

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-2-117-146>

УДК 504.453

**Формирование весеннего стока рек ЕТР:  
основные факторы и способы их учета.  
II. Переоценка с учетом современных условий  
на примере рек бассейна Дона**

***Н.А. Варенцова*<sup>1,2</sup>, *М.Б. Киреева*<sup>2</sup>, *М.А. Харламов*<sup>2</sup>,  
*М.И. Варенцов*<sup>3</sup>, *Н.Л. Фролова*<sup>2</sup>, *Е.С. Повалишникова*<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Центральное управление по гидрометеорологии и мониторингу  
окружающей среды, г. Москва, Россия;*

<sup>2</sup> *Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия;*

<sup>3</sup> *Научно-исследовательский вычислительный центр  
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия  
kireeva\_mb@mail.ru*

Представлен анализ формирования весеннего стока на реках Русской равнины. Приведен краткий обзор исследований, посвященных динамике отдельных характеристик климата и половодий рек на Русской равнине за последние 40 лет. Показано, что в результате климатических изменений и антропогенного влияния на процессы формирования талого стока во много определяющими стали не приходные, а расходные факторы, обуславливающие его потери. Разработана и верифицирована схема факторов формирования половодья на примере рек бассейна Дона, наиболее сложного с точки зрения формирования половодья. По результатам проверки на 11 водосборах, расположенных в бассейне Дона, определены три наиболее значимых фактора формирования весеннего стока: отсутствие значимой связи стока половодья с запасом воды в снеге; увеличение роли влажности почвы и глубины ее промерзания; выявлена большая роль скорости таяния снежного покрова в период непосредственно перед началом весеннего половодья. Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности применения данной схемы исследования в других регионах.

*Ключевые слова:* сток весеннего половодья, реки бассейна Дона, динамические, квазипостоянные и антропогенные факторы

**Spring river runoff in the European part of Russia:  
main factors and their estimation.  
II. Reassessment in modern conditions  
on the example of the Don basin rivers**

***N.A. Varentsova*<sup>1,2</sup>, *M.B. Kireeva*<sup>2</sup>, *M.A. Kharlamov*<sup>2</sup>,  
*M.I. Varentsov*<sup>3</sup>, *N.L. Frolova*<sup>2</sup>, *E.S. Povalishnikova*<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Central Administration for Hydrometeorology and Environmental  
Monitoring, Moscow, Russia;*

<sup>2</sup> *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;*

<sup>3</sup> *Research Computing Center Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia  
kireeva\_mb@mail.ru*

The analysis of the formation of spring runoff on the rivers of the Russian Plain is presented. A brief review of the studies dealing with the dynamics of individual climate characteristics and river floods on the Russian Plain in the past 40 years is given. It was shown that as a result of climate change and anthropogenic impact on the formation of snowmelt runoff, not incoming but outgoing factors causing its loss have become decisive. The scheme of the spring flood formation factors was developed and verified for the rivers of the Don basin, which is the most complex one in terms of the spring flood formation. According to the verification for 11 catchments situated in the Don basin, three most significant factors of the spring flood formation were identified: the absence of the significant correlation between the spring flood runoff and snow water equivalent; an increasing role of soil moisture and freezing depth; a great role of the snowmelt rate during the period just before the spring flood. The results allow making a conclusion on a possibility of applying this research scheme in other regions.

*Keywords:* spring flood runoff, Don basin rivers, dynamic, quasi-permanent, and anthropogenic factors

## Введение

Изучение весеннего половодья как основной фазы водного режима рек Русской равнины в последние годы становится все более актуальным. Данному аспекту посвящено огромное количество научно-исследовательских работ, анализ которых был приведен в первой части исследования, опубликованного в данном сборнике.

Сложность процесса формирования половодья связана с тем, что, с одной стороны, он сильно зависит от зональных факторов – распределения снежного покрова, морозности зим, характеристик промерзания почвы, которые в том числе подвергаются влиянию изменений климата, с другой стороны, в не меньшей степени на него влияют и азональные факторы, к которым можно отнести особенности пространственного распределения почвенного покрова, геологическое строение водосбора, степень сельскохозяйственной освоенности и прямого антропогенного воздействия.

Многофакторность, обусловленная всеми этими аспектами, приводит к тому, что изучение характеристик половодья чаще всего делается на региональном уровне, который позволяет снизить количество необходимых анализируемых показателей и упростить весьма сложные расчеты, исключив из них наименее важные для данного конкретного региона величины. Только понижение размерности вычислений и сужение спектра параметров позволяют подойти к вопросам выделения основных ключевых факторов, которые могут быть использованы в качестве потенциальных предикторов для составления прогнозных зависимостей. При этом даже методы физико-математического моделирования порой не могут дать исчерпывающий ответ относительно того, что именно влияет на формирование высоты и объема половодных пиков в наиболее сложных с точки зрения условий формирования половодья регионах. Именно к таким регионам относится бассейн Дона, примеры по которому приводятся в данном исследовании.

В первой части работы проводится анализ региональных и крупномасштабных исследований, посвященных динамике характеристик весеннего половодья для рек Русской равнины на основе литературных источников. Показано, что именно на юге Европейской территории России изменение характеристик весеннего половодья носит наиболее масштабный и беспрецедентный характер за всю историю гидрологических наблюдений. Объектом регионального исследования выбран бассейн Дона, в котором эта закономерность проявилась наиболее ярко. В рамках работы выдвинуто несколько гипотез относительно возможных процессов трансформации стокоформирования в период весеннего половодья, проведен анализ и проверка выдвинутых гипотез на региональном уровне на 11 частных водосборах в пределах Донского бассейна.

### **Материалы и методы исследования**

В основу исследования был положен традиционный в гидрологической практике региональный факторный анализ. На первом этапе с целью генерализации факторы формирования стока (ФФС) половодья были разделены на 17 групп. В качестве входной метеорологической информации использованы данные реанализа ERA-5 с шагом  $0,25^\circ$  по широте и долготе. На их основе сформирован массив более чем из 200 потенциальных характеристик ФФС половодья (табл. 1). Он включил в себя различные параметры режима температуры и осадков, тренды на выделенных интервалах времени, глубины промерзания почвы, влажности почвы и ее класса. Потенциальные ФФС охватывают период от предшествующего лета до окончания таяния снежного покрова.

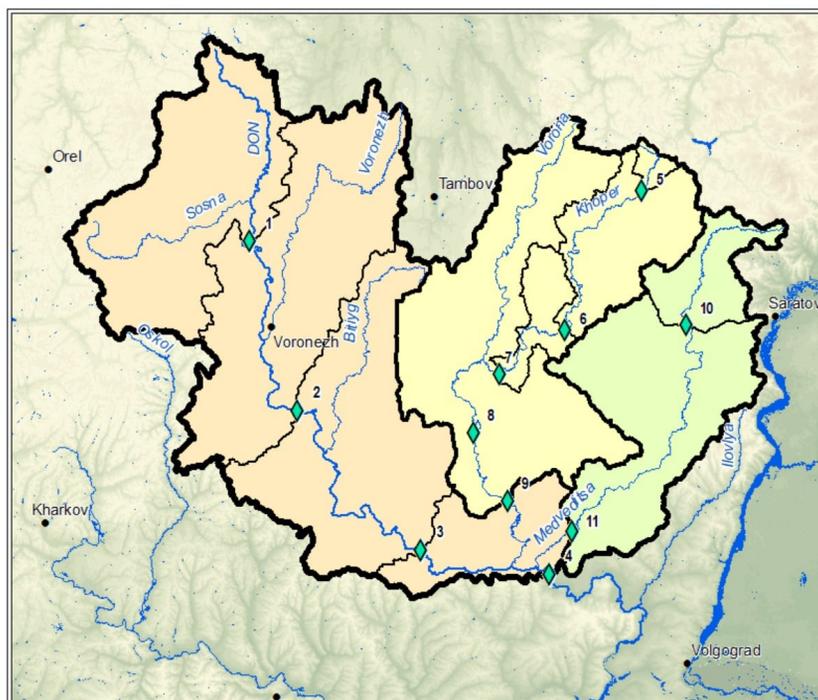
Также был проведен сравнительный анализ ряда исследований, посвященных непосредственно изменению основных предиктантов – характеристик весеннего половодья. Исследования отбирались по географическому признаку и перечню изучаемых показателей – максимальных расходов воды и объемов стока весеннего половодья.

Для подтверждения сформулированных обобщений и выдвинутых гипотез в качестве регионального примера в данной работе на 11 водосборах в пределах бассейна Дона (зона недостаточного увлажнения) количественно исследовались особенности влияния различных факторов (запаса воды в снежном покрове, глубины промерзания и предзимней влажности почвы) на формирование стока половодья. В качестве тестовых бассейнов использованы посты на Дону и двух его главных притоках – Хопре и Медведице. На р. Дон взято четыре пункта – Задонск, Лиски, Казанская и Беляевский. На р. Хопер – Пановка, Балашов, Поворино, Бесплемяновский и Барминский, а на р. Медведице – Лысье Горы и Арчединская. Таким образом, в работе задействованы водосборы площадью от 932 до 204 000 км<sup>2</sup> (рис. 1). Кратность увеличения площадей от верховьев к низовьям рек изменялась от 4 до 61. Для анализа использовались данные о суммарном слое стока половодья за период с 1980 по 2017 год.

**Таблица 1.** Краткое описание потенциальных характеристик ФФС половодья, рассчитанных по данным ERA-5

**Table 1.** A brief description of the potential characteristics of the freshet FFF calculated according to ERA-5 data

№	Группа факторов формирования стока	Состав показателей
F1	Снежный покров	Характерные даты, средние и максимальные запасы воды в снежном покрове за выбранные периоды, их коэффициенты вариации
F2	Средние характеристики зимнего периода	Продолжительность периода, средняя температура воздуха, суммы осадков за различные интервалы времени, их коэффициенты вариации
F3	Зимние морозы	Продолжительность периодов, средняя температура, суммы осадков и их коэффициенты вариации
F4	Зимние оттепели	Продолжительность периодов, средняя температура, суммы осадков и их коэффициенты вариации
F5	Глубина промерзания	Продолжительность периода, максимальная и средняя за период глубина промерзания
F6	Период от максимального снеговзапаса до его схода	Продолжительность периодов, суммы и средние значения температур воздуха, амплитуды температур, суммы осадков (по фазам и смешанным), коэффициенты вариации, средняя глубина снежного покрова, коэффициенты трендов
F7	Период от максимального снеговзапаса до перехода температуры воздуха через 0°C	
F8	Период от перехода температуры воздуха через 0°C до схода снежного покрова	
F9	10 дней после схода снежного покрова	
F10	Последние 10 дней зимы	
F11	Первые 10 дней весны	
F12	Последние 10 дней зимы и первые 10 дней весны	
F13	Скорость таяния	Время, скорость и коэффициенты трендов периода таяния в общем и по фазам
F14	Летняя влажность почвы	Влажность почвы за различные периоды лета
F15	Предзимняя влажность почвы	Влажность почвы за различные периоды осени
F16	Влажность конца зимы	Влажность почвы за различные периоды февраля – марта
F17	Экстремумы влажности почвы	Наибольшие и наименьшие значения влажности почвы за цикл формирования половодья, даты



№	Река	Пост	Площадь водосбора, тыс. км <sup>2</sup>	Высота нуля графика поста, м	Природная зона
1	Дон	г. Задонск	31,1	98,09	смешанные леса, лесостепь
2		г. Лиски	69,5	77,36	смешанные леса, лесостепь
3		ст. Казанская	102,0	57,98	смешанные леса, лесостепь
4		х. Беляевский	204,0	44,20	смешанные леса, лесостепь
5	Хопер	х. Пановка	1,12	152,62	лесостепь
6		г. Балашов	14,3	100,88	лесостепь
7		г. Поворино	19,1	89,29	смешанные леса, лесостепь
8		х. Бесплемяновский	44,9	69,11	смешанные леса, лесостепь
9		х. Барминский	57,3	60,60	смешанные леса, лесостепь
10	Медведица	пгт. Лысье Горы	7,61	126,62	лесостепь
11		ст. Арчединская	33,7	63,51	лесостепь, степь

**Рис. 1.** Обзорная карта района исследований. Бассейны: I – р. Дон; II – р. Хопер; III – р. Медведица. Арабскими цифрами указаны положения замыкающих створов частных водосборов, приведенных в таблице.

