

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОД СУШИ
С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

УДК 556.53:551

МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ВЛАГООБОРОТА
ПО ДАННЫМ ВОДНОБАЛАНСОВЫХ СТАНЦИЙ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ
ЧАСТИ БАСЕЙНА р. ДОН

© 2020 г. С. А. Журавин^а, *, М. Л. Марков^а, Е. В. Гуревич^а

^аГосударственный гидрологический институт,
Санкт-Петербург, 199004 Россия

*e-mail: 2019mml@gmail.com

Поступила в редакцию 29.01.2020 г.

После доработки 14.05.2020 г.

Принята к публикации 12.06.2020 г.

Материалы многолетних наблюдений воднобалансовых станций в бассейне р. Дон подтверждают наличие климатических изменений, которые привели к изменениям в формировании стока воды и других элементов водного баланса. Показано, что основные изменения в гидрологическом режиме водных объектов обусловлены снижением влияния на него криогенного регулирования водообмена в бассейне. Это проявляется в двух процессах: росте инфильтрации атмосферных осадков в зону аэрации и грунтовые воды и улучшении дренирования подземных вод гидрографической сетью. В начальный период преобладает первый процесс, что приводит к уменьшению доли поверхностного стока, к подъему уровня грунтовых вод – росту подземного питания рек. В последующем возрастает роль второго процесса, в результате чего постепенно снижаются запасы подземных вод в бассейне, уровень грунтовых вод и меженный сток рек. Баланс процессов пополнения и сработки подземных вод восстанавливается после прекращения формирования криогенных явлений в речном бассейне, связанных с фазовыми переходами вода–лед(снег)–вода. С большой вероятностью можно предположить, что перестройка этих процессов к настоящему времени близка к завершению.

Ключевые слова: многолетние колебания климата, изменения влагооборота, элементы водного баланса, промерзание почвы.

DOI: 10.31857/S0321059620060188

ВВЕДЕНИЕ

Оценке многолетних изменений режима стока воды на реках России в последние годы посвящен ряд работ [1, 4, 7]. Общее направление этих работ заключается в определении современного состояния ресурсов поверхностных вод по большим регионам и бассейнам крупнейших рек, анализе изменений их внутригодового распределения и прогнозе изменений на перспективу. Вместе с тем такой “валовый” подход необходим, но недостаточен для полноценного мониторинга водных объектов по следующим причинам.

Во-первых, из рассмотрения “выпадает” целый класс водотоков, а именно – малые реки с площадями водосборов до 2–5 тыс. км², которые составляют >80% численности и протяженности всех рек России, на их водосборах и формируется основная часть водных ресурсов. Во-вторых, такой подход не позволяет раскрыть механизмы изменений гидрологического режима во всей системе влагооборота, понимание которых необходимо

при разработке мероприятий по адаптации водохозяйственного и природного комплексов к текущим и прогнозируемым изменениям климата.

Для понимания физических причин происходящих изменений гидрологического режима целесообразно рассматривать полный комплекс причинно-следственных связей от климатических изменений до результирующих изменений всех составляющих водного баланса и определяющих их факторов. Решение этой задачи возможно только на основе материалов долгосрочных комплексных гидрометеорологических наблюдений, осуществляемых на воднобалансовых станциях Росгидромета.

Большая часть территории бассейна р. Дон расположена в лесостепной и степной физико-географических зонах Европейской части России (ЕЧР). В этих природных зонах размещаются две воднобалансовые станции (ВБС) Росгидромета – Нижнедевицкая (лесостепная зона) и Каменная Степь (степная зона).

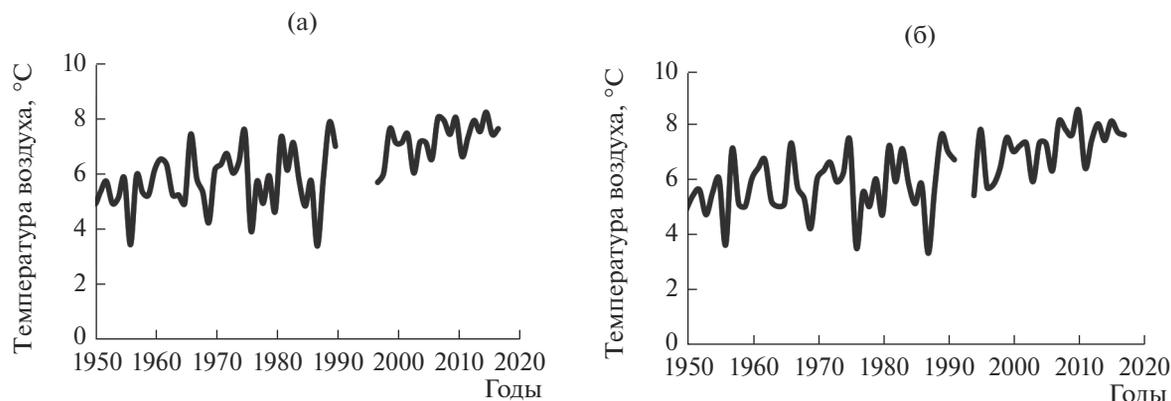


Рис. 1. Многолетние изменения средней годовой температуры воздуха по данным наблюдений: а – Нижнедевицкой ВБС, лесостепная зона; б – ВБС Каменная Степь, степная зона.

Нижнедевицкая ВБС, организованная в 1948 г., расположена в верхней части водосбора р. Девыцы (правобережного притока р. Дон) в пределах Нижнедевицкого района Воронежской области, в 60 км западнее г. Воронежа.

ВБС Каменная Степь, основанная в 1950 г., расположена на водосборе р. Чиглы (левобережного притока р. Битюг) на водораздельных участках притоков Чиглы – балок Озерки и Таловой в пределах Таловского района Воронежской области.

Программой работ воднобалансовых станций предусмотрены наблюдения за определяющими факторами элементов водного баланса речных бассейнов.

ИЗМЕНЕНИЯ ОСНОВНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ВОДНОБАЛАНСОВЫХ СТАНЦИЯХ

Основные климатические характеристики – атмосферное давление, температура и влажность воздуха, осадки. Эти показатели в первую очередь характеризуют массо- и теплообмен на водосборах.

Температура воздуха

Материалы наблюдений на воднобалансовых станциях (рис. 1) свидетельствуют о том, что после относительно стабильного периода колебаний температуры воздуха до середины – конца 1970-х гг. начинается ее рост. При этом в ряду наблюдений выделяются данные за 1987 г., когда наблюдалась исключительно суровая для этих природных зон зима, лишь ненамного уступающая самой холодной за период наблюдений зиме 1942 г.: на общем фоне повышенной относительно периода до 1977 г. температуры воздуха не исключены отдельные годы с низкими и даже экстремально низкой температурой воздуха.

Изменение средней годовой температуры воздуха хотя и показательно для выявления долговременных периодов с разным характером температурного режима, но с точки зрения развития процессов влагооборота не столь важно, как изменение внутригодового распределения температуры, причем не только сезонного, но и внутрисезонного.

