зависимостей между величиной стока и рядом стокоформирующих факторов не позволяет дать однозначную оценку стока на будущее даже при наличии достоверного климатического прогноза. Так, например, если допустить, что реализуется прогноз дальнейшего увеличения приземной температуры воздуха, нет оснований утверждать, что за этим последует дальнейший рост минимального стока в бассейне Дона. Действительно, в последние десятилетия поступление талых вод во время участвовавших оттепелей стало играть значительную роль в питании подземных вод и, соответственно, в увеличении минимального зимнего стока. Однако с ростом температуры воздуха и в условиях неизменности количества осадков нельзя и далее ожидать существенного увеличения величины подземного стока. Дальнейший рост температуры воздуха в зимний период будет всего лишь способствовать перераспределению соотношения твердых и жидких осадков, и та твердая часть осадков, которая поступала в реку в процессе оттепели, будет преимущественно выпадать сразу в жидком виде. Таким образом, реализация климатического сценария дальнейшего потепления в отсутствие других дополнительных источников питания приведет к исчерпанию ресурса увеличения подземного питания и к достижению предела увеличения минимального стока.

Следует отметить, что наблюдавшийся рост межлетнего стока не связан линейной зависимостью с ростом приземной температуры воздуха в зимний период в бассейне Дона. Скачкообразный характер наблюдаемых изменений минимального стока (переход из одного стационарного состояния в другое) обусловлен инерционным характером формирования всех видов ресурсов

подземных и почвенных вод. В ответ на повышение зимней температуры воздуха ресурсы подземных вод растут постепенно и не оказывают заметного влияния на величину стока зимней межени, но при достижении некоторого порогового значения создаются условия для более интенсивной разгрузки подземных вод в гидрографическую сеть.

Поэтому при условии сохранения на водосборе количества осадков и с учетом инерционности реакции стока на повышение температуры воздуха при водохозяйственных расчетах нужно исходить из гипотезы о сохранении межлетнего стока на современном уровне в ближайшем будущем.

Несмотря на то, что практически все климатические модели дают прогноз потепления в России в XXI в. [12], существует мнение о недостаточном научном обосновании глобального потепления вследствие того, что модельные расчеты не полностью отражают природные процессы в атмосфере и океане. Поэтому не исключается и другой вариант развития событий – замедление темпов потепления или даже похолодание. В таком случае режим стока может перейти в другое условно стационарное состояние, например – вернуться к режиму базового периода.

Из современных методов, которые при оценке и прогнозе характеристик стока позволяют учесть наблюдаемые и прогнозируемые изменения гидрологических и климатических параметров, вероятностные методы и подходы на основе байесовских методов оценки и прогнозирования – одно из наиболее перспективных направлений, активно развивающихся в последнее время как в России, так и в других странах [1–3, 13, 17, 18]. С помощью байесовского подхода на основе предложенной гипотезы смены состояний можно выполнить расчет минимального стока рек бассейна р. Дон с учетом и нестационарности процесса в целом, и неопределенности развития ситуации в будущем.

Принятие гипотезы смены условно стационарных состояний и разбиение рядов стока согласно выбранным принципам деления – достаточно для того, чтобы оценить величины минимального стока путем построения закона распределения для двух условно стационарных периодов – базового и текущего [1, 2]. Фактически искомое распределение представляет собой сумму двух законов распределения, куда каждое слагаемое входит с определенным весом, зависящим от продолжительности условно стационарного периода. Тезис о неизменности межлетнего стока в ближайшем будущем учитывается при применении байесовской методики путем придания большего веса сценарию текущего периода увеличением

