

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-2-92-116>

УДК 504.453

Формирование весеннего стока рек ЕТР: основные факторы и способы их учета.

I. Обзор исследований

***Н.А. Варенцова*^{1,2}, *М.Б. Киреева*², *М.А. Харламов*²,
*М.И. Варенцов*³, *Н.Л. Фролова*², *Е.С. Повалишникова*²**

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

² *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
г. Москва, Россия;*

³ *Научно-исследовательский вычислительный центр
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова,
г. Москва, Россия
kireeva_mb@mail.ru*

Представлен обзор работ, посвященных формированию стока рек. Проведена типизация факторов формирования весеннего половодья. Выделены группы прямых и косвенных, динамических и квазипостоянных, а также антропогенных факторов. Построена сводная схема факторов формирования половодья с учетом особенностей их влияния на водный сток, проанализирована роль каждого значимого фактора в формировании весеннего половодья, приведены их количественные оценки. Выдвинута гипотеза, что к настоящему времени представление о главенствующей роли приходных составляющих в формировании стока весеннего половодья во многом утратило актуальность. Рассмотрены современные подходы к расчету основных факторов формирования стока весеннего половодья.

Ключевые слова: весеннее половодье, изменение климата, снежный покров, водный эквивалент, влажность почвы, глубина промерзания

Spring river runoff in the European part of Russia: main factors and their estimation.

I. Review of previous studies

***N.A. Varentsova*^{1,2}, *M.B. Kireeva*², *M.A. Kharlamov*²,
*M.I. Varentsov*³, *N.L. Frolova*², *E.S. Povalishnikova*²**

¹ *Central Administration for Hydrometeorology and Environmental
Monitoring, Moscow, Russia;*

² *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;*

³ *Research Computing Center Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
kireeva_mb@mail.ru*

The review of the papers dealing with the river runoff formation is presented. The factors of the spring flood formation are typified. The groups of direct and indirect, dynamic and quasi-permanent, as well as anthropogenic factors are distinguished.

The authors constructed a summary scheme of the spring flood formation factors, taking into account the peculiarities of their influence on water runoff, analyzed the role of each significant factor in the formation of spring floods, and presented their quantitative estimates. It was hypothesized that the concept of the dominant role of incoming components in the spring flood runoff formation has currently lost its relevance. Modern approaches to the calculation of the main factors of the spring flood runoff formation are considered.

Keywords: spring flood, climate change, snowpack, water equivalent, snow cover, soil moisture, freezing depth

Введение

Весеннее половодье в пределах Европейской территории России (ЕТР) – одна из важнейших фаз водного режима, во время которой формируется от 70 до 90 % годового стока [2, 43, 52]. Актуальность его изучения связана с наводнениями в этот период года, сопровождающимися значительным ущербом [54]. Часты случаи затопления населенных пунктов и линейных объектов (дороги, мосты, опоры ЛЭП и др.), повреждения сооружений как ледяными полями, корчеходом, так и самим водным потоком. Еще одна угроза, набирающая актуальность в последние десятилетия, – низкий сток в течение половодья (до 40 % от годового стока), влияющий на формирование маловодья в остальную часть года. Значительный объем стока за период половодья рассматривался как достаточный источник водных ресурсов на протяжении всего водохозяйственного года. Однако с изменением климата увеличилась повторяемость развития как единичных случаев, так и серий лет с маловодными веснами.

Большое значение для населения и экономики по-прежнему имеет регулирование стока. В пределах ЕТР и по сей день действуют схемы, опирающиеся на зимнюю сработку водохранилищ и наполнение их полезного объема весной. Но все чаще отмечаются маловодные весны, которые приводят к нарушению обеспечения населения и объектов экономики водой. Или же формируются весны с поздним выпадением большого количества осадков, что вынуждает формировать залповые сбросы, повышая общественные и экономические риски.

Только за последние 30 лет число опасных гидрологических явлений выросло почти в три раза [18]. Практически вся южная и центральная части ЕТР по наводнениям относятся к районам средней и высокой степени опасности, низкая и незначительная опасность фиксируется лишь для бассейнов Северной Двины ниже Котласа, Мезени и Печоры [21]. Отметим, что в случае маловодий пространственное распределение рисков и уязвимости объектов экономической инфраструктуры аналогично.

Изучение современных факторов формирования стока (далее – ФФС) и совершенствование методов прогнозирования половодья позволит уменьшить риск возникновения опасных гидрологических явлений. Большинство существующих методик разрабатывались и апробировались

на периодах, предшествовавших наблюдаемому изменению климата. Отсутствие синхронности и синфазности изменений со статистической точки зрения привели к нарушению устойчивости прогнозных уравнений в бассейнах Дона, Оки и Волги [10], а в 2000-х гг. существенные поправки приходилось вводить и для рек севера ЕТР.

Первая часть представленной работы посвящена обзору научных исследований, посвященных анализу факторов формирования весеннего половодья на реках ЕТР и используемым методам гидрологических прогнозов в XX–XXI веке.

Материалы и методы исследования

Изучение литературных источников основывалось на их временной классификации и различиях в подходах советской и зарубежной гидрологической школы. В первой части обзора проведена схематическая классификация факторов формирования стока половодья на основе имеющихся представлений. Затем согласно предложенной классификации давалась оценка влияния изменений климата на каждый отдельный фактор на основе исследований, проведенных на Русской равнине.

Представления о формировании стока половодья в XX веке

Половодье – сложный многофакторный процесс. В значительной степени на формирование весеннего половодья оказывают влияние условия предшествующего осеннего периода, хотя для ряда регионов доказана также значимость влияния условий летнего периода, а также половодья предшествующего года [13, 41].

В России вопросами влияния различных факторов на формирование весеннего половодья начали заниматься еще на рубеже XIX–XX вв. Г. Тарловский, Ю.В. Ланге, Р.П. Спарро, Е.А. Гейнц и Д.И. Кочерин. Основным же толчком к развитию данного направления стало экстремально высокое половодье 1908 года в бассейне Волги. В сущности, именно в работах Е.А. Гейнца и Д.И. Кочерина впервые были определены основные факторы формирования стока, которые далее на протяжении века рассматривались советскими и российскими гидрологами. Было установлено, что характеристики половодья (объем, максимальный расход воды, форма гидрографа, интенсивность роста) зависят от количества влаги, поступившей на водосбор и условий ее трансформации к замыкающему створу русла.

При детальном рассмотрении формирования стока половодья перечень влияющих на него факторов значительно расширяется (рис. 1). По роли в водном балансе ФФС половодья делят на приходные и расходные, по типу воздействия – на прямые и косвенные, по времени воздействия – на квазипостоянные и динамические.

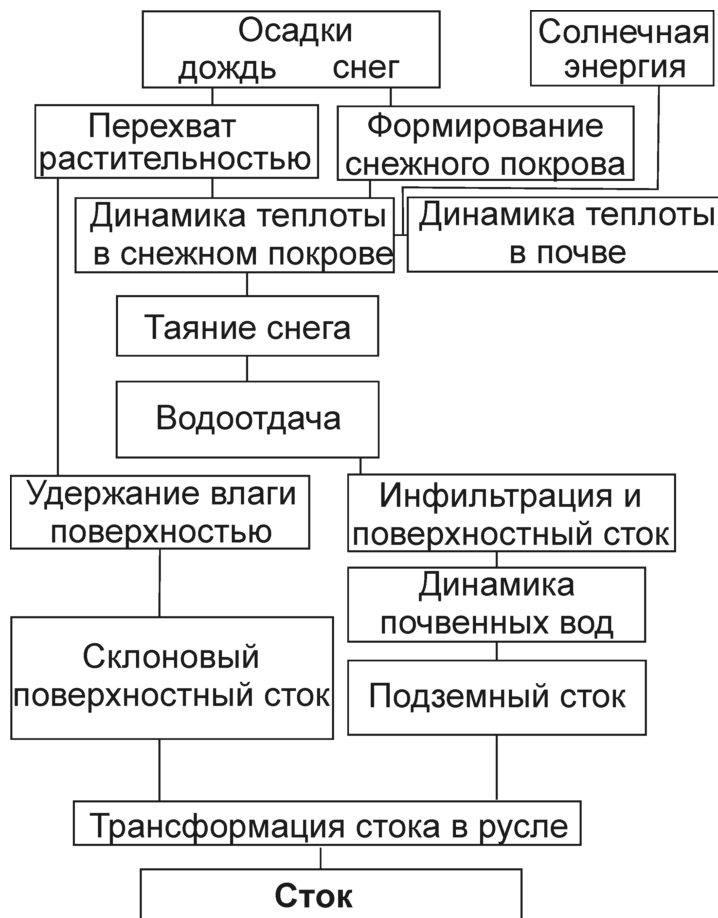


Рис. 1. Общие представления о факторах формирования стока половодья (по опубликованным работам в XX в.).

Fig. 1. General ideas about the factors of flood runoff formation (according to published works in the 20th century).