Рост годовой температуры воздуха обусловлен потеплением во все сезоны (рис. 2). Следует отметить, что средние месячные значения температуры воздуха в летний сезон вплоть до 2008 г. были в среднем ниже, чем в 1950–1970-е гг. Их повышение произошло только в последнее десятилетие. Наиболее значительный рост температуры воздуха произошел в январе–феврале и марте. При этом средние месячные значения температуры воздуха в марте и ноябре в последнее десятилетие приближаются к нулевой отметке. Для территории России, в том числе бассейна р. Дон, где в годовом цикле по-прежнему преобладает снеговое питание рек, а наиболее многоводная фаза стока – весеннее половодье, зимне-весенний температурный режим играет особую роль. Изменение зимнего и весеннего температурного режима выражается прежде всего в количестве и продолжительности оттепелей и означает изменение режима снегонакопления и снеготаяния, а также увлажнения, промерзания и оттаивания почвогрунтов, которые определяют формирование объемов весеннего половодья [3].

Атмосферные осадки

Количество атмосферных осадков на воднобалансовых станциях полуаридной зоны ЕЧР в последние десятилетия возросло, хотя и не так заметно, как температура воздуха. На воднобалансовых станциях лесостепной и степной зон

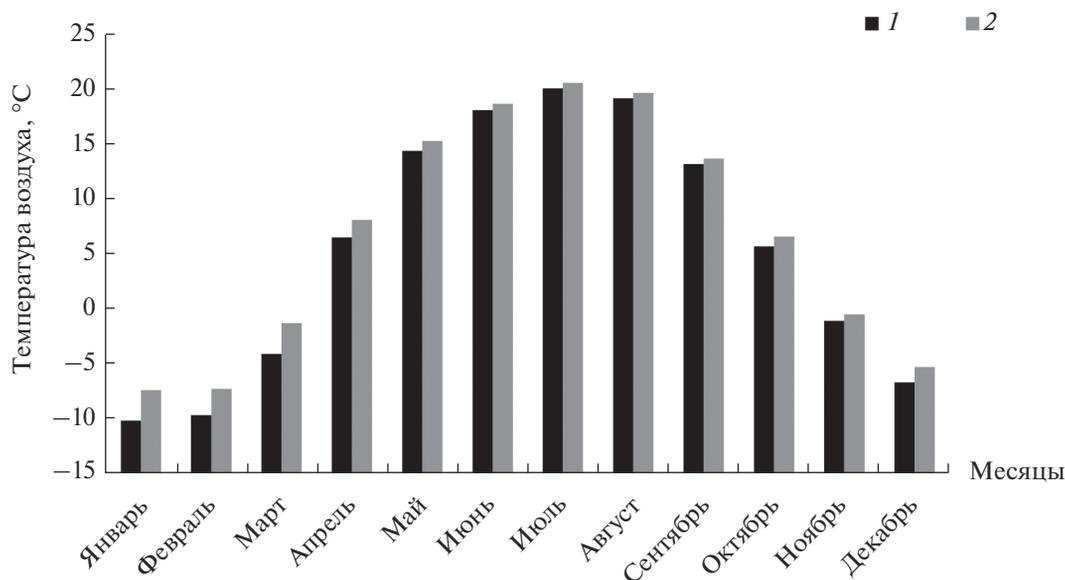


Рис. 2. Средние месячные значения температуры воздуха по данным наблюдений на ВБС Каменная Степь, осредненные за периоды: 1929–1977 (1) и 1978–2016 гг. (2).

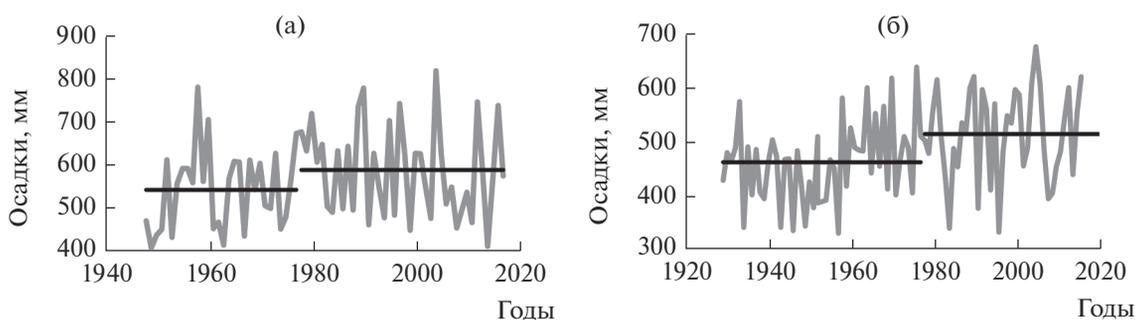


Рис. 3. Многолетние изменения годовых сумм осадков по данным наблюдений: а – Нижнедевицкой ВБС; б – ВБС Каменная Степь.

осадки в 1980–2010-х гг. увеличились на 46 мм (ст. Нижнедевицкая) и на 51 мм (ст. Каменная степь) по сравнению с предыдущим периодом наблюдений до 1980 г. (рис. 3). Для полуаридной зоны это составляет 10–12% средней суммы годовых осадков первоначального периода. Необходимо отметить, что станции расположены на Среднерусской возвышенности, поэтому рост количества осадков на них несколько больше, чем на равнинных территориях. Эти результаты в целом согласуются с данными в [2].

На станциях, расположенных в лесостепной и степной зонах, наблюдается заметное увеличение изменчивости годовых сумм осадков. С одной стороны, здесь увеличилась повторяемость значительных годовых сумм осадков (600–800 мм), характерных для зоны достаточного и даже избыточного увлажнения, с другой – наблюдаются ти-

пичные для этой зоны относительно маловодные периоды продолжительностью вплоть до 4–5 лет с годовыми суммами осадков <500 мм. При этом после 1996 г. годовые суммы осадков в районах воднобалансовых станций в полуаридной зоне не были меньше 400 мм.

Увеличение осадков в зоне недостаточного увлажнения, как и на остальной территории центра ЕЧР, наблюдается в основном в зимний период. В частности, по данным ВБС Каменная Степь, количество осадков в декабре–феврале возросло в среднем с 83 до 147 мм, в то время как в некоторые летние и осенние месяцы оно даже снизилось. Наметилась тенденция к снижению количества осадков в июле–августе. В 2009 и 2015 гг. суммарное количество осадков в эти месяцы составило всего 9–11 мм. О вероятности дальнейшего увеличения длительности периодов

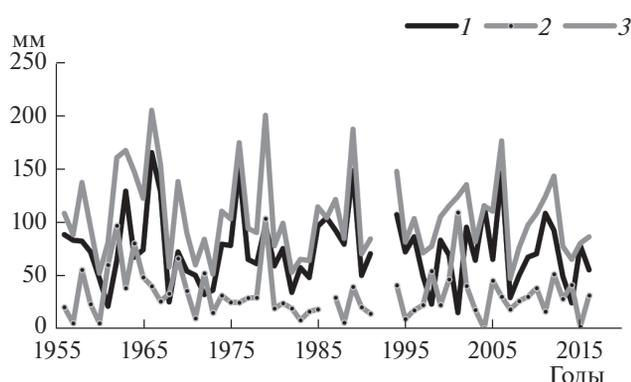


Рис. 4. Многолетние изменения предвесенних запасов воды в снеге (1), количество осадков за период половодья (2) и сумма запасов воды в снеге и осадков за период половодья (3) на водосборе балки Степная (ВБС Каменная Степь).

без осадков в летнее время свидетельствуют модельные расчеты, выполненные в ГГО с использованием региональных климатических моделей [16].