**Fig. 1.** Overview map of the research area. Watersheds: I – the Don River; II – the Hoper River; III – the Medveditsa River. Arabic numerals indicate the positions of the closing gates of private catchments shown in the table below.

Все метеорологические характеристики для выбранных водосборов рассчитаны за 1980–2017 гг. по данным реанализа ERA5 [45] и усреднены в границах водосборов.

Для определения наиболее весомых для половодья ФФС проведен статистический регрессионный анализ. Он включил в себя:

- определение парных коэффициентов корреляции между слоем стока половодья каждого водосбора и потенциальными ФФС;

- построение двух- и трехпараметрических уравнений линейной регрессии для определения комбинаций ФФС, наиболее точно описывающих сток половодья;

- определение для этих уравнений коэффициентов корреляции между предикторами для снижения неустойчивости решений;

- определение множественного коэффициента корреляции, среднеквадратической ошибки уравнения и уровня значимости полученной зависимости.

Кроме того, выделялись используемые ФФС и их принадлежность к назначенным группам.

Двухпараметрические уравнения составлялись для всех возможных комбинаций ФФС за исключением пар, на которые были наложены ограничения в силу их высокой скоррелированности. Построение трехпараметрических уравнений шло на основе 200 лучших двухпараметрических уравнений.

Все основные и вспомогательные программы для этого анализа написаны в средах Python и Matlab.

## **Изменение климата и его влияние на формирование стока половодья в XXI веке**

### ***Взгляд российских ученых***

С течением времени сокращение гидрометеорологической сети и программ наблюдений в сочетании с изменением климата привели к невозможности использования установленных ранее статистических связей стока половодья и определяющих его факторов с первоначальным уровнем достоверности. Направленность, скорость изменения, а также степень их влияния на весеннее половодье оказались различны. Поэтому современное состояние и динамика основополагающих факторов формирования стока и происходящих процессов требуют краткого описания.

***Циркуляция атмосферы.*** Практически все динамические факторы весеннего половодья связаны с атмосферной циркуляцией, которая, выступая первостепенным косвенным фактором, характеризует глобальные условия их формирования.

Восточно-Европейская равнина находится под действием Исландского и Алеутского минимумов, Азорского и Сибирского максимумов, для описания действия которых наиболее часто прибегают к использованию индексов циркуляции атмосферы: североатлантического

колебания или NAO, восточно-атлантического колебания или EA, арктического колебания или AO, колебания полярной области или Pol, Южного колебания, или SOI, тихоокеанского колебания или NPI [5, 27, 30].

В современных условиях в зимний период (в частности, в январе) NAO и EA оказывают наибольшее влияние на формирование стока практически со всей территории Восточно-Европейской равнины за исключением районов к югу от 50° с. ш. (Нижняя Волга, Средний Дон, устья Хопра и Медведицы). При одновременной положительной фазе NAO и EA траектории движения циклонов смещаются к северу от 50–52° с. ш., обуславливая развитие маловодья в бассейне Дона и Нижней Волги. Зимой это дополнительно приводит к развитию положительной аномалии температуры воздуха (более 3 °C).

В период отрицательной фазы NAO и EA траектории движения циклонов смещаются к югу с разной интенсивностью, что способствует росту влагозапасов в пределах водосборов центра и юга равнины. При отрицательных фазах NAO и EA наблюдается обратная тенденция с аномалией до –5 °C и усилением процессов блокирования западного переноса, что крайне важно для формирования устойчивого холодного периода в зимние месяцы [25].

В последние десятилетия наблюдается положительная фаза NAO в январе–марте начиная примерно с конца 1970-х гг., в апреле – с 1990-х гг. В среднем за зимние месяцы (декабрь–февраль) положительная аномалия индекса сохраняется с 1980-х гг. Одновременно с этим для октября отмечаются устойчивый отрицательный тренд интенсивности NAO и преобладание его отрицательной фазы начиная с 1980-х гг., а в зимний период наблюдаются преобладание и усиление положительной фазы EA [20].

С середины XX в. над Восточно-Европейской равниной значительно снизилось количество блокирующих антициклонов, которые обеспечивали формирование холодных зим и значительное промерзание почвы. Об этом также свидетельствует изменение приземного давления от +1 гПа в бассейне Нижней Волги до –5 гПа – на западе бассейнов Дона и Днепра [24].

Кроме того, в годы развития Эль-Ниньо на западе Восточно-Европейской равнины формируется положительная аномалия осадков, а в годы развития Ла-Нинья в центре и на юге равнины наблюдается отрицательная аномалия осадков на фоне отрицательной аномалии температуры преимущественно на юге и юго-востоке равнины.

На фоне изменений циркуляции атмосферы преимущественно в зимний и весенний сезоны в пределах Восточно-Европейской равнины снизилась скорость ветра. Наибольшие тренды характерны для северо-западных и центральных районов Европейской территории России: 11,8–16,5 %/10 лет, или на 39–54 % за 1977–2011 годы.

В зимние месяцы 1946–2012 гг. в пределах Восточно-Европейской равнины наблюдалось изменение приземного давления. Наибольшие градиенты этого тренда характерны для Дона, Оки и Нижней Волги, тогда как к северу они сглаживаются, а абсолютное значение аномалии давления уменьшается до  $-3$  гПа.

Вышеописанные особенности атмосферной циркуляции указывают на ее изменение по сравнению с серединой XX в. как в целом за год, так и за период весеннего формирования стока в частности. По этой причине важным представляется сравнительный анализ факторов формирования стока в прошлом и настоящем, что необходимо не только для понимания текущих особенностей формирования половодья, но и для оценки рисков от климатических изменений в будущем.

**Температура воздуха.** Описанные изменения напрямую отразились на температуре воздуха – значимом опосредованно влияющем факторе формирования половодья. Для нее в пределах Восточно-Европейской равнины диагностированы положительные тренды в осенний, зимний и весенний периоды с коэффициентами 0,64, 0,43 и 0,41 °C/10 лет соответственно [5]. Тренд в зимние месяцы значим только на 18%-ном уровне достоверности, в остальные сезоны – менее чем при 1 %. Тем не менее изменение условий формирования стока в зимний период уже привело к серьезнейшим последствиям для речного стока: росту зимнего и сокращению талого стока на большей части Восточно-Европейской равнины, в особенности – в ее южной половине [22, 23, 29, 31, 53]. Эти изменения неравномерны: наибольшие зимние тренды характерны для северо-запада и запада Восточно-Европейской равнины, а наименьшие – для востока. В осенние месяцы распределение прямо противоположное, а в весенние – сравнительно равномерное с пиком лишь в нижнем течении р. Печоры.

Наблюдаемый тренд привел к увеличению числа и интенсивности зимних оттепелей, которые прежде рассматривались лишь в форме оговорок для бассейнов Оки и Дона [3, 10]. Следом сократилась продолжительность холодного периода. Так, в пределах бассейнов Волги и Дона она уменьшилась на 5–20 суток [13, 50].

Наблюдаемые тренды конца зимы – начала весны свидетельствуют о значительном снижении дружности весны на большей части Восточно-Европейской равнины, где диагностируется деградация половодья. В этих регионах увеличивается продолжительность периодов с внутрисуточным переходом температуры воздуха через 0 °C. Например, коэффициент дружности половодья в бассейне Дона с 1970 г. снизился в 1,5–2 раза по сравнению с предшествующим периодом [10]. В результате увеличились доли испарения и фильтрации влаги в структуре формирования весеннего половодья.

**Атмосферные осадки.** Изменение температурного режима зимнего периода привело к существенным последствиям в режимах накопления атмосферных осадков, увлажнения и глубины промерзания почвы,

развития ледяной корки и испарения с поверхности снега и почвы. Примечательно, что первый фактор не всегда может быть отнесен к приходной части водного баланса. Выпадение атмосферных осадков в твердой фазе в зимние и весенние месяцы формирует приходную составляющую половодья. В то же время жидкие осадки весной в зависимости от их объема, интенсивности и типа поверхности, на которую они выпадают, могут относиться и к перераспределяющим факторам. Например, морось при определенных синоптических условиях может приводить к увеличению испарения и инфильтрации, обеспечивая постепенный сход снежной толщи без формирования ярко выраженной волны половодья.

В последние годы в пределах Восточно-Европейской равнины достоверный положительный тренд осадков диагностируется только для весенних месяцев, наиболее ярко выраженный в бассейнах рек Балтийского, Белого и Баренцева морей.

Для осенних и зимних месяцев положительный тренд незначителен, однако именно в эти периоды отмечаются наиболее серьезные изменения в структуре осадков. Количество твердых осадков на Восточно-Европейской равнине с 1936 г. сократилось на 22 %, количество смешанных осадков выросло на 35 %, а жидких – на 14 %. Примечательно, что в формировании весеннего половодья все большую роль начинают играть весенние осадки, так как отмечается рост паводковой составляющей в структуре формирования половодья [16, 17, 36, 49].

Согласно [21], твердая составляющая атмосферных осадков – запас воды в снежном покрове – по-прежнему остается основой формирования половодья. В современных климатических условиях в пределах Восточно-Европейской равнины средняя максимальная высота снежного покрова увеличивается от 10 см на юге до 80 см на севере и северо-востоке, а средний максимальный запас воды в снеге на полевых участках – от первых миллиметров на юге до 150–200 мм в бассейне Верхней и Средней Камы, низовьях Печоры и в Хибинах. На лесных участках средний максимальный запас воды в снеге составляет от 50 до 150 мм и характеризуется меньшей пространственной изменчивостью в сравнении с полевыми показателями [13].

По отношению к сумме зимних осадков максимальный снегозапас, как правило, составляет 50–70 %. В отдельные годы в южной половине ЕТР эта величина может сокращаться до 0 %, а в северной половине – увеличиваться до 90 % [22].

Ярко выражены тренды сокращения максимальных снегозапасов для бассейнов Дона и Нижней Волги [49, 50]. Для бассейнов Северной Двины, Мезени и Печоры значимые изменения в настоящее время не диагностируются. Однако стабильность роли снежного покрова как фактора в общем процессе формирования половодья не может быть доказана лишь отсутствием трендов непосредственно в рядах гидрометеорологических данных.

**Ледяная корка.** Изменениям подверглась и ледяная корка, характерная для регионов с частыми и интенсивными оттепелями. В XXI в. наибольшая повторяемость ее развития отмечается на Верхнем и Среднем Дону, Верхнем Днепре, а также в бассейнах рек, впадающих в Балтийское море.

В пределах Восточно-Европейской равнины средняя продолжительность залегания ледяной корки варьирует от 1,5–3,5 до 24 суток в бассейнах Кубани, Волги, Днепра, Нижнего Дона и верховьев Северной Двины в поле и до 4 суток в лесу в бассейнах Верхней Волги, Дона и Днепра. Средняя максимальная толщина ее при этом не превышает 8 мм в поле и 2 мм в лесу. На фоне современных климатических изменений отмечается повсеместное сокращение продолжительности залегания (на 25–45%/10 лет в поле и на 25–65%/10 лет в лесу) и толщины ледяной корки (в поле на 1–10 мм/10 лет или 20–35 %/10 лет в лесу в силу малых начальных величин – на 1–5 мм/10 лет или 20–75 %/10 лет), что отчасти может сказываться на снижении коэффициента талого стока в весенний период. Наибольшие изменения зафиксированы в бассейнах Северной Двины и Печоры [5]. Изменение характеристик снежного покрова и ледяной корки отражается на процессах таяния весной и в зимние оттепели.

