ПАВОДОЧНЫЙ СТОК НА РЕКАХ ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ И ЕГО РОЛЬ В ФОРМИРОВАНИИ СОВРЕМЕННОГО ВОДНОГО РЕЖИМА*

© 2018 г. М.Б. Киреева¹, Н.А. Фролова¹, Е.П. Рец², Т.Е. Самсонов¹,
Е.А. Телегина¹, М.А. Харламов¹, Н.Н. Езерова¹, О.М. Пахомова¹

¹ ФГБОУ ВО «Московский государственный университет
имени М.В.Ломоносова», Москва, Россия

² ФГБУН «Институт водных проблем РАН», Москва, Россия

Ключевые слова: паводочный сток, водный режим, изменение климата, реки европейской территории России.

Рассмотрены современные особенности водного режима рек европейской территории России, а именно – роль паводочного стока в его формировании. Расчленение гидрографов рек европейской территории России, проведенное на основе разработанного авторского алгоритма (GrWat) генетического расчленения гидрографа по составляющим (подземная, талая в период половодья, талая в периоды оттепелей, дождевая) и использовании данных реанализа, показало изменения характерных дат и максимальных расходов воды оттепельных и дождевых паводков, объемов стока за каждую фазу гидрологического года. Продemonстрировано, что изменения метеорологических характеристик зимнего периода отразились на формировании водности межени и паводков во время оттепелей. В свою очередь, это оказало влияние на все внутригодовое распределение стока, обусловив заметную трансформацию типового гидрографа рек европейской территории России.

Показано, что в современный период на большинстве рек происходит интенсивное сокращение соотношения объемов и максимальных расходов половодья по отношению к соответствующим объемам грунтовой составляющей речного стока, а снижение стока половодья идет на фоне увеличения минимального зимнего стока (в основном за счет зимних паводков, объем которых для некоторых рек увеличился на 20–30 %).

* Работа выполнена при поддержке гранта №16-35-60080 РФФИ в части разработки программного обеспечения и алгоритмов расчета, создания базы данных характеристик паводочного стока и гранта РФФИ № 18-05-60021 «Арктика» в части анализа изменений стока арктических рек. Разработка варианта программного обеспечения GrWat для горных территорий ЕТР и анализ районных тенденций паводочного стока выполнен при поддержке РНФ, грант № 17-77-10169

ВВЕДЕНИЕ

Современные изменения водного режима рек являются актуальным направлением научных исследований. Основная тенденция, характерная для большинства рек европейской территории России заключается в выравнивании годового гидрографа стока. Это, к примеру, отмечается в исследовании стока рек бассейна Волги [1–8]. Предположительно, этот процесс выражается в сокращении стока весенних месяцев, связанном с перехватом части талой воды оттепельными паводками, которые формируются за счет вторжения влажного и теплого воздуха.

Анализ метеорологических данных за последние десятилетия свидетельствует, что этот период был не только самым теплым, но и самым влажным за время инструментальных наблюдений [9]. Важным следствием увеличения числа, продолжительности и «глубины» оттепелей служит рост потерь талого стока и повышенное питание подземных вод. За счет этого возрастает роль паводочного стока, особенно в зимний период. Возникновение отдельных паводков, которое наблюдалось и ранее, в настоящий момент переросло в наличие длительных многопиковых паводочных периодов зимой, за которые на отдельных реках Европейской России, проходит до 20–30 % от годового объема стока воды (рис. 1).

Рис. 1. Многопиковые (2007–2008 гг.) и однопиковые (2006 г.) гидрографы р. Дон в ст. Казанская, расчлененные по составляющим с помощью алгоритма GrWat [10]: 1 – дождевой сток; 2 – талый сток весеннего половодья; 3 – сток оттепельных паводков; 4 – базисный сток за счет грунтовой составляющей.

Цель данной работы – дать объективный анализ изменения характеристик паводочного стока за последние 70 лет, а также попытаться выявить эти характеристики. Одним из вопросов прогнозирования и оценки характеристик как паводочного, так и половодного стока является сложность в выделении этих фаз водного режима, связанная с суперпозицией паводков

и половодья. В существующих методических указаниях Росгидромета нет количественных величин, по которым можно было бы выделить начало или окончание паводков и половодья, а также разделить отдельные паводки и паводочные периоды.

