

Генетическая гидрология: механизмы формирования стока в новых условиях

Н. И. Коронкевич*, Е. А. Барабанова*,
А. Г. Георгиади*, С. В. Долгов*, И. С. Зайцева*,
Е. А. Кашутина*, И. П. Милюкова*

Рассмотрена суть генетической гидрологии. Приведены примеры ошибочных гидрологических решений, неверно учитывающих генезис гидрологических явлений и процессов. Обращено внимание на недостаточно изученные, во многом дискуссионные вопросы определения генезиса ряда гидрологических изменений на российской территории Русской равнины и гидрологической роли ряда факторов, повлиявших на эти изменения, такие как оценка изменений стока крупных рек и регионов Российской Федерации в XXI в. по сравнению с нормами стока за 1895—1960 и 1930—1980 гг.; современные особенности формирования склонового и речного стока в лесостепной и степной зонах Русской равнины в условиях изменения ландшафтной структуры и климата; влияние трансформации площади, занятой лесом, и его возраста на территории Русской равнины; динамика водозабора и безвозвратного расхода воды в России, ее европейской и азиатской частях. Также рассмотрена чувствительность речного стока к изменениям количества атмосферных осадков и температуры воздуха в условиях многолетней мерзлоты на примере бассейна Вилюя.

Ключевые слова: речной и склоновый сток, температура, осадки, изменения, генезис, антропогенные и климатические факторы, Россия, Русская равнина, XXI в.

DOI: 10.52002/0130-2906-2025-4-51-66

1. Введение

Под генетической гидрологией понимается выявление причин формирования стока и его изменений на основе проверенных исходных данных и методов исследования различных гидрологических характеристик в противовес формально статистическим подходам, часто исходящим из ложных показателей и связей. В истории немало случаев, когда на основании недостоверных данных или методов расчета были получены ложные результаты. Так, М. И. Львович [24], анализируя одну из работ, посвященных оценке влияния лесистости на годовой речной сток на территории Русской равнины и доказывающих, что годовой сток растет с увеличением залесенности территории, показал, что выявленная зависимость — зависимость стока от географической широты местности, поскольку лесистость

* Институт географии Российской академии наук; e-mail: koronkevich@igras.ru (Коронкевич Николай Иванович).

на территории Русской равнины возрастает с юга на север в соответствии с географической зональностью, но одновременно растет и сток в связи с увеличением количества осадков и уменьшением испаряемости. В дальнейшем разные авторы для выявления гидрологической роли лесов все больше старались определять ее при равенстве прочих факторов. Это правило правомерно и для выявления гидрологической роли других факторов, однако оно не всегда соблюдается, в том числе и в ряде работ последнего периода времени. Другой пример — оценка влияния уклона склона на сток. Общераспространенное мнение об увеличении стока с ростом уклона не всегда справедливо: то есть рост стока в чистом виде очевиден, но в реальных условиях большее влияние оказывает механический состав почвы. Как показано в работе [20], на суглинистых и глинистых почвах на участках с большим уклоном сток действительно всегда больше, причем тем больше, чем сильнее они смыты. А на супесчаных и песчаных почвах на участках с большими уклонами более интенсивно происходило вымывание самых мелких частиц почвогрунтов, оставшаяся более крупная их механическая фракция обладает повышенными инфильтрационными свойствами, способствуя уменьшению стока.

Распространено мнение, что поверхностная составляющая речного стока — это сток по поверхности почвы, тогда как в лесной зоне значительную ее часть составляет сток верховодки, имеющей место ниже поверхности почвы (на что обращено внимание в работе [19]).

В практике расчетов влияния неорошаемого земледелия на сток и водный баланс часто фигурирует такой фактор, как распашка территории. Строятся зависимости стока от ее величины, но при этом не учитывается, что при одной и той же площади распашки влияние на сток может быть диаметрально противоположным. В условиях нашей страны осенняя пахота (зябь) приводит к уменьшению стока весеннего половодья, так как почва в разрыхленном состоянии обладает повышенными инфильтрационными свойствами. А при распашке весной сток происходит по уплотненной за зиму почве, что существенно увеличивает его по сравнению со стоком при зяблевой пахоте. Это хорошо показано в ряде работ [3, 19, 24].

Приведем пример из области водопотребления. Один из авторов, анализируя данные водохозяйственной статистики, пришел к выводу, что за очень короткий период объем загрязненных сточных вод в СССР резко возрос и это свидетельствует о деградации водного хозяйства в стране. Однако он не учел, что незадолго до появления его работы в СССР было принято решение о переводе в статистическом учете части условно чистых вод в разряд загрязненных, т. е. на самом деле объем действительно загрязненных вод практически не изменился.

В последние десятилетия широкое распространение получило физико-математическое моделирование речного стока. Но нередко отдельные работы дают противоречивые результаты при оценке происходящих и особенно прогнозируемых изменений речного стока. Хорошо известна работа М. И. Будыко [4], в которой он смоделировал прогноз изменения стока на европейской части страны к 2020 г. И если результаты для центра и юга этой территории оказались довольно близки к современным, то для северных районов прогнозируемое увеличение стока в 2—3 раза явно не оправ-

далось. Конечно, современные модели основаны на лучшем знании закономерностей формирования гидрологического цикла, но, как отмечено выше, и эта информация нуждается в дальнейшем совершенствовании, в том числе в уточнении исходной информации и в оценке влияния различных факторов на сток. Отметим, что этому в значительной мере препятствует существенное сокращение сети гидрометрических станций по сравнению с советским периодом и не всегда высокое качество определения расходов воды.

Остановимся на нескольких аспектах гидрологических расчетов, механизмах формирования стока, которые лежат в русле генетической гидрологии, но являются во многом дискуссионными.

2. Исходные данные и методы исследования

Использованы данные о речном стоке, содержащиеся в Водном кадастре Российской Федерации [29], в работах [6—8], данные о склоновом стоке [3, 19]. Основу сведений об использовании водных ресурсов составили данные, содержащиеся в указанных выше ежегодниках Водного кадастра, в государственных докладах о состоянии окружающей среды и водных ресурсов, в частности в докладе [25]. Информация о структуре ландшафтов, площади угодий почерпнута из различных статистических справочников. Ценную информацию дал анализ целого ряда литературных источников.