Особый интерес вызывают предвесенние максимальные запасы воды в снеге и осадки за период формирования половодья. Выполнить такой анализ для Нижнедевицкой ВБС не представляется возможным ввиду того, что весенний сток на малых водосборах станции в последние десятилетия практически не формировался; следовательно, невозможно и выделить этот генетический период. Поэтому информация приведена только для ВБС Каменная Степь (рис. 4). В среднем за 1978–2016 гг. предвесенние запасы воды в снеге и осадки за период половодья снизились всего на 11 мм по сравнению с предыдущим многолетним периодом из-за оттепелей и более короткого зимнего периода.

Изменения климатической ситуации в лесостепной и степной зонах начали происходить со второй половины 1970-х гг.

Время начала климатических изменений различно по территории бассейна р. Дон. Во многих публикациях их принимают с 1978 г. [7].

ИЗМЕНЕНИЯ В СИСТЕМЕ ВЛАГООБОРОТА ВОДОСБОРОВ МАЛЫХ РЕК

В результате климатических изменений возникли условия для изменения режима формирования стока воды и других составляющих водного баланса. При этом перестройка во всей системе тепло- и влагооборота речных бассейнов, даже небольшого размера, и достижение ею равновесного состояния, к которому стремится любая сложная система, могут быть длительными в силу

различного временного и пространственного масштаба происходящих на нем процессов. Особенно длительный период, по-видимому, требуется для перестройки в системе водообмена поверхностных и подземных вод. Эта ситуация не позволяет на основе уже имеющихся данных наблюдений надежно и достоверно оценить вероятные тренды в процессах влагооборота без осуществления их дальнейшего мониторинга на воднобалансовых станциях.

Общие тенденции потепления не отменяют того, что в отдельные годы и группы лет могут быть холодные зимы без оттепелей или с пониженным количеством осадков.

Испарение с поверхности почвы и воды

На испарение с поверхности воды и почвы влияют скорость ветра, поступающая солнечная радиация, влажность воздуха.

Уменьшение средней скорости ветра в приземном слое в конце 1990–начале 2000-х гг. отмечалось в работах [2, 5]. Дефицит влажности воздуха в бассейне р. Дон, по данным [7], начал понижаться с середины 1970-х гг. и сохранялся на низком уровне вплоть до середины 1990-х гг., после чего начался его рост.

В работе [16] отмечено увеличение общей облачности в последние десятилетия. Снижение поступления прямой солнечной радиации на ЕЧР зафиксировано здесь вплоть до 1990 г., после чего начался ее рост. В 2000-х гг. величины приходящей на земную поверхность прямой солнечной радиации стабилизировались, но не достигли уровня 1960-х гг.

В полуаридной зоне снижение приходящей солнечной радиации сказывается на испарении в меньшей степени, чем в более северных регионах, поскольку этой энергии в любом случае достаточно для интенсивного испарения. В результате увеличения количества осадков, подъема уровня грунтовых вод верхнего горизонта и капиллярной каймы близко к поверхности почвы возросло количество доступной для испарения влаги. В результате снижение величин испарения с поверхности воды до середины 1970-х гг. сопровождалось ростом испарения с поверхности почвы; причем к середине 1990-х гг. для лесостепной зоны они были близки по величине. Такое явление наблюдалось не только на воднобалансовых станциях полуаридной зоны России, но и в других сходных по природным условиям регионах и за рубежом [6].

Величины испарения с почвы (по монолиту с растительностью) в лесостепной зоне (Нижнедевицкая ВБС) фактически стабилизировались уже со второй половины 1970-х гг. в среднем на вели-

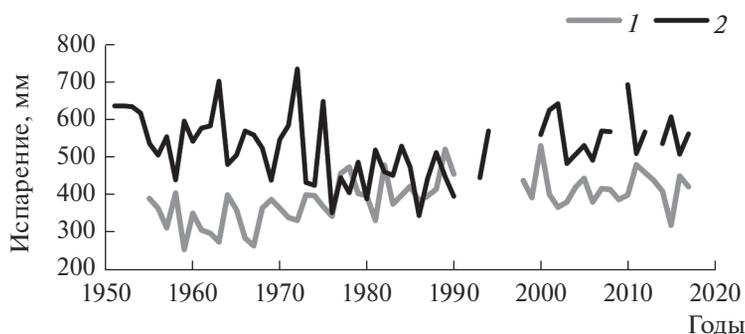


Рис. 5. Испарение с поверхности почвы (1) и воды (2) по данным наблюдений Нижнедевицкой ВБС за период наблюдений до 2017 г.

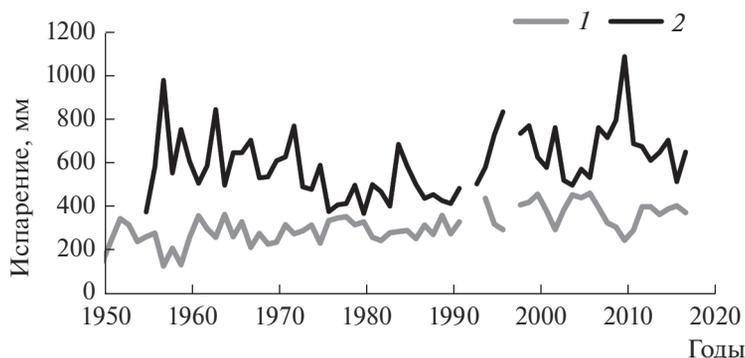


Рис. 6. Испарение с поверхности почвы (1) и воды (2) по данным наблюдений ВБС Каменная Степь (степная зона) до 2017 г.

чине 420 мм, что превышает средние величины испарения за предыдущий период на 70–80 мм (рис. 5). Однако испарение с поверхности воды во второй половине 1990-х гг. вновь начало повышаться с 430–440 мм в год и стабилизировалось в 2000-х гг. на уровне 550–560 мм, что несколько ниже, чем в период 1950–1960-х гг.

В степной зоне (ВБС Каменная Степь) наблюдалась сходная картина, но с некоторыми особенностями. Во-первых, испарение с почвы здесь всегда было ниже, чем испарение с воды (рис. 6). Во-вторых, годовые величины испарения с почвы стабилизировались здесь только с середины 1990-х гг. и составили в среднем 380–390 мм в год, что на 100–110 мм больше, чем в 1950–1960-е гг. Испарение с поверхности воды в 2000-х гг. вернулось к уровню первого “квази-стационарного” периода (до 1978 г.).

Следует отметить, что на увеличение испарения с поверхности воды и почвы в полуаридной зоне повлияло увеличение продолжительности периода с положительной температурой воздуха. Период, когда наблюдается испарение с поверхности воды и почвы, в последние десятилетия имеет среднюю продолжительность с апреля по

ноябрь – на месяц больше, чем в 1950–1960-е гг. В 2002 г. этот период включал в себя даже март.

В настоящей работе использованы результаты наблюдений за испарением с водной поверхности с помощью испарителя ГГИ-3000 и за испарением с суши на участках с травянистой растительностью (залежь) с помощью весовых испарителей ГГИ-500-50. Все наблюдения на воднобалансовых станциях выполняются в соответствии с руководящими документами Росгидромета.

Запас влаги в почве

Запасы влаги в почве, по данным наблюдений на Нижнедевицкой ВБС, в среднем росли в течение всего года, за исключением апреля и августа. Незначительное уменьшение увлажнения верхнего метрового слоя почвогрунтов в апреле связано с более ранними сроками завершения снеготаяния, а август в среднем стал более засушливым, чем в предыдущий период. При этом в некоторые зимние и весенние месяцы величина влагозапасов может превышать величину наименьшей полевой и капиллярной влагоемкости.