К *приходным факторам* половодья относят генетически разные составляющие стока – талые, дождевые и подземные воды. Доля талого стока напрямую зависит от запасов воды в снежном покрове на водосборе. Доля дождевых вод отличается большой пространственно-временной изменчивостью. Ее значимость прямо пропорциональна величине снегозапасов: с юга на север Европейской территории России доля дождевого стока возрастает с 10 % в бассейне Среднего и Нижнего Дона до 40–50 % в бассейне рек Северной Двины и Печоры. Доля подземного стока в объеме половодья определяется гидрогеологическими условиями, но редко превышает 5–10 % от суммарного стока [43]. *Расходные факторы* – это факторы, определяющие потери стока: испарение, поверхностное

задержание и пополнение влаги в толще почвогрунтов (включая потери стока на увлажнение зоны аэрации, пополнение запасов подземных и грунтовых вод).

Прямые факторы связаны с общим запасом влаги на водосборе, в том числе с запасом воды в снеге, ледяной корке и в почвогрунтах, с осадками в период снеготаяния. **Косвенные факторы** привлекаются при невозможности прямых измерений или низкой репрезентативности результатов контактных измерений при их экстраполяции. Наиболее часто они применяются для оценки впитывающей способности водосбора, дружности весны и влияния большинства квазипостоянных факторов: типов почвы и растительности, рельефа и т. д. [15, 19, 50].

Отдельного внимания заслуживает впитывающая способность водосбора. На протяжении всей истории ее описывали исключительно косвенными характеристиками – влажностью и глубиной промерзания почвы [13, 46]. Эти ФФС не являются стокоформирующими: различные их сочетания могут приводить к совершенно противоположным эффектам. По этой причине в рамках данной работы предлагается их классифицировать как **перераспределяющие факторы**.

Изменчивость стока определяется **динамическими** факторами – характеристиками метеорологического, гидрологического и гидрогеологического режимов. Здесь **квазипостоянными** выступают факторы подстилающей поверхности, которые в масштабах десятилетий редко претерпевают значимые изменения (размеры и форма речного водосбора, геология, почвы и почвогрунты, растительность, рельеф и фильтрационный режим территории, естественные аккумуляторы стока и источники дополнительного питания). Они определяют пространственное перераспределение выпадающих осадков, задержание талых вод на поверхности и в толще водосбора, испарение и время добегающего склонового и руслового стока [5, 42]. Примечательно, что в [38] к свойствам подстилающей поверхности уже относят динамические (влажность и глубина промерзания почвы) и квазипостоянные факторы (плотность почвы, ее механический состав, почвенно-гидрологические константы, рельеф, залесенность, заболоченность, виды землепользования и др.).

Особое место в структуре формирования стока принадлежит **антропогенным факторам**. Среди наиболее ярких примеров – изъятие вод на сельскохозяйственные, промышленные нужды, коммунальное водоснабжение, гидроэнергетику и речной транспорт, преобразование поверхности водосбора или активные воздействия на факторы формирования стока. Каждый вид хозяйственной деятельности влияет на изменение внутригодовой неравномерности стока, его объема, коэффициента стока отдельно взятых фаз водного режима, величины подземного стока и скорости добегающего.

Вышеупомянутые ФФС могут быть описаны качественными и количественными характеристиками, что позволяет проанализировать

их влияние на весеннее половодье. На набор изучаемых параметров всегда влиял выбор метода исследований: физико-математического, воднобалансового или статистического. В основу **физико-математического подхода** заложены общие представления о том, что каждый процесс на речном водосборе можно описать уравнением, основанном на теоретических физико-математических или экспериментально-эмпирических выводах. Большинство полученных в XX в. выводов легли в основу современных гидрологических моделей. К настоящему времени значительные достижения в моделировании стока имеют научные группы под руководством Д.А. Буракова, Ю.Б. Виноградова, Б.И. Гарцмана, А.Н. Гельфана, Е.М. Гусева, С.А. Кондратьева, В.И. Корня, Л.С. Кучмента, Ю.Г. Мотовилова и др. Методы физико-математического моделирования применяются чаще для изучения и прогнозирования самого стока, но не его факторов.

К недостаткам физико-математического подхода относится трудоемкость его реализации. В некоторых случаях можно говорить и о невозможности применения математического моделирования в рамках отдельного речного бассейна или о превышении итоговой ошибки над ошибкой статистических и воднобалансовых методов.

Частным случаем физико-математического подхода является представление о речном водосборе как о системе с неравномерным распределением емкости и переменной инфильтрационной способностью. В основе его подхода лежат интегральные полуэмпирические уравнения емкостного и инфильтрационно-емкостного типов водопоглощения, которые стали основой физико-статистических методов прогнозирования. Данный тип методов лег в основу прогнозов притока воды к Цимлянскому водохранилищу и потерь талых вод в левобережной части Нижнего Дона [8, 13]. Но для рек севера ЕТР и заболоченных территорий неучет испарения приводит к большим ошибкам [7].

Важно отметить, что подобные уравнения хорошо работают только при условии задания точного объема водоподачи на водосбор. Не решен вопрос границ зон сильного и слабого промерзания почвы. Перечисленные проблемы в условиях низкой плотности существующей наблюдательной сети не позволяют использовать этот подход как основной.

Предельным случаем упрощения физико-математического подхода можно назвать **воднобалансовый**. Согласно [30, 46], метод применим исключительно для водосборов лесной зоны избыточного увлажнения – Верхней Волги, Западной Двины, Верхней Вятки. В этих условиях водопоглотительная способность речных бассейнов определяется емкостью зоны аэрации, фильтрацией в грунтовые воды и испарением. Воднобалансовый подход физически обоснован, однако отсутствие простых и надежных схем определения потерь для любого речного водосбора в любых ландшафтных условиях накладывает ограничения на его использование.

В отличие от двух предыдущих *статистический подход* основан полностью на эмпирических зависимостях. Он приобрел распространенность за счет низкой плотности наблюдательной сети, сложности организации наблюдений, а также потребности экстраполяции полученных результатов на неизученные речные водосборы.

Физически обоснованные статистические зависимости активно использовались для изучения факторов формирования и прогноза весеннего стока рек севера Восточно-Европейской равнины на протяжении всего XX века. А их результаты и выводы часто ложились в основу методик оперативного прогнозирования характеристик половодья. В настоящее время одной из ветвей статистического подхода в гидрологии стало применение машинного обучения [55–57].

В рамках статистического подхода велся постоянный поиск факторов формирования стока и их комбинаций, максимально точно описывающих процесс в рамках заданных условий, но проводился он по крайне ограниченному перечню показателей:

- запасу воды в снежном покрове и неравномерности его залегания по площади водосбора;
- ледяной корке;
- дополнительным осадкам;
- глубине промерзания и влажности почвы.

От исследования к исследованию, в зависимости от природной и ландшафтной зоны ФФС конкретизировались с учетом рассматриваемого периода, но общий вид зависимости чаще всего оставался неизменным. Установленный набор факторов вытекал из уравнения водного баланса речного бассейна в период развития весеннего половодья (рис. 2).

Запас воды в снежном покрове – безусловно, наиболее значимый фактор формирования стока весеннего половодья. Весь снег, накапливающийся на речном водосборе, участвует в формировании стока половодья. Формирование пика половодья происходит в основном за счет снегозапасов в полях и овражно-балочной сети, а объема половодья – за счет лесных запасов и подповерхностного и грунтового стока.

Среднее многолетнее значение максимального запаса воды в снежном покрове в пределах Европейской территории России в середине XX в. варьировало от 30–40 мм в низовьях Дона и Приазовье до 160–180 мм в верховьях Печоры, Вычегды и Камы. При этом в лиственных и смешанных лесах запас воды в снеге обычно на 10–20 % превышал полевой, в хвойных лесах – на 10–15 %. В районах с частыми оттепелями эта разница могла достигать 30 % и более [11, 24, 42, 45, 46]. Зачастую запасы воды в снеге на залесенных участках оценивались путем умножения на фиксированный коэффициент, поскольку снегомерные маршруты в лесах были редки, а надежность их результатов на протяжении всего XX в. вызывала сомнения. Наглядным примером можно назвать значимые расхождения максимальных снегозапасов и стока половодья на севере Европейской территории России [48, 53].

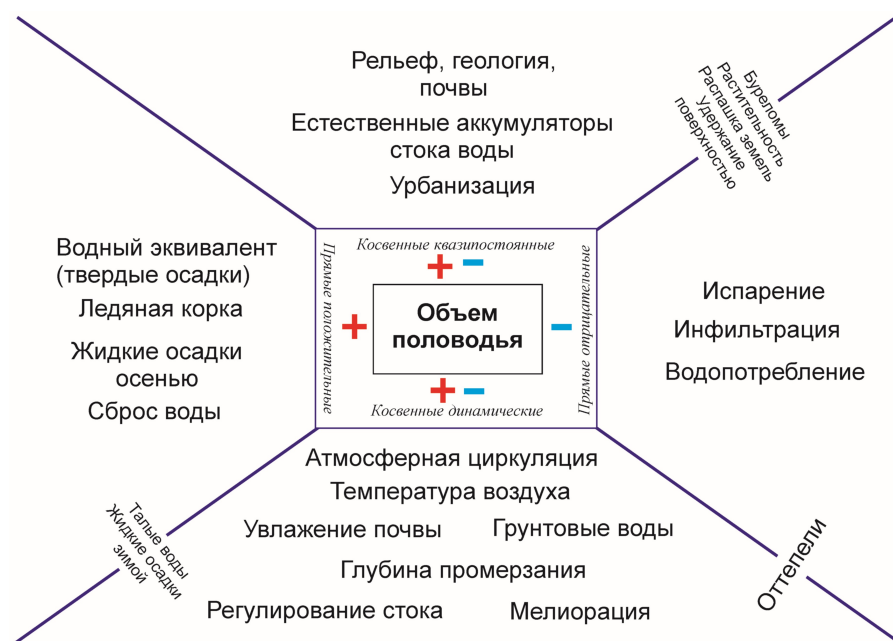


Рис. 2. Схема факторов формирования половодья, составленная авторами по обзору литературы.