Основные методы исследования — сравнительный географо-гидрологический метод, разные вариации воднобалансового метода — более детально освещены далее.

3. Основные результаты и их обсуждение

3.1. Изменение речного стока России в XXI веке

В табл. 1 представлены средние многолетние значения стока ряда крупных речных бассейнов, характеризующих северную и южную части Европейской России, европейскую часть России (ЕЧР) в целом, азиатскую часть страны (АЧР), сток всех рек России за периоды 1895—1960 гг. (норма стока по данным [6, 8]), 1930—1980 гг. (средний многолетний сток по данным ежегодника [29]), 2001—2022 гг., т. е. начало XXI в. [29]. Сток представленных рек (европейской и азиатской частей страны) составляет около 60% суммарного стока рек России.

Как видно, сток всех рек России в 2001—2022 гг. почти на 7% превышает норму стока за 1895—1960 гг. и близкую к ней по величине норму стока за 1930—1980 гг. (по данным суммирования стока выбранных рек европейской и азиатской территории соответственно почти на 5,5 и 5,3%), главным образом, за счет рек севера ЕЧР и азиатской части страны, тогда как для юга ЕЧР выявлено уменьшение стока, особенно по сравнению с нормой 1895—1960 гг. Из отдельных рек в аспекте увеличения стока выделяются Онега и Печора, Лена и Колыма, а его уменьшения — Дон, Урал, Кубань. Для рек азиатской части России в целом характерно увеличение стока, за исключением Амура.

Таблица 1

**Средний годовой сток в 2001—2022 гг. по сравнению со средним
многолетним стоком в 1895—1960 и 1930—1980 гг. [6, 8, 29]**

Река — створ	Сток, км ³ /год			Изменение, по сравнению с			
				1895—1960 гг.		1930—1980 гг.	
	1895— 1960 гг.	1930— 1980 гг.	2001— 2022 гг.	км ³	%	км ³	%
Нева — устье	79,7	74,3	79,1	–0,6	–0,8	4,8	6,4
Онега — с. Порог	15,5	15,1	17,6	2,1	13,7	2,5	16,7
Печора — устье	130	129	142	12	9,6	13	10,4
Северная Двина — устье	110	101	105	–5	–4,1	4	4,4
Мезень — устье	27,9	27,2	28,4	0,5	1,6	1,2	4,3
Реки севера ЕЧР, сумма	363	347	373	10	2,7	26	7,6
Дон — станица Раздорская	27,5	25,3	17,2	–10,3	–37,5	–8,1	–32,0
Кубань — устье	13,2	13	11,1	–2,1	–16,2	–1,9	–14,9
Терек — станица Котляревская	4,6	4,4	4,4	–0,2	–5,3	–0,03	–0,6
Сулак — с. Миатлы	5,5	5,6	5,7	0,2	2,9	0,05	0,9
Волга — с. Верхнее Лебяжье	248	227	236	–12	–4,9	9	3,9
Урал — с. Кушум	11,3	9,7	7,4	–3,9	–34,4	–2,3	–23,5
Реки юга ЕЧР, сумма	310	285	282	–29	–9,2	–3,4	–1,2
Реки ЕЧР, сумма	673	632	655	–19	–2,8	23	3,6
Обь — г. Салехард	390	405	417	27	7,0	12	3,0
Енисей — г. Игарка	568	572	609	41	7,2	37	6,4
Лена — устье	508	537	597	89	17,6	60	11,2
Колыма — п. Усть-Среднекан	23	23,1	27,5	4,5	19,5	4,4	19,0
Амур — г. Комсомольск-на-Амуре	308	306	300	–8	–2,6	–6	–1,9
Реки АЧР, сумма	1797	1843	1951	154	8,6	108	5,8
Все рассматриваемые реки, сумма	2470	2475	2606	136	5,5	132	5,3
Все реки России, сумма	4197	4224	4517	320	7,1	293	7,0

Очевидно, что главной причиной отмеченного изменения речного стока в большинстве случаев следует считать климатические флуктуации, условно полагая их естественное происхождение, роль антропогенных факторов остается в значительной мере недостаточно изученной, хотя можно уверенно говорить, что она существенна, особенно в отношении стока рек юга ЕЧР.

3.2. Особенности реакции стока на современные изменения ландшафтной структуры и климатических условий в лесостепной и степной зонах Русской равнины

В последние десятилетия произошли существенные изменения в ландшафтной структуре водосборов (в соотношении площадей под сельскохозяйственными угодьями, лесами и урбанизированными территориями). Трансформация ландшафтов в лесостепи и степи Русской равнины во многом обусловлена сельскохозяйственным воздействием, поскольку сельскохозяйственными угодьями занята большая часть территории. Так, в бассейне Дона она достигла 78%, в Белгородской и Курской областях около 80%, в том числе пашня — 60—65%, и на их территории изменились структура посевов и характер обработки почвы. За последние десятилетия выросла площадь урбанизированных территорий (практически в 2 раза),

способствующих увеличению стока, особенно в летний период. Она составляет в среднем по бассейну Дона 3,4% (в Белгородской области — 4,5%, в Курской — 4,1%) и практически сравнялась с площадью залесенных участков, поверхностный сток с которых близок к нулю (в среднем по бассейну Дона — 3,3%, в Белгородской и Курской областях — 4,2%) [16], оставаясь таким все время. В ландшафтные изменения условий формирования стока существенные коррективы вносят и значительные изменения климата.

Информационной основой изучения закономерностей формирования поверхностного склонового стока служат наблюдения на воднобалансовых (стоковых) станциях, расположенных на речных водосборах. К сожалению, в 1980—1990-е годы и без того небольшое число таких стационаров (в СССР оно не превышало 30, находились они в подчинении различных организаций и ведомств) резко уменьшилось, а на оставшихся стационарах наблюдения проводятся по существенно сокращенной программе. В связи с этим особую ценность представляют сохранившиеся в степной и лесостепной зонах воднобалансовые стационары ФНЦ агроэкологии РАН с длительными периодами репрезентативных наблюдений (более 50 лет).