Паводки – это относительно интенсивные подъемы воды в русловой сети, измеряемые по высоте уровня или по величине расхода. Одно из первых определений паводков дано в работах Д.И. Кочерина [11]. Согласно современному определению В.Н. Михайлова [12], «паводок – это фаза водного режима, которая может многократно повторяться в различные сезоны года и характеризуется интенсивным, обычно кратковременным увеличением расходов и уровней воды и вызывается дождями или снеготаянием во время оттепелей». Согласно определению гидрологического словаря [13], «паводок – быстрый сравнительно кратковременный подъем уровня воды в каком-либо фиксированном створе реки, завершающийся почти столь же быстрым спадом и, в отличие от половодья, возникающий нерегулярно». При этом согласно [13], «величины поднятия уровня и увеличения расхода воды при паводке могут в отдельных случаях превышать уровень и наибольший расход половодья. Паводок обычно возникает от дождей, но в условиях неустойчивой зимы может быть обусловлен интенсивным кратковременным таянием». Началом паводка считается момент, когда уровень воды впервые резко превышает характерный уровень межени [14–16], продолжается паводок до того момента, пока уровень воды не упадет до той же или другой условной отметки.

Паводки на реках европейской территории России имеют различное происхождение и условия формирования. Главным образом, это определяется региональными особенностями климатических, почвенно-геологических, геоморфологических и других природных факторов, а также индивидуальными особенностями каждого водосбора. Это приводит к индивидуальности процессов формирования и развития паводочного стока в различных климатических зонах, областях и районах. Существуют различия и в процессах формирования паводков, и в генезисе максимального стока на разных территориях [17]. Формирование паводков зависит от непосредственного объема поступающей на поверхность водосбора влаги (талой или дождевой), предшествующего состояния водосбора, которое определяет потери стока. Подробно концептуальные вопросы моделей формирования паводков и их прогнозирования рассматриваются в довольно большом количестве работ [14, 17]. Согласно данным Гидрометцентра, предел предсказуемости осадков на текущий момент развития технологий и вычислительных мощностей составляет 5–7 дней [18]. Формирование оттепельных паводков зависит от целого ряда метеорологических и гидрологических факторов. Первые включают характеристики интенсивности выпадающих

осадков, в случае зимнего периода – их фазы, продолжительности выпадения осадков и предшествующее состояние поверхности, наличие ледяной корки. С гидрологической точки зрения, важнейшей предпосылкой возникновения как зимних, так и летних паводков является состояние увлажненности водосбора и водность реки в предпаводочной период [14, 19, 20].

Процесс формирования паводка на реке подразумевает несколько возможных сценариев: интенсивность осадков такова, что скорость фильтрации воды меньше скорости ее поступления на поверхность почвы; поверхность почвы уже насыщена влагой полностью или перекрыта ледяной коркой и инфильтрации не происходит [21, 22]. Чаще всего паводки наблюдаются при сочетании этих условий с дополнительным поступлением воды не только по поверхности, но и из верхнего подповерхностного слоя. В любом случае, увеличение количества и продолжительности паводков должно приводить к увеличению инфильтрационного питания грунтовых вод. Предположительно, именно поэтому в большинстве регионов европейской части России вместе с сокращением объемов половодья наблюдается увеличении стока в маловодные периоды года – во время летне-осенней и зимней межени [5, 9, 23].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Оценку гидрологических характеристик проводили по репрезентативным гидрологическим станциям и постам. В работе использовались суточные ряды расходов воды по замыкающим створам основных рек, расположенных в различных природных зонах европейской части России (табл. 1, рис. 2).

Подготовленная исходная информация подгружалась в качестве входных данных в авторский разработанный алгоритм (GrWat) генетического расчленения гидрографа по составляющим (подземная, талая в период половодья, талая в периоды оттепелей, дождевая) [24, 25]. В основу разрабатываемого алгоритма положены графоаналитические подходы Б.И. Куделина [25] по расчленению гидрографа средних рек. Методика расчленения гидрографа основывается на следующих положениях:

- динамика подземного стока отдельных водоносных пластов определяется степенью гидравлической связи этих пластов с рекой;
- расчленение гидрографа заключается в выделении на нем подземной составляющей с учетом закономерностей динамики подземного стока в реку.

Метеорологическая информация (в виде данных реанализа) используется в качестве индикатора и возможности отнесения пиков на гидрографе к группам событий – оттепелям или дождевым (смешанным) паводкам. В упрощенном виде, реализованном в алгоритме, методика расчленения гидрографа сводится к следующим принципам:

- во время прохождения максимального расхода воды подземное питание реки (в случае полной гидравлической связи) равняется нулю;
- уменьшение подземного питания начинает происходить во время подъема половодья, в этот период наблюдаются явления берегового регулирования: вода из реки поступает в грунтовые горизонты;
- после прохождения половодья грунтовое питание повышено и постепенно убывает по экспоненциальному закону;
- при прохождении паводков дождевой сток не снижает, а увеличивает подземное питание. Отклонение паводков происходит по хорде от точки резкого увеличения расходов воды до точки перегиба (снижения расходов воды);
- при наложении паводков на волну подъема или спада половодья они отделяются по экспоненте;
- отнесение паводочных пиков к группе талых или дождевых идет по осредненной температуре или сумме осадков в предшествующие дни, превышающей заданное критическое значение.