Fig. 2. Scheme of flood formation factors compiled by the authors based on a literature review.

Изменчивость снеготпасов в пределах обширных территорий определялась в том числе факторами подстилающей поверхности. В зимний период значительно влияние рельефа: в ряде работ указывается на ярко выраженную линейную зависимость максимальных снеготпасов от высоты и экспозиции местности. Например, в лесостепной зоне ЕТР градиент изменения максимальных снеготпасов по высоте в среднем равен 40 мм на 100 м высоты, а экспозиция склона определяет продолжительность залегания снежного покрова [36].

Влияние расчлененности территории характеризуется коэффициентом снеготнакопления [15, 29, 36, 42]. На примере Дона показано, что его наибольшие значения (до 10–20) присущи узким оврагам и балкам, особенно если в верхней части склоны более пологие, чем в нижней, и расположены перпендикулярно преобладающему направлению зимних ветров. Максимальных значений эта величина достигает в малоснежные зимы, когда за счет снега овражно-балочной сети почти полностью формируется весеннее половодье [13].

Важно, что густота овражно-балочной сети и первичных звеньев русловой сети в масштабах десятилетий претерпевают изменения. В современных условиях этот фактор перестает быть квазипостоянным.

Наиболее существенные изменения за последние два века отмечены в пределах степной и лесостепной зон ЕТР – в ареалах наибольшей антропогенной нагрузки. Сокращение первичного звена русловой сети привело к росту потерь стока на испарение и инфильтрацию, сокращению скорости добегаания талого стока [1, 22, 25]. В то же время некоторые работы указывают на перспективы возобновления роста овражно-балочной сети в первой половине XXI в. [12].

Начиная с 1937 г. внимание уделялось интенсивности снеготаяния. Низкая интенсивность таяния оценивалась в 5–6, средняя – 8–12, высокая – более 15–17 мм/сутки. Предельные ее значения на открытой местности принимались в размере 25–30, при проталинах – до 60 мм/сутки. В хвойном лесу интенсивность таяния оценивалась в размере до 10–12, но редко превышала 20 мм/сутки. Однозначного представления о значимости этого фактора не было: ряд исследований указывали, что в отличие от продолжительности интенсивность снеготаяния не влияет на характер половодья, особенно в границах лесной зоны [28, 42], другие склонялись к обратному [40].

Несмотря на кажущуюся примитивность, количественная оценка интенсивности снеготаяния довольно сложна. Одним из путей решения задачи считался расчет интенсивности снеготаяния через тепловой баланс, однако его результаты показали значительные погрешности. Даже современные наблюдения с привлечением спутниковой съемки для смоченного (тающего) снега показывают большие ошибки, хотя и таяние снеготаяния отслеживается надежно [53]. Наибольшее распространение в XX в. получил метод, основанный на эмпирических зависимостях слоя стаивания от суммы положительных среднесуточных температур [29, 33]. Так, для рек Москвы и Пехорки он был оценен в 2,1 мм/сутки. Для густого ельника он составлял 1,4, для ельника средней густоты и смешанных лесов – 1,8, для редколесья – 3–4 мм/сутки. Последнее значение подтверждается работами П.П. Кузьмина. В поле коэффициент стаивания рекомендовалось принимать равным 5,2 мм/сутки.

Схожая схема принималась при учете оттепелей в зимний период: из расчета 3 мм на 1 С положительной среднесуточной температуры [13, 14]. Подобные оценки – результат многолетних наблюдений на сети воднобалансовых станций Европейской территории России.

Осадки в период весеннего половодья – еще один фактор, чаще всего характеризующий приходную составляющую. В середине XX в. их норма в бассейнах Дона, Днепра и Нижней Волги составляла от 5 до 15 мм, в бассейнах Оки, Верхней Волги и Камы, а также в верховьях Северной Двины – примерно 15–20 мм, увеличиваясь лишь к бассейну Печоры до 40 мм [3]. В отдельные годы в пределах всей ЕТР эта величина могла колебаться от 0 до 70 мм. При этом лишь часть выпадающих осадков оценивалась как эффективная. Порядка 5–10 мм влаги перехватывалось смешанным лесом, 15–25 мм – хвойным [28]. Кроме того, коэффициент стока осадков, выпавших на проталины, редко превышал 0,2.

В ряде работ XX в. постулируется факт существенного влияния весенних осадков на половодье рек вследствие их значительной изменчивости. На примере прогноза слоя стока половодья в бассейнах рек Кобры, Летки, Камы, Вятки, Великой, Бол. Холуницы и Весляны В.Д. Комаров показал значимое увеличение тесноты связи при привлечении данных о весенних осадках. Иные количественные оценки по связи весенних осадков со стоком половодья не были обнаружены.

Гораздо больше работ, описывающих *суммарное влияние снегозапаса и весенних осадков* на сток половодья. Одна из первых работ, посвященных выявлению связи между суммой осадков за зиму и весну с объемом стока в половодье, была опубликована Е.А. Гейнцом еще в 1903 г. для Оки у г. Орла [28]. В 1930-х гг. были установлены одни из первых зависимостей для Волги у Ярославля и Оки у Калуги, а в 1940-х гг. – для рек Камы, Вятки и Северной Двины. Чуть позже они были дополнены параметром осадков за период развития половодья, который повысил их надежность.

Надежность подобного двухпараметрического описания стока половодья, зависящего от запаса воды в снежном покрове (S) и осадков за время таяния (X), неодинакова в разных географических зонах. Наибольшая теснота связи в середине XX в. наблюдалась для рек севера лесной зоны (коэффициент корреляции $R = 0,8-0,9$) и наименьшая – на востоке степной, лесостепной зон и на востоке южной части лесной зоны, а также на реках северо-запада ($R = 0,4-0,6$). В центральных и западных районах степной и лесостепной зон, а также южной половины лесной зоны коэффициенты корреляции имели значения $0,7-0,8$.

Исходя из совместного анализа снегозапасов и сумм весенних осадков, исследователями при использовании статистического подхода был сделан вывод о главенстве их роли в формировании стока половодья [3, 13, 50]. Однако для большей части Восточно-Европейской равнины зависимость $Y = f(S + X)$ оказалась недостаточной.

Понятие о потерях стока. Начиная с 1930-х гг. возрастает интерес к изучению факторов, определяющих потери стока в период весеннего половодья. Определение всех членов балансового уравнения было трудоемко, часто сопровождалось значительными ошибками, а часть из них не могла быть измерена. В результате специалисты в этой области все чаще стали прибегать к интегральным характеристикам. Так, в 1939–1947 гг. В.Д. Комаров ввел понятие потерь p_0 , которое определяло сумму величин полной поверхностной емкости бассейна и затрат талой воды на инфильтрацию в увлажненную мерзлую почву, обусловленных некоторым количеством открытых сверху некапиллярных пор в верхнем слое почвы и частичным оттаиванием ее на проталинах. В сущности, p_0 – это отклонение зависимости от прямой идеального соответствия между снегозапасом и стоком (рис. 3). Примечательно, что низ этих кривых предлагалось обосновывать зимними паводками, поскольку случаев половодий

с непроницаемой почвой и малым снегозапасом (до 30 мм) в первой половине XX в. не наблюдалось.

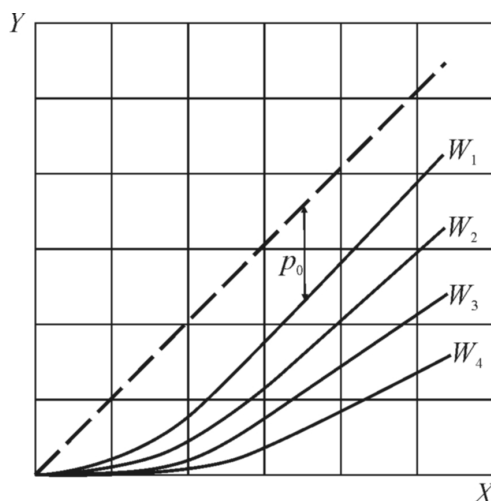


Рис. 3. Общий вид зависимости стока за паводке (Y) от запаса воды в снежном покрове (S), сложенного с осадками за время таяния (X) и осеннего увлажнения почвы (W_1 – W_4), p_0 – отклонение зависимости от прямой идеального соответствия между снегозапасом и стоком [29].

Fig. 3. General view of the dependence of the runoff during the flood (Y) on the water reserve in the snow cover (S), combined with precipitation during the thawing time (X) and autumn soil moistening (W_1 – W_4), p_0 is the deviation of the dependence from the straight line of ideal correspondence between the snow reserve and runoff [29].

