

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ НА ВЕСЕННИЙ СТОК В БАССЕЙНЕ ДОНА

Н.А. Варенцова¹, М.Г. Гречушникова², Е.С. Повалишникова³, М.Б. Киреева⁴,
М.А. Харламов⁵, Н.Л. Фролова⁶

^{1–6} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши*

¹ *Центральное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, начальник отдела гидрологических прогнозов*

⁵ *Институт водных проблем РАН, лаборатория моделирования поверхностных вод, инженер*

¹ *Инженер; e-mail: efrnatalie@gmail.com*

² *Канд. геогр. н., вед. науч. с.; e-mail: allavis@mail.ru*

³ *Канд. геогр. н., ст. науч. с.; e-mail: elenapovalishnikova@gmail.com*

⁴ *Канд. геогр. н., доцент; e-mail: kireeva_mb@mail.ru*

⁵ *Мл. науч. с.; e-mail: maks-xool@mail.ru*

⁶ *Докт. геогр. н., профессор; e-mail: frolova_nl@mail.ru*

В статье рассмотрены современные особенности стока весеннего половодья в бассейне Дона за 1930–2017 гг. Его масштабные изменения за последние полвека приурочены к 1980 и 2006–2010 гг. В эти периоды наблюдались наиболее существенные климатические изменения, усугубленные в XX в. значительно возросшим антропогенным регулированием стока многочисленными водохранилищами. Применение метода интегральных кривых совместно со статистическим анализом слоя весеннего стока по данным 50 гидрологических постов позволило разделить вклад климатических изменений и антропогенной составляющей в формирование современных тенденций сокращения половодного стока на реках бассейна Дона. По результатам проведенных исследований установлено его сокращение за последние 40 лет в среднем на 30–40%: от 10% в верховьях Воронежа, Хопра и Медведицы до более чем 50–60% в бассейнах рек Северский Донец и Оскол. По характеру изменения весеннего стока реки бассейна Дона разделены на три группы: с началом периода сокращения стока после 1980 г., после 2006–2010 гг. и без изменений весеннего стока. По проведенным оценкам величина видимого испарения с поверхности водохранилищ в бассейне Дона выше Цимлянского водохранилища сравнительно невелика и составляет 0,09 км³ или 0,5% от среднегодового стока Дона в створе города Калач-на-Дону. Однако в маловодные годы на водосборах с интенсивной хозяйственной деятельностью этот фактор может значительно усиливать дефицит водных ресурсов. Подсчитано, что доля суммарного полезного объема водохранилищ в бассейнах крупнейших притоков Дона составляет в среднем 43% от сокращения объема их стока в период половодья, что свидетельствует о значительной возможности сезонного перераспределения стока воды водохранилищами объемом более 0,1 км³. Проведена оценка техногенного потенциала регулирования (ТПР) водохранилищ бассейна объемом более 0,1 км³. Отмечено сокращение весеннего стока на реках при росте ТПР водохранилищ в их бассейнах.

Ключевые слова: внутригодовое распределение стока, водохранилище, техногенный потенциал регулирования, половодье, изменение климата

ВВЕДЕНИЕ

Весеннее половодье в бассейне Дона – важная фаза гидрологического режима питающих его рек, формирующаяся под действием прямых и косвенных факторов. К первой группе относятся запасы воды в снежном покрове и ледяной корке, осадки в период снеготаяния, а также запасы грунтовых вод и почвенной влаги. Среди косвенных факторов наиболее существенные – режимы температуры воздуха и выпадения осадков в осенне-зимний период, глубина промерзания почвы, дружность весны. Большое значение имеют типы почв и растительности, рельеф и экспозиция склонов и т. д.

Квазипостоянными среди них являются факторы подстилающей поверхности: размеры и форма речного водосбора, геология, рельеф, растительность и фильтрационные свойства почвогрунтов. В вековом масштабе эти характеристики могут претерпевать некоторые изменения, однако в разрезе десятков лет, которыми обычно оперируют при проведении исследований, они практически не изменяются, но определяют пространственно-временное перераспределение выпадающих осадков, задержание талых вод на поверхности и в толще водосбора, испарение и время добегания склонового и руслового стока.

Отмечаемые на современном этапе изменения водного стока в бассейне Дона состоят в его увеличении в период межени и катастрофическом уменьшении в половодье [Болгов и др., 2002, 2005; Джамалов и др., 2010; 2013; Киреева и др., 2018; Фролова и др., 2010]. Для количественной оценки и прогноза изменений стока в первую очередь необходимо выявить факторы, послужившие триггером к наблюдаемым трендам, а также проанализировать их количественное влияние на сток. Важно отметить