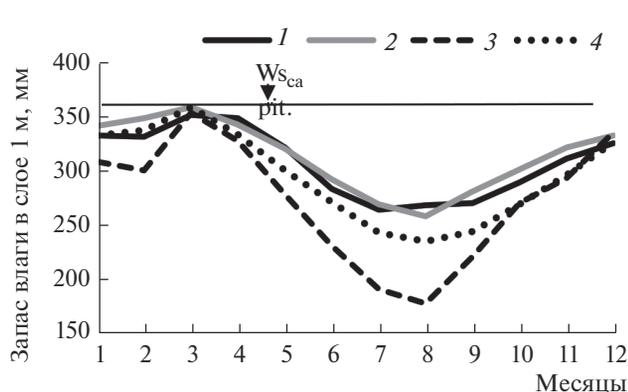


Рис. 7. Внутригодовое распределение запасов влаги в почвогрунтах в слое 1 м на логу Долгий (Нижедевицкая ВБС): среднее за период 1955–1977 гг. (1); среднее за период 1978–2017 гг. (2); среднее за период 2007–2017 гг. (4); по наблюдениям в 2010 г. (3).

Возросшее общее увлажнение почвы, особенно в зимний и переходные периоды, сопровождается учащением периодов с пониженным содержанием влаги в летний сезон, когда в течение декады и более содержание влаги может приближаться к влажности завядания $W_{вз}$ и даже опускаться ниже этого уровня. На рис. 7 для примера показано внутригодовое распределение содержания влаги в метровом слое почвогрунтов на логу Долгом в anomalно жарком 2010 г., когда на Нижедевицкой ВБС были зафиксированы наибольшие средние месячные значения температуры воздуха в июле (26°C) и августе (24.9°C) за весь период наблюдений. При этом за июль выпало всего 11.2, за август – 40 мм осадков. Влагозапасы в июле–августе опускались всего до 180–190 мм (ниже уровня влажности завядания). Такие же величины влагозапасов в метровом слое почвогрунтов наблюдались в 2002 г., а также в 1984 и 2009 гг., но в сентябре. Еще в 1996, 2008, 2011, 2015 гг. были зафиксированы влагозапасы ~200 мм, т.е. опасность возникновения почвенных засух и значительного дефицита влаги в верхнем слое зоны аэрации в последние годы повысилась. По данным наблюдений на Нижедевицкой ВБС, повторяемость этих явлений возросла в среднем с 1 случая в 10–15 лет до 1 случая в 5–7 лет. На рис. 7 это подтверждается уменьшением влагозапасов в летние и осенние месяцы за период 2007–2017 гг.

Промерзание почвогрунтов

Промерзание почвогрунтов – один из важнейших процессов, влияющих на формирование стока весеннего половодья. Сочетание промерзания почвогрунтов с их увлажнением определяет льдистость почвы, формирование так называемого “запирающего” слоя как в предвесенний период,

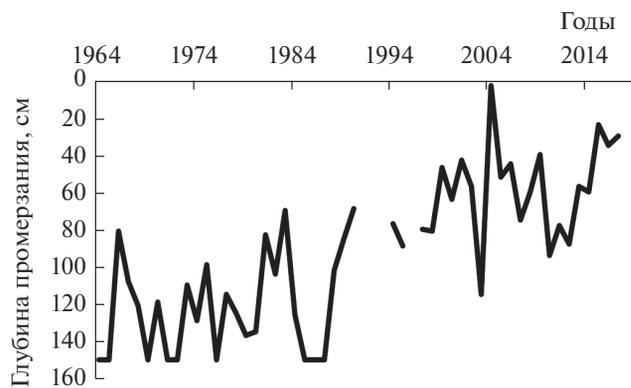


Рис. 8. Изменения максимальной годовой величины промерзания почвогрунтов по данным наблюдений на логу Малютка, мерзлотомер № 1 Нижедевицкой ВБС за период 1964–2017 гг.

так и в результате замерзания талой воды в верхних слоях почвы на начальном этапе снеготаяния [11]. Наличие или отсутствие “запирающего” слоя определяет водопроницаемость почвогрунтов, формирование поверхностного стока и инфильтрации.

На рис. 8 показаны многолетние изменения максимальной за год глубины промерзания по данным наблюдений на мерзлотомере № 1, установленном на водосборе лога Малютка (НДВБС), где отмечались наибольшие глубины промерзания на водосборе р. Девыцы. До 1987 г. здесь в шести случаях наблюдалось промерзание почвогрунтов до ≥ 150 см (глубина установки мерзлотомера составляет 150 см). С 1988 до 2017 г. было отмечено только 2 случая, когда промерзание здесь превысило 100 см.

В статье [11] отмечено, что для южной части бассейна р. Волги, граничащей с бассейном р. Дон, промерзание почвогрунтов снизилось в последние десятилетия в среднем на 50 см.

Изменение запасов грунтовых вод

По данным наблюдений на воднобалансовых станциях, уровни и, соответственно, запасы грунтовых вод в конце XX – начале XXI в. существенно возросли во всех водоносных горизонтах начиная с верхнего локального горизонта, который часто не имеет сплошного распространения. Этому способствовал перевод значительной части поступающей на водосбор влаги из поверхностного стока, прежде всего весеннего половодья, в горизонты подземных вод, которые обладают высокой емкостью и большой инерционностью в разгрузке. При этом в периоды высокого стояния уровня воды верхнего горизонта испарение с почвы частично снижает питание грунтовых вод.

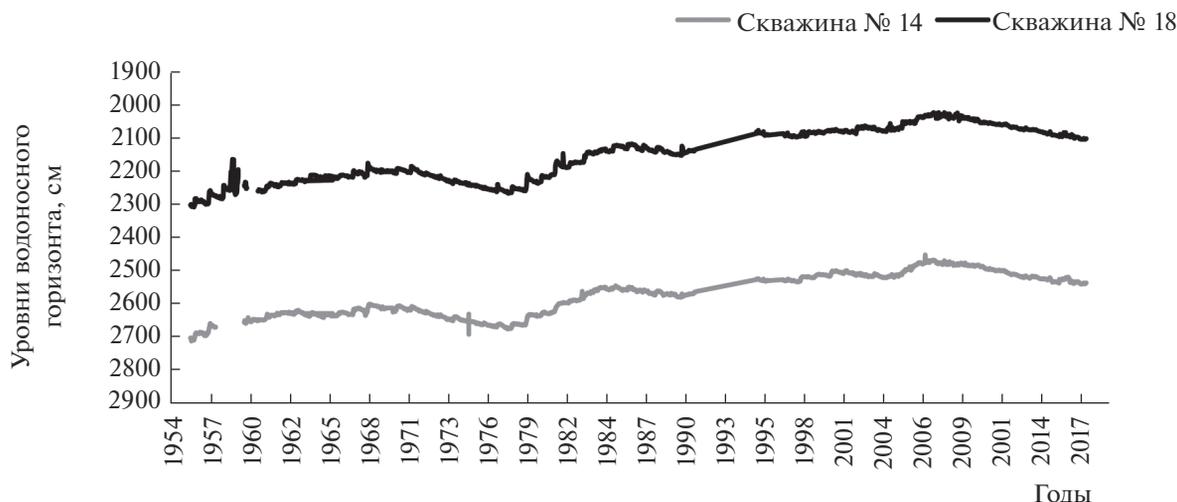


Рис. 9. Многолетние изменения средних годовых уровней воды по данным наблюдений на НДВБС (скважины № 14 и 18) за период 1956–2016 гг.