Неоднозначность определения параметра p_0 привела к тому, что первые работы были направлены на определение его через коэффициент стока, который для рек ЕТР варьировал в пределах от 0,02 до 0,95. Так, Е.Г. Попов предлагал использовать отношение интенсивности впитывания i к поступлению талой воды на почву h . В первом приближении i/h по смыслу близко к $(1 - \eta)$, где η – коэффициент стока.

Одновременно с этим отмечалось возрастание величины потерь с увеличением разности полной и наименьшей полевой влагоемкости почв бассейна [24], а также тесная связь с расчлененностью рельефа [40]. Однако ни то, ни другое все еще не поддавалось количественным оценкам на масштабах различных речных водосборов.

В среднем величина потерь увеличивалась преимущественно с северо-запада на восток и юго-восток от 30 до 60 мм, в отдельные годы достигая 80–100 мм. Для рек лесной зоны большое внимание уделялось лесной подстилке. Ее впитывающая способность оценивалась в размере до 20, в заболоченных лесах – до 30, а при наличии сфагнома и торфа – до 50 мм

воды [28, 39]. Отсюда следовало, что для достижения оптимального увлажнения на севере ЕТР требовалось больше влаги, чем на юге.

Весомый вклад в развитие математического описания потерь стока внесли изменения программ наблюдений на гидрометеорологической сети, которые положили начало массовым наблюдениям за снежным покровом, глубиной промерзания почвы и другими показателями. Подкрепленные увеличивающимися массивами данных, были получены выводы о существенном влиянии влажности почв и глубины их промерзания на потери талого стока в период весеннего половодья. В частности, было показано, что [15, 27, 50]:

– в лесной зоне и на заболоченных участках глубина промерзания почвы имеет слабую связь со стоком половодья, в то время как ее высокая влажность формирует своеобразный водоупор;

– в пределах лесостепной и степной зон минимум потерь достигается при влажности почв, близкой к наименьшей полевой влагоемкости, и глубиной их промерзания;

– в регионах с большой повторяемостью развития ледяной корки (например, Заволжье) получена высокая теснота связи потерь весеннего стока с глубиной промерзания;

– в суглинистых почвах водонепроницаемый слой возникает, если во время таяния начальная влажность почвы составляет не менее 60 % общего объема пор, а в песчаных почвах – при значениях, близких к наименьшей полевой влагоемкости. В лесных массивах водонепроницаемый слой образуется исключительно редко;

– для глинистых и суглинистых почв требуется учет степени залесенности водосбора и распределения их по площади для оценки объема потерь талого стока.

В результате к концу XX в. практически все полученные статистические уравнения, описывающие сток половодья, можно было свести к следующим постулатам:

1) потери талых вод сильно возрастают при слабо промерзшей почве;
2) пониженное увлажнение почвы осенью влечет увеличение потерь талых вод;

3) при стоке по мерзлой и хорошо увлажненной с осени почве потери талых вод невелики и практически не зависят от продолжительности таяния. В этих условиях наблюдается тесная связь стока за половодье с запасом воды в снежном покрове (с учетом осадков за время таяния);

4) требуется совместный учет влияния промерзания и влажности почвы.

Влажность почвогрунтов при достижении высоких значений формирует условия, близкие к водоупору. Низкая влажность почвы, анализируемая в отрыве от остальных факторов, указывает на большую фильтрационную способность почвогрунтов и, следовательно, большие потери стока для половодья как фазы водного режима [15]. В то же время

не всякая очень сухая почва будет хорошо пропускать влагу: суглинистые и глинистые почвы при значительном промерзании и интенсивной водоподаче талых вод за определенные интервалы времени образуют воздушные водоупоры, повышающие коэффициент стока до промачивания верхнего почвенного слоя.

Значимость этого ФФС половодья не подвергается сомнению. Но интересно, что работ, предлагавших использование измеренной влажности почвы в качестве количественного фактора, крайне мало. Это определено как трудоемкостью и ограниченностью по времени года подобного вида наблюдений, так и крайне высокой изменчивостью получаемого пространственного поля характеристики. Примерами работ с использованием одновременно фактической и расчетной влажности почв можно назвать методики прогноза притока воды к Цимлянскому водохранилищу [13, 14]. В них увлажнение почвы перед началом снеготаяния W оценивалось по фактическим данным для трех из четырех речных водосборов.

По этой причине в зависимости от региона исследований ученые использовали косвенные характеристики [5, 13, 46]. Еще в 1935 г. Б.Д. Зайков на примере стока половодья р. Большой Узень у г. Новоузенска предлагал зависимость вида:

$$y = 0,1X\sqrt{(X - z)},$$

где X – сумма зимне-весенних осадков (до окончания половодья), а $(X - z)$ – разность между суммой осадков и испарением по графикам Мейера за период с 1 октября до установления снежного покрова.

Этот способ косвенной оценки влагоемкости водосбора с некоторыми изменениями до конца XX в. считался наиболее популярным, особенно для водосборов лесной зоны, включая рр. Летку, Кобру, Каму, Великую, Вятку, Большую Холуницу и Весляну. Но наиболее распространенной стала оценка поверхностной влагоемкости $w_{\text{пв}}$, впервые появившаяся в [24]. Ее получали путем сложения:

- осадков за вычетом испарения (по Б.В. Полякову) за 90 дней, предшествующих дате перехода температуры воздуха через 0°C осенью;
- осадков за период от даты перехода через 0°C до даты образования устойчивого снежного покрова;
- количества воды, образующейся из снега в период оттепели и попадающей на поверхность почвы.

В таком виде параметр вошел в ряд прогностических методик, включая прогнозы половодья на р. Оке и других реках нечерноземной зоны ЕТР [50].

Для характеристики предзимней влагонасыщенности водосбора допускалось использование и величины паводочного стока рек в осенний период или среднемесячных расходов воды за 1–2 месяца до начала зимы [35], а также водность рек в феврале – марте. Подобные решения были реализованы Т.И. Великановой [11] для Юга, Сухоны, Устья и Кокшеньги.

Кроме того, в США были разработаны схемы, учитывающие осадки за каждый день в течение заданного периода с неким редуцированным коэффициентом [33].

Наряду с влажностью для расчета характеристик половодья использовали *глубину промерзания почвы*. При промерзании почвы происходят важные структурные изменения ее пористости, плотности, водопроницаемости и теплофизических характеристик. Ряд авторов отмечает, что глубина промерзания в первую половину зимы в основном определяется январскими морозами, если к этому времени высота снежного покрова не превышает 15–25 см [32]. Промерзание почвы наиболее интенсивно развивается в суглинистых почвах, которые характеризуются меньшим размером пор и большим содержанием в них влаги после выпадения осенних дождей. Именно для глинистых и суглинистых почв зимой характерно увеличение глубины промерзания за счет капиллярного поднятия, в том числе при близком положении уровня грунтовых вод. Значительные отрицательные аномалии в условиях малоснежных зим ведут к нарастанию глубины промерзания. В отдельных случаях в лесных массивах она может достигать 1 м [15].

Экспериментально установлено, что скорость инфильтрации не зависит от льдистости почвы при средней глубине промерзания 0–25 см, а наиболее резкое изменение фильтрационных свойств почвы происходит при глубине промерзания 30–45 см. При достижении значения в 60 см почва, по мнению ученых, становится практически непроницаемой для талого стока. В то же время в работах разных лет отмечается, что большие потери могут формироваться при сочетании малого увлажнения и большой глубины промерзания [26, 27].

В первой половине XX в. в пределах ЕТР средняя глубина промерзания увеличивалась от 30–40 в Приазовье до 60 см в бассейнах Медведицы, Хопра, Сулы, Оскола, Ворсклы и до 80–100 см в бассейнах Камы и Печоры [28, 44]. Отсюда следовало, что она относится к ФФС половодья лишь для южных водосборов.

Чаще всего при анализе ФФС половодья и разработке методов прогноза использовали среднюю максимальную или среднюю на дату глубинную промерзания почвы. В середине XX в. некоторые исследователи предприняли попытку учета неравномерности промерзания почвы через кривые распределения по аналогии со снежным покровом. Однако данный подход не показал увеличения эффективности методик прогнозирования весеннего стока.

Прочие факторы весеннего стока. Среди неклассических ФФС половодья можно выделить среднюю температуру воздуха в зимний период по Е.А. Гейнцу, а также площадь водосбора по Д.И. Кочерину и Д.Л. Соколовскому.

Отдельного внимания заслуживает ледяная корка. Притертая корка способствует увеличению коэффициента талого стока весной.

Аналогичный эффект достигается при выпадении жидких осадков весной на наст. А при оттепелях он сокращает потери на испарение снежного покрова. Эти эффекты приобретают значимость лишь при достижении некоторой степени покрытости водосбора снегом или его толщины в 2–4 см. Тем не менее, в количественных показателях ледяная корка в течение XX в. в большинстве работ просто суммировалась с запасом воды в снежном покрове. Большой популярности этот показатель не приобрел в силу ненадежности результатов натурных измерений.

Помимо перечисленных параметров, отмечалась связь половодья с почвенным и растительным покровом, характером рельефа, глубиной залегания грунтовых вод. В XX в. сделаны выводы о характере половодья для однородных физико-географических и ландшафтных зон [11, 28, 40]. Большое число работ посвящено влиянию леса, в т. ч. многократному снижению интенсивности снеготаяния и увеличению потерь талого стока в лесных массивах, особенно на песчаных почвах [48].