В качестве исходной информации использовались результаты гидрологических [1] и метеорологических [9] наблюдений Росгидромета, данные Новосильского, Поволжского, Волгоградского воднобалансовых стационаров ФНЦ агроэкологии РАН [2, 3] и материалы наблюдений Нижнедевицкой воднобалансовой станции. Для выявления современных особенностей ландшафтной структуры рассматриваемой территории анализировались также сведения Росреестра и Росстата.

Расчет весеннего поверхностного склонового стока с сельскохозяйственных угодий выполнен с учетом наиболее контрастных по условиям формирования стока угодий. Анализировались поля под зябью (осенняя пахота) и с уплотненной к началу половодья почвой (озимые, многолетние травы, залежи и пастбища).

В гидрологическом отношении важную роль играет изменение площадей под зяблевой вспашкой с разрыхленной к началу половодья почвой, поскольку весенний поверхностный сток с таких полей существенно меньше, чем с нераспаханных полей, — в 1,5 раза и более в лесостепной зоне и в 4—5 раз в степной.

Площадь зяблевой пахоты значительно увеличилась в период с конца XIX в. до начала 1980-х годов на фоне относительно однородных климатических условий. В 1960—1970 гг. осенью распахивалось до 50% всей водосборной площади Дона. Зяблевая вспашка привела к существенному уменьшению весеннего поверхностного склонового стока. По сравнению с периодом исчисления нормы речного стока по К. П. Воскресенскому [8], склоновый сток в северной части лесостепи уменьшился на 20%, в центральной лесостепи — в 1,5 раза, а в степной зоне — почти в 6 раз [16].

Впоследствии площадь зяби сократилась и составила в среднем по рассматриваемой территории 37% (1978—2013 гг.). При этом доля угодий с уплотненной к началу половодья почвой достигла 41%. Во многом это было обусловлено увеличением посевной площади озимых культур, обладающих большей урожайностью по сравнению с яровыми культурами. Другая причина заключается в уменьшении самой посевной площади, по-

сколько выводимые из севооборотов угодья характеризуются в основном уплотненной почвой.

Такие ландшафтные изменения способствуют современному увеличению поверхностного склонового стока. Например, расчеты для территории Курской области показали, что в результате лишь уменьшения площади пашни (без учета изменений структуры посевов) объем весеннего склонового стока должен был бы увеличиться в последнее десятилетие на 9—12%. Однако увеличения склонового стока не произошло. Возобладало влияние изменившихся климатических условий. Так, для района Новосильской зональной агролесомелиоративной опытной станции их вклад в произошедшие за последние десятилетия изменения склонового стока составил 85%, а вклад антропогенной составляющей — лишь 15% [3].

Из обобщения данных Росгидромета следует, что в многолетней динамике (1966—2022 гг.) как годовой суммы осадков, так и количества осадков в холодный и теплый периоды отчетливо выраженные тренды отсутствуют [10, 14, 16].

Наиболее важным фактором уменьшения стока стало повышение температуры воздуха. Вследствие этого в холодный период года и вследствие улучшения условий инфильтрации весенний поверхностный сток значительно сократился (на 60—80% на пологих склонах сельскохозяйственных угодий, а в отдельные годы до нуля). В то же время он возрос на урбанизированных площадях. Как следует из работы [21], в бассейне Дона, расположенном в основном в лесостепной и степной зонах, общий склоновый сток с сельскохозяйственных и урбанизированных площадей уменьшился с $9,1 \text{ км}^3/\text{год}$ в период исчисления нормы стока по данным работы [8] до $7\text{—}7,5 \text{ км}^3/\text{год}$ в 1930—1980 гг. и до $5,4\text{—}5,8 \text{ км}^3/\text{год}$ в начале XXI в. В целом поверхностный сток стал формироваться преимущественно в речных долинах, оврагах и балках. Климатические изменения привели также к значительному уменьшению стока весеннего речного половодья — в апреле на 40—50%, в мае на 20—50% (рис. 1).

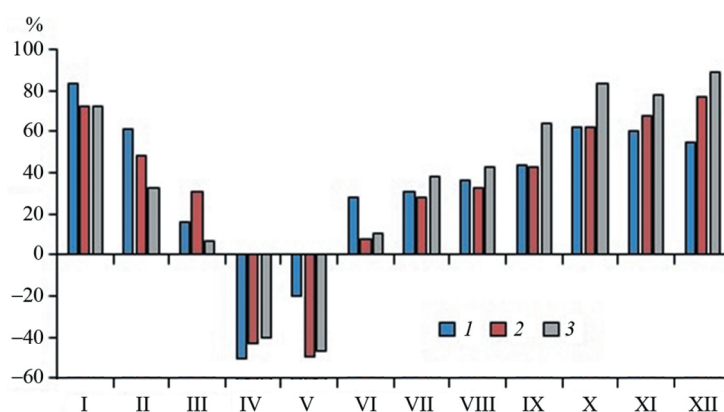


Рис. 1. Изменение среднемесячного стока р. Дон за 1981—2016 гг. в разных створах относительно нормы за 1930—1980 гг.: 1 — г. Лиски; 2 — г. Калач-на-Дону; 3 — станица Раздорская.

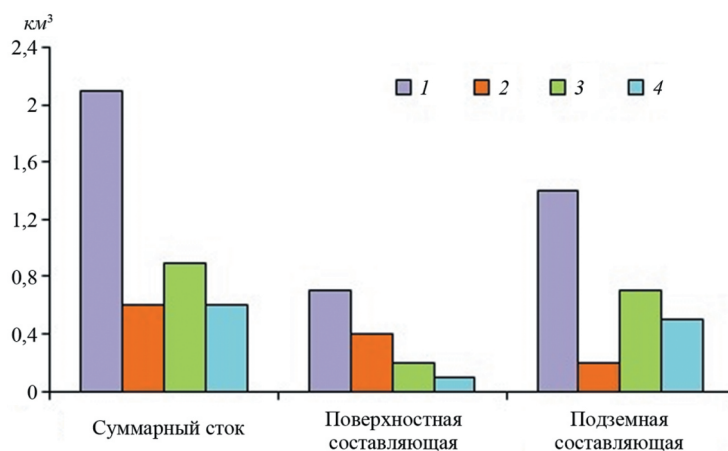


Рис. 2. Годовой сток Белгородской области и его внутригодовое распределение в среднем за 2008—2021 гг.: 1 — год в целом; 2 — половодье; 3 — лето — осень; 4 — осень — зима.