**Снеготаяние.** С середины XX в. для оценки интенсивности снеготаяния в статистических методах по-прежнему чаще всего прибегают к использованию коэффициентов стаивания, как это указывалось выше [33]. Подобное упрощение в современных условиях может приводить к значительным ошибкам. В [2] для степной и лесостепной зон бассейна Дона значения коэффициента стаивания при сумме осадков 0–10 мм за оттепель составляют 5–6 мм/°С. При выпадении во время оттепели интенсивных осадков оно повышается до 15–25 мм/°С, в отдельных случаях – до 40–50 мм/°С. Однако по материалам снегомерных съемок сокращение запаса воды до 62 мм происходит и при отрицательных среднесуточных температурах, вероятно, за счет положительных температур днем, что согласуется с [18]. Но диапазон полученных значений коэффициента стаивания для оттепелей варьирует в очень широких пределах (от 0,5 до 100 мм/(°С·сут)), что не позволяет произвести надежную оценку среднего значения [2].

**Влажность и глубина промерзания почвы.** Внимания требуют и изменения косвенных факторов потерь и перераспределения стока – влажности и глубины промерзания почвы. В текущих климатических условиях в пределах Восточно-Европейской равнины отмечается повсеместное снижение влажности почв в верхнем метровом слое со скоростью 0,4–1,2 мм/10 лет весной и 0,6–2,8 мм/10 лет в июле. Исключение составляют речные бассейны Северо-Кавказского федерального округа, где тренд слабоположительный. По данным [5], аридность климата Восточно-Европейской равнины растет, даже несмотря на положительный тренд суммы осенних осадков практически на всей территории равнины.

Такие тренды указывают на рост впитывающей способности водосборов в период формирования половодья. Примечательно, что отрицательный тренд весенней влажности почв наблюдается несмотря на учащение интенсивных зимних оттепелей, в течение которых на Восточно-Европейской равнине формируются условия для начала водоотдачи в почвогрунты.

Совокупное воздействие роста средней температуры воздуха в зимний период, сокращение продолжительности холодного периода и увеличение частоты и интенсивности оттепелей способствуют уменьшению глубины промерзания почвы и, следовательно, увеличению потерь талого стока на инфильтрацию. Так, по бассейну р. Волги она уменьшилась в среднем до 39–84 см, что на 24–49 % меньше, чем в первой половине XX в. Это сокращение произошло на фоне роста средней температуры зимы всего лишь на 1 °С [11, 29].

### ***Взгляд зарубежных ученых***

Работы зарубежных исследователей XXI в. и их обобщения [42, 55, 57] подтверждают практически все выводы, полученные нашими соотечественниками. Основные факторы формирования стока рассматриваются с точки зрения водного баланса и включают в себя приходные и расходные составляющие: твердые и жидкие осадки, испарение и эвапотранспирацию, влажность почвы и уровень грунтовых вод [37, 41, 46, 47].

Существенным отличием в зарубежных исследованиях в последние 30 лет является стремление к минимизации использования в качестве исходных данных результатов натурных наблюдений за всеми ФФС половодья. Так, в рекомендациях Всемирной метеорологической организации приводится целый перечень обоснований низкой точности результатов снегомерных съемок. В качестве альтернативных источников информации о запасе воды в снежном покрове и прочих потенциальных факторах рекомендованы результаты моделирования, данные реанализа и спутникового мониторинга, аэрофотосъемка [39, 54]. Испарение может быть оценено как прямыми методами, так и косвенно – через коротковолновую или длинноволновую радиацию, температуру воздуха и поверхности воды, влажность воздуха и давление водяного пара, скорость ветра. Для оценки влажности почвы на водосборе помимо прямых методов рекомендовано использование тензометрической съемки, съемки по методу электрического сопротивления (Porous blocks/electrical resistance blocks), спутниковой съемки в видимом и инфракрасном спектрах, микроволновой и гамма-съемок. В то же время для оценки потерь половодья ВМО рекомендует использование вероятностного или климатологического подходов [47, 48]. Тем не менее в отдельных работах отмечено привлечение данных полевых наблюдений [38].

В весенний период по аналогии с отечественными исследованиями для оценки скорости таяния снежного покрова чаще всего применяют

метод температурных коэффициентов, которые, например, для Северной Америки в среднем варьируют от 2–4 в апреле до 4–7 мм/°С в июне в зависимости от залесенности водосбора.

В большом количестве зарубежных исследований подтверждается взаимосвязь между характеристиками половодья и динамикой атмосферной циркуляции. Так, в работах [38, 48, 56, 40] указывается на влияние тихоокеанской декадной осцилляции на развитие многоводного половодья и наводнений на севере США, в [34, 35] сделаны выводы о тесной связи характеристик половодья с положительной и отрицательной фазами NAO, AO, PDO, ENSO.

В части квазипостоянных ФФС половодья зарубежные исследователи чаще всего выделяют среднюю высоту водосбора, площадь оледенения и распространение вечной мерзлоты. Подтверждаются гипотезы отечественных исследователей о влиянии рельефа, залесенности и густоты лесного полога.

Влияние температуры воздуха и осадков на характеристики весеннего половодья показаны в [34, 48, 55] на примере крупнейших рек арктического бассейна и их притоков. Например, выделены как реки, для которых положительная аномалия температуры в весенний период ведет к увеличению продолжительности половодья, так и реки с противоположной реакцией. Аналогичные особенности выделены для сроков начала, объема и пика половодья с температурой воздуха и осадками в холодный период.

Определения вкладов каждого из ФФС в половодье также редки, как и в отечественной литературе, и в основном представляют собой качественные выводы [53]. Только в единичных публикациях присутствуют приближенные оценки: в [44] на основе статистического анализа установлено, что снеготопы в бассейне р. Фрейзер (Канада) лишь на 20–40 % определяют риск высокого половодья, в то время как синоптические условия обеспечивают до 60–80 %.

В результате изменения климата и сохраняющейся антропогенной нагрузке на речные водосборы происходят драматические изменения в условиях формирования и режиме прохождения весеннего половодья. Вследствие роста температуры воздуха и жидких осадков отмечается сдвиг режимов рек умеренного и субарктического климатов с нивального на смешанный и плювиальный [39]. На более ранние сроки сдвигаются пики половодья на Аляске [40].

Значительно усложняется формы гидрографов рек со снеговым питанием: в них все чаще формируются наложенные дождевые и талодождевые [52]. Несмотря на повсеместный рост наводнений, вызванных жидкими осадками, локально в пределах умеренных и субарктических широт отмечается статистически значимый рост средней и максимальной высоты наводнений на реках со снеговым питанием, а также числа случаев и продолжительности наводнений на реках со смешанным питанием.

## Изменение стока половодья рек Русской равнины в XXI веке

Современные оценки характеристик половодья и его приходных составляющих в пределах Восточно-Европейской равнины указывают не только на разную интенсивность их изменений, но и переменный знак тренда, что отражается в современной динамике характеристик стока – объеме и максимальных расходах весеннего половодья – даже в пределах крупных бассейнов [16, 31, 36, 49, 51].

Наиболее существенные тренды снижения половодного стока отмечаются в зоне недостаточного увлажнения южного склона ЕТР [49]. Например, в бассейнах Дона и Нижней Волги отмечается уменьшение максимальных расходов на 40–50 %, на Нижней Волге – до 70 %, а годовая амплитуда для суточных расходов воды уменьшилась в 2–3 раза [1, 8, 11, 22, 26, 31]. Сокращение весеннего стока в бассейнах Верхней Волги, Средней и Нижней Камы достигает 10–20% [45], а в бассейне Дона – до 50% [6, 7, 10]. Примечательно, что для Донского бассейна доля суммарного полезного объема водохранилищ составляет в среднем до 43–45 % от сокращения объема стока половодья, в бассейне Волги – до 70 %, что наглядно отражает последствия антропогенного воздействия на речные водосборы [1].

В [19] показано, что для всего бассейна Волги сокращение слоя стока половодья наблюдается на 70 % рек, а на 30 % диагностирован рост. В то же время лишь для трети из них тренды по состоянию на 2016 г. статистически значимы, в настоящее время их число удвоилось. Скорость изменений также выросла: по полученным в настоящее время оценкам сокращение объема половодья на реках с его отрицательной динамикой составило 40–60%, тогда как в 1978–2010 гг. эта величина составляла лишь порядка 10% [23].

Вслед за изменением объемных показателей половодья растет коэффициент естественной зарегулированности стока: до 0,6–0,7 на реках северного склона ЕТР и Урала, и более 0,7 – на реках бассейнов Оки, Дона и Кубани [31].

Рост слоя стока половодья наиболее часто диагностируется в горных и предгорных районах ЕТР, а также северо-западных районах и Карелии (рис. 2). На реках Северного Края и Верхней Камы статистически значимых трендов на сегодняшний день в литературе не выявлено [45, 51].

Реакция стока половодья на изменение климата и его составляющих наиболее выражена на малых водосборах. Так, на малых реках при сокращении глубины промерзания коэффициент талого стока снизился до 0,3–0,4, что подтверждается как наблюдениями на гидрологических постах, так и на воднобалансовых станциях.

Вследствие изменения климата нарушена однородность в рядах максимального стока рек южной и юго-западной частей ЕТР. В бассейнах Дона, Днепра, Оки и Нижней Волги с начала 1980-х гг. снижение максимальных расходов воды составило 40–60 %, сократилась и дисперсия

(рис. 3а). Статистически значимые отрицательные тренды диагностированы на более чем 90 % действующих стоковых постах (рис. 3б). В то же время положительные тренды выявлены для ряда рек северной части бассейна Волги и склонов Уральских гор [8, 23]. В других работах приводятся несколько отличные результаты.