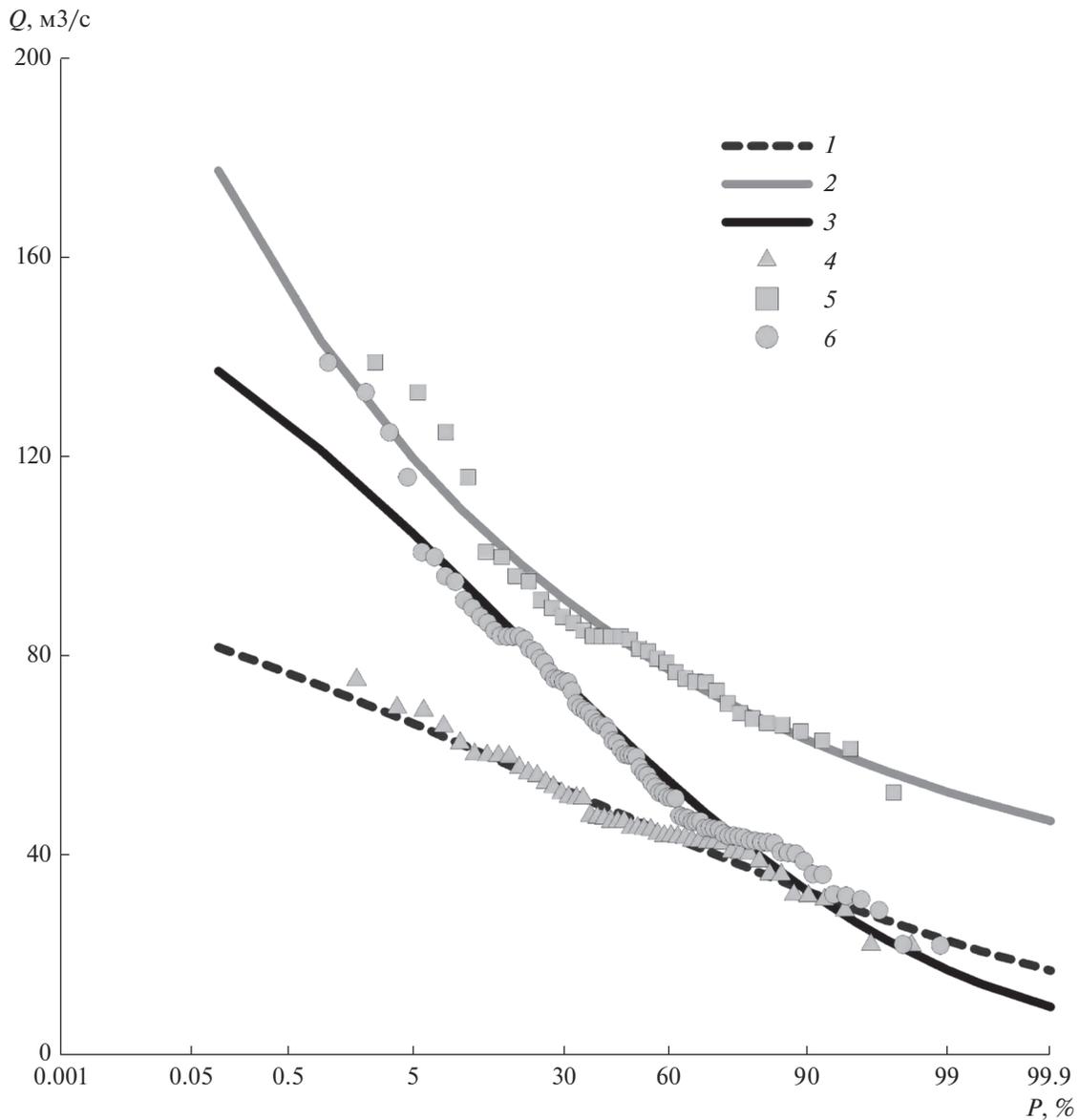


Рис. 5. Кривые распределения минимального стока р. Дон – г. Задонск за зимнюю межень: 1 – теоретическое распределение базового периода (до 1980 г.), 2 – теоретическое распределение текущего периода (1980–2016 гг.), 3 – байесовское распределение; 4, 5, 6 – эмпирические кривые базового, текущего периодов и всего ряда соответственно.

его продолжительности на величину интервала прогноза в 10 лет. Пример расчета минимального стока для р. Дон у г. Задонска представлен на рис. 5.

Как показано выше, изменения годового стока в бассейне Дона не настолько существенны, чтобы можно было однозначно говорить об их нестационарности. Нет статистически достоверных выводов для подтверждения того, что случайный процесс годового стока перешел в другое стационарное состояние, а значит он остается в рамках марковских представлений о чередовании лет повышенной и пониженной водности. Поэтому для

вероятностной оценки годового стока рек бассейна Дона рекомендуется применять традиционный способ представления закономерностей многолетних колебаний стока в виде марковской цепи, наиболее часто используемой в водохозяйственных расчетах.

Для среднего годового стока рек бассейна р. Дон, который характеризуется не очень высокими значениями коэффициента автокорреляции, наиболее подходящей для расчетов представляется модель, основанная на методе построения двумерных распределений путем их

представления в виде билинейных разложений по системе ортогональных полиномов с линейной корреляцией между обеспеченностями смежных членов последовательности. Модель с линейной корреляцией между обеспеченностями смежных членов ряда показывает наилучшее соответствие натурным данным [14] и достаточно широко применяется для оценки годового стока неозерных рек с ограничением на коэффициент автокорреляции ≤ 0.5 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изменение климата неизбежно повлекло за собой перестройку гидрологического режима рек бассейна р. Дон. Можно констатировать, что основная тенденция изменения меженного стока в бассейне – тенденция его увеличения, местами более чем в 2 раза. Смена фазы пониженной водности фазой повышенной водности на реках всего бассейна произошла ориентировочно в 1980 и 1990 гг. в разных частях бассейна с разными физико-географическими условиями. При этом рост меженного стока не связан линейной зависимостью с ростом приземной температуры воздуха в зимний период в бассейне Дона, а дальнейший рост температуры приведет к исчерпанию ресурса увеличения подземного питания и к достижению предела увеличения минимального стока. Существенное увеличение объемов меженного стока во внутригодовом распределении отмечается на фоне слабо меняющегося годового стока.