Таблица 1. Характеристики гидрологических постов, по которым подготовлены ряды суточных расходов воды

Река	Пост	Площадь водосбора, км ²	Период наблюдений	Зона
Северная Двина	Усть-Пинега	348 000	1930–2014	тайга
Сухона	Калинкино	49 000	1930–2014	тайга
Мезень	Малонисогорск	56 000	1930–2014	тайга, лесотундра
Печора	Усть-Цильма	248 000	1932–2014	тайга, лесотундра
Вятка	Вятские поляны	124 000	1918–2015	смешанные леса
Кама	Гайны	27 400	1911–2015	тайга
Молога	Устюжина	19 100	1934–2015	смешанные леса
Волга	Старица	21 100	1920–2010	смешанные леса
Унжа	Макарьев	18 500	1900–2015	смешанные леса
Ветлуга	Ветлуга	22 200	1938–2015	смешанные леса
Самара	Елшанка	22 800	1878–2015	лесостепь
Ока	Муром	190 000	1936–2015	лесостепь
Ока	Калуга	54 900	1876–2015	лесостепь
Мокша	Темников	15 800	1935–2015	лесостепь
Дон	Казанская	102 000	1928–2015	лесостепь
Хопер	Бесплемяновский	44 900	1929–2015	лесостепь
Медведица	Арчединская	33 700	1928–2015	лесостепь, степь
Кубань	Армавир	16 900	1960–2015	Высотная поясность
Терек	Котляревская	8920	1960–2015	Высотная поясность

Рис. 2. Репрезентативные створы, используемые в качестве опорных для оценки динамики паводочного стока в различных природных зонах.

Программа делит суточные расходы воды на водохозяйственные годы – от начала половодья текущего календарного года до начала половодья следующего. Для корректной работы программы важно верно выделить начало и конец половодья для каждого года, назначить граничные условия по сезонам и ввести условия правильного выделения паводков. Для математического описания особенностей вариации стока каждой реки были введены 12 основных и 12 дополнительных калибруемых параметров, графо-аналитически описывающих вариации на гидрографе и их интерпретацию (табл. 2). Дополнительные 12 параметров имеют вспомогательное значение и призваны улучшить выделение паводковой составляющей (дождевой и талой), границ зимней межени и границ половодья в сложных случаях, когда волна половодья в результате заморозков разбивается на несколько пиков.

Таблица 2. Калибруемые параметры в программе GrWat

Название параметра	Условия, которые задает параметр
mome	Месяц, с которого начинается зимняя межень
grad	Интенсивность спада/подъема Q за счет грунтовой составляющей, выраженная в долях от расхода предшествующего дня
grad1	Интенсивность спада/подъема Q на спаде половодья за счет грунтовой составляющей, выраженная в долях от расхода предшествующего дня
kdQgr1	Максимально допустимое повышение грунтовой составляющей по сравнению с начальным значением (после спада половодья)
polmon (1)	Самый ранний месяц, когда может наблюдаться начало половодья
polmon (2)	Самый поздний месяц, когда может наблюдаться начало половодья
polkol(1)	Количество дней с начала половодья с устойчивым увеличением расхода воды в среднем равным установленному градиенту (polgrad(1))
polkol(2)	Количество дней с начала половодья с устойчивым увеличением в среднем на $\geq 0\%$
polkol(3)	Количество дней с начала половодья, за которое проходит основная волна половодья
polgrad(1)	Значения градиента устойчивого увеличения расхода в начале половодья
polgrad(2)	Во сколько раз средний расход воды за половодье (polkol(3)) гарантированно превышает предшествующий половодью меженный уровень
prodspada	Количество дней с даты максимального расхода действия grad, после этого переходит на grad1
nPav	Количество дней, за которое анализируется сумма осадков и сумма температур
nZam	Количество дней, за которое анализируются температуры воздуха для определения заморозков
nWin	Количество дней, за которое анализируются температуры воздуха для определения начала зимней межени
Pcr	Критическая сумма осадков (мм), которая вызывает значимый паводок
Tcr1	Средняя температура за nPav, при которой происходит переход от дождевых паводков к талым
Tzam	Средняя суточная температура события «заморозок»
Twins	Средняя суточная температура, определяемая за nWin дней для определения начала зимней межени
SignDelta	Значимый перепад расходов в долях от максимального расхода воды этого года
SignDelta1= SignDelta*0.15	Значимый перепад для поиска локального максимума
PavRate	Доля от объема половодья, когда паводок учитывается
InterpolStep	Предельное количество ячеек с пропусками подряд, которые заполняются интерполяцией
FlagGaps	Каким образом обозначаются пропуски в рядах

Отдельной задачей было выделение паводков на волне спада и подъема половодья с помощью экспоненциального уравнения, отражающего кривую истощения. Для случаев, когда паводки наблюдаются в межень или для дождевых паводков, накладывающихся на подъем половодья, принято решение использовать для отделения паводочной составляющей от грунтовой обычную линейную функцию. Наиболее сложным случаем является наложение оттепельного паводка на подъем половодья. На основе проведенных в 2016 г. работ предложен алгоритм поиска данного момента во времени (рис. 3).