Характерной тенденцией с начала 1980-х годов стало существенное увеличение (на 15—20%) интенсивности нисходящего инфильтрационного потока влаги, что способствовало увеличению дренируемого реками подземного стока (на 35—45%); доля подземной составляющей в суммарном годовом стоке достигла 65—75% (рис. 2).

Таким образом, на современном этапе изменения ландшафтной структуры речных водосборов и климатических условий в лесостепной и степной зонах Русской равнины действуют на весенний поверхностный склоновый и речной сток разнонаправленно. Сокращение посевной площади и увеличение площади угодий с уплотненной к началу половодья почвой (озимых, залежей и др.), увеличение урбанизированных площадей не привели к увеличению стока. Произошли кардинальные, не имеющие аналогов за весь период инструментальных наблюдений климатические изменения в структуре весеннего водного баланса на водосборах. Повышение температуры воздуха в холодный сезон, сопровождавшееся участившимися оттепелями, привело в целом к уменьшению глубины промерзания почвогрунтов зоны аэрации, к снижению запасов воды в снеге перед началом весеннего половодья и к значительному сокращению поверхностного склонового стока, к увеличению инфильтрации талых и дождевых вод в почву во время оттепелей и весеннего половодья, способствуя увеличению подземной составляющей речного стока. Ее доля в суммарном годовом речном стоке существенно возросла. За последние 15 лет она достигла в лесостепной зоне 60—65% и более (в Курской и Белгородской областях).

Несмотря на уменьшение водозабора, результатом совместного воздействия ландшафтных и климатических изменений стало значительное сокращение годового речного стока. На Нижнем Дону сток в 1981—2022 гг. уменьшился более чем на 30% по сравнению с нормами 1895—1960 и 1930—1980 гг. (табл. 1).

3.3. Оценка влияния динамики возраста леса и лесистости на изменения стока в пределах российской части Русской равнины

В большинстве гидрологических и водохозяйственных расчетов фактор леса не принимается во внимание. Вместе с тем в работе [22] обосновано, что изменение возраста леса и занимаемой им площади может не только регулировать годовую величину стока, но и существенно влиять на нее. По данным работы [22], после вырубки или лесного пожара сток практически мгновенно возрастает, в подзоне южной и средней тайги достигая максимально 165% зональных показателей стока. Затем по мере восстановления леса испарение увеличивается, а сток уменьшается. При возрасте леса около 25 лет сток уменьшается до зональных значений, далее продолжая сокращаться вплоть до достижения лесом возраста 50 лет (сток уменьшается до 0,55 от его зональных значений), после чего по мере приближения к возрасту спелости испарение с леса уменьшается, а сток начинает расти, достигая к 100 годам зонального. После достижения лесом столетнего возраста увеличение стока с леса замедляется, достигая 1,12 зонального стока к 160-летнему возрасту.

Используя эти количественные соотношения, более детально представленные в работе [22] (рис. 4.1, табл. 4.1), авторы попытались оценить изменения стока на территории Русской равнины в результате трансформации лесистости территории и возраста леса за период 1973—2023 гг. при прочих равных условиях. Расчеты выполнены для субъектов Российской Федерации. Информация о лесистости и среднем возрасте лесов на 1 января 1973 г. опубликована в книге [23]. Новейшие доступные данные о возрасте лесов (в зависимости от региона с 1 января 2018 г. по 1 января 2024 г.) приведены в действующих на настоящий момент Лесных планах административных единиц, а также в формах территориальной отчетности № 2-ГЛР “Распределение площади лесов и запасов древесины по преобладающим породам и группам возраста”. Данные о лесистости на 2023 г. получены с сайта Единой межведомственной информационно-статистической системы (ЕМИСС) (<https://www.fedstat.ru/>).

Все современные данные формально отнесены к 2023 г., поскольку имеющаяся для ряда областей погодичная лесная статистика свидетельствует о незначимости изменений в возрастной структуре лесов за самые последние годы. Годовой речной сток в 1973 г. в пределах административных единиц принят равным средним многолетним значениям, приведенным в работе [6].

Допуская, что речной сток трансформировался только в результате изменения возраста и площади лесов, предлагается следующий алгоритм расчета, представленный на примере Тверской области.

1. По данным работы [6] определяется норма стока (зональный сток) для 1973 г. Для Тверской области она равна 222 мм. При этом имеется в виду, что зональный сток складывается из стока с лесных участков и стока с нелесных (полевых) участков с учетом занимаемых ими площадей.

2. По соответствующим справочникам находится площадь, занятая лесом: в 1973 г. — 37,6% всей территории, а в 2023 г. — 54,7% (т. е. пло-

щадь лесных участков увеличилась на 17,1%). При этом площадь полевых участков сократилась с 62,4 до 45,3%, а средний возраст леса увеличивается с 39 до 49 лет.

3. По данным работы О. И. Крестовского ([22], табл. 4.1, рис. 4.1)), приведенным и в работе [18], определяется соотношение стока с леса и зонального стока. При возрасте леса 39 лет оно равно 0,643.

4. В 1973 г. сток с леса равен $222 \text{ мм} \cdot 0,643 = 143 \text{ мм}$. Сток с поля X определяется из уравнения $143 \cdot 37,6\% + X \cdot 62,4\% = 222 \text{ мм} \cdot 100\%$, откуда $X = 270 \text{ мм}$.

5. Как отмечено выше, средний возраст леса в 2023 г. составил 49 лет. Эта величина складывается из возраста леса на его “старой” площади и на “новой”. Исходя из гипотезы о равномерном изменении лесистости в течение 50 лет средний возраст леса на “новой” площади составил 25 лет. Отсюда средний возраст леса на “старой” площади Y определяется по уравнению $25 \text{ лет} \cdot 17,1\% + Y \text{ лет} \cdot 37,6\% = 49 \text{ лет} \cdot 54,7\%$, из которого следует, что $Y = 60 \text{ лет}$.