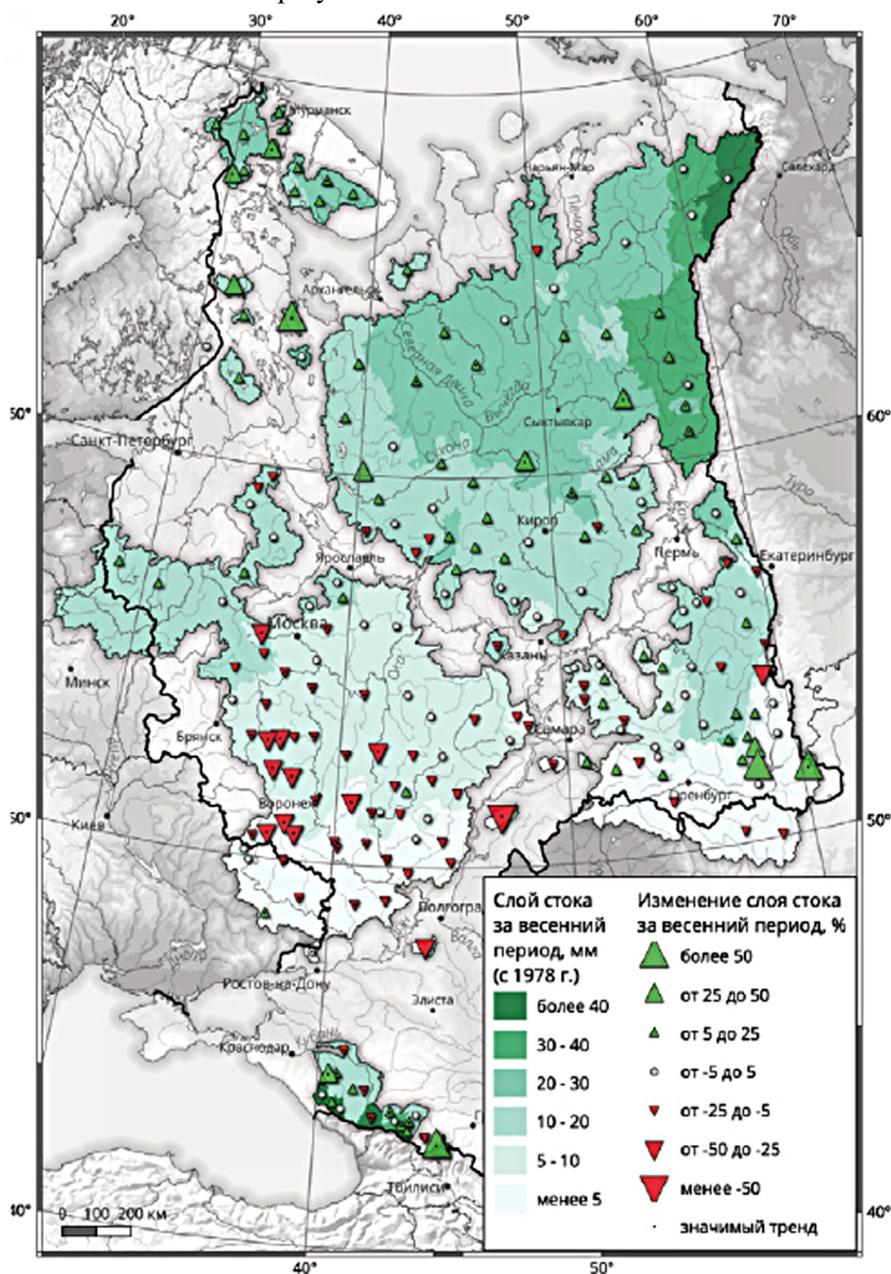
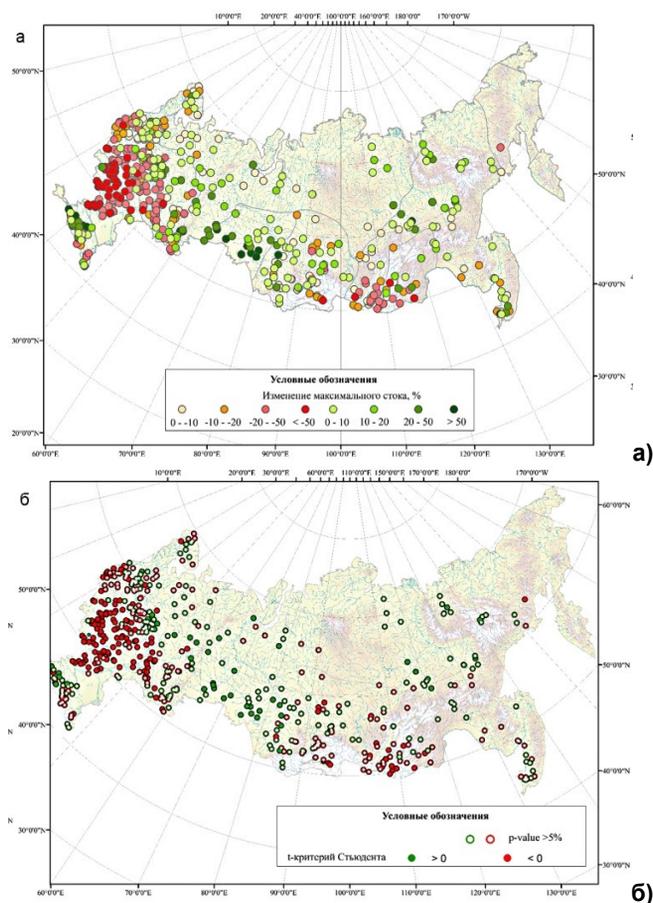


Рис. 2. Изменение слоя стока за весенний период [31].

Fig. 2. Changes in freshet flow (mm) during the spring period [31].



**Рис. 3.** Изменение максимального стока (а) и оценка его статистической значимости по критерию Стюдента для  $p < 5\%$  (б) [32].  
**Fig. 3.** Changes in the maximum flow (a) and the assessment of its statistical significance according to the Student's criterion for  $p < 5\%$  (б) [32].

Изменению подверглись и сроки развития весеннего половодья. Окончание половодья для южной половины ЕТР сместилось на июнь, что отмечается, например, на Медведице и Хопре, притоках Верхней и Средней Волги, Вятки и Белой. В то же время на северных реках половодье стало более растянутым: на Северной Двине, Онеге и Мезени оно теперь чаще завершается в июле.

Оценка вклада климатических и антропогенных изменений в наблюдаемую динамику стока половодья присутствует в работе [7]. Авторы указывают, что в бассейне Дона до 1980 г. вклад антропогенной составляющей в сокращение половодья превалировал, после – отошел на второй план. В то же время отмечается, что с 1930 г. по настоящее время масштабы изменения стока половодья были выше, чем межени.

Согласно проведенному анализу, бассейн Дона является регионом, для которого изменения стока половодья оказались наиболее яркими и критичными с точки зрения безопасности водообеспечения хозяйственных объектов и экономики. Поэтому именно этот регион выбран нами для подтверждения выдвинутых обобщенных тезисов и сформулированных гипотез относительно трансформации условий формирования стока половодья.

### **Региональный анализ формирования стока половодья в современных климатических условиях (на примере бассейна Дона)**

По результатам проведенного статистического регрессионного анализа для 11 частных водосборов, расположенных в зоне недостаточного увлажнения на юге России, представления о главенствующих ФФС половодья, сформированные в середине XX в., подтвердились лишь частично. Если рассматривать отдельные парные коэффициенты корреляции стока с классическими факторами – снегозапасом на конец зимы, осенним увлажнением почвы и глубиной промерзания, то они могут быть довольно высоки. Однако при попытке построения множественной регрессии эти характеристики не попадают в уравнения с наиболее высокой теснотой связи. Максимальные коэффициенты для групп факторов, формирующих наилучшие комбинации для уравнений множественной регрессии, приведены в табл. 2.

Первая группа ФФС содержит в себе разнообразные характеристики снежного покрова и характерные даты его развития (схода, установления и проч.). Для стока половодья выбранных 11 водосборов наибольший коэффициент корреляции с величиной максимальных за год снегозапасов в большинстве случаев не превышает 0,3, и только для одного бассейна составляет 0,46.

Для второй группы факторов характерно более четкое разделение: для водосборов выше по течению связь стока половодья более тесная с суммами зимних температур (бассейны 1, 2, 5, 10 и 11), а к среднему и нижнему течению (бассейны 3, 4, 8, 9) более значимой оказывается связь с суммой осадков на конец зимы, в основном – с 10–20 февраля по дату схода снежного покрова +10 дней. Эта же зависимость полностью подтверждается для третьей группы (характеристики морозности зимы) (рис. 4).

Среди показателей оттепелей (группа 4) наиболее значимыми ФФС можно назвать число дней с оттепелями (посты 1 и 10) и его коэффициент вариации (посты 6, 8, 11), наибольшую продолжительность оттепели (2, 3, 9), а также среднюю температуру оттепели (пост 4). Особо выделяется в данном ряду пост у д. Пановка (№ 5), где наиболее весомым фактором диагностировано количество осадков за периоды оттепелей.

**Таблица 2.** Максимальные коэффициенты корреляций для групп определяющих факторов со стоком весеннего половодья на примере водосборов в бассейне Дона

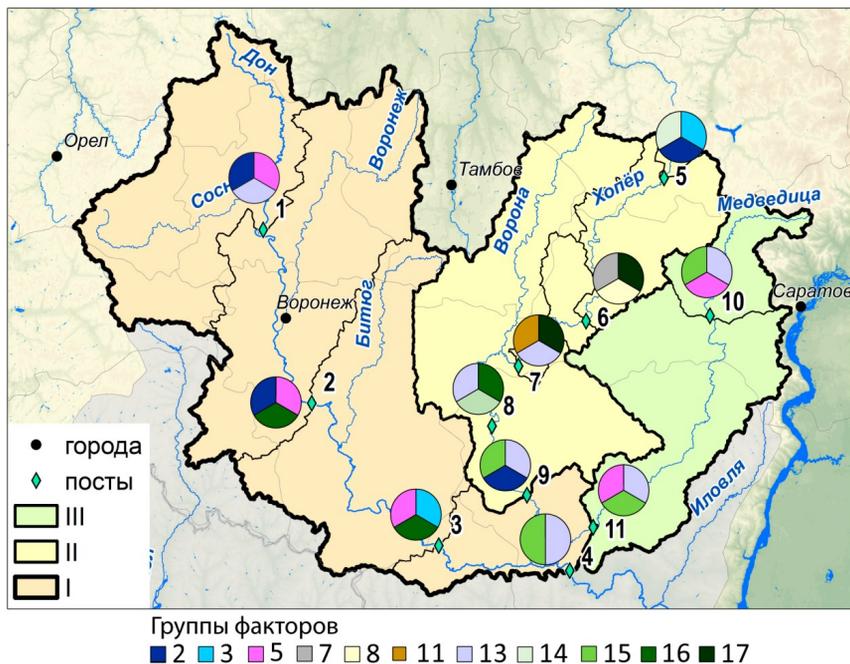
**Table 2.** Maximum correlation coefficients for groups of determining factors with freshet flow on the example of the Don's watershed

Группа факторов	Бассейн Дона				Бассейн Хопра					Бассейн Медведицы	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
F1	0,53	0,47	-0,5	0,43	0,33	0,23	0,3	0,35	0,37	0,33	0,26
F2	-0,61	-0,4	0,41	0,44	-0,4	0,39	0,44	0,49	0,47	-0,43	-0,32
F3	-0,59	0,51	0,56	0,48	0,44	0,28	0,28	0,45	0,43	-0,45	-0,38
F4	-0,42	-0,34	-0,26	-0,29	0,34	-0,33	-0,3	-0,42	0,31	-0,3	-0,28
F5	0,67	0,49	0,39	0,28	0,34	0,18	0,25	0,26	0,24	0,4	0,44
F6	-0,56	-0,32	0,34	0,31	0,31	0,45	0,35	0,34	0,46	-0,42	-0,39
F7	-0,61	-0,42	0,39	-0,36	0,25	0,37	0,35	0,34	0,46	-0,45	-0,29
F8	0,4	0,32	0,30	0,35	0,28	-0,39	0,3	0,31	0,3	0,36	0,3
F9	0,25	0,22	-0,36	-0,43	-0,25	-0,3	-0,34	0,37	0,34	0,3	0,28
F10	0,55	0,39	0,4	0,36	0,31	0,23	0,26	0,26	0,29	0,36	0,24
F11	0,46	0,25	0,3	0,3	0,18	-0,39	-0,26	-0,27	0,25	0,34	0,2
F12	0,54	0,36	0,38	0,35	0,23	0,23	0,18	0,26	0,28	0,36	0,24
F13	-0,65	-0,47	-0,45	-0,48	0,32	0,47	0,39	0,39	-0,5	-0,6	-0,5
F14	0,18	0,35	0,36	0,38	0,35	0,34	0,44	0,44	-0,4	-0,27	-0,24
F15	0,27	-0,33	-0,39	-0,42	0,35	0,36	0,43	0,41	0,39	0,39	0,41
F16	0,47	-0,43	-0,42	0,38	0,29	0,25	0,21	-0,42	-0,4	0,31	0,24
F17	0,45	0,45	0,54	0,54	0,43	0,5	0,57	0,47	0,54	0,48	0,38

Глубина промерзания (группа 4) значима лишь для верховий Дона (посты 1, 2, 3) и бассейна Медведицы (10, 11). При этом наиболее существенные связи отмечаются не для максимальных значений глубины промерзания, а для осредненных за декаду, как правило, незадолго до начала половодья и в начале его развития.