Рис. 3. Алгоритм поиска точки начала экспоненциальной кривой.

После поиска максимума основной волны половодья в программе происходит выделение паводков на спаде и подъеме половодья. Физически в этот момент происходит наложение волн оттепельных или дождевых паводков на волну половодья. Основной задачей, определяющей успешность и качество построенных кривых спада, является поиск показателя экспоненты « k » с учетом того, что подземный сток складывается из разных водоносных горизонтов различной мощности. Вторым важным теоретическим вопросом является поиск точки отсчета начала спада, т. е. нахождение Q_0 в формуле (1) кривой спада, имеющей форму экспоненты:

$$Q = Q_0 \cdot \exp^{kt}, \quad (1)$$

где Q_0 – начальный расход; k – показатель экспоненты; t – время.

Поиск начинается от максимума основной волны половодья, далее программа определяет момент возникновения отрицательного градиента расхода $-n$. Следующая точка $n-1$ используется для задания экспоненты по двум известным значениям. Экспонента продолжается до того момента,

пока не упрется в кривую, отделяющую грунтовую составляющую. Далее локальные паводки объединяются в случае, если показатель σ меньше заданной доли от максимального расхода воды. Поиск момента начала паводка происходит похожим путем. Определяется момент, когда угол наклона участка $\Delta 1$ станет больше угла наклона участка $\Delta 2$. Это означает, что данная точка соответствует началу паводка. На спаде половодья выделение паводков происходит аналогичным образом, а для поиска коэффициентов экспоненты используются начальная и конечная точки паводка.

В результате для каждого выбранного створа (рис. 2) были получены характеристики генетических составляющих стока, а именно – характерные расходы воды и их даты, объемы стока за отдельные фазы водного режима, даты их начала и окончания, характеристики изменчивости расходов воды.

Для анализа изменений условий формирования паводочного стока на европейской территории России использовали суточные данные реанализа третьего поколения ERA Interim, созданного Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF). Данные находятся в открытом доступе и охватывают период с 1979 года по настоящее время. Формат данных представляет собой значения основных метеорологических величин в сетке $0,75^\circ \times 0,75^\circ$ для всей планеты [26]. По причине отсутствия метеорологической информации за более ранние периоды анализ наиболее явных тенденций климата проводили с помощью сравнения осредненных характеристик за последние тридцать лет (1978–2016 гг.) по отношению к средним за предшествующий (1958–1977 гг.) период. Кроме того, чтобы отразить наиболее яркие тенденции изменений климатических параметров в последнее десятилетие сравнили периоды 1980–2006 и 2007–2016 гг. В результате были рассчитаны показательные метеорологические характеристики, влияющие на процессы формирования стока на водосборе: количество дней с отрицательной температурой воздуха, сумма отрицательных температур, продолжительность зимнего периода, средняя температура воздуха за зимний период, количество оттепелей, сумма твердых и жидких осадков за зимний период, сумма осадков за летний период. Для отдельных метеорологических станций проведен анализ изменения глубины промерзания почвы с применением косвенного показателя – температуры почвы на различных глубинах. В качестве исходных материалов использовали данные, опубликованные в базе АЙСОРИ на сайте ВНИИГМИ–МЦД [27]. Срочные измерения обрабатывали с помощью разработанных скриптов на языке Python, усредняли до суточного разрешения с учетом отбракованных, ошибочных и пустых значений.

ИЗМЕНЕНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ФОРМИРОВАНИЯ ПАВОДКОВ

В большинстве моделей формирования паводочного стока [14, 15, 17], кроме основных факторов (количества и интенсивности выпадения осадков), заметное внимание уделяется потерям воды, которые напрямую зависят от предшествующих условий на водосборе. Именно здесь в последние годы могли произойти заметные изменения. Формирование паводков в зимний период определяется состоянием поверхности почвы – ее влажности, глубины промерзания и наличия ледяной корки [14, 17]. Эти три основных фактора определяют возможность просачивания воды, т. е. потери влаги на инфильтрацию [17]. Если глубина промерзания почвы невелика, а влажность ее мала, существенная часть талой воды после начала водоотдачи будет уходить в грунтовые горизонты и паводок на реке, скорее всего, не сформируется. Наличие ледяной корки на поверхности фактически превращает почву в водоупор. Ввиду недоступности данных о глубине промерзания почвы, в качестве косвенного ее показателя можно использовать минимальную температуру почвы на заданной глубине. Наиболее интересным представляется поверхностный слой, поскольку условия в нем играют определяющую роль в формировании паводочного стока. В данной работе для проведения анализа использовали температуру почвы на глубине 40 см.