Нельзя обойти вниманием *антропогенное влияние* на сток половодья, оценке роли которого посвящено множество работ [4, 9, 16, 17, 20, 23, 36, 51].

Помимо прямых (регулирование стока, водозабор, водосброс, переброска стока), разительно преобразующих водный режим рек, влияние оказывают косвенные факторы переменного воздействия. Первый из них – сельскохозяйственное освоение земель. Распашка речных водосборов под озимые и создание зяби под яровые культуры в осенний период ведет к увеличению пористости верхнего слоя почвы и ее фильтрационной способности [31, 47, 49]. Так, коэффициент фильтрации в зимний период для возделываемых почв снижается лишь в 2–4 раза, тогда как на условно-естественных участках – до 10–12 раз. В то же время распашка влияет и на коэффициент стока: повышая его для грунтовой составляющей и снижая для талых вод.

Еще один антропогенный ФФС половодья – создание лесозащитных полос для удержания снега и талого стока на полевых участках. В естественных условиях большая часть снега с метелевым переносом задерживалась в овражно-балочной сети. Снегозадержание в полях привело к увеличению инфильтрации талых вод и времени добегаания до первичных звеньев русловой сети. Тот же эффект диагностирован для распашки склонов водосборов.

Лесные полосы оказывают сильное влияние не только на условия снегонакопления непосредственно в пределах лесополос, но и на прилегающих к ним территориях полей. Снегонакопление в зоне влияния лесополос определяется конструкцией насаждений, их размерами и положением относительно преобладающих направлений зимних ветров, характером и размером снегосборной площади, расстояниями между полосами, а также метеорологическими условиями зимы: скоростью ветра, количеством и распределением во времени осадков и другими

факторами. Влияние лесных полос на снегоотложение распространяется на расстояние, равное 20–30-кратной высоте деревьев. По результатам наблюдений в заповеднике Каменная Степь установлены закономерности снегонакопления внутри полностью взаимодействующей системы лесных полос и разобренных систем [36]. Основной функцией лесных полос является снижение скоростей ветра, перераспределение снегозапасов и сокращение весеннего поверхностного стока с частичным его переводом в подземный.

Влияние леса на весенний сток проявляется и при его сведении. Так, в работе [30] показано, что при неизменности климата рубки леса с последующим его восстановлением приводят к росту весеннего стока в нечерноземной зоне ЕТР в пределах 5–10 % на крупных и средних реках и до 25 % – на малых рек.

Интегральное влияние распашки и создания лесозащитных полос породило предложения по возможности управления инфильтрацией, глубиной промерзания и равномерностью распределения снежного покрова [6].

Несмотря на большое разнообразие неосновных ФФС, большинство второстепенных и антропогенных ФФС до настоящего времени не поддаются количественной оценке, оставаясь качественными факторами.

Мультифакторные оценки характеристик половодья. Статистический подход подразумевает проведение регрессионного анализа, поэтому не удивительно, что в большом числе исследований опубликованы также и мультифакторные уравнения для стока половодья. Одни из первых статистических зависимостей имели крайне простой вид: сток половодья увязывался с запасом воды в снеге или эффективными осадками (максимальный снегозапас, сложенный с осадками на период половодья). К 1920–1930-м гг. в качестве дополнительных косвенных характеристик появляется средняя температура зимнего периода и осадки за сентябрь предшествующего года.

Общий вид зависимостей, которыми пользовались с середины XX в. и до настоящего времени, был сформирован в 1940–1950-е гг. В эти же сроки активное развитие получили территориальные методы прогнозирования. Считается, что их общей физической основой были метод водного баланса и закономерности движения талых вод в толще почвогрунтов, но реализованы они были квазистатистическим методом. Наиболее распространенным видом зависимости слоя стока половодья во второй половине XX в. стала:

$$Y = f(S + X; w \cdot L / 50),$$

где $S + X$ – сумма запасов воды в снежном покрове и осадков на период половодья, w – количество продуктивной влаги в слое почвы 0–50 см, L – глубина промерзания. Выражение $w \cdot L / 50$ описывает количество продуктивной влаги в почве, превратившееся в лед. Его в 1955 г. практически одновременно предложили Е.С. Змиева, Т.Т. Макарова и В.Д. Комаров,

опиравшиеся на успешность его применения при оценке потерь на Каме, Вятке и Белой, а также реках Заволжья.

Зависимости такого вида применялись для бассейна Медведицы у хут. Арчединская, рек бассейна Оки, Белой, Сулы у г. Лубны [24, 28, 34, 40]. При этом погрешность в описании объема половодья, например, для Оки у г. Белев не превышала 20 мм. Однако в зависимости от природной зоны и ландшафтных условий ее внешний вид претерпевал изменения. Так, для рек степной и лесостепной зон (Дона, Оки и рек южного Заволжья) при отсутствии связи стока половодья с осенней влажностью почв и уровнем грунтовых вод зависимость выглядела следующим образом:

$$Y = f(S + X, \zeta, L, \xi),$$

где S – запасы воды в снеге, X – осадки за время снеготаяния, ζ – льдистость почвы (в баллах), L – глубина промерзания, ξ – интенсивность таяния.

Для рек севера и лесной зоны ЕТР зависимость, наоборот, чаще всего лишалась показателя глубины промерзания, т. к. в наблюдавшихся климатических условиях промерзание почвы практически ежегодно превышало 60 см:

$$Y = f(S + X, W),$$

где W – осеннее увлажнение почвы. Отдельное внимание уделялось водосборам, практически сплошь покрытым лесами: для них вычитания испарения не производилось. Вместо этого за косвенную характеристику увлажнения принималась сумма осадков с 1 августа до установления снежного покрова.

Альтернативный подход для залесенных водосборов применялся в работе [35], где уравнение прогноза стока половодья имело вид

$$Y = f(S + X, Y_{II}),$$

где Y_{II} – сток за февраль.

Одновременно с этим появляется целый набор зависимостей вида $Y = f(S + X)$ при условии «оптимальных» показателей влажности и глубины промерзания почвы. Так, для р. Москвы оптимальная влажность почвы принималась ≥ 65 мм, а глубина промерзания ≥ 60 см [28]. При этом теснота связи R повысилась до 0,92, а продолжительность таяния не оказывала влияния на величину потерь стока.

Менее распространенные зависимости имели вид:

$$Y = (S + X) - p_0 \operatorname{th} \frac{X}{p_0},$$

где p_0 – параметр, зависящий для данного типа почвы только от ее осеннего увлажнения и определяемый через экспоненциальную связь с увлажнением почвы при условии промерзания почвы более чем на 60 см.

Анализ половодья по уравнению такого вида реализован В.Д. Комаровым на примере рек степного Заволжья.

Учет слабопромерзших участков речного водосбора чаще всего велся дифференцировано. Для них коэффициент стока был принят равным 0,1. Примечательно, что учет неоднородности глубины промерзания в зависимостях, описывающих слой стока половодья для ряда рек лесной зоны, позволил вдвое снизить погрешность прогноза.

Но далеко не всегда предлагалось использовать для анализа только зимние или предзимние характеристики. Так, в работе Е.С. Змиевой [24] наравне со снегозапасом предлагалось учитывать произведение дефицита влажности на глубину оттаивания почвы на рано появившихся проталинах в момент освобождения половины водосбора от снежного покрова. Однако значимых выводов получено не было.

Как следует из приведенного анализа, в большинстве существующих на данный момент работ отечественных гидрологов применяются схожие подходы к описанию факторов формирования стока половодья и его прогноза: сток половодья зависит от снегозапасов, влажности почвы и глубины промерзания. На этом построена теория статистической гидрологии уже восемь десятков лет. При этом практически везде дополнительно указывается на большую значимость условий весны. Формирующиеся в период заблаговременности прогноза, они значительно влияют на конечные количественные и качественные характеристики половодья.

Выводы

На основе обзора литературы проведена единая типизация факторов формирования весеннего половодья. Выделены группы прямых и косвенных, динамических и квазипостоянных, а также антропогенных факторов.

На основе анализа литературы авторами построена сводная схема факторов формирования половодья с учетом особенностей их влияния на водный сток.

Проанализированы представления о роли каждого значимого фактора в формировании весеннего половодья, приведены их количественные оценки за различные временные промежутки времени, приведенные в литературных источниках.

Рассмотрены современные теоретические подходы к расчету основных факторов формирования стока весеннего половодья.

Выдвинута гипотеза, что к настоящему моменту представления о главенствующей роли приходных составляющих в формировании слоя стока весеннего половодья во многом утратили свою актуальность. Существенная трансформация процессов формирования талого стока на водосборе за счет климатических изменений и антропогенных факторов коренным образом повлияла на роль отдельных компонентов, что требует детального переосмысления и анализа на уровне отдельных регионов. В следующей части работы подобный анализ реализован на примере водосборов рек Донского бассейна.

Типизация факторов формирования весеннего половодья выполнена при поддержке гранта РФФ № 19-77-10032, анализ роли таких факторов – при поддержке гранта РФФ № 21-47-00008.

The typing of spring flood formation factors was supported by the RSF grant no. 19-77-10032, and the analysis of the role of such factors was supported by the RSF grant no. 21-47-00008.