6. По указанным выше данным О. И. Крестовского соотношение стока со “старой” лесной площади и зонального стока при возрасте леса 60 лет равно 0,58. Отсюда сток со “старой” лесной площади равен $222 \text{ мм} \cdot 0,58 = 129 \text{ мм}$. На “новой” залесенной площади он практически равен зональному стоку с коэффициентом 0,975, т. е. $222 \text{ мм} \cdot 0,975 = 216 \text{ мм}$.

7. Находим средневзвешенный сток со всей территории Тверской области в 2023 г.: $270 \text{ мм} \cdot 45,3\%$ (сток с поля) + $129 \text{ мм} \cdot 37,6\%$ (сток со “старого” леса) + $216 \text{ мм} \cdot 17,1\%$ (сток с “нового” леса) : $100\% = 208 \text{ мм}$.

То есть по сравнению с 1973 г. сток с территории Тверской области под влиянием изменения возраста и площади леса в 2023 г. оказался на 14 мм (или на 6%) меньше. Это, конечно, ориентировочная величина, но она свидетельствует о возможности существенного влияния состояния лесов на речной сток.

За последние 50 лет в пределах российской части Русской равнины в большинстве регионов лесистость увеличилась, более всего — в центральной и северной частях территории, относящейся к лесной зоне. Более всего лесистость увеличилась в Тверской области — на 17%, в Смоленской, Ярославской областях и Республике Марий Эл — на 9—10%, в Новгородской и Нижегородской областях, в Республике Карелия — на 6—8%, во Владимирской, Свердловской, Кировской, Костромской и Ивановской областях, в Пермском крае — примерно на 5%. В этой же зоне отмечаются максимальные показатели лесистости. В Костромской области в 2023 г. лесистость составляла более 73%, в Республике Коми, в Пермском крае, Свердловской, Вологодской, Новгородской и Кировской областях — более 60%. В лесостепной и степной зонах лесистость почти не изменилась (0—1%). В среднем с 1973 по 2023 г. лесистость в пределах российской части Русской равнины увеличилась с 29,6 до 32,5% площади.

Самые старые леса к 2023 г. сохранились в Архангельской области и в Республике Коми (средний возраст свыше 100 лет). Средний возраст лесов большинства других регионов в 2023 г. находился в диапазоне 40—80 лет. За последние 50 лет произошло относительное выравнивание среднего возраста леса на рассматриваемой территории: сокращение среднего воз-

раста в северных и восточных регионах и увеличение среднего возраста в большинстве других регионов.

Расчетный годовой сток за счет изменения возраста леса и лесистости территории в 2023 г. по сравнению с 1973 г. уменьшился в лесной зоне в среднем на 10—11 мм, что составляет около 4% стока на северном макросклоне Русской равнины и около 6% в пределах южного макросклона. Для отдельных регионов изменения еще больше. Например, в Пермском крае оцененное сокращение стока достигло 17%, что требует дополнительных исследований, как и вообще затронутая тема. Вместе с тем уже выполненные расчеты свидетельствуют о том, что учет лесного фактора может существенно изменить многие представления о генезисе происходящих изменений речного стока.

3.4. Изменения интенсивности водохозяйственного использования водных ресурсов Российской Федерации в последние десятилетия

В конце XX в. — начале XXI в., согласно водохозяйственным справочникам, произошли существенные изменения интенсивности антропогенных воздействий на водные ресурсы России, связанные с кризисными явлениями в экономике и с перестройкой ее структуры после распада СССР. В первую очередь это выразилось в существенном снижении основных показателей использования воды — объема забора воды из природных источников, величины сброса сточных вод в поверхностные природные объекты и безвозвратного расхода воды (рассчитываемого по разнице водозабора и объема сточных вод) (табл. 2). В динамике использования водных ресурсов в России четко выделяются периоды, существенно различающиеся по величине и интенсивности антропогенной нагрузки. С начала 1960-х годов, когда начался систематизированный учет использования воды, до середины 1970-х годов наблюдалось быстрое увеличение водопотребления, а затем оно было довольно стабильным с некоторой тенденцией роста к 1990 г., с 1991 по 2000 г. — период резкого уменьшения показателей

Таблица 2

Изменения основных показателей использования воды в Российской Федерации по периодам

Показатель	Период, годы		
	1975—1990	1991—2000	2001—2022
Забор воды из природных источников, всего, км ³ /год	108	93,3	74,1
Использовано свежей воды, км ³ /год	98,2	76,8	57,3
Сброшено сточных вод в поверхностные природные водоемы, всего, км ³ /год	74,9	61,6	45,8
Общий безвозвратный расход, км ³ /год	33,1	31,7	28,3
Безвозвратный расход в процессе использования, км ³ /год	23,3	15,2	11,5
Объем оборотной и последовательно используемой воды, км ³ /год	133	141	139
Количество отчитывающихся водопользователей, тыс. объектов	41,9	51,3	36,7

использования воды во всех отраслях водного хозяйства и период с начала XXI в. — замедление темпов падения и даже в последние годы некоторое стремление к стабилизации и росту.

В период 1975—1990 гг. забор воды из природных источников колебался в пределах от 107 до 116 км³/год (максимальная величина за весь период наблюдений), использование свежей воды изменялось от 94 до 100 км³/год, сброс сточных вод колебался в пределах 67—80 км³/год, безвозвратный расход в пределах 31—41 км³/год. В период 1991—2000 гг. при средних значениях водозабора немногим более 90 км³/год его значения снижались со 116 до 86 км³/год, использование воды с 95 до 67, сброс сточных вод с 73 до 56, безвозвратный расход с 41 до 30 км³/год. Доля общего безвозвратного расхода в объеме водозабора в рассматриваемые периоды колебалась в пределах 30—40%.