Во время таяния снежного покрова (группа 6) наибольшую значимость практически для всех водосборов играет продолжительность периода (посты 1, 2, 10, 11) и трендовый коэффициент температуры (3, 4, 6). Для среднего и нижнего течения р. Хопер значимую роль оказывают суммы отрицательных температур периода в силу высокой залесенности водосбора. Аналогичные результаты получены и для группы 7.

В период от перехода температуры через 0 °С до момента схода снежного покрова (группа 8) наиболее значимы средний снегозапас (посты 1, 3, 8–11), диапазон температур (посты 2, 4), среднее квадратическое отклонение температуры (10, 7), суммы отрицательных температур (6). Схожие результаты получены для групп 9–12, однако их значимость высока в силу разного по времени охвата периодов таяния и стекания вод.



**Рис. 4.** ФФС половодья на исследуемых водосборах. Группы факторов соответствуют табл. 1, номера постов см. на рис. 1

**Fig. 4.** FFF freshet in the studied catchments. The groups of factors correspond to Table 1, see the numbers of posts in Fig. 1

В группе 13 наибольшим весом характеризуются характеристики пассивного таяния (посты 1–4), характеристики активного таяния (посты 10–11) и общая скорость стаивания (5–9).

Среди групп 14–17 наиболее выделяются характеристики типа состояния почвы на конец августа и октября ( $R_{max} = -0,42 \dots -0,18$ ), максимальная и минимальная 10-дневная влажность почвы за период формирования условий половодья ( $R_{max} = 0,35-0,54$  и  $0,08-0,57$  соответственно), а также их типы ( $-0,53 \dots -0,11$  и  $-0,17 \dots -0,47$  соответственно).

### Обсуждение результатов

Максимальный запас воды в снеге, традиционно рассматриваемый как ведущий фактор формирования стока половодья, утратил свою главенствующую роль в построении прогнозных методик. Для анализируемых гидрологических постов коэффициенты корреляции снегозапаса и слоя весеннего стока составили от  $-0,19$  до  $0,46$ . Согласно проведенным расчетам, ни для одного из 11 постов в уравнения с наиболее высокими коэффициентами множественной регрессии не вошли параметры, характеризующие максимальные или характерные снегозапасы (F1). Это чисто

статистический результат, бесспорно при построении прогнозных уравнений, в основе которых лежит метод водного баланса, этот показатель следует учитывать. На первом месте в статистически формируемых уравнениях множественной регрессии для водосборов Дона стоят либо характеристики глубины промерзания (F5), либо зимних морозов (F3). В замыкающих створах р. Дон – х. Беляевский (пост 4) и р. Хопер – х. Барминский (пост 9) и для водосборов (10, 11) на р. Медведице первый предиктор – характеристика скорости таяния (F13). В альтернативных уравнениях с чуть более низкими коэффициентами на первое место могут выходить суммы осадков с 1 ноября до конца зимы (F2) (см. табл. 2, табл. 3).

Полученный результат созвучен с тезисами, приведенными в [12, 14]. В них анализируется динамика поверхностного склонового стока и показано его заметное уменьшение в степных и лесостепных районах Русской равнины, в том числе в бассейне Дона, к которому принадлежат анализируемые в наших расчетах водосборы. В качестве приходной составляющей сейчас целесообразно рассматривать осадки холодного периода, выпадающие при различных температурах, но и они не всегда в достаточной степени могут определить формирование весеннего слоя стока. Тем не менее при составлении прогнозных зависимостей, безусловно, необходимо тем или иным образом учитывать приходную часть уравнения водного баланса для слоя стока половодья. Полученные чисто статистически уравнения множественной регрессии, имеющие наиболее высокие коэффициенты корреляции (табл. 3), показывают, что приходные компоненты в первых трех ФФС либо отсутствуют, либо могут быть представлены самыми различными параметрами. В большинстве случаев значимость приходных компонент ниже или сопоставима с иными параметрами – сроками установления снежного покрова и суммами отрицательных температур воздуха.

В то же время влажность почвы (F14 – F17), ранее считавшаяся незначимой для формирования половодья в бассейнах степных и лесостепных рек [4], на трех из четырех донских водосборах за исключением самого верхнего (г. Задонск – №1) входит в тройку ФФС, образующих наиболее тесные связи, а на Хопре и Медведице она значима для всех водосборов. Однозначного доминирующего сезона для определения влажности почвы нет – ранее считалось, что определяющим является предзимнее увлажнение почвы [4]. В бассейне Медведицы наиболее значима влажность почвы в октябре – ноябре (предзимний период), в бассейне Дона – в предзимний и предвесенний (февраль – март) периоды, а в бассейне Хопра можно рассматривать любые характеристики влажности почвы, включая ее экстремальные величины. Это созвучно с результатами, полученными в работах [12, 14]. В том числе, изменения влажности почвы и глубины промерзания носят весьма существенный характер в последние 40 лет [15–17].

**Таблица 3.** Примеры полученных статистическим образом зависимостей для стока половодья бассейнов № 1–11 (согласно табл.1), множественный коэффициент корреляции MR и среднеквадратическая ошибка уравнения RMSE  
**Table 3.** Examples of statistically obtained dependencies for the flood runoff of basins No. 1-11 (according to Table. 1), multiple correlation coefficient MR and the RMSE

№	MR	RMSE	ФФС 1	ФФС 2	ФФС 3
1	0.82	11.1	fr_depth max	melt_time %	TPsum 01.11-SP
2	0.78	13	fr_depth 21-31.03	21-28.02 swvl_type	TPsum 01.11-SP
3	0.76	11	SnowTP	21-31.03 swvl	fr_depth 21-31.03
4	0.77	9.4	melt_passive trend_coef	31.10 swvl_type	swvl_lin 10d_before_sd_end
5	0.71	24.2	subzero_temp_mean	TPsum 01.11-SP	21-31.07 swvl
6	0.76	14.4	min 10rollmean swvl	frozen_temp TO-S0	frozen_temp Smax-T0
7	0.74	19.1	min_10rollmean swvl	melt_time	frozen_temp sp-10d
8	0.82	11.6	swvl_lin 10d_after_sd_end	31.10 swvl	melt_speed active
9	0.81	8.1	melt_speed	TPsum 10.02-SP10	swvl 10d_before_sd_start
10	0.76	11.9	melt_trend_coef	fr_depth_max	31.10 swvl_type
11	0.73	14.1	melt_trend_coef	swvl 10d_before_sd_start	fr_depth 21-31.01

Примечание к табл. 3. **F2:** *TPsum 01.11-SP* (сумма осадков с 01 ноября по конец зимы) и *TPsum 10.02-SP10* (сумма осадков с 10 февраля по конец зимы + 10 дней). **F3:** *SnowTP* (сумма твердых осадков) и *subzero\_temp\_mean* (средняя отрицательная температура). **F5:** *fr\_depth\_max* (максимальная глубина промерзания почвы), *fr\_depth 21-31.03* (средняя глубина промерзания почвы за последнюю декаду марта), *fr\_depth 21-31.01* (средняя глубина промерзания почвы за последнюю декаду января). **F7:** *frozen\_temp Smax-T0* (сумма отрицательных температур периода). **F8:** *frozen\_temp T0-S0* (сумма отрицательных температур периода). **F11:** *frozen\_temp sp-10d* (сумма отрицательных температур периода). **F13:** *melt\_passive trend\_coef* (трендовый коэффициент пассивного стаивания), *melt\_speed* (скорость стаивания в мм/день), *melt\_trend\_coef* (трендовый коэффициент стаивания), *melt\_time %* (время стаивания в процентах от количества дней со снежным покровом), *melt\_time* (время стаивания), *melt\_speed active* (скорость активного стаивания в мм/день). **F14:** *21-31.07 swvl* (влажность почвы последней декады июля). **F15:** *31.10 swvl\_type* (тип влажности почвы на 31.10), *31.10 swvl* (влажность почвы на 31.10), *swvl 10d\_before\_sd\_start* (влажность почвы за 10 дней перед установлением снежного покрова). **F16:** *swvl\_lin 10d\_after\_sd\_end* (линейная влажность почвы за 10 дней после схода снежного покрова), *21-28.02 swvl\_type* (влажность почвы последней декады февраля), *21-31.03 swvl* (влажность почвы последней декады марта), *swvl\_lin 10d\_before\_sd\_end* (линейная влажность почвы за 10 дней до схода снежного покрова). **F17:** *min\_10rollmean swvl* (минимальная 10 дневная влажность почвы).

Глубину промерзания почвы в России сейчас, как и ранее, определяют по данным вытяжных термометров, установленных на разную глубину (20–320 см) на сети метеорологических станций, а вот контактные измерения влажности почвы проводятся крайне редко [3, 4, 28]. Причиной тому до сих пор является низкая плотность агрометеорологической сети, ограничения по синоптическим условиям и высокая трудоемкость измерений. Поэтому увлажненность водосборов, т. е. способность впитывать дополнительную влагу, оценивается в основном косвенно по температуре и осадкам, измеряемым на метеостанциях. В зарубежной практике чаще используют данные дистанционного зондирования земли, в том числе данные эксперимента GRACE [9, 55, 57], но пока в прогнозировании весеннего стока рек Русской равнины эта информация практически не применяется. Между тем изменения глубины промерзания и ее влияние на формирование слоя стока половодья – значительны. Так, например, считающаяся исключительно значимой для Хопра [4] глубина промерзания почвы сейчас не оказывает существенное влияние на половодье в этом регионе. Она попадает в тройку значимых ФФС в бассейне Верхнего Дона (посты 1, 2), а также в бассейне Медведицы (посты 10, 11) с коэффициентами корреляции до 0,57.

Одновременно с этим крайне важную роль в последние три десятилетия стали играть параметры группы скорости таяния снежного покрова (F13) с коэффициентом корреляции от –0,65 до 0,55, входящие в первые три ФФС для 7 из 11 водосборов.

Основные причины роста потерь стока в весенний период авторы видят как в климатических изменениях характеристик зимнего периода, так и в трансформации ландшафта, а именно в изменениях методов культивации полей. В частности, в различных работах подчеркивается увеличение распашки полей осенью с 25 до 50 % от 1950-х до 1960–1970 гг. [12, 14]. Позднее, в 1978–2013 гг., осенью распахивалось в среднем 36,5 %, а после 2013 г. – 25–28 % пахотных земель.

Примечательно, что сформированный в 1950–1960-х гг. вид зависимости стока половодья от суммы максимального снегозапаса с осадками в период половодья, влажности почвы и глубины ее промерзания продолжает рассматриваться как основной и в современной практике. Согласно полученным нами расчетам по частным водосборам вид этой зависимости существенно трансформировался, как с точки зрения корреляционных связей, так и с точки зрения перечня параметров и периодов их определения. Так, например, для водосборов р. Хопер выше Балашова и Поворино влажность почвы характеризуется вдвое большим коэффициентом корреляции со стоком половодья, чем снежный покров. Коллективом авторов была предпринята попытка точного воспроизводства методики прогноза половодья 1972 г. [4]. Результаты показали, что вид прогнозной зависимости для замыкающего створа крупной реки (р. Дон – х. Беляевский,  $F=204\ 000\ \text{км}^2$ ), протекающей по югу Русской равнины в зоне недостаточного увлажнения, существенно изменился [2]. На первый план вышли факторы, определяющие потери и перераспределение стока. Хотя и отказываться от приходных составляющих в уравнении в любом случае не следует, но обязательным является переоценка их значимости и индивидуальный подбор наиболее адекватных предикторов.

### Выводы

К настоящему моменту представления о главенствующей роли приходных составляющих в формировании слоя стока весеннего половодья частично утратили свою актуальность. В результате климатических изменений и антропогенного влияния на процессы формирования талого стока определяющими стали не приходные, а расходные факторы, обуславливающие его потери. В этих условиях бесспорно учет приходных составляющих должен также использоваться в составлении прогнозных зависимостей, но именно степень его влияния должна быть переоценена. На современном этапе при построении прогнозных уравнений необходимо максимально расширить перечень анализируемых показателей. Частные случаи прогнозов требуют тщательного и индивидуального подбора предикторов прогнозных уравнений, групповой анализ ограниченного перечня характеристик снижает качество зависимостей. Следует так же рассматривать различные временные отрезки для их расчета.