Уровень верхнего горизонта на Нижнедевицкой ВБС (лесостепная зона) к 1990 г. поднялся в среднем на 1 м (капиллярная кайма, соответственно, приблизилась к поверхности) [17]. К сожалению, наблюдения на скважинах верхнего водоносного горизонта были впоследствии прекращены.

На рис. 9 показаны изменения уровня воды в основном постоянном водоносном горизонте водосбора р. Девицы. Уровни воды начали подниматься с 1978 г. и к 2008 г. выросли на 2.4–2.8 м, что соответствует запасу воды 200–250 мм. После 2008–2009 гг. произошло снижение уровней грунтовых вод на 0.4–0.8 м, связанное со снижением питания грунтовых вод в конце 1990–начале 2000-х гг.

Проведенный ранее анализ совмещенных графиков колебаний уровней воды по скважинам на Нижнедевицкой ВБС на верхнем (2–4 м от поверхности) и нижнем (25–30 м) водоносных горизонтах [17] показал сдвиг по времени 6–8 лет. Это время миграции влаги от верхнего водоносного горизонта к нижнему, что дает основания судить о сохранении повышенного питания подземными водами рек из более низкого водоносного горизонта в течение, как минимум, указанного периода даже при условии существенного снижения его питания из верхнего горизонта.

Причины роста уровней грунтовых вод — увеличение (по крайней мере в районах расположения воднобалансовых станций) количества осадков и благоприятные условия для фильтрации воды в зимний и весенний периоды, связанные со слабым промерзанием почвогрунтов в последние 15 лет и с отсутствием так называемого “запирающего слоя” в почве.

На рис. 10 показаны многолетние изменения уровня верхнего водоносного горизонта за период 1930–2011 гг. по данным наблюдений на скважине в районе ВБС Каменная Степь. На графике видно, что в 1975–1977 гг. уровень грунтовых вод повысился на 1–2 м и в отдельные периоды достигал отметок <2 м от поверхности земли. В 2007–2011 гг. произошло его резкое падение (на 5 м), что связано с ростом испаряемости и с уменьшением годовых сумм осадков в этот период, поскольку верхний водоносный горизонт в полуаридной зоне очень чувствителен к погодным условиям и такие колебания вполне возможны при общей климатической ситуации, способствующей активному питанию грунтовых вод. Понижение уровня грунтовых вод и, соответственно, верхней границы капиллярной каймы неизбежно должно было понизить и величину испарения с поверхности почвы.

На рис. 11 приведены многолетние изменения уровня воды по скважинам, расположенным на водосборах балок Степной и Солонцы (ВБС Каменная Степь) за 1996–2015 гг.

Все эти скважины имеют неглубокое заложение и отражают динамику уровня верхнего водоносного горизонта. До 2003 г. уровень воды колебался с амплитудой 1.5–2 м. При этом даже на скважинах, расположенных в приводораздельных и верхних частях склонов, уровень воды продолжительное время был в 1–1.5 м от поверхности, а в нижних частях склонов <1 м. На скважинах, расположенных в зоне разгрузки, в период весеннего половодья в многоводные годы наблюдался выход воды на дневную поверхность. Наиболее высоко уровень грунтовых вод стоял в 2003–2006 гг.

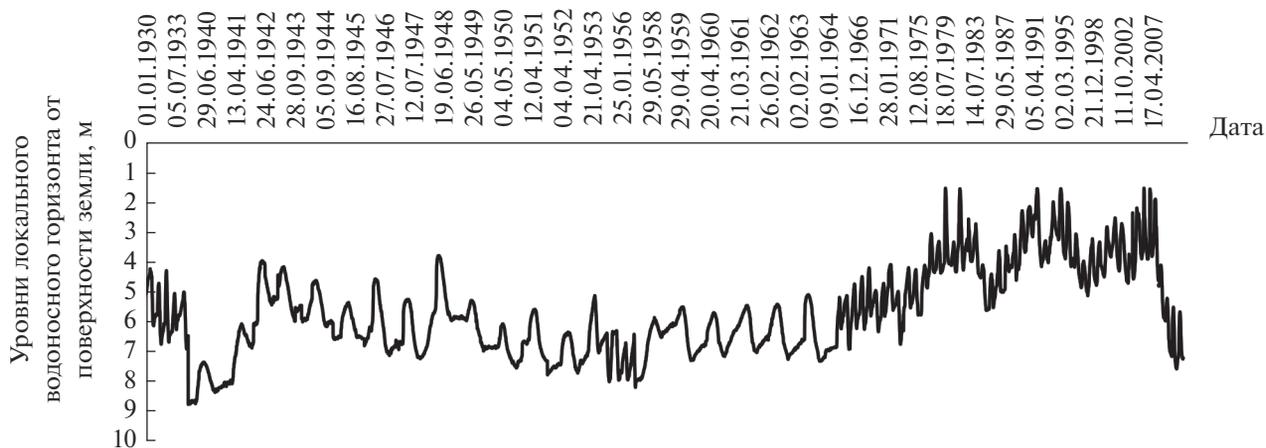


Рис. 10. Многолетние изменения средних годовых уровней воды верхнего водоносного горизонта по данным наблюдений на ВБС Каменная Степь за 1930–2011 гг.

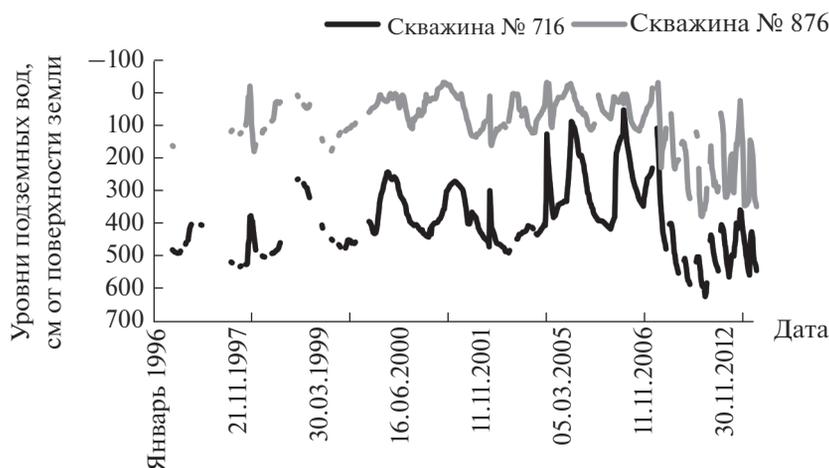


Рис. 11. Многолетние изменения уровня воды по скважинам, расположенным на водосборе балки Солонцы на ВБС Каменная Степь за период 1996–2015 гг.

В 2008 г. началось падение уровня воды, наиболее значительное в верхних частях склонов, где уровень опустился в среднем на 3–4 м. В нижних частях склонов и в притальвежной части падение уровня было меньше и составило 0.5–1.5 м.

ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ РЕЖИМА СТОКА ВОДЫ НА ВОДОТОКАХ

Анализ многолетнего хода стока воды больших и средних рек ЕЧР, основанный на данных наблюдений стандартной гидрометрической сети, свидетельствует о значительных изменениях годового, максимального и минимального стока, внутригодового распределения стока рек [4].

Данные наблюдений за стоком воды малых водотоков показывают, что на них также произошли изменения, зачастую более значительные,

чем на крупных и средних реках, которые интегрируют сток, сформированный преимущественно на водосборах малых рек. К сожалению, информация о режиме первичной гидрографической сети весьма ограничена, особенно в отношении водотоков, протекающих по дну логов, балок, а также ручьев и рек с площадями водосборов <1000 км².

На рис. 12, 13 представлены примеры осредненных типовых гидрографов малых рек лесостепной зоны (р. Девица – п. Товарня и р. Девица – п. Девица).

В зоне недостаточного увлажнения фаза максимального стока (половодья) сдвинулась с апреля на март, а его доля в годовом снизилась с 35–50 до 20–30% в сочетании с 2–3-кратным увеличением минимального стока. При этом на реках и водотоках с площадями водосборов до 100–200 км²

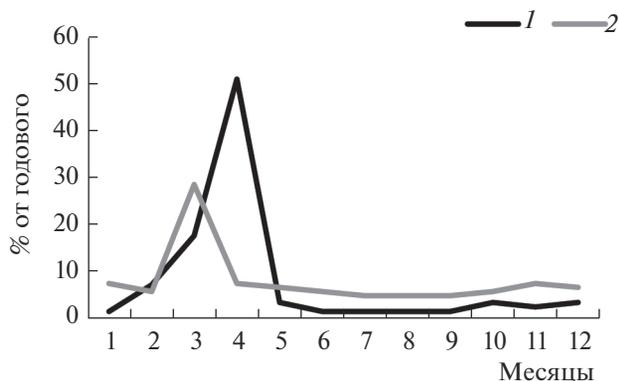


Рис. 12. Осредненный типовой гидрограф стока для постоянных водотоков начального звена гидрографической сети лесостепной зоны (до 100–200 км²) на примере р. Девица – п. Товарня для периодов 1955–1977 (1) и 1978–1993 гг. (2), площадь водосбора $F = 103 \text{ км}^2$ (с 1994 г. пост закрыт).

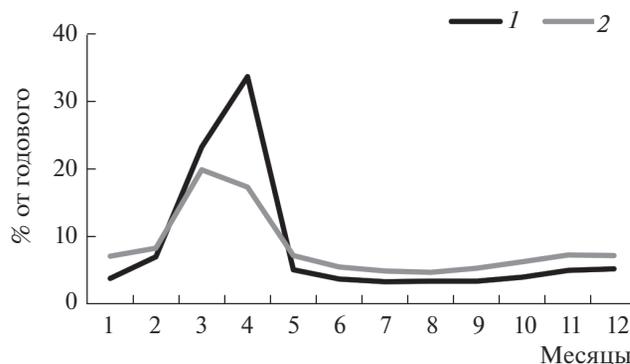


Рис. 13. Осредненные гидрографы годового стока р. Девица – п. Девица ($F = 1490 \text{ км}^2$) за периоды 1956–1977 (1) и 1978–2016 гг. (2).



Рис. 14. Многолетние изменения годового стока воды на водотоках Нижнедевицкой ВБС (р. Девица – п. Товарня, $F = 103 \text{ км}^2$; руч. Ясенок, $F = 21.7 \text{ км}^2$, закрыт в 1990 г.; лог Долгий, $F = 2.57 \text{ км}^2$, в последние десятилетия сток воды наблюдался спорадически в отдельные годы).

половодье формируется чаще всего в феврале–апреле (рис. 12). На реках с большими площадями водосборов половодье обычно проходит, как и в предыдущие десятилетия, в феврале–мае, но наибольшая водность наблюдается в марте (рис. 13).

В лесостепной и степной зонах на малых реках наблюдается значительное увеличение меженного стока, снижение максимальных расходов весеннего половодья почти в 2 раза и расплывание его гидрографа.

Годовой сток на малых водотоках изменялся здесь ступенчато в сторону снижения (рис. 14). При этом на реках, дренирующих основные постоянно действующие водоносные горизонты, снижение годового стока менее заметно, чем на водотоках начального звена гидрографической сети, которые в последние десятилетия сильно

деградируют. В начальный период современной климатической ситуации – с конца 1970-х до середины 1990-х гг. – в полуаридной зоне на малых реках наблюдался незначительный рост годового стока, в то время как на водотоках с неполным дренированием подземных вод годовое стока снижался. Такое различие тенденций изменений стока свидетельствует о существенной роли питания малых рек из подземных горизонтов.

На временных водотоках лесостепной зоны, по данным наблюдений Нижнедевицкой ВБС, на логу Долгом (площадь водосбора $F = 2.57 \text{ км}^2$) в последние десятилетия поверхностный сток не наблюдался даже в период весеннего половодья. Последний раз сток здесь был зафиксирован в 2003 г. и составил 17.7 мм. Следует отметить, что 44% площади водосбора лога Долгого занято лесом.

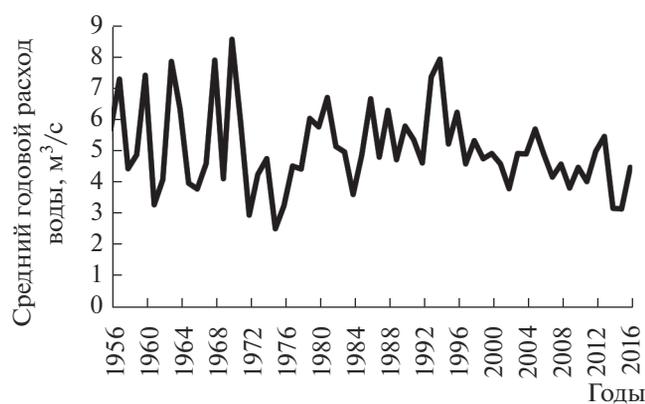


Рис. 15. Многолетние изменения средних годовых расходов воды р. Девица – п. Девица ($F = 1490 \text{ км}^2$) за период 1956–2016 гг.

Ввиду прекращения наблюдений на постоянных водотоках на Нижнедевицкой ВБС, к анализу были привлечены данные наблюдений на п. Девица одноименной реки, в верховьях которой расположена станция. С середины 1970-х гг. до второй половины 1990-х годов сток р. Девицы был достаточно высоким, хотя и меньше, чем в среднем в 1950–1960-е гг., когда наблюдалось чередование высокого и низкого стока весеннего половодья (рис. 15). Стабильность стока реки поддерживалась за счет повышенного питания подземными водами, о чем свидетельствует минимальный месячный сток летне-осенней межени (рис. 16). Однако с начала 2000-х гг. началось постепенное снижение годового стока в результате сработки подземных вод верхнего водоносного горизонта.