При рассмотрении динамики использования воды важно иметь в виду такой показатель, как количество отчитывающихся водопользователей. Число объектов, предоставляющих отчеты по водопользованию, сначала неуклонно увеличивалось до 51,3 тыс. в 1995 г. После этого наблюдалось уменьшение до порядка 40 тыс., или на 20%, к 2008 г., а после принятия приказа Росстата 2009 г. “Об утверждении статистического инструментария для организации Росводресурсами федерального статистического наблюдения об использовании воды”, когда часть мелких водопользователей была освобождена от статистической отчетности, число респондентов сократилось и в самые последние годы колеблется в пределах 26—29 тыс. объектов.

Наряду с этим фактором уменьшение основных показателей использования воды, несомненно, связано с экономическим кризисом после распада СССР, выразившимся в снижении промышленного производства, особенно наиболее водоемких предприятий, в сокращении численности населения, в перепрофилировании сельского хозяйства, в уменьшении площади орошаемых земель. Кроме того, введение частной собственности и более высокой платы за воду способствовали более экономному ее использованию. В последние годы стало больше внимания уделяться внедрению современных технологий использования воды в промышленности и в орошаемом земледелии, в частности развитию внутрисочвенного орошения.

Водохозяйственные ситуации и тенденции в динамике водопотребления в европейской и азиатской частях России во многом схожи, при том что на долю европейской части приходится около 75% общероссийского водозабора, из которых 15—16% — на долю ее северной части. К 2020 г. произошло снижение всех показателей использования воды в европейской части страны в 2 раза и в азиатской — в 1,6—1,7 раза по сравнению с 1990 г. Спад в использовании воды произошел практически у всех ее потребителей. При этом мало изменилась доля промышленного и хозяйственно-бытового секторов, процент которых в общем использовании несколько больше на азиатской территории страны. В обоих регионах снизилась доля орошаемого земледелия, особенно значительно (в 4 раза) в АЧР. Вместе с тем почти в 2 раза в азиатской части страны возросло использование воды для сельскохозяйственного водоснабжения и прочих нужд.

Как все это повлияло на годовой речной сток? В значительной мере об этом можно судить по величине общего безвозвратного расхода. С одной

стороны, его значение несколько преувеличивает уменьшение речного стока из-за того, что часть водозабора осуществляется из подземных горизонтов, гидравлически не связанных с рекой, и забора морских вод. С другой стороны, в местах забора подземных вод часто происходит интенсивная фильтрация речных вод, не учитываемая в водохозяйственных расчетах. Не принимается во внимание и то, что сбрасываемые сточные воды нередко подогреты, что приводит к усиленному испарению с водного зеркала рек и водоемов. Наконец, сказывается упомянутый выше недоучет использования воды небольшими предприятиями. Так что можно полагать, что представленный в табл. 2 общий безвозвратный расход, видимо, довольно хорошо соответствует действительному уменьшению речного стока. По сравнению с периодом 1975—1990 гг. в XXI в. оно сравнительно невелико, примерно $5 \text{ км}^3/\text{год}$ по всей России, из которых приблизительно $4 \text{ км}^3/\text{год}$ приходится на ЕЧР, а $1 \text{ км}^3/\text{год}$ — на азиатскую территорию. Причем в европейской части России изменения коснулись практически полностью южного региона. Вместе с тем меньший объем безвозвратного расхода в XXI в. способствовал увеличению речного стока. В частности, если бы этого не было, уменьшение стока на юге ЕЧР (см. табл. 1) было бы больше.

Нередко водопотребление включает и изменение стока в результате создания гидроузлов, в том числе дополнительное испарение с акватории водохранилищ [7]. Согласно работе [7], дополнительное испарение с акватории водохранилищ оценивалось для России в $10\text{—}12 \text{ км}^3/\text{год}$. Но насколько оно изменилось в настоящее время, еще предстоит выяснить, хотя очевидно, что значение испарения по сравнению с нормой 1930—1980 гг., когда в основном были созданы гидроузлы и водохранилища, меньше, чем по сравнению с нормой 1895—1960 гг.

3.5. Чувствительность стока в условиях многолетней мерзлоты к сценариям изменения количества атмосферных осадков и температуры воздуха (на примере Вилюя)

Условия формирования стока на территориях, занятых многолетней мерзлотой, специфичны по сравнению с районами, где она отсутствует. Вместе с тем работы [12, 30] показали, что возможные сценарные изменения мощности сезонно-талого слоя незначительны и их относительное влияние на сток Вилюя вносит существенно меньший вклад в суммарные изменения стока по сравнению с возможными изменениями количества атмосферных осадков и температуры воздуха.

Бассейн Вилюя с замыкающим створом в с. Хатырык-Хомо имеет площадь 454 тыс. км^2 . Он практически полностью покрыт непрерывной многолетней (вечной) мерзлотой. Сезонно-талый слой изменяется по территории от 0,7 до 1,5 м.

Для оценки чувствительности стока Вилюя к изменениям температуры и количества осадков проведены численные эксперименты на модели месячного водного баланса, разработанной в Институте географии РАН для оценки изменений стока крупных речных бассейнов, вызванных климатическими изменениями в условиях теплых эпох геологического прошлого и

при сценарных изменениях климата в XXI в. [11—13]. В основе модели лежит уравнение среднегодовое месячного водного баланса речных водосборов. Расчеты проводятся в ячейках регулярной сетки. Модель прошла апробацию для условий крупных речных бассейнов, расположенных в разных природных зонах России, включая зону вечномёрзлых грунтов.

В качестве входных данных для проведения расчетов были использованы данные сценарных изменений среднемесячных значений суммы атмосферных осадков и температуры воздуха, полученные с помощью пяти глобальных климатических моделей (GFDL-ESM2M, IPSL-CM5A-LR, HadGEM2-ES, MIROC-ESM-CHEM, NorESM1-M) проекта ISI-MIP2-The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (<https://www.isimip.org/>), которые были осреднены для периодов 2006—2035 и 2036—2065 гг. Данные о климатических характеристиках для базового периода относятся к 1971—2001 гг. Они были получены на основе реанализа, проведенного в рамках программы EUWATCH [31].

Рассматривался сценарий с наибольшим антропогенным воздействием (RCP8.5), в соответствии с которым предполагается, что выбросы в атмосферу будут увеличиваться в течение всего текущего столетия.