По результатам статистического регрессионного анализа формирования весеннего стока на частных водосборах в зоне недостаточного

увлажнения юга ЕТР определены три наиболее значимые ФФС. Установлено отсутствие значимой связи стока половодья с запасом воды в снеге (коэффициенты корреляции от  $-0,19$  до  $0,46$ ) и увеличение роли влажности почвы и глубины ее промерзания (коэффициенты корреляции выросли соответственно до  $0,4-0,57$  и локально до  $0,67$ ). В то же время выявлена большая роль скорости таяния снежного покрова в период непосредственно перед началом весеннего половодья. Это не значит отказ от учета приходной составляющей при составлении уравнений, но доказывает необходимость ее переоценки.

Установлено, что главенствующие группы ФФС претерпевают изменения с увеличением площади водосбора. На небольших водосборах в бассейне Дона (посты 1–4) и Хопра (посты 5–9) основную роль играют глубины промерзания и зимние морозы, в нижнем течении на первый план выходят влажность почвы и скорость стаивания снежного покрова. В бассейне Медведицы с ростом площади водосбора группы факторов остаются прежними, однако значимость параметров внутри групп меняется. Это важный результат, поскольку масштабные эффекты ФФС в принципе не рассматривались ранее в работах гидрологов XX века.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 19-77-10032 в части методов и подходов и № 21-47-00008 (корреляционный анализ).

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 19-77-10032.

### Список литературы

1. Варенцова Н.А., Гречушников М.Г., Повалишников Е.С., Киреева М.Б., Харламов М.А., Фролова Н.Л. Влияние климатических и антропогенных факторов на весенний сток в бассейне Дона // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр.* 2021. № 5. С. 91-100.
2. Варенцова Н.А., Киреева М.Б., Фролова Н.Л., Харламов М.А., Илич В.П., Сазонов А.А. Прогноз притока воды к Цимлянскому водохранилищу в период половодья в современных климатических условиях: проблемы и воспроизводимость // *Водные ресурсы*. 2020. Т. 47. № 6. С. 694-709. DOI: 10.31857/S0321059620060152
3. Вершинина Л.К. Методика расчета и прогноза объема стока весеннего половодья в бассейне р. Дона // *Труды ГГИ*. 1977. Вып. 223. С. 52-65.
4. Вершинина Л.К., Крестовский О.И. Учет водопоглотительной способности водосборов при прогнозах стока весеннего половодья // *Труды ГГИ*. 1980. Вып. 265. С. 3-30.
5. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Основной том. М.: Изд-во ААНИИ, 2014. 1018 с.
6. Гельфан А.Н., Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Мотовилов Ю.Г., Гусев Е.М. Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2021. Т. 7. № 1. С. 36-79. DOI: 10.21513/2410-8758-2021-1-36-79
7. Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милюкова И.П., Барабанова Е.А., Капшутина Е.А. Современные и сценарные изменения стока Волги и Дона // *Водное хозяйство России*. 2017. № 3. С. 6-23. DOI: 10.35567/1999-4508-2017-3-1
8. Горбаренко А.В., Варенцова Н.А., Киреева М.Б. Трансформация стока весеннего половодья и паводков в бассейне верхней Волги под влиянием климатических изменений // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2021. № 4. С. 6-8.

9. Григорьев В.Ю., Фролова Н.Л., Джамалов Р.Г. Изменение водного баланса крупных речных бассейнов европейской части России // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2018. № 4. С. 36-47.

10. Джамалов Р.Г., Киреева М.Б., Косолапов А.Е., Фролова Н.Л. Водные ресурсы бассейна Дона и их экологическое состояние. М.: ГЕОС, 2017. 204 с.

11. Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Рец Е.П., Бугров А.А. Особенности формирования современных ресурсов подземных вод европейской части России // Водные ресурсы. 2015. Т. 42. № 5. С. 457-466. DOI: 10.7868/S0321059615050065

12. Долгов С.В., Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А. Ландшафтно-гидрологические изменения в бассейне Дона // Водные ресурсы. 2020. Т. 47, № 6. С. 674-685. DOI: 10.31857/S032105962006005X

13. Калюжный И.Л., Лавров С.А. Влияние климатических изменений на глубину промерзания почв в бассейне р. Волга // Лёд и снег. 2016. Т. 56, № 2. С. 207-220. DOI: 10.15356/2076-6734-2016-2-207-220

14. Кацутина Е.А., Ясинский С.В., Коронкевич Н.И. Весенний поверхностный склоновый сток на Русской равнине в годы различной водности // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2020. № 1. С. 37-46. DOI: 10.31857/S2587556620010100

15. Киреева М.Б., Фролова Н.Л. Современные особенности весеннего половодья рек бассейна Дона // Водное хозяйство России. 2013. № 1. С. 60-76.

16. Киреева М.Б., Фролова Н.Л., Рец Е.П., Самсонов Т.Е. Водный режим рек европейской территории России и его трансформация в XXI веке под влиянием меняющегося климата // Водные ресурсы России: современное состояние и управление: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. Т. 1. Новочеркасск: ЛИК, 2018б. С. 49-55.

17. Киреева М.Б., Фролова Н.Л., Рец Е.П., Самсонов Т.Е., Телегина Е.А., Харламов М.А., Езерова Н.Н., Пахомова О.М. Паводочный сток на реках европейской территории России и его роль в формировании современного водного режима // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2018. № 4. С. 48-68.

18. Комаров В.Д. Весенний сток равнинных рек европейской части СССР, условия его формирования и методы прогнозов. М.: Гидрометеиздат, 1959. 259 с.

19. Лавров С.А., Калюжный И.Л. Влияние климатических изменений на сток весеннего половодья и факторы его формирования в бассейне Волги // Водное хозяйство России. № 6. 2016. С. 42-60.

20. Михайлова Н.В., Юровский А.В. Восточноатлантическое колебание: механизм и влияние на климат Европы в зимний период // Морской гидрофизический журнал. 2016. № 4. С. 27-37.

21. Мишон В.М., Болгов М.В., Сенцова Н.И. Гидрологическое обоснование водохозяйственных мероприятий в бассейне Верхнего Дона // Экология бассейна Дона. Воронеж, 2005. С. 74-75.

22. Многолетние изменения элементов водного баланса на воднобалансовых и болотных станциях: научно-прикладной справочник / под ред. М.Л. Маркова. СПб.: РИАН, 2021. 202 с.

23. Многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек Российской Федерации: научно-прикладной справочник / под ред. В.Ю. Георгиевского. СПб.: РИАН, 2021. 190 с.

24. Мониторинг общей циркуляции атмосферы. Северное полушарие: справочная монография / под ред. Р.М. Вильфанда, А.И. Неушкина. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. 123 с.

25. Нестеров Е.С. Особенности состояния океана и атмосферы в разных фазах северо-атлантического колебания // Метеорология и гидрология. 1998. № 8. С. 74-82.

26. Осипова Н.В., Болгов М.В. Оценка характеристик максимального стока весеннего половодья в бассейне р. Дон в нестационарных условиях // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 6. С. 686-693. DOI: 10.31857/S0321059620060103

27. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том II. Последствия изменений климата. М.: Росгидромет, 2008. 289 с.
28. РД 52.33.217-99. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 11. Агрометеорологические наблюдения на станциях и постах. Часть I. Основные агрометеорологические наблюдения. Книга 1. М.: Росгидромет, 2000. 87 с.
29. Сафина Г.Р., Голосов В.Н. Влияние изменений климата на внутригодичное распределение стока малых рек южной половины Европейской территории России // Ученые записки Казанского ун-та. Серия Естественные науки. 2018. № 1. С. 111-125.
30. Теория общей циркуляции атмосферы: учебное пособие / Переведенцев Ю.П., Мохов И.И., Елисеев А.В. и др.; науч. ред. Э.П. Наумов. Казань: Казанский ун-т, 2013. 224 с.
31. Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Харламов М.А., Самсонов Т.Е., Энтин А.Л., Лурье И.К. Картографирование современного состояния и трансформации водного режима рек Европейской территории России // Геодезия и картография. 2020. № 7. С. 14-26. DOI: 10.22389/0016-7126-2020-961-7-14-26
32. Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Гельфан А.Н., Сазонов А.А., Шевченко А.И. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. 1. Оценка изменений водного режима рек России по данным наблюдений // Водные ресурсы. 2022. Том 49, № 3. С. 251-269. DOI: 10.31857/S032105962203004X
33. Шихов А.Н., Абдуллин Р.К. Мониторинг формирования и прохождения весеннего половодья на реках водосбора Воткинского водохранилища в 2014 г. // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 4. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=13834> (дата обращения 12.03.2022).
34. Ahmed R., Prowse T., Dibike Y., Bonsal B. Effects of climatic drivers and teleconnections on late 20th century trends in spring freshet of four major arctic-draining rivers // Water. 2021. Vol. 13. P. 179. DOI: 10.3390/w13020179
35. Assani A.A. Analysis of the Influence of the 2007–2008 La Niña Events, Land Use, and Dam Management Modes on the 2008 Spring Freshet Characteristics in Quebec, Canada // Flood Risk Management. 2017. DOI: 10.5772/intechopen.68646
36. Blöschl G., Hall J., Viglione A. et al. Changing climate both increases and decreases European river floods // Nature. 2019. Vol. 573. P. 108-111. DOI: 10.1038/s41586-019-1495-6
37. Blöschl G., Hall J., Parajka J. et al. Changing climate shifts timing of European floods // Science. 2017. Vol. 357. P. 588-590. DOI: 10.1126/science.aan2506
38. Burn D.H., Cunderlik J.M., Pietroniro A. Hydrological trends and variability in the Liard River basin. Tendances hydrologiques et variabilité dans le bassin de la rivière Liard // Hydrological Sciences Journal. 2004. Vol. 49:1. P. 53-67. DOI: 10.1623/hysj.49.1.53.53994
39. Burn D.H., Whitfield P.H. Changes in flood events inferred from centennial length streamflow data records // Advances in Water Resources. 2018. Vol. 121. P. 333–349. DOI: 10.1016/j.advwatres.2018.08.017
40. Curran J.H., Biles F.E. Identification of seasonal streamflow regimes and streamflow drivers for daily and peak flows in Alaska // Water Resources Research. 2021. Vol. 57. E2020WR028425. DOI: 10.1029/2020WR028425
41. Davie T. Fundamentals of hydrology. Second edition. Taylor & Francis. London; New York, 2008. 221 pp.
42. Dery S.J., Stahl K., Moore R.D., Whitfield P.H., Menounos B., Burford J.E. Detection of runoff timing changes in pluvial, nival, and glacial rivers of western Canada // Water Resources Research. 2009. Vol. 45. W04426. DOI: 10.1029/2008WR006975
43. ERA5. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5> (дата обращения 15.05.2020).
44. Flow Forecasting for the Lower Fraser River (from Hope to the Ocean, River Forecast Centre B.C. Ministry of Forests, Lands and Natural Resource Operations Water Management

Branch. 2012. 5 p. URL: [https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/research-monitoring-and-reporting/monitoring/river-forecast-centre/flow\\_forecasting\\_lower\\_fraser.pdf](https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/research-monitoring-and-reporting/monitoring/river-forecast-centre/flow_forecasting_lower_fraser.pdf) (дата обращения 12.03.2022).