Список литературы

1. *Авилова К.В., Голосов В.Н., Панин А.В., Сидорчук А.Ю.* Состояние русел // Малые реки волжского бассейна. М.: Изд-во МГУ, 1998. С. 109-116.
2. *Алексеевский Н.И., Фролова Н.Л., Антонова М.М., Игонина М.И.* Оценка влияния изменений климата на водный режим и сток рек бассейна Волги // Вода: химия и экология. 2013. № 4. С. 3-12.
3. *Алюшинская Н.М., Анискина Н.А., Ивашинцева Л.Д.* Весенний сток рек бассейна Северной Двины и его прогнозы // Труды ГГИ. 1962. Вып. 97. С. 3-138.
4. Антропогенные воздействия на водные ресурсы России и сопредельных государств в конце XX столетия / отв. ред. Н.И. Коронкевич, И.С. Зайцева. М.: Наука, 2003. 367 с.
5. *Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д.* Курс гидрологических прогнозов: учебник. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 419 с.
6. *Барабанов А.Т.* Закономерности формирования поверхностного стока талых вод, его прогноз и регулирование // Известия Оренбургского гос. аграрного ун-та. 2012. № 1(33). С. 65-68.
7. *Бураков Д.А., Литвинова О.С.* Водно-балансовые зависимости для прогноза стока талых вод на юге Западно-Сибирской равнины // География и природные ресурсы. 2010. Вып. 3. С. 111-120.
8. *Быстров А.В.* Расчет и прогноз потерь талых вод на водосборах левобережной части Нижнего Дона // Труды ГГИ. 1980. Вып. 265. С. 83-87.
9. *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.
10. *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
11. *Великанова Т.И.* Весенний сток и особенности его формирования в условиях северной части Европейской территории СССР // Труды ЦИПа. 1967. Вып. 54. С. 78-100.
12. *Веретенникова М.В., Зорина Е.Ф., Ковалев С.Н., Любимов Б.П.* Современная пораженность овражной эрозией земель сельскохозяйственного фонда и прогноз возможного ее развития // Эрозия почв и русловые процессы. 1998. Т. 11. С. 103-111.
13. *Вершинина Л.К.* Методика расчета и прогноза объема стока весеннего половодья в бассейне р. Дона // Труды ГГИ. 1977. Вып. 223. С. 52-65.
14. *Вершинина Л.К., Крестовский О.И.* Учет водопоглотительной способности водосборов при прогнозах стока весеннего половодья // Труды ГГИ. 1980. Вып. 265. С. 3-30.
15. *Владимиров А.М.* Факторы, определяющие возникновение экстремальных расходов и уровней воды половодья // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического ун-та. 2009. № 9. С. 22-39.
16. Водные ресурсы России и их использование / под ред. И.А. Шикломанова СПб.: Государственный гидрологический институт, 2008. 600 с.
17. *Водогрецкий В.Е.* Антропогенное изменение стока малых рек. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 176 с.
18. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Основной том. М.: Изд-во ААНИИ, 2014. 1018 с.

19. *Гареев А.М., Зайцев П.Н., Комиссаров А.В.* Некоторые особенности изменчивости максимальных расходов воды весеннего половодья в зависимости от влияния стокоформирующих факторов (на примере бассейнов рек Башкирского Предуралья) // Вестник Башкирского ун-та. 2015. № 2. С. 478-485.
20. *Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милокова И.П., Барабанова Е.А., Кацутина 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
21. *Гладкевич Г.И., Терский П.Н., Фролова Н.Л.* Оценка опасности наводнений на территории Российской Федерации // Водное хозяйство России. 2012. № 2. С. 29-46.
22. *Голосов В.Н., Панин А.В.* Пространственно-временные закономерности процесса деградации речной сети на Восточно-Европейской равнине // Труды Академии водохозяйственных наук. 1998. Вып. 5. Гидрология и русловые процессы. С. 163-172.
23. *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.
24. *Змиева Е.С.* Весенний сток в бассейне р. Волги и метод его прогноза // Труды ЦИПа. 1955. Вып. 39(66). С. 27-34.
25. *Иванова Н.Н., Голосов В.Н., Панин А.В.* Земледельческое освоение территории и отмирание рек европейской части России // Геоморфология. 1996. № 4. С. 53-60.
26. *Калюжный И.Л., Лавров С.А.* Влияние климатических изменений на глубину промерзания почв в бассейне р. Волга // Лед и снег. 2016. Т. 56, № 2. С. 207-220. DOI: 10.15356/2076-6734-2016-2-207-220
27. *Калюжный И.Л., Лавров С.А.* Гидрофизические процессы на водосборе. СПб: Нестор-История, 2012. 616 с.
28. *Комаров В.Д.* Весенний сток равнинных рек европейской части СССР, условия его формирования и методы прогнозов. М.: Гидрометеиздат, 1959. 259 с.
29. *Комаров В.Д.* Долгосрочный прогноз весеннего стока рек черномозной зоны Европейской части СССР на основе территориально общих зависимостей. Л.: Гидрометеиздат, 1955. 74 с.
30. *Крестовский О.И.* Опыт расчета и прогноза элементов водного баланса весеннего половодья бассейна р. Вятки // Труды ГГИ. 1977. Вып. 233. С. 3-14.
31. *Кузник И.А.* Агроресомелиоративные мероприятия, весенний сток и эрозия почв. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 220 с.
32. *Леонovich И.И., Вырко Н.П., Демидко М.Н.* Статистический метод определения глубины промерзания грунтов // Труды БГТУ. 2015. № 2. С. 27-31. <https://rep.bntu.by/handle/data/47635>
33. *Линслей Р.К., Колер М.А., Паулюс Д.Л.Х.* Прикладная гидрология. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 759 с.
34. *Макарова Т.Т.* Исследование условий формирования весеннего стока р. Камы и методика его прогноза // Труды ЦИП. М.: Гидрометеиздат, 1955. Вып. 39(66). С. 15-22.
35. *Макарова Т.Т.* Исследование формирования весеннего половодья по методу водного баланса (на примере р. Мологи) // Труды ЦИПа. 1950. Вып. 22(49). С. 53-84.
36. *Мишон В.М., Болгов М.В., Сенцова Н.И.* Бассейн Верхнего Дона: водные ресурсы, гидрология, гидрография // Тр. НИИ Геологии ВГУ. Вып. 26. Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2005а. 139 с.
37. *Мишон В.М., Болгов М.В., Сенцова Н.И.* Гидрологическое обоснование водохозяйственных мероприятий в бассейне Верхнего Дона // Экология бассейна Дона. Воронеж, 2005б. С. 74-75.
38. Многолетние изменения элементов водного баланса на воднобалансовых и болотных станциях: научно-прикладной справочник / под ред. М.Л. Маркова. СПб.: РИАЛ, 2021. 202 с.
39. *Молчанов А.А.* Гидрологическая роль сосновых лесов на песчаных почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1952. 488 с.
40. *Паршин В.Н., Салов М.С.* Весенний сток в бассейне реки Дон и его предвычисление. Л.: Гидрометеиздат, 1955. 103 с.

41. *Перминов А.В., Смирнова М.А.* Оценка внутригодового распределения речного стока в бассейне Верхней Волги // Вестник ФГОУ ВО МГАУ. 2014. № 3. С. 30-34.
42. *Попов Е.Г.* Вопросы теории и практики прогнозов речного стока. Л.: Гидрометеоздат, 1963. 395 с.
43. Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления XXI века / под ред. А.В. Кислова, В.М. Евстигнеева, С.М. Малказовой, Н.Н. Соколихиной, Г.В. Сурковой, П.А. Торопова, А.В. Чернышева, А.Н. Чумаченко. М.: МАКС Пресс, 2008. 292 с.
44. *Разумова Л.А.* Сезонная мерзлота и влажность почвы на Европейской территории СССР // Труды ЦИП. Вып. 51. Л.: Гидрометеоздат, 1953. 352 с.
45. *Рахманов В.В.* Водоохранная роль лесов. М.: Гослесбумиздат, 1962. 235 с.
46. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 248 с.
47. *Сафина Г.Р., Голосов В.Н.* Влияние изменений климата на внутригодовое распределение стока малых рек южной половины Европейской территории России // Ученые записки Казанского ун-та. Серия Естественные науки. 2018. № 1. С. 111-125.
48. *Соколов А.А.* О влиянии леса на максимальный сток весеннего половодья // Труды ГГИ. 1962. № 99. С. 79-140.
49. *Соломатин Н.В., Валиева Ж.А., Гейде Э.Г.* Антропогенные изменения в формировании стока на водосборах Южного Урала // Известия ОГАУ. 2007. № 15-1. С. 104-106.
50. *Субботин А.И.* Структура половодья и территориальные прогнозы весеннего стока рек в нечерноземной зоне европейской территории России. Л.: Гидрометеоздат, 1978. 98 с.
51. *Фролова Н.Л.* Гидрология рек (антропогенные изменения речного стока). Учебное пособие. М.: Географический ф-т МГУ, 2006. 111 с.
52. *Фролова Н.Л., Агафонова С.А., Нестеренко Д.П., Повалишников Е.С.* Естественная зарегулированность стока рек бассейна Волги в условиях меняющегося климата // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2013. № 6. С. 32-49.
53. *Чурюлин Е.В., Копейкин В.В., Розинкина И.А., Фролова Н.Л., Чурюлина А.Г.* Анализ характеристик снежного покрова по спутниковым и модельным данным для различных водосборов на Европейской территории Российской Федерации // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 2(368). С. 120-143.
54. *Frolova N.L., Kireeva M.B., Magrickiy D.V., Bologov M.B., Kopylov V.N., Hall J., Semenov V.A., Kosolapov A.E., Dorozhkin E.V., Korobkina E.A., Retz E.P., Akutina Y., Djamalov R.G., Efremova N.A., Sazonov A.A., Agafonova S.A., Belyakova P.A.* Hydrological hazards in Russia: origin, classification, changes and risk assessment // Nat Hazards. 2017a. Vol. 88. P. 103-131. DOI: 10.1007/s11069-016-2632-2.
55. *Li K., Huang G., Baetz B.* Development of a Wilks feature importance method with improved variable rankings for supporting hydrological inference and modeling // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2021. Vol. 25. Issue 9. P. 4947-4966. DOI: 10.5194/hess-25-4947-2021.
56. *Merz R., Tarasova L., Basso S.* The flood cooking book: ingredients and regional flavors of floods across Germany // Environmental Research Letters. 2020. Vol. 15. 114024. DOI: 10.1088/1748-9326/abb9dd.
57. *Schmidt L., Heße F., Attinger S., Kumar R.* Challenges in Applying Machine Learning Models for Hydrological Inference: A Case Study for Flooding Events Across Germany // Water resources research. 2020. Vol. 56. DOI: 10.1029/2019WR025924.