В Центральной полосе России, в бассейне Верхнего Дона и Оки за последние 30–40 лет наблюдаются значимые тренды минимальной температуры почвы на глубине 40 см. Если в конце 1970 – середине 1980-х годов она в среднем составляла $-4 - 6^{\circ}\text{C}$ (рис. 4 а, б), достигая в отдельные годы $-8 - 10^{\circ}\text{C}$, то в 2000-х годах ее среднее значение стало составлять $0 - 1^{\circ}\text{C}$. Примерно в половине случаев минимальная за зиму температура почвы оказывалась положительной. Таким образом, промерзания на глубине 40 см не наблюдалось.

На минимальную температуру почвы также оказывает влияние наличие снежного покрова – чем его высота больше, тем заметнее теплоизолирующий эффект, препятствующий глубокому промерзанию. Поэтому в более южных регионах, например, на Нижнем Дону тенденции повышения минимальной температуры почвы выражены менее явно (рис. 4 б, в). Как в 1970–1980-е годы, так и в 2000-е встречаются отдельные случаи (например, 2009 г.), когда минимальная температура почвы на глубине 40 см опускалась до $-6 - 8^{\circ}\text{C}$. Скорее всего, это связано с резким приходом холодов в периоды отсутствия снежного покрова. На севере ЕТР, в пределах северо-западных регионов наблюдаются аналогичные тенденции, менее выражено повышение минимальной температуры почвы в восточных регионах – бассейне рек Кама, Средняя и Нижняя Волга, Урал.

Рис. 4. Изменение минимальной температуры почвы на глубине 40 см за зиму на метеостанциях бассейна Дона: *а* – м/с Ефремов; *б* – м/с Елец; *в* – м/с Казанская; *г* – м/с Миллерово.

Подводя итог, можно констатировать, что повышение минимальной температуры почвы и, как следствие, сокращение глубины промерзания почвы, происходящее из-за более теплых зим, приводят к увеличению грунтового питания. Одновременно увеличиваются потери стока на поверхностное задержание и испарение в течение зимнего и особенно весеннего периода.

Изменения условий формирования стока в зимний период и, как следствие, в весенний период связаны во многом с фазой выпадения осадков, которая обусловлена характером зим, условиями снегонакопления. В целом для европейской части России, согласно данным доклада об изменениях климата [28], наблюдается рост годовых сумм осадков. Тем не менее, по результатам проведенных расчетов на северо-западе, в центре и на юге ЕЧР заметно сократилось количество твердых осадков, выпадающих за зимний период. Наиболее существенное снижение отмечено в верховьях Днепра и его притоках – около 20–40 мм. Для значительной части территории бассейна Дона, Оки и Верхней Волги снижение количества твердых осадков составило 10–20 мм. В Заволжье наблюдаются обратные тенденции: например, в Верховьях Северной Двины, бассейнах левобережных притоков Верхней и Средней Волги (реки Кострома, Унжа, Ветлуга), бассейне Вятки наблюдается увеличение суммы твердых осадков за зиму на 10–20 мм за период 1978–2016 по сравнению со средним значением за 1958–1977 (рис. 5 а). Еще заметнее растет сумма твердых осадков в бассейне Урала, прирост достигает в среднем 20–40 мм, местами и до 40–80 мм. Противоположная картина характерна для суммы жидких осадков за зимний период (рис. 5 б): по всему правобережью Волги, в бассейне Дона, реках Северо-Запада рост составляет от 10 до 40 мм. Наиболее явно эти тенденции проявляются в бассейне Ладожского озера, реках, впадающих в Финский залив, а также реках юга Русской равнины, впадающих в Азовское море между бассейнами Дона и Кубани, в малых притоках Цимлянского водохранилища. Увеличение жидких осадков составляет от 20 до 40 %, а снижение количества дней с отрицательными температурами – от 15 до 25 % (рис. 6).

Комбинация описанных тенденций приводит к увеличению потерь на инфильтрацию, переувлажнению почвы в зимний период из-за возникновения частых оттепелей, снижению поверхностного стока весной [2, 8]. Как следствие, увеличивается питание грунтовых вод [5], что, в свою очередь, приводит к росту доли подземного питания рек. С точки зрения формирования паводочного стока, повышенная водность межени способствует формированию паводков. Выпадение жидких осадков или сильная и продолжительная оттепель приводят к резкому росту водоотдачи, если к этому моменту почва уже достаточно насыщена влагой – начинается поверхностный сток, накладывающийся на предшествующий рост грунтового питания реки. Все это приводит к формированию паводков.