45. Frolova N.L., Kireeva M.B., Magrickiy D.V. et al. Hydrological hazards in Russia: origin, classification, changes and risk assessment // *Natural Hazards*. 2017. Vol. 88. P. 103-131. DOI: 10.1007/s11069-016-2632-2

46. Guide to Hydrological Practices, Volume I: Hydrology – From Measurement to Hydrological Information. WMO-No.168. Sixth Edition. 2008. URL: [https://hydrology.nl/images/docs/hwrp/WMO\\_Guide\\_168\\_Vol\\_I\\_en.pdf](https://hydrology.nl/images/docs/hwrp/WMO_Guide_168_Vol_I_en.pdf) (дата обращения 22.03.2022).

47. Guide to Hydrological Practices: Data Acquisition and Processing, Analysis, Forecasting and other Applications WMO-No.168. Fifth Edition. 1994. URL: <https://www.slideshare.net/indiawrm/guide-to-hydrological-practices-data-acquisition-and-processing-analysis-forecasting-and-other-applications-wmono168-fifth-edition-1994> (дата обращения 22.03.2022).

48. Jones N.E., Petreman I.C., Schmidt B.J. High flows and freshet timing in Canada: observed trends. 42 climate change research report (CCRR-42). Ministry of Natural resources and forestry. Ontario, 2015. 24 p.

49. Kharlamov M., Kireeva M., Varentsova N. Spring freshet on East European plain: changes in drivers and conditions during last three decades. EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021. 2021. EGU21-13477. DOI: 10.5194/egusphere-egu21-13477

50. Kireeva M.B., Ilich V.P., Frolova N.L., Kharlamov M.A., Sazonov A.A., Mikhaylyukova P.G. Estimation of the impact of climatic and anthropogenic factors on the formation of the extreme low-flow period in the Don River basin during 2007–2016 // *Geography, Environment, Sustainability*. 2019. Vol. 12(2). P. 62-77. DOI: 10.24057/2071-9388-2017-28.

51. Magritsky D.V., Frolova N.L., Evstigneev V.M., Povalishnikova E.S., Kireeva M.B., Pakhomova O.M. Long-term Changes of River Water Inflow into the Seas of the Russian Arctic Sector // *Polarforschung*. 2018. Vol. 87(2). P. 177–194. DOI: 10.2312/polarforschung.87.2.177

52. Matti B., Dahlke H.E., Dieppois B., Lawler D.M., Lyon S.W. Flood seasonality across Scandinavia – Evidence of a shifting hydrograph? // *Hydrological Processes*. 2017. Vol. 31. P. 4354-4370. DOI: 10.1002/hyp.11365

53. Naikn P.K., Jay D.A. Distinguishing human and climate influences on the Columbia River: changes in the disturbance processes. Cold Region Hydrology in a Changing Climate, Proceedings of symposium H02 held during IUGG2011 in Melbourne, Australia, July 2011. IAHS Publ. 346. 2011. P. 21-26.

54. Partasenok I.S., Groisman P.Y., Chekan G.S., Melnik V.I. Winter cyclone frequency and following freshet streamflow formation on the rivers in Belarus // *Environmental Research Letters*. 2014. Vol. 9(9). 095005. DOI: 10.1088/1748-9326/9/9/095005

55. Prowse T.D., Wrona F.J., Reist J.D., Gibson J.J., Hobbie J.E., Le'vesque L.M.J., Warwick F.V. Climate change effects on hydroecology of arctic freshwater ecosystems // *Royal Swedish Academy of Sciences*. 2006. Vol. 35, No. 7. P. 347-358.

56. Rood S.B., Foster S.G., Hillman E.J., Luek A., Zanewich K.P. Flood moderation: Declining peak flows along some Rocky Mountain rivers and the underlying mechanism // *Journal of Hydrology*. 2016. Vol. 536. P. 174-182. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.02.043

57. Walker B.J., Marsh P.Dr. High resolution spatial variability in spring snowmelt for an Arctic shrub-tundra watershed 2019. Theses and Dissertations (Comprehensive). 2116. <https://scholars.wlu.ca/etd/2116>

## References

1. Varentsova N.A., Grechushnikova M.G., Povalishnikova E.S., Kireeva M.B., Kharlamov M.A., Frolova N.L. Vliyaniye klimaticheskikh i antropogennykh faktorov na vesenniy stok v basseine Dona [Climatic and anthropogenic impacts on spring runoff in the Don River basin]. *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geogr.* [Bulletin of Moscow University. Ser. 5. Geography], 2021, no. 5, pp. 91-100. [in Russ.].

2. Varentsova N.A., Kireeva M.B., Frolova N.L., Kharlamov M.A., Ilich V.P., Sazonov A.A. Prognoz pritoka vody k Tsimlyanskomu vodokhranilishchu v period polovod'ya v sovremennykh

kli-maticheskikh usloviyakh: problemy i vosproizvodimost' [Forecasting water inflow into the Tsimlyansk reservoir during spring flood under current climate conditions: problems and reproducibility]. *Water resources*. 2020, vol. 47, no. 6, pp. 953-967. DOI: 10.1134/S0097807820060159

3. *Vershinina L.K.* Metodika rascheta i prognoza ob"ema stoka vesennego polovod'ya v basseine r. Dona [Methodology for calculating and forecasting the volume of spring flood runoff in the basin of the Don river]. *Trudy GGI* [Proceedings of the GGI]. 1977, is. 223, pp. 52-65. [in Russ.].

4. *Vershinina L.K., Krestovskii O.I.* Uchet vodopoglotitel'noi sposobnosti vodosborov pri prognozakh stoka vesennego polovod'ya [Accounting for the water absorption capacity of watersheds in forecasting spring flood runoff]. *Trudy GGI* [Proceedings of the GGI], 1980, is. 265, pp. 3-30. [in Russ.].

5. *Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii. Osnovnoi tom* [The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. Main volume]. Moscow: AANII Publ., 2014, 1018 p. [in Russ.].

6. *Gel'fan A.N., Frolova N.L., Magritskii D.V., Kireeva M.B., Grigor'ev V.Yu., Motovilov Yu.G., Gusev E.M.* Vliyaniye izmeneniya klimata na godovoi i maksimal'nyi stok rek Rossii: otsenka i prognoz [The impact of climate change on the annual and maximum runoff of Russian rivers: assessment and forecast]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya* [Fundamental and Applied Climatology], 2021, vol. 7, no. 1, pp. 36-79. DOI: 10.21513/2410-8758-2021-1-36-79 [in Russ.].

7. *Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Milyukova I.P., Barabanova E.A., Kashutina E.A.* Sovremennye i stsenarnye izmeneniya stoka Volgi i Dona [Modern and scenario changes in the flow of the Volga and Don]. *Vodnoe khozyaistvo Rossii* [Water industry in Russia]. 2017, no. 3, pp. 6-23. DOI: 10.35567/1999-4508-2017-3-1 [in Russ.].

8. *Gorbarenko A.V., Varentsova N.A., Kireeva M.B.* Transformatsiya stoka vesennego polovod'ya i pavodkov v basseine verkhnei Volgi pod vliyaniem klimaticheskikh izmenenii [Transformation of Spring Flood Runoff and Floods in the Upper Volga Basin Under the Influence of Climate Change]. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie* [Water management in Russia: problems, technologies, management]. 2021, no. 4, pp. 6-8. [in Russ.].

9. *Grigor'ev V.Yu., Frolova N.L., Dzhamalov R.G.* Izmenenie vodnogo balansa krupnykh rechnykh basseinov evropeiskoi chasti Rossii [Changes in the water balance of large river basins in the European part of Russia]. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie* [Water management in Russia: problems, technologies, management]. 2018, no. 4, pp. 36-47. [in Russ.].

10. *Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Rets E.P., Bugrov A.A.* Osobennosti formirovaniya sovremennykh resursov podzemnykh vod evropeiskoi chasti Rossii [Formation of current groundwater resources in European Russia]. *Water Resources*, 2015, vol. 42, no. 5, pp. 563-571. DOI: 10.1134/S009780781505005X

11. *Dzhamalov R.G., Kireeva M.B., Kosolapov A.E., Frolova N.L.* Vodnye resursy basseina Dona i ikh ekologicheskoe sostoyaniye [Water resources of the Don basin and their ecological state]. Moscow: GEOS Publ., 2017, 204 p. [in Russ.].

12. *Dolgov S.V., Koronkevich N.I., Barabanova E.A.* Landscape-hydrological changes in the Don basin. *Water Resources*. 2020, vol. 47, no. 6, pp. 934-944. DOI: 10.1134/S0097807820060056

13. *Kalyuzhnyi I.L., Lavrov S.A.* Vliyaniye klimaticheskikh izmenenii na glubinu promerzaniya pochv v basseine r. Volga [Influence of climatic changes on the depth of soil freezing in the basin of the river. Volga]. *Led i sneg* [Ice and snow]. 2016, vol. 56, no. 2, pp. 207-220. DOI: 10.15356/2076-6734-2016-2-207-220. [in Russ.].

14. *Kashutina E.A., Yasinskii S.V., Koronkevich N.I.* Vesennii poverkhnostnyi sklonovyi stok na Russkoi ravnine v gody razlichnoi vodnosti [Spring slope runoff on the Russian plain in years of different water content]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya* [News of the Russian Academy of Sciences. Geographic series]. 2020, no. 1, pp. 37-46. DOI: 10.31857/S2587556620010100. [in Russ.].

15. Kireeva M.B., Frolova N.L. Sovremennye osobennosti vesennego polovod'ya rek basseina Dona [Modern Features of the Spring Flood in the Rivers of the Don Basin]. *Vodnoe khozyaistvo Rossii* [Water industry in Russia]. 2013, no. 1, pp. 60-76. [in Russ.].

16. Kireeva M.B., Frolova N.L., Rets E.P., Samsonov T.E. Vodnyi rezhim rek evropeiskoi territorii Rossii i ego transformatsiya v XXI veke pod vliyaniem menyayushchegosya klimata [The water regime of the rivers of the European territory of Russia and its transformation in the 21st century under the influence of a changing climate]. *Vodnye resursy Rossii: sovremennoe sostoyanie i upravlenie: sbornik materialov Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. [Water resources of Russia: current state and management: collection of materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference]. Vol. 1. Novocherkassk, LIK, 2018, pp. 49-55 [in Russ.].

17. Kireeva M.B., Frolova N.L., Rets E.P., Samsonov T.E., Telegina E.A., Kharlamov M.A., Ezerova N.N., Pakhomova O.M. Pavodochnyi stok na rekakh evropeiskoi territorii Rossii i ego rol' v formirovaniy sovremennogo vodnogo rezhima [Flood runoff on the rivers of the European territory of Russia and its role in the formation of the modern water regime]. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie* [Water management in Russia: problems, technologies, management]. 2018, no. 4, pp. 48-68. [in Russ.].

18. Komarov V.D. Vesennii stok ravninnykh rek evropeiskoi chasti SSSR, usloviya ego formirovaniya i metody prognozov [Spring Runoff of Plain Rivers in the European Part of the USSR, Conditions for Its Formation and Methods of Forecasting], Moscow: Gidrometeoizdat Publ., 1959, 259 p. [in Russ.].

19. Lavrov S.A., Kalyuzhnyi I.L. Vliyanie klimaticheskikh izmenenii na stok vesennego polovod'ya i faktory ego formirovaniya v basseine Volgi [Influence of climate change on spring flood runoff and factors of its formation in the Volga basin]. *Vodnoe khozyaistvo Rossii* [Water industry in Russia], 2016, no. 6, pp. 42-60. [in Russ.].

20. Mikhailova N.V., Yurovskii A.V. Vostochnoatlanticheskoe kolebanie: mekhanizm i vliyaniya na klimat Evropy v zimnii period [East Atlantic Oscillation: mechanism and influence on the European climate in winter]. *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal* [Marine Hydrophysical Journal], 2016, no. 4, pp. 27-37 [in Russ.].