References

1. *Avilova K.V., Golosov V.N., Panin A.V., Sidorchuk A.Yu.* Sostoyanie rusel [Condition of the channels]. Malye reki volzhskogo basseina [Small rivers of the Volga basin], Moscow: MGU Publ., 1998, pp. 109-116. [in Russ.].
2. *Alekseevskii N.I., Frolova N.L., Antonova M.M., Igonina M.I.* Otsenka vliyaniya izmenenii klimata na vodnyi rezhim i stok rek basseina Volgi [Assessment of the impact of climate

change on the water regime and runoff of rivers in the Volga basin]. *Voda: khimiya i ekologiya* [Water, climate and ecology]. 2013, no. 4, pp. 3-12. [in Russ.].

3. *Alyushinskaya N.M., Aniskina N.A., Ivashintsova L.D.* Vesennii stok rek basseina Severnoi Dviny i ego prognozy [Spring runoff of rivers in the Northern Dvina basin and its forecasts]. *Trudy GGI* [Proceedings of the GGI]. 1962, vol. 97, pp. 3-138. [in Russ.].

4. Antropogennye vozdeistviya na vodnye resursy Rossii i soprodel'nykh gosudarstv v kontse XX stoletiya [Anthropogenic impacts on the water resources of Russia and neighboring states at the end of the 20th century]. Koronkevich N.I., Zaitseva I.S. (Ed.). Moscow: Nauka Publ., 2003, 367 p. [in Russ.].

5. *Apollova B.A., Kalinin G.P., Komarov V.D.* Kurs gidrologicheskikh prognozov: ucheb [Hydrological Forecast Course: textbook]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1974, 419 p. [in Russ.].

6. *Barabanov A.T.* Zakonomernosti formirovaniya poverkhnostnogo stoka talykh vod, ego prognoz i regulirovanie [Patterns of the formation of the surface runoff of melt water, its forecast and regulation]. *Izvestiya Orenburgskogo gos. agrarnogo un-ta* [Proceedings of the Orenburg State Agrarian University]. 2012, no. 1(33), pp. 65-68. [in Russ.].

7. *Burakov D.A., Litvinova O.S.* Vodno-balansovye zavisimosti dlya prognoza stoka talykh vod na yuge Zapadno-Sibirskoi ravniny [Water-balance dependencies for the forecast of melt water runoff in the south of the West Siberian Plain]. *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and natural resources]. 2010, issue 3, pp. 111-120. [in Russ.].

8. *Bystrov A.V.* Raschet i prognoz poter' talykh vod na vodosborakh levoberezhnoi chasti Nizhnego Dona [Calculation and forecast of melt water losses in the catchment areas of the left-bank part of the Lower Don]. *Trudy GGI* [Proceedings of the GGI]. 1980, issue 265, pp. 83-87. [in Russ.].

9. *Varentsova N.A., Grechushnikova M.G., Povalishnikova E.S., Kireeva M.B., Kharlamov M.A., Frolova N.L.* Vliyanie klimaticheskikh i antropogennykh faktorov na vesennii stok v basseine Dona [Influence of Climatic and Anthropogenic Factors on Spring Runoff in the Don Basin]. *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geogr.* [Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography]. 2021, no. 5, pp. 91-100. [in Russ.].

10. *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

11. *Velikanova T.I.* Vesennii stok i osobennosti ego formirovaniya v usloviyakh severnoi chasti Evropeiskoi territorii SSSR [Spring runoff and features of its formation in the conditions of the northern part of the European territory of the USSR]. *Trudy TsIPA* [Proceedings of the CIP]. 1967, issue 54, pp. 78-100. [in Russ.].

12. *Veretennikova M.V., Zorina E.F., Kovalev S.N., Lyubimov B.P.* Sovremennaya porazhen-nost' ovrazhnoi eroziei zemel' sel'skokhozyaistvennogo fonda i prognoz vozmozhnogo ee raz-vitiya [Spring runoff and features of its formation in the conditions of the northern part of the European territory of the USSR Modern ravine erosion of agricultural land and forecast of its possible development]. *Eroziya pochv i ruslovye protsessy* [Soil erosion and channel processes]. 1998, vol. 11, pp. 103-111. [in Russ.].

13. *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, issue 223, pp. 52-65. [in Russ.].

14. *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, issue 265, pp. 3-30. [in Russ.].

15. *Vladimirov A.M.* Faktory, opredelyayushchie vzniknovenie ekstremal'nykh raskhodov i urovnei vody polovod'ya [Factors Determining the Occurrence of Extreme Flows and High Water

Levels]. *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo un-ta* [Scientific Notes of the Russian State Hydrometeorological University]. 2009, no. 9, pp. 22-39. [in Russ.].

16. Vodnye resursy Rossii i ikh ispol'zovanie [Water resources of Russia and their use]. I.A. Shiklomanova (Ed.). Saint-Petersburg: Gosudarstvennyi gidrologicheskii institut Publ., 2008, 600 p. [in Russ.].

17. *Vodogreetskii V.E.* Antropogennoe izmenenie stoka malykh rek [Anthropogenic change in the runoff of small rivers]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1990, 176 p. [in Russ.].

18. 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.].

19. *Gareev A.M., Zaitsev P.N., Komissarov A.V.* Nekotorye osobennosti izmenchivosti maksimallykh raskhodov vody vesennego polovod'ya v zavisimosti ot vliyaniya stokoformiruyushchikh faktorov (na primere basseinov rek Bashkirskogo Predural'ya) [Some Peculiarities of Variability of Maximum Water Discharges in Spring High Water Depending on the Influence of Runoff Forming Factors (on the Example of River Basins of the Bashkir Cis-Urals)]. *Vestnik Bashkinskogo un-ta* [Bulletin of the Bashkin University]. 2015, no. 2, pp. 478-485. [in Russ.].

20. *Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Milyukova I.P., Barabanova E.A., Kashutina E.A.* So-vremennye i stsennarnye 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.].

21. *Gladkevich G.I., Terskii P.N., Frolova N.L.* Otsenka opasnosti navodnenii na territorii Rossiiskoi Federatsii [Flood risk assessment on the territory of the Russian Federation]. *Vodnoe khozyaistvo Rossii* [Water industry in Russia]. 2012, no. 2, pp. 29-46. [in Russ.].

22. *Golosov V.N., Panin A.V.* Prostranstvenno-vremennye zakonomernosti protsessa degrada-tsii rechnoi seti na Vostochno-Evropeiskoi ravnine [Spatial and temporal regularities of the process of degradation of the river network in the East European Plain]. *Trudy Akademii vodokhozyaistvennykh nauk* [Proceedings of the Academy of Water Science], issue 5. *Gidrologiya i ruslovye protsessy* [Hydrology and channel processes]. 1998, pp. 163-172. [in Russ.].

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

24. *Zmieva E.S.* Vesennii stok v basseine r. Volgi i metod ego prognoza [Spring runoff in the Volga river basin and the method of its forecast]. *Trudy TsIPa* [Proceedings of the CIP]. 1955, issue 39(66), pp. 27-34. [in Russ.].

25. *Ivanova N.N., Golosov V.N., Panin A.V.* Zemledel'cheskoe osvoenie territorii i otmiranie rek evropeiskoi chasti Rossii [Agricultural development of the territory and the dying off of the rivers of the European part of Russia]. *Geomorfologiya* [Geomorphology]. 1996, no. 4, pp. 53-60. [in Russ.].

26. *Kalyuzhnyi I.L., Lavrov S.A.* Gidrofizicheskie protsessy na vodosbore [Hydrophysical processes in the watershed]. Saint-Petersburg: Nestor-Istoriya Publ., 2012, 616 p. [in Russ.].