Значительные и устойчивые на протяжении достаточно длительного периода времени изменения режима характеристик стока неизбежно приводят к необходимости смены парадигмы водохозяйственных и гидрологических расчетов. Детальное рассмотрение и обоснование подходов и создание новых методов оценки и прогноза стока в условиях климатических изменений может опираться на гипотезу смены стационарных состояний [1, 2, 5, 17]. Однако ситуация с ресурсным пределом минимального зимнего стока в бассейне Дона показала, что прежде, чем разрабатывать новые или привлекать уже созданные для нестационарных состояний вероятностные методы, для подтверждения гипотезы смены гидрологического режима следует провести анализ пространственно-временных колебаний стоковых характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болгов М.В., Коробкина Е.А., Трубецкова М.Д., Филимонова М.К., Филиппова И.А. Современные изменения минимального стока на реках бассейна р.

- Волги // Метеорология и гидрология. 2014. № 3. С. 75–85.
2. Болгов М.В., Коробкина Е.А., Филиппова И.А. Байесовский прогноз минимального стока в нестационарных условиях с учетом возможных изменений климата // Метеорология и гидрология. 2016. № 7. С. 72–81.
3. Болгов М.В., Сенцова Н.И. Байесовские оценки расчетных характеристик минимального стока рек в нестационарных условиях // Метеорология и гидрология. 2010. № 11. С. 70–80.
4. Болгов М.В., Трубецкова М.Д., Филимонова М.К., Филиппова И.А. Современные изменения климатических характеристик и вероятностная оценка изменений минимального стока в бассейне реки Волги // Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление. 2014. № 3. С. 83–99.
5. Болгов М.В., Филиппова И.А., Осипова Н.В., Коробкина Е.А., Трубецкова М.Д. Современные особенности гидрологического режима рек бассейна Волги // Вопросы географии. 2018. Сб. 145. Гидрологические изменения. С. 206–218.
6. Водные ресурсы России и их использование. СПб.: ГГИ, 2008. 587 с.
7. Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Кацутина Е.А., Барабанова Е.А. Природно-климатические и антропогенные изменения стока Волги и Дона // Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. Т. 2. С. 55–78.
8. Георгиади А.Г., Милюкова И.П. Возможные изменения речного стока в бассейнах крупнейших рек Русской равнины в XXI веке // Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление. 2006. № 1. С. 62–77.
9. Георгиади А.Г., Милюкова И.П. Сценарная оценка изменений стока рек Волги и Дона, возможных в первой трети XXI века // Вопросы географии. 2012. Сб. 133. Географо-гидрологические исследования. С. 224–236.
10. Георгиевский В.Ю., Шалыгин А.Л. Гидрологический режим и водные ресурсы // Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. М., 2012. С. 53–85.
11. Джамалов Р.Г., Киреева М.Б., Косолапов А.Е., Фролова Н.Л. Водные ресурсы бассейна Дона и их экологическое состояние. М.: ГЕОС, 2017. 205 с.
12. Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. СПб., 2017. 106 с.
13. Основные гидрологические характеристики при нестационарности временных рядов, обусловленной влиянием климатических факторов. Рекомендации по расчету. СТО ГГИ 52.08.41–2017. СПб.: ГГИ, 2017. 42 с.
14. Раткович Д.Я. Многолетние колебания речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 256 с.
15. СП 31.13330.2012 Свод правил. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.02-84* (Изм. № 1, 2, 3, 4).

- [Электронный ресурс]. <http://docs.cntd.ru/document/1200093820> (дата обращения 15.01.2020)
16. Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю., Бабкин В.И., Балонишников Ж.А. Проблемы изучения формирования и оценки изменений водных ресурсов и водообеспеченности России // Метеорология и гидрология. 2010. № 1. С. 23–32.
 17. Bolgov M.V., Filippova I.A., Korobkina E.A., Trubetsko-va M.D. On the Forecast of Long-Term Changes in the Hydrological Regime of Rivers Using the Results of Climate Modeling // Water Resour. 2018. V. 45. Suppl. 2. P. S17–S21.
 18. Rios Insua D., Montes Diez R., Palomo J. Bayesian methods in Hydrology: A review // Rev. R. Aca. Cien. Ser. A. Mat. 2002. V. 96 (3). P. 461–479.