Изменение характеристик стока паводков и показателей стока за другие фазы водного режима

Для большинства рек Европейской России формирование паводков стало происходить практически ежегодно, в последние десятилетия паводки наблюдаются в любой гидрологический сезон года. Особенно ярко этот процесс можно проследить по датам прохождения максимальных расходов как дождевых, так и оттепельных паводков. Наиболее четко тенденция к увеличению «разброса» дат прохождения максимальных расходов воды во время паводков характерна для степных и лесостепных районов – бассейна Дона, притоков нижнего течения Оки, реках бассейна Средней и Нижней Волги. Так, например, на р. Самаре до середины 1970-х годов максимальные расходы дождевых паводков наблюдались преимущественно в мае–августе (рис. 7 а) и были связаны с интенсивными летними ливнями. В последующие десятилетия выделяется еще один «кластер» дат – это зимние дождевые паводки, наблюдающиеся в октябре–декабре. Тем не менее, статистически достоверного роста величины максимального расхода дождевых паводков выявить не удалось (рис. 7 б). Что же касается дат максимальных расходов оттепельных паводков – здесь наблюдается схожая с дождевыми паводками ситуация.

Если до начала 1970-х годов максимальные расходы оттепельных паводков наблюдались преимущественно в декабре–январе (рис. 7 в), то в последние десятилетия наиболее интенсивные оттепели стали отмечаться в марте–апреле, непосредственно перед началом весеннего половодья. Максимальные расходы оттепельных паводков в степной и лесостепной зонах заметно увеличиваются в последние три десятилетия (рис. 7 г). В лесной зоне наблюдаются схожие тенденции, но выражены они гораздо слабее.

При оценке вклада оттепельных паводков в увеличение стока следует рассматривать две характеристики: значение объема стока оттепельных паводков без учета грунтовой составляющей и вместе с ней. Первый показатель отражает тот объем воды, который относительно быстро поступает в русловую сеть в результате таяния снега во время оттепелей и выпадающих жидких осадков. Значение с учетом грунтовой составляющей включает талый сток, поступающий в русло реки уже в качестве подземной составляющей, и зависит от водности предшествующего периода. На рис. 8 отражено, что для обеих характеристик присуща некоторая цикличность с ярко выраженным увеличением в конце 1970-х годов. Для ряда гидрологических постов, расположенных в степной зоне (бассейн Дона, Самары), прослеживается тенденция в увеличении числа оттепелей после 1978 г. Однако статистическая значимость этих трендов прослеживается пока не везде.

После середины 1970-х годов на гидрографах рек отчетливо видна трансформация внутригодового распределения речного стока, которая отмечается большинством исследователей [1, 4, 5]. На рис. 9 приведены гистограммы компонентов годового стока, благодаря которым можно проследить вклад различных составляющих в его годовой объем за последние 70 лет. Практически для всех рек выявляется тенденция роста базисной или грунтовой составляющей. Наименее ярко она прослеживается на севере ЕЧР и в бассейне Камы (рис. 9 а, б). Наиболее очевидное перераспределение стока характерно для бассейнов Оки, Дона, левобережных притоков Средней и Нижней Волги (рис. 9 в). Для отдельных постов происходит увеличение объемов оттепельного стока, но выявляется эта тенденция далеко не везде. Можно предположить, что механизмы влияния оттепелей на зимний сток более интенсивно отражаются в росте грунтовой составляющей, чем в росте самих объемов паводочных пиков.

Для рек Северного Кавказа характерно прохождение паводков в течение всего года, для Терека и Кубани в среднем 17 раз в год: от 7 до 23 паводков летом и до 10 зимой. Максимальные годовые расходы этих рек возникают

при наложении паводка на базисную половодную волну, сформированную снеготаянием и спадом предшествующих дождевых паводков. Значение годового максимального расхода воды на р. Кубань показывает статистически недостоверный положительный тренд, на р. Терек – статистически недостоверный отрицательный. Для обеих рек характерно смещение даты прохождения годового максимального расхода на более ранние сроки: с конца июня – середины июля на конец июня для Терека и с конца июня-середины июля на середину июня для Кубани. Накладывающиеся на летнее половодье паводки составляют 9–10 % суммарного стока Кубани и 4–5 % стока Терека. Зимние паводки не вносят существенного вклада на р. Терек (до 1 %), в то время как на Кубани они приносят 3–5 % суммарного стока. Увеличе-

ние практически в два раза дисперсии рядов объема паводков происходит на р. Кубань в зимний и летний периоды. На р. Терек аналогичное увеличение дисперсии характерно для полного объема паводков в зимний период. Для обеих рек отмечено направленное увеличение дисперсии рядов продолжительности подъема и суммарной продолжительности паводков летом и зимой. Данные тенденции при относительной стабильности статистических характеристик максимального расхода воды могут обуславливать увеличение паводочной опасности на исследуемых реках.