27. *Kalyuzhnyi I.L., Lavrov S.A.* Vliyanie 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.].

28. *Komarov V.D.* Dolgosrochnyi prognoz vesennego stoka rek chernozemnoi zony Evropeiskoi chasti SSSR na osnove territorial'no obshchikh zavisimostei [Long-term forecast of the spring runoff of rivers in the chernozem zone of the European part of the USSR based on territorially common dependencies]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1955, 74 p. [in Russ.].

29. *Komarov V.D.* Vesennii stok ravninnykh rek evropeiskoi chasti SSSR, usloviya ego for-mirovaniya 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.].

30. *Krestovskii O.I.* Opyt rascheta i prognoza elementov vodnogo balansa vesennego polovo-d'ya basseina r. Vyatki [Experience in calculating and predicting the elements of the water balance of the spring flood in the basin of the Vyatka river]. *Trudy GGI* [Proceedings of the GGI]. 1977, issue 233, pp. 3-14. [in Russ.].

31. *Kuznik I.A.* Agrolesomeliativnye meropriyatiya, vesennii stok i eroziya pochv [Agroforestry measures, spring runoff and soil erosion]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1962, 220 p. [in Russ.].

32. *Leonovich I.I., Vyrko N.P., Demidko M.N.* Statisticheskii metod opredeleniya glubiny promerzaniya gruntov [Statistical method for determining the depth of soil freezing]. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU]. 2015, no. 2, pp. 27-31, available at: <https://rep.bntu.by/handle/data/47635>. [in Russ.].

33. *Linslei R.K., Koler M.A., Paulyus D.L.Kh.* Prikladnaya gidrologiya [Applied hydrology]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1962, 759 p. [in Russ.].

34. *Makarova T.T.* Issledovanie formirovaniya vesennego polovod'ya po metodu vodnogo balansa (na primere r. Mologi) [Study of the formation of spring floods using the water balance method (on the example of the Mologa River)]. *Trudy TsIP* [Proceedings of the CIP]. 1950, issue 22(49), pp. 53-84. [in Russ.].

35. *Makarova T.T.* Issledovanie uslovii formirovaniya vesennego stoka r. Kamy i metodika ego prognoza [Study of the conditions for the formation of the spring runoff of the Kama river and the method of its forecast]. *Trudy TsIP* [Proceedings of the CIP]. Moscow: Gidrometeoizdat Publ., 1955, issue 39(66), pp. 15-22. [in Russ.].

36. *Mishon V.M., Bolgov M.V., Sentsova N.I.* Bassein Verkhnego Dona: vodnye resursy, gidrologiya, gidrografiya [The Upper Don basin: water resources, hydrology, hydrography]. *Tr. NII Geologii VGU* [Proceedings of the Research Institute of Geology VSU], issue 26, Voronezh: Voronezh State University Publ., 2005a, 139 p. [in Russ.].

37. *Mishon V.M., Bolgov M.V., Sentsova N.I.* Gidrologicheskoe obosnovanie vodokhozyaistven-nykh 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, 2005b, pp. 74-75. [in Russ.].

38. 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.].

39. *Molchanov A.A.* Gidrologicheskaya rol' osnovnykh lesov na peschanykh pochvakh [Hydrological role of pine forests on sandy soils]. Moscow: AN SSSR Publ., 1952, 488 p. [in Russ.].

40. *Parshin V.N., Salov M.S.* Vesennii stok v basseine reki Don i ego predvychnislenie [Spring runoff in the Don river basin and its prediction]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1955, 103 p. [in Russ.].

41. *Perminov A.V., Smirnova M.A.* Otsenka vnutrigodovogo raspredeleniya rechnogo stoka v basseine Verkhnei Volgi [Assessment of the intra-annual distribution of river runoff in the Upper Volga basin]. *Vestnik FGOU VO MGAU* [Herald FGOU VO MSAU]. 2014, no. 3, pp. 30-34. [in Russ.].

42. *Popov E.G.* Voprosy teorii i praktiki prognozov rechnogo stoka [Issues of theory and practice of river runoff forecasts]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1963, 395 p. [in Russ.].

43. Prognoz klimaticheskoi resursoobespechennosti Vostochno-Evropeiskoi ravniny v uslo-viyakh potepeniya XXI veka [Forecast of climatic resource availability of the East European Plain in the conditions of warming of the 21st century]. A.V. Kislova, V.M. Evstigneeva, S.M. Malkhazovoi, N.N. Sokolikhinnoi, G.V. Surkovoii, P.A. Toropova, A.V. Chernysheva, A.N. Chumachenko (Eds.). Moscow: MAKS Press Publ., 2008, 292 p. [in Russ.].

44. *Razumova L.A.* Sezonnaya merzlota i vlazhnost' pochvy na Evropeiskoi territorii SSSR [Seasonal permafrost and soil moisture in the European territory of the USSR]. *Trudy TsIP* [Proceedings of the CIP], issue 51, Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1953, 352 p. [in Russ.].

45. *Rakhmanov V.V.* Vodookhrannaya rol' lesov [Water protection role of forests]. Moscow: Goslesbumizdat Publ., 1962, 235 p. [in Russ.].

46. Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam. Vyp. 1. Dolgosrochnye prognozy elementov vodnogo rezhima rek i vodokhranilishch [Manual of Hydrological Forecasts. Issue. 1. Long-term forecasts of elements of the water regime of rivers and reservoirs]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1989, 248 p. [in Russ.].

47. Safina G.R., Golosov V.N. Vliyanie izmenenii klimata na vnutrigodovoe raspredelenie stoka mal'kikh 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 Estestvennye nauki* [Scientific notes of Kazan University. Series Natural Sciences]. 2018, no. 1, pp. 111-125. [in Russ.].

48. Sokolov A.A. O vliyaniy lesa na maksimal'nyi stok vesennego polovod'ya [On the influence of the forest on the maximum runoff of the spring flood]. *Trudy GGI* [Proceedings of the GGI]. 1962. № 99. pp. 79-140. [in Russ.].

49. Solomatin N.V., Valieva Zh.A., Geide E.G. Antropogennye izmeneniya v formirovaniy stoka na vodosborakh Yuzhnogo Urala [Anthropogenic changes in runoff formation in the watersheds of the Southern Urals]. *Izvestiya OGAU* [News OGAU]. 2007, no. 15-1, pp. 104-106. [in Russ.].

50. Subbotin A.I. Struktura polovod'ya i territorial'nye prognozy vesennego stoka rek v nechernozemnoi zone evropeiskoi territorii Rossii [Flood Structure and Territorial Forecasts of Spring River Runoff in the Non-Chernozem Zone of European Russia]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1978. 98 p. [in Russ.].

51. Frolova N.L. Gidrologiya rek (antropogennye izmeneniya rechnogo stoka). Uchebnoe posobie [Hydrology of rivers (anthropogenic changes in river flow). Tutorial]. Moscow: Faculty of Geography MSU Publ., 2006. 111 p. [in Russ.].

52. Frolova N.L., Agafonova S.A., Nesterenko D.P., Povalishnikova E.S. Estestvennaya zare-gulirovannost' stoka rek basseina Volgi v usloviyakh menyayushchegosya klimata [Natural regulation of the flow of rivers in the Volga basin in a changing climate]. *Vodnoe khozyai-stvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie* [Water management in Russia: problems, technologies, management]. 2013, no. 6, pp. 32-49. [in Russ.].

53. Churyulin E.V., Kopeikin V.V., Rozinkina I.A., Frolova N.L., Churyulina A.G. Analiz kharak-teristik snezhnogo pokrova po sputnikovym i model'nym dannym dlya razlichnykh vodosbo-rov na Evropeiskoi territorii Rossiiskoi Federatsii [Analysis of Snow Cover Characteristics Based on Satellite and Model Data for Various Watersheds in the European Territory of the Russian Federation]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological research and forecasts]. 2018, no. 2(368), pp. 120-143. [in Russ.].

54. Frolova N.L., Kireeva M.B., Magrickiy D.V., Bologov M.B., Kopylov V.N., Hall J., Semenov V.A., Kosolapov A.E., Dorozhkin E.V., Korobkina E.A., Rets E.P., Akutina Y., Djamalov R.G., Efremova N.A., Sazonov A.A., Agafonova S.A., Belyakova P.A. Hydrological hazards in Russia: origin, classification, changes and risk assessment. *Nat Hazards*. 2017, vol. 88, pp. 103-131. DOI: 10.1007/s11069-016-2632-2

55. Li K., Huang G., Baetz B. Development of a Wilks feature importance method with improved variable rankings for supporting hydrological inference and modelling. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2021, vol. 25, issue 9, pp. 4947-4966. DOI: 10.5194/hess-25-4947-2021

56. Merz R., Tarasova L., Basso S. The flood cooking book: ingredients and regional flavors of floods across Germany. *Environmental Research Letters*. 2020, vol. 15, 114024. DOI: 10.1088/1748-9326/abb9dd.

57. Schmidt L., Heße F., Attinger S., Kumar R. Challenges in Applying Machine Learning Models for Hydrological Inference: A Case Study for Flooding Events Across Germany. *Water resources research*. 2020, vol. 56. DOI: 10.1029/2019WR025924.

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.