На временных водотоках степной зоны повышенный поверхностный сток наблюдался вплоть до 2008 г., преимущественно в период весеннего половодья. Так, среднее многолетнее значение максимального модуля весеннего стока воды по

балке Степной за период наблюдений 1950–2007 гг. составляло 199 л/с км^2 с историческими максимумами 1953 г. – 1062 л/с км^2 и 1979 г. – 1266 л/с км^2 . С 1988 г. происходило снижение стока весеннего половодья с ежегодными колебаниями максимального модуля до 106 л/с км^2 . Особенно повышенным сток был после 1988 г. в 2005 и 2006 гг., когда максимальные модули весеннего стока по балке Степной составляли 283 и 310 л/с км^2 соответственно, а по балке Солонцы – 324 и 238 л/с км^2 соответственно, что связано с исключительно высоким уровнем грунтовых вод – вплоть до 1.5 м от поверхности (рис. 10). После 2008 г. вместе с падением уровня грунтовых вод резко понизился поверхностный сток воды, который в последние 10 лет не превышал $10\text{--}20 \text{ мм}$ (рис. 17).

Следует принять во внимание, что большой слой стока воды за период весеннего половодья при разработке схем его долгосрочного прогноза обычно связывался только с формированием “запирающего” слоя в почве. Высокие уровни стояния грунтовых вод в этих схемах не учитывались [3, 10], поскольку такое явление в полуаридной зоне ранее не наблюдалось.

Показатель снижения доли поверхностного стока в полуаридных зонах – деградация начальных звеньев гидрографической сети. Уменьшение их длины в центральной части ЕЧР к середине 1990-х гг. составило $15\text{--}50\%$ [8]. В частности, длина имеющего постоянный в течение всего года сток руч. Ясенок на Нижнедевицкой ВБС к 1985 г. уменьшилась на 0.8 км – с 3 до 2.2 км [14].

Уменьшение густоты гидрографической сети свидетельствует о снижении руслоформирующих расходов воды и косвенно указывает на уменьшение густоты не только овражно-балочной, но и склоновой микроручейковой сети, вследствие этого уменьшаются водная эрозия и транспорт наносов.

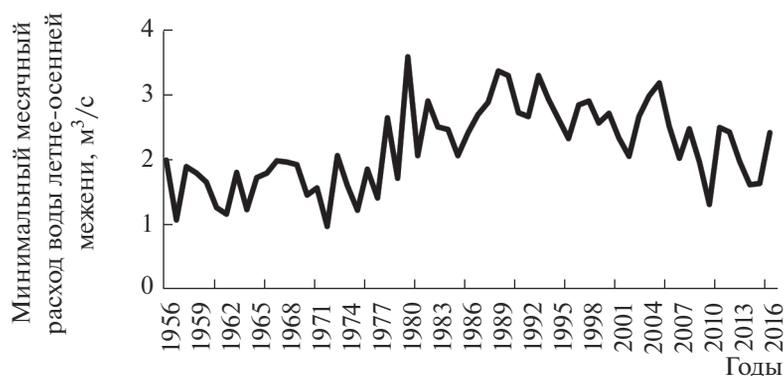


Рис. 16. Многолетние изменения минимальных месячных расходов воды летне-осенней межени р. Девица – п. Девица ($F = 1490 \text{ км}^2$) за период 1956–2016 гг.

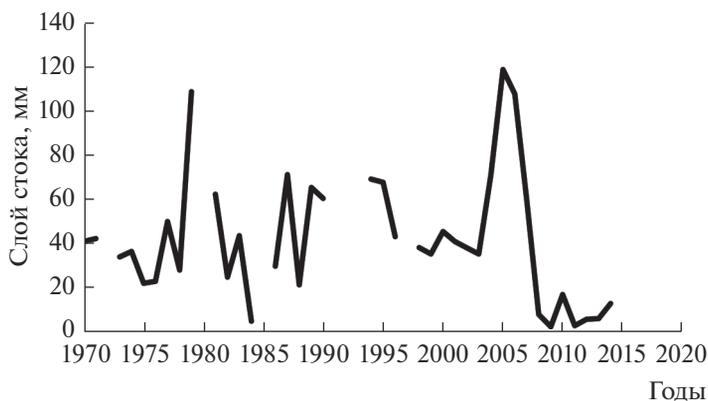


Рис. 17. Многолетние изменения годового стока воды балки Степной ВБС Каменная Степь ($F = 1.92 \text{ км}^2$).

Деградация гидрографической сети связана с уменьшением глубины промерзания почв и с отсутствием в большинстве случаев процесса формирования “запирающего” слоя, который образуется при промерзании большей части территории водосборов при увлажнении почвы более чем на 0.7–0.8 величины наименьшей полевой влагоемкости $W_{\text{нв}}$. “Запирающий” слой препятствует просачиванию воды в нижележащие горизонты и снижает потери талых вод.

Сложность и инерционность процессов формирования стока воды на водосборах начального звена гидрографической сети можно проследить на примере простых балансовых соотношений по ВБС Каменная Степь за два периода: 1978–1995 и 1996–2017 гг. (табл. 1). Границы периодов выбраны в соответствии с временными изменениями годовых сумм осадков и испарения, а также с ходом колебаний уровня грунтовых вод.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что в начальный период (1978–1995 гг.) за счет пониженного испарения даже при условии сравнительно высокого поверхностного стока величина “потенциальной” инфильтрации составляла в среднем ~ 150 мм, в результате чего существенно поднялся уровень подземных вод. “Потенциальная” инфильтрация определяется как балансовая разница между наблюдаемыми осадками, испарением с поверхности почвы и стоком.

Реальная величина инфильтрации несколько ниже “потенциальной”, поскольку не учтено поверхностное задержание влаги растительным покровом и микрорельефом, хотя безвозвратные потери на поверхностное задержание в условиях пахотных земель лесостепной и степной зон в весенний период составляет всего ~ 5 мм.

Во второй рассматриваемый период (1996–2007 гг.) при высоком стоянии уровня подземных вод верхнего горизонта наблюдались значительное для этого региона количество осадков, увеличенное испарение с поверхности почвы (за счет наличия влаги для испарения) и повышенный поверхностный сток воды. При этом потенциальная инфильтрация снизилась вдвое.

В период 2008–2017 гг. с наиболее высокими средними годовыми значениями температуры воздуха поверхностный сток снизился в 5–6 раз. В 2008–2009 гг. годовые суммы осадков существенно уменьшились (вплоть до 400 мм). Это послужило “спусковым крючком” для резкого снижения уровня грунтовых вод верхнего горизонта на 3–5 м. Испарение с поверхности почвы уменьшилось на 50 мм за счет снижения количества доступной для испарения влаги даже при увеличении продолжительности периода, когда оно наблюдается. Величина потенциальной инфильтрации вновь возросла в среднем до 140 мм, в результате чего уровни грунтовых вод стабилизировались.

Таблица 1. Основные составляющие водного баланса (мм) балки Степной, осредненные за отдельные периоды с 1978 по 2017 г.

Период, годы	Осадки	Испарение с поверхности почвы	Поверхностный сток	Потенциальная инфильтрация
1978–1995	511	315	50	146
1996–2007	535	405	57	73
2008–2017	502	356	8	138

Следует отметить, что средние величины годовых сумм осадков за выбранные периоды различались всего на 20–30 мм, что свидетельствует о преобладании температурного фактора в произошедшем изменении поверхностного стока воды.

Таким образом, можно отметить, что изменения процессов формирования стока воды на малых реках полуаридных и аридных зон имеют сходные черты. Поверхностный сток, формируемый преимущественно в период весеннего половодья, в рассматриваемых природных условиях снизился повсеместно при одновременном возрастании питания рек грунтовыми и подземными водами. В лесостепной и степной зонах основные постоянные горизонты подземных вод залегают на значительной глубине, поэтому временные масштабы процесса их пополнения больше по сравнению с верхними водоносными горизонтами спорадического распространения. Эти водоносные горизонты, питающие постоянные водотоки начального звена гидрографической сети (ручьи), чувствительны к засушливым периодам и криогенным факторам, определяющим режим питания и разгрузки зоны активного водообмена. Поэтому объемы годового стока малых рек здесь снижаются.