Согласно рассмотренным сценариям, в бассейне Вилюя температура воздуха может повыситься к середине XXI в. больше, чем в 2006—2035 гг. Среднее модельное увеличение годовой температуры воздуха составит 4,1°C. При этом согласно четырем из пяти моделей наибольшее ее повышение может наблюдаться в холодный период года, тогда как по сценарию, полученному по модели MIROC, максимум повышения температуры приходится на весну. По расчетам модели GFDL, в середине XXI в. может наблюдаться наименьшее повышение температуры (от 0°C в летние до 2,9°C в зимние месяцы), а модель MIROC дает наибольшее ее повышение (особенно в мае) — на 10,8°C. Разброс сценарных средних месячных модельных изменений количества атмосферных осадков составляет 1—10 мм: наибольшие отклонения получены по расчетам модели MIROC, а наименьшие — по модели GFDL.

Сценарные изменения климата более всего повлияют на внутригодовое распределение стока Вилюя, тогда как его годовой сток практически не изменится. Вероятно, произойдет заметное смещение волны половодья на более ранние сроки (на месяц). При этом сток в апреле — мае увеличится, а в июне — уменьшится. В летне-осенний период сток незначительно снизится.

Для оценки чувствительности стока к изменениям отдельно количества осадков и температуры воздуха были проведены две серии численных экспериментов. В первой серии температура воздуха изменялась в соответствии с климатическими сценариями, а количество атмосферных осадков принималось равным современным значениям. Во втором эксперименте уже количество атмосферных осадков принималось в соответствии с климатическими сценариями, а температура воздуха оставалась такой же, как в современных условиях.

Результаты численных экспериментов показали, что сценарные изменения как количества атмосферных осадков, так и температуры воздуха оказывают существенное влияние на сток Вилюя (рис. 3). При этом при двух контрастных сценариях (RCP2.6 и RCP8.5) характер влияния этих факто-

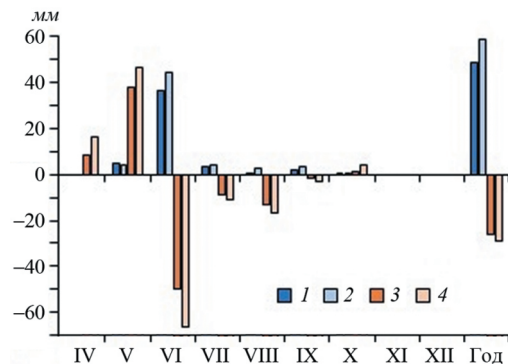


Рис. 3. Чувствительность стока Вилыю к сценарным изменениям (осредненным по пяти моделям) атмосферных осадков в 2006—2035 гг. (1) и в 2036—2065 гг. (2) и температуры воздуха в 2006—2035 (3) и в 2036—2065 гг. (4).

сферных осадков приводит к росту стока половодья (из-за существенного увеличения стока в июне) и незначительно увеличивает летне-осенний сток.

4. Заключение

В начале XXI в. выявлено увеличение стока в России в целом, большинства рек севера ЕЧР и АЧР и его уменьшение в южной части ЕЧР по сравнению со среднемноголетним стоком за 1895—1960 и 1930—1980 гг., который оказался близким для общероссийского стока (разница менее 1%) и ряда речных бассейнов. В эти изменения внесли свой, часто неоднозначный вклад факторы, не учитываемые или не всегда верно учитываемые в гидрологических и водохозяйственных расчетах, в основном потому, что механизм влияния этих факторов на сток оказывается очень сложным. Среди них — ландшафтные изменения, обусловленные хозяйственной деятельностью в условиях современных изменений климата, уменьшение площадей, занятых зяблевой (осенней) пахотой под яровые культуры, приводящее к уменьшению стока, и увеличение урбанизированных территорий, способствовавших увеличению поверхностного речного стока в лесостепных и степных районах ЕЧР. Однако климатические изменения и связанные с ними уменьшение глубины промерзания почвы в холодный период года и рост инфильтрации талых и дождевых вод оказали большее влияние, в результате чего весенний поверхностный склоновый сток уменьшился в начале XXI в. до 60% по сравнению с нормой стока за 1895—1960 гг. Сток Дона, водосбор которого расположен в основном в лесостепной и степной зонах, несмотря на снижение водозабора и безвозвратного забора воды, уменьшился более чем на 30%.

Произошедшее за последние 50 лет увеличение залесенности российской части Русской равнины на фоне относительного межрегионального выравнивания среднего возраста лесов привело, согласно расчетам по методике О. И. Крестовского, к уменьшению годового речного стока в лес-

ров сходен. Повышение температуры воздуха уменьшает годовой сток реки, а увеличение количества атмосферных осадков приводит к его увеличению, большему, чем снижение стока под влиянием изменений температуры воздуха. Изменение температуры воздуха — основной фактор смещения волны половодья на более ранние сроки и незначительного уменьшения объема половодья (из-за существенно уменьшения стока в июне), особенно в 2036—2065 гг., а также уменьшения летне-осеннего стока.

Увеличение количества атмо-

ной зоне на северном макросклоне Русской равнины в среднем на 4%, а на южном макросклоне — на 6%.

Уменьшение водозабора и безвозвратного расхода воды, в учете которых произошли изменения, стало заметным фактором, влияющим на сток в южной части ЕЧР. Если бы его не было, уменьшение стока здесь было бы на 13% больше по сравнению с периодом 1895—1960 гг. и почти на 120% — по сравнению с периодом 1930—1980 гг.

Сценарные изменения стока р. Виллой, расположенной в зоне многолетней мерзлоты, рассчитанные по модели месячного водного баланса на основе анализа результатов пяти глобальных климатических моделей, показали незначительные изменения годового стока к середине XXI в., но очень существенные его сезонные изменения. Оценка чувствительности стока Виллы к изменениям количества атмосферных осадков и температуры воздуха свидетельствует о значительной роли обоих факторов, в то же время действующих на сток разнонаправленно. При этом влияние осадков, способствующих увеличению стока, все же преобладает.