21. Mishon V.M., Bolgov M.V., Sentsova N.I. Gidrologicheskoe obosnovanie vodokhozyaistvennykh meropriyatii v basseine Verkhnego Dona [Hydrological substantiation of water management activities in the Upper Don basin]. *Ekologiya basseina Dona* [Ecology of the Don basin]. Voronezh, 2005, pp. 74-75. [in Russ.].

22. Mnogoletnie izmeneniya elementov vodnogo balansa na vodnobalansovykh i bolotnykh stantsiyakh: nauchno-prikladnoi spravochnik [Long-term changes in water balance elements at water balance and bog stations: scientific and applied reference book]. M.L. Markova (Ed.). Saint-Petersburg.: RIAL Publ., 2021, 202 p. [in Russ.].

23. Mnogoletnie kolebaniya i izmenchivost' vodnykh resursov i osnovnykh kharakteristik stoka rek Rossiiskoi Federatsii: nauchno-prikladnoi spravochnik [Long-term fluctuations and variability of water resources and the main characteristics of the flow of rivers in the Russian Federation: scientific and applied reference book]. V.Yu. Georgievskogo (Ed.), Saint-Petersburg: RIAL Publ., 2021, 190 p. [in Russ.].

24. Monitoring obshchei tsirkulyatsii atmosfery. Severnoe polusharie: spravochnaya monografiya, R.M. Vil'fanda, A.I. Neushkina (Ed.), Obninsk: VNIIGMI-MTsD Publ., 2012, 123 p. [in Russ.].

25. Nesterov E.S. Osobennosti sostoyaniya okeana i atmosfery v raznykh fazakh severoatlanticheskogo kolebaniya [Peculiarities of the State of the Ocean and the Atmosphere in Different Phases of the North Atlantic Oscillation]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology], 1998, no. 8, pp. 74-82. [in Russ.].

26. Osipova N.V., Bolgov M.V. Assessing the characteristics of the maximal spring flood runoff in the Don basin under nonstationary conditions. *Water Resources*, 2020, vol. 47, no. 6, pp. 945-952. DOI: 10.1134/S009780782006010X

27. Otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii. Tom II. Posledstviya izmenenii klimata [Assessment report on climate

change and its consequences on the territory of the Russian Federation. Volume II. The consequences of climate change]. Moscow: Rosgidromet, 2008, 289 pp. [in Russ.].

28. RD 52.33.217-99. Nastavlenie gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam. Vypusk 11. Agrometeorologicheskie nablyudeniya na stantsiyakh i postakh. Chast' I. Osnovnye agrometeorologicheskie nablyudeniya. Kniga 1 [Instructions for hydrometeorological stations and posts. Issue 11. Agrometeorological observations at stations and posts. Part I. Basic agrometeorological observations]. Moscow: Rosgidromet, 2000, 87 p. [in Russ.].

29. Safina G.R., Golosov V.N. Vliyaniye izmenenii klimata na vnurigradovoye raspredeleniye stoka malyykh rek yuzhnoi poloviny Evropeiskoi territorii Rossii [The impact of climate change on the intra-annual distribution of runoff of small rivers in the southern half of the European territory of Russia]. *Uchenye zapiski Ka-zanskogo un-ta. Seriya Estestvennyye nauki* [Scientific notes of Kazan University. Series Natural Sciences]. 2018, no. 1, pp. 111-125. [in Russ.].

30. Teoriya obshchei tsirkulyatsii atmosfery: uchebnoye posobie [The Theory of General Circulation of the Atmosphere: A Study Guide]. E.P. Naumov (Ed.), Kazan': Kazanskii un-t Publ., 2013, 224 p.[in Russ.].

31. Frolova N.L., Kireeva M.B., Kharlamov M.A., Samsonov T.E., Entin A.L., Lur'e I.K. Kartografirovaniye sovremennogo sostoyaniya i transformatsii vodnogo rezhima rek Evropeiskoi territorii Rossii [Mapping the current state and transformation of the water regime of the rivers of the European territory of Russia]. *Geodeziya i kartografiya* [Geodesy and cartography], 2020, no. 7, pp. 14–26. DOI: 10.22389/0016-7126-2020-961-7-14-26 [in Russ.].

32. Frolova N.L., Magritskii D.V., Kireeva M.B., Grigor'ev V.Yu., Gel'fan A.N., Sazonov A.A., Shevchenko A.I. Stok rek Rossii pri proiskhodyashchikh i prognoziruemyykh izmeneniyakh klimata: obzor publikatsii. 1. Otsenka izmenenii vodnogo rezhima rek Rossii po dannym nablyudenii [Runoff of Russian rivers under ongoing and predicted climate changes: a review of publications. 1. Assessment of changes in the water regime of Russian rivers based on observational data]. *Water resources*, 2022, vol. 49, no. 3, pp. 251-269. DOI: 10.31857/S032105962203004X [in Russ.].

33. Shikhov A.N., Abdullin R.K. Monitoring formirovaniya i prokhozheniya vesennego polovod'ya na rekakh vodosbora Votkinskogo vodokhranilishcha v 2014 g [Monitoring of the formation and passage of the spring flood on the rivers of the watershed of the Votkinsk reservoir in 2014]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2014, no. 4, available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=13834>. [in Russ.].

34. Ahmed R., Prowse T., Dibike Y., Bonsal B. Effects of climatic drivers and teleconnections on late 20th century trends in spring freshet of four major arctic-draining rivers. *Water*, 2021, vol. 13, pp. 179. DOI: 10.3390/w13020179

35. Assani A.A. Analysis of the Influence of the 2007–2008 La Niña Events, Land Use, and Dam Management Modes on the 2008 Spring Freshet Characteristics in Quebec, Cana. *Flood Risk Management*, 2017. DOI: 10.5772/intechopen.68646

36. Blöschl G., Hall J., Viglione A. et al. Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*, 2019, vol. 573, pp. 108–111. DOI: 10.1038/s41586-019-1495-6

37. Blöschl G., Hall J., Parajka J. et al. Changing climate shifts timing of European floods. *Science*, 2017, vol. 357, pp. 588-590. DOI: 10.1126/science.aan2506

38. Burn D.H., Cunderlik J.M., Pietroniro A. Hydrological trends and variability in the Liard River basin. Tendances hydrologiques et variabilité dans le bassin de la rivière Liard. *Hydrological Sciences Journal*, 2004, vol. 49:1, pp. 53–67. DOI: 10.1623/hysj.49.1.53.53994

39. Burn D.H., Whitfield P.H. Changes in flood events inferred from centennial length streamflow data records. *Advances in Water Resources*, 2018, vol. 121, pp. 333-349. DOI: 10.1016/j.advwatres.2018.08.017

40. Curran J.H., Biles F.E. Identification of seasonal streamflow regimes and streamflow drivers for daily and peak flows in Alaska. *Water Resources Research*, 2021, vol. 57, E2020WR028425. DOI: 10.1029/2020WR028425

41. Davie T. Fundamentals of hydrology. Second edition. Taylor & Francis. London, New York, 2008. 221 p.

42. Dery S.J., Stahl K., Moore R.D., Whitfield P.H., Menounos B., Burford J.E. Detection of runoff timing changes in pluvial, nival, and glacial rivers of western Canada. *Water Resources Research*, 2009, vol. 45, W04426. DOI: 10.1029/2008WR006975
43. ERA5. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), available at: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>.
44. Flow Forecasting for the Lower Fraser River (from Hope to the Ocean, River Forecast Centre B.C. Ministry of Forests, Lands and Natural Resource Operations Water Management Branch. 2012, 5 p., available at: [https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/research-monitoring-and-reporting/monitoring/river-forecast-centre/flow\\_forecasting\\_lower\\_fraser.pdf](https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/research-monitoring-and-reporting/monitoring/river-forecast-centre/flow_forecasting_lower_fraser.pdf).
45. Frolova N.L., Kireeva M.B., Magrickiy D.V. et al. Hydrological hazards in Russia: origin, classification, changes and risk assessment. *Natural Hazards*, 2017, vol. 88, pp. 103-131. DOI: 10.1007/s11069-016-2632-2
46. Guide to Hydrological Practices, Volume I: Hydrology – From Measurement to Hydrological Information. WMO-No.168. Sixth Edition. 2008, available at: [https://hydrology.nl/images/docs/hwrp/WMO\\_Guide\\_168\\_Vol\\_I\\_en.pdf](https://hydrology.nl/images/docs/hwrp/WMO_Guide_168_Vol_I_en.pdf).
47. Guide to Hydrological Practices: Data Acquisition and Processing, Analysis, Forecasting and other Applications WMO-No.168. Fifth Edition. 1994. available at: <https://www.slideshare.net/indiawrm/guide-to-hydrological-practices-data-acquisition-and-processing-analysis-forecasting-and-other-applications-wmono168-fifth-edition-1994>.
48. Jones N.E., Petreman I.C., Schmidt B.J. High flows and freshet timing in Canada: observed trends. 42 climate change research report (CCRR-42). Ministry of Natural resources and forestry. Ontario, 2015, 24 p.
49. Kharlamov M., Kireeva M., Varentsova N. Spring freshet on East European plain: changes in drivers and conditions during last three decades. EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, 2021, EGU21-13477. DOI: 10.5194/egusphere-egu21-13477
50. Kireeva M.B., Ilich V.P., Frolova N.L., Kharlamov M.A., Sazonov A.A., Mikhaylyukova P.G. Estimation of the impact of climatic and anthropogenic factors on the formation of the extreme low-flow period in the Don River basin during 2007–2016. *Geography, Environment, Sustainability*, 2019, vol. 12(2), pp. 62-77. DOI: 10.24057/2071-9388-2017-28.
51. Magritsky D.V., Frolova N.L., Evstigneev V.M., Povalishnikova E.S., Kireeva M.B., Pakhomova O.M. Long-term Changes of River Water Inflow into the Seas of the Russian Arctic Sector. *Polarforschung*, 2018, vol. 87(2), pp. 177-194. DOI: 10.2312/polarforschung.87.2.177
52. Matti B., Dahlke H.E., Dieppois B., Lawler D.M., Lyon S.W. Flood seasonality across Scandinavia – Evidence of a shifting hydrograph? *Hydrological Processes*, 2017, vol. 31, pp. 4354-4370. DOI: 10.1002/hyp.11365
53. Naikm P.K., Jay D.A. Distinguishing human and climate influences on the Columbia River: changes in the disturbance processes. Cold Region Hydrology in a Changing Climate, Proceedings of symposium H02 held during IUGG2011 in Melbourne, Australia, July 2011, IAHS Publ., 346. 2011, pp. 21–26.
54. Partasenok I.S., Groisman P.Y., Chekan G.S., Melnik V.I. Winter cyclone frequency and following freshet streamflow formation on the rivers in Belarus. *Environmental Research Letters*, 2014, vol. 9(9), 095005. DOI: 10.1088/1748-9326/9/9/095005
55. Prowse T.D., Wrona F.J., Reist J.D., Gibson J.J., Hobbie J.E., Le'vesque L.M.J., Warwick F.V. Climate change effects on hydroecology of arctic freshwater ecosystems, *Royal Swedish Academy of Sciences*, 2006, vol. 35, no. 7, pp. 347-358.
56. Rod S.B., Foster S.G., Hillman E.J., Luek A., Zanewich K.P. Flood moderation: Declining peak flows along some Rocky Mountain rivers and the underlying mechanism. *Journal of Hydrology*, 2016, vol. 536, pp. 174–182. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.02.043
57. Walker B.J., Marsh P.Dr. High resolution spatial variability in spring snowmelt for an Arctic shrub-tundra watershed 2019. Theses and Dissertations (Comprehensive). 2116, available at: <https://scholars.wlu.ca/etd/2116>

Поступила 28.04.2022; одобрена после рецензирования 23.05.2022;  
принята в печать 08.06.2022.

Submitted 28.04.2022; approved after reviewing 23.05.2022;  
accepted for publication 08.06.2022.