Изложенный анализ результатов наблюдений за температурой воздуха, осадками, испарением с поверхности почвы и воды, запасами влаги в почве, промерзанием почво-грунтов, уровнями грунтовых вод и речным стоком на ВБС Каменная степь и Нижнедевицкая ВБС указывает на различие временных масштабов реакции водного баланса и гидрологического режима на произошедшее повышение температуры воздуха, особенно в холодный и переходные периоды.

Рост температуры воздуха за 20–25 лет на начальном этапе сказался на уменьшении или прекращении промерзания почвогрунтов, на увеличении питания подземных вод и росте их уровня, соответственно – на увеличении испарения с поверхности почвы.

С повышением температуры воздуха улучшилась дренирующая способность гидрографической сети. Этому способствовали следующие процессы: снижение или прекращение миграции влаги к фронту промерзания [9], снижение влияния на сработку грунтовых вод разницы давления воздуха в атмосфере и в почвогрунтах в зимний и начальный весенний период [12], увеличение пропускной способности русел ручьев и малых рек при уменьшении толщины льда [13]. В результате постепенного улучшения дренирования подземных вод начиная с 2007–2008 гг. уровни грунтовых вод в зоне питания стали снижаться, так как расходная часть их водного баланса возрасла больше, чем приходная. Снизилась увлажнен-

ность зоны аэрации в теплый период, и, соответственно, уменьшилось испарение с почвы, но в целом оно в отдельные годы выросло из-за увеличения продолжительности теплого периода. Сток в логах в лесостепной зоне полностью прекратился даже в период снеготаяния, а в степной зоне он понизился до незначительных величин. Происходит деградация начальных звеньев гидрографической сети. Намечилось снижение общей обводненности этих территорий [15].

ВЫВОДЫ

Данные наблюдений воднобалансовых станций показывают, что климатические изменения привели к значительной перестройке всей системы тепло-влажнооборота на их водосборах.

Общие черты климатических изменений на территории – повышение температуры воздуха, особенно значительное в январе–марте при некотором снижении температуры теплого периода вплоть до 2008 г.; увеличение количества осадков. Важная особенность засушливых регионов – изменение внутригодового распределения осадков, суммы которых увеличились в переходные и зимний периоды, но уменьшились в летний период.

По данным локальных наблюдений на ВБС Каменная степь и Нижнедевицкой, однонаправленные климатические изменения привели к переходу от одного квазистационарного периода формирования стока к другому. Переходный период длится уже 30–40 лет. Он характеризуется снижением роли криогенных явлений и процессов в тепло-влажнообороте в речных бассейнах.

Так как роль температурного фактора в формировании водного режима рек в современных условиях снижается, то прогнозирование стока на перспективу в этих районах не может выполняться на основе только этого предиктора. Основным определяющим фактором в этот период будут осадки.

Весьма вероятно, что перестройка во всей цепи влагооборота на водосборах малых рек лесостепной и степной зон к настоящему времени близка к завершению, так как формирование стока в этих районах уже адаптировалось к условиям, когда влияние криогенных процессов и явлений снизилось или практически прекратилось. Однако для подтверждения этого тезиса требуется продолжение совершенствования системы мониторинга процессов формирования стока воды от склона до водосборов с разной степенью дренирования подземных вод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бабкин В.И.* Речной сток и циклическая деятельность в бассейнах Оби, Енисея и Лены. М.: Науч. мир, 2017. 546 с.
2. *Богданова Э.Г., Гаврилова С.Ю., Ильин Б.М.* Атмосферные осадки // *Тр. ГГО. Вып. 573.* 2014. С. 39–64.
3. *Вершинина Л.К., Крестовский О.И., Калюжный И.Л., Павлова К.К.* Оценка потерь талых вод и прогнозы объема стока половодья (в равнинных районах Европейской территории СССР). Л.: Гидрометеоздат, 1985. 189 с.
4. *Георгиевский В.Ю.* Водные ресурсы рек Российской Федерации. Тр. IV Всерос. науч. конф. “Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов”. М., 2015. С. 5–8.
5. *Говоркова В.А., Павлова Т.В.* Ожидаемые изменения климата на территории Российской Федерации в XXI веке // *Тр. ГГО. Вып. 575.* 2014. С. 64–117.
6. *Голубев В.С., Лоримор Дж.Х., Гройсман П.Я., Сперанская Н.А., Журавин С.А., Менни М.Дж., Петерсон Т.К., Малон Р.В.* Изменения испарения на территории бывшего Советского Союза и континентальной части Соединенных Штатов Америки. Новые оценки // *Изменения климата и их последствия.* СПб.: Наука, 2002. С. 21–230.
7. *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.
8. *Иванова Н.Н., Ларионов Г.А.* Динамика протяженности малых рек: факторы и количественные оценки // *Причины и механизмы пересыхания малых рек / Под ред. А.П. Дедкова, Г.П. Бутакова.* Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1996. С. 37–42.
9. *Калюжный И.Л., Лавров С.А.* Гидрофизические процессы на водосборе: Экспериментальные исследования и моделирование. СПб.: Нестор-История, 2012. 615 с.
10. *Комаров В.Д.* Изучение факторов и закономерностей весеннего речного стока на основе данных наблюдений на репрезентативных бассейнах // *Вод. ресурсы. № 4.* 1980. С. 5–18.
11. *Лавров С.А., Калюжный И.Л.* Влияние климатических изменений на сток весеннего половодья и факторы его формирования в бассейне Волги // *Вод. хоз-во России. № 6.* 2016. С. 42–60.
12. *Лавров С.А., Марков М.Л.* Оценка влияния атмосферного давления на уровень и сток грунтовых вод // *Инженерные изыскания.* 2018. Т. XII. Вып. 2. № 11–12. С. 44–51.
13. *Марков М.Л., Гуревич Е.В.* О влиянии ледяного покрова на подземную составляющую речного стока // *Гидросфера. Опасные процессы и явления. Т. 1.* Вып. 4. 2019. С. 477–489.
14. Материалы наблюдений Нижнедевицкой водно-балансовой станции. Вып. 25, 1985 / Под ред. И.И. Кирюшина. Курск: УГМС ЦЧО, 1986. 192 с.
15. *Савин И.Ю., Марков М.Л., Овечкин С.В., Исаев В.А.* Тренд общей обводненности Европейской части России, выявленный по спутниковым данным GRACE // *Бюл. Почвенного ин-та.* 2016. Вып. 82. С. 28–40.
16. *Школьник И.М., Мелешко В.П., Кароль И.Л., Киселев А.А., Надеждина Е.Д., Хлебникова Е.И., Махоткина Е.Л., Салль И.А.* Облачность и радиационный режим на территории России: наблюдаемые климатические изменения // *Тр. ГГО. Вып. 573.* 2014. С. 65–91.
17. *Zhuravin S.A., Markov M.L.* Development of studies in small research basins in Russia and the most recent tasks // *Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins. IAHS Publ / Ed. A. Herrmann, S. Schumann.* 2010. № 336. P. 219–224.