Выполненные расчеты имеют ориентировочный характер, вместе с тем они свидетельствуют о важности затронутой темы. Представляется актуальным в дальнейшем с учетом уже выполненных проработок комплексно оценить гидрологическую роль всех основных факторов изменения стока России в текущем столетии.

Работа выполнена по теме государственного задания FMWS-2024-0007 “Биотические, географо-гидрологические и ландшафтные оценки окружающей среды для создания основ рационального природопользования”.

Литература

1. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО); <https://gmvo.skniihv.ru/>.
2. Барабанов А. Т. Эрозионно-гидрологическая оценка взаимодействия природных и антропогенных факторов формирования поверхностного стока талых вод и адаптивно-ландшафтное земледелие. — Волгоград, ФНИЦ агроэкологии РАН, 2017.
3. Барабанов А. Т., Долгов С. В., Коронкевич Н. И. Влияние современных изменений климата и сельскохозяйственной деятельности на весенний поверхностный склоновый сток в лесостепных и степных районах Русской равнины. — Водные ресурсы, 2018, т. 45, № 4, с. 332—340.
4. Будыко М. И. Климат в прошлом и будущем. — Л., Гидрометеиздат, 1980.
5. Водная стратегия Российской Федерации на период до 2020 года (Распоряжение Правительства РФ от 27 августа 2009 г. № 1235-р); <https://docs.cntd.ru/document/902173350>.
6. Водные ресурсы и водный баланс территории Советского Союза. — Л., Гидрометеиздат, 1967.
7. Водные ресурсы России и их использование. — СПб, Государственный гидрологический институт, 2008.
8. Воскресенский К. П. Норма и изменчивость годового стока рек Советского Союза. — Л., Гидрометеиздат, 1962.
9. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации — Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД); <http://meteo.ru/>.
10. Георгиади А. Г., Долгов С. В., Кашуткина Е. А., Коронкевич Н. И., Шапоренко С. И., Ясинский С. В. Современные климатические и гидрологические изменения в Белгородской области и их последствия. — Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология, 2023, № 4, с. 84—89; <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2023/4/84-89>.

11. Георгиади А. Г., Коронкевич Н. И., Миллюкова И. П., Кашутина Е. А., Барабанова Е. А. Современные и сценарные изменения речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Ч. 2. Бассейны рек Волги и Дона. — М., Макс Пресс, 2014.
12. Георгиади А. Г., Коронкевич Н. И., Миллюкова И. П., Кислов А. В., Анисимов О. А., Барабанова Е. А., Кашутина Е. А., Бородин О. О. Сценарная оценка вероятных изменений речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Часть 1. Бассейн реки Лены. — М., Макс Пресс, 2011.
13. Георгиади А. Г., Миллюкова И. П. Масштабы гидрологических изменений в бассейне р. Волга, возможные при антропогенном потеплении климата. — Метеорология и гидрология, 2002, № 2, с. 72—79.
14. Долгов С. В. Антропогенные и климатические изменения водных ресурсов в Курской области и их последствия. — Вопросы географии, 2023, № 157, с. 105—123; <https://doi.org/10.24057/probl.geogr.157.5>.
15. Долгов С. В., Коронкевич Н. И. Гидрологическая яркость равнинной территории. — Известия РАН. Сер. географическая, 2010, № 1, с. 7—25.
16. Долгов С. В., Коронкевич Н. И., Барабанова Е. А. Ландшафтно-гидрологические изменения в бассейне Дона. — Водные ресурсы, 2020, т. 47, № 6, с. 674—685; <https://doi.org/10.31857/s032105962006005x>.
17. Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС); <https://www.fedstat.ru/>.
18. Кашутина Е. А., Коронкевич Н. И. Влияние изменения состояния лесов европейской части России на годовой речной сток. — Водные ресурсы, 2013, т. 40, № 4, с. 339—349; <https://doi.org/10.7868/S0321059613040068>.
19. Коронкевич Н. И. Водный баланс Русской равнины и его антропогенные изменения. — М., Наука, 1990.
20. Коронкевич Н. И. О влиянии уклона склона на поверхностный сток. — Известия АН СССР. Сер. географическая, 1985, № 4, с. 57—65.
21. Коронкевич Н. И., Черногаева Г. М., Долгов С. В., Кашутина Е. А., Барабанова Е. А., Лукьянов К. В. Антропогенно-измененные воды, поступающие в водные объекты в бассейне Дона. — Метеорология и гидрология, 2023, № 6, с. 74—82.
22. Крестовский О. И. Влияние вырубок и восстановления лесов на водность рек. — Л., Гидрометеиздат, 1986, 119 с.
23. Лесной фонд СССР (по учету на 1 января 1973 г.). Книга 1. — М., 1976, 600 с.
24. Львович М. И. Человек и воды. — М., Географиз, 1963, 568 с.
25. О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2020 году. Государственный доклад. — М., Росводресурсы, НИА-Природа, 2022, 510 с.; <https://rosstat.gov.ru/folder/11194>.
26. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 году. Государственный доклад. — М., Минприроды России; МГУ им. М. В. Ломоносова, 2023.
27. Основные показатели охраны окружающей среды. Статистический бюллетень. Федеральная служба государственной статистики, 2023; https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/oxr_bul_2023.pdf.
28. Охрана окружающей среды в России. 2022: Статистический сборник. — М., Росстат, 2022; https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Ochрана_okruij_sredi_2022.pdf.
29. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество (Ежегодное издание). — Л., СПб, 1982—2022.
30. Georgiadi A. G., Milyukova I. P., and Kashutina E. A. Response of river runoff in the cryolithic zone of Eastern Siberia (Lena River basin) to future climate warming. /In: Environmental Change in Siberia. Advances in Global Change Research. H. Balzter (ed.). — Springer, Dordrecht, 2010, vol. 40; https://doi.org/10.1007/978-90-481-8641-9_10.
31. Harding R., Best M., Blyth E., Hagemann S., Kabat P., Tallaksen L. M., Warnaars T., Wiberg D., Weedon G. P., van Lanen H. A. J., Fulco L., and Haddeland I. WATCH: Current knowledge of the terrestrial global water cycle. — J. Hydrometeorol., 2011, No. 12, pp. 1149—1156; <https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-024.1>.