Для максимальных расходов воды паводков летнего периода характерна однородность относительно среднего значения и C_v и для Терека и для Кубани. Для максимальных расходов зимних паводков на р. Терек характерно направленное увеличение максимального расхода воды, которое происходит за счет роста грунтовой составляющей стока в бассейне на фоне тен-

денции к понижению превышения максимального расхода над грунтовым стоком и значительного снижения его дисперсии. Величина грунтового стока увеличилась в течение рассматриваемого периода на 40 % на Кубани и на 20 % на р. Терек. Грунтовый сток составлял 58 % годового на р. Терек до 1981 г., в современный период водности его доля увеличилась до 63 %. На Кубани через грунтовое звено проходило 30 % годового стока до 1981 г. и почти 40 % в современный период.

ВЫВОДЫ

В современный период на большинстве рек происходит интенсивное сокращение соотношения объемов и максимальных расходов половодья по отношению к соответствующим объемам грунтовой составляющей. Если до 1978 г. объемы воды, проходящие за половодья, значительно превышали объем подземной составляющей за год, то в последние тридцать лет эти величины даже для крупных бассейнов становятся сопоставимыми или доля последних начинает преобладать.

Основная причина роста минимальных расходов воды связана с увеличением паводочного стока под влиянием более интенсивных и продолжительных оттепелей. Результаты расчетов подтвердили ряд полученных ранее выводов об изменении и трансформации водного режима рек ЕТР и показали, что в последние 30 лет в средней и южной части европейской территории России – в бассейнах Волги, Оки, Вятки, Дона – наблюдается снижение объемов половодья, рост меженных расходов воды и увеличение доли паводочного стока в годовом. Снижение стока половодья происходит на фоне увеличения минимального зимнего стока в основном за счет зимних паводков, объем которых на большинстве рек увеличился на 20–30 %. Также за счет оттепелей повышается питание подземных вод.

Отличительной особенностью водного режима последних десятилетий стало наличие паводочных пиков практически в любой сезон гидрологического года. Таким образом, некоторые реки европейской территории России по классификации Б.Д. Зайкова с трудом можно относить к рекам с восточно-европейским типом водного режима, поскольку сток весеннего половодья составляет менее 50 % годового стока.

В данной работе впервые представлен современный анализ генетических составляющих речного стока на основе автоматического расчленения гидрографа, позволяющий оценивать большой массив суточной информации. Результаты исследований могут быть использованы для планирования водохозяйственных мероприятий и регулирования стока в различные сезоны года в условиях происходящих климатических изменений. Особое внимание должно быть уделено зимнему периоду, характеризующемуся на современном этапе повышенной водностью и неустойчивостью водного режима. Кроме того, полученные результаты могут быть использованы для совершенствования прогнозных методик весеннего половодья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследования стока и процессов формирования паводков // Труды ГГИ / под ред. Д.Л.Соколовского. Л.:Гидрометеиздат,1947. 184 с.
2. Ясинский С.В., Каишутин Е.А. Пространственные и временные закономерности изменения весеннего склонового и речного стока на Русской равнине // Изв. РАН. Сер. геогр. 2007. № 5. С. 71–81.
3. Киреева М.Б., Илич В.П., Фролова Н.Л., Харламов М.А., Сазонов А.А., Михайлюкова П.Г. Вклад климатических и антропогенных факторов в формирование маловодного периода в бассейне р. Дон 2007–2015гг. // Геориск. 2017. № 4 С. 10–21.
4. Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Агафонова С.А., Евстигнеев В.М., Ефремова Н.А., Повалишников Е.С. Внутригодовое распределение стока равнинных рек Европейской территории и его изменение//Водное хозяйство России. 2015. № 4. С. 4–20.
5. Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Рец Е.П., Сафронова Т.И., Бугров А.А., Телегина А.А., Телегина Е.А. Современные ресурсы подземных и поверхностных вод европейской части России. М.: ГЕОС, 2015. 320 с.
6. Дмитриева В.А. Внутригодовая и многолетняя динамика сезонного речного стока // Аридные экосистемы. 2011. Т. 17. № 2 (47). С. 23–32.
7. Дмитриева В.А. Экстремальная водность как фактор нарушения гидроэкологической безопасности в бассейне Верхнего Дона // Аридные экосистемы. 2014. Т. 20. № 2 (59). С.12–18.
8. Барабанов А.Т., Долгов С.В., Коронкевич Н.И., Панов В.И., Петелько А.И. Поверхностный сток и инфильтрация в почву талых вод на пашне в лесостепной и степной зонах Восточно-европейской равнины // Почвоведение. 2018. № 1. С. 62–69.
9. Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Киреева М.Б. Современные изменения водного режима рек в бассейне Дона // Водные ресурсы. 2013. Т. 40. № 6. С. 544–556.
10. Kireeva M., Rets E., Samsonov T, Telegina E. Complex analysis of changes in the water regime of the rivers of European Russia based on the methods of automatic hydrograph separation (GrWat package) / Geophysical Research Abstracts Vol. 20, EGU2018-10892, 2018 EGU General Assembly, 2018.
11. Кочерин Д.И. Вопросы инженерной гидрологии М.: Полиграфкнига, 1932. 209 с.
12. Михайлов В.Н., Добровольский А.Д., Добролюбов С.А. Гидрология: уч. для ВУЗов. М.: Высшая школа, 2007. 463 с.
13. Чеботарев А.В. Гидрологический словарь Л.: Гидрометеиздат, 1976. 247 с.
14. Бефани Н.Ф. Прогнозирование дождевых паводков на основе территориально общих зависимостей. Л., 1977. 185 с.
15. Бефани А.Н. Теория формирования дождевых паводков и методы их расчета // Международный симпозиум по паводкам и их расчетам. М.: Изд-во литературы по строительству, 1969. С. 273–294.
16. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 2. Л.:Гидрометиздат, 1989. 357 с.
17. Проблемы паводков. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 199 с.
18. Труды гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2014. Вып. 351. 156 с.
19. Ольдекоп Э.М. О роли регулирующей емкости русловой системы при формировании паводочного стока // Труды ГГИ, 1947. Вып. 1 (55). С. 3–10.
20. Вольфицун И.Б. Процессы формирования дождевых паводков и методика их расчета/по материалам ВНИГЛ: автореф. дисс. ... канд. тех. наук. Л., 1953. 10 с.
21. Корень В.И. Математические модели речного стока и их использование в прогнозах весеннего половодья и дождевых паводков: автореф. дисс. ... д-ра геогр. наук. М., 1988. 339 с.

22. Кучмент Л.С., Корень В.И. Математическая модель формирования дождевых па-
водков. Обнинск, 1969. 54 с.
23. Болгов М.В., Коробкина Е.А., Филиппова И.А. Байесовский прогноз минимального
стока в нестационарных условиях с учетом возможных изменений климата // Ме-
теорология и гидрология. 2016. № 7. С. 72–81.
24. Kireeva M., Sazonov A., Rets E., Ezerova N., Frolova N., Samsonov T. Genetic analysis of
seasonal runoff based on automatic techniques of hydrometeorological data processing //
Geophysical Research Abstracts Vol. 19, EGU2017-1075-1, 2017 EGU General Assembly
2017. CCAttribution 3.0 License.
25. Куделин Б.И. Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных
вод. М.: Издательство Московского университета, 1966 г. 345 с.
26. Dee D.P. and et. Al The ERA-Interimre analysis: configuration and performance of the
data assimilation system// Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2011.
Vol. 137. P. 553–597.
27. База данных АЙСОРИВНИИГМИ-МЦД Режим доступа: <http://aisori.meteo.ru/>
ClimateR, (дата обращения: 25.06.2018)
28. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологиче-
ских систем. М.; Росгидромет, 2012. 506 с.

Сведения об авторах:

Киреева Мария Борисовна, канд. геогр. наук, младший научный сотрудник, гео-
графический факультет, кафедра гидрологии суши, ФГБОУВО «Московский государ-
ственный университет имени М.В.Ломоносова», Россия, 119991, Москва, Ленинские
горы, 1; e-mail: kireeva_mb@mail.ru

Фролова Наталья Леонидовна, д-р геогр. наук, профессор, заведующая кафедрой
гидрологии суши, ФГБОУВО «Московский государственный университет имени
М.В.Ломоносова», Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1; e-mail: frolova_nl@mail.ru

Рец Екатерина Петровна, канд. геогр. наук, ФГБУН «Институт водных проблем
РАН», Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3; e-mail: retska@mail.ru

Самсонов Тимофей Евгеньевич, канд. геогр. наук, ведущий научный сотрудник,
географический факультет, кафедра картографии и геоинформатики, ФГБОУВО
«Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Россия, 119991,
Москва, Ленинские горы, 1; e-mail: tsamsonov@geogr.msu.ru

Телегина Екатерина Андреевна, аспирант, географический факультет, кафедра ги-
дрологии суши, ФГБОУВО «Московский государственный университет имени М.В.Ло-
моносова», Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1; e-mail: tesladanton@gmail.com

Харламов Максим Александрович, аспирант, географический факультет, кафе-
дра гидрологии суши, ФГБОУВО «Московский государственный университет имени
М.В.Ломоносова», Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1; e-mail: kharlamov.m.a@
gmail.com

Езерова Наталия Николаевна, аспирант, географический факультет, кафедра
гидрологии суши, ФГБОУВО «Московский государственный университет имени
М.В.Ломоносова», Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1.

Пахомова Ольга Михайловна, канд. геогр. наук, географический факультет, кафе-
дра гидрологии суши, ФГБОУВО «Московский государственный университет имени
М.В.Ломоносова», Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1; e-mail: olupah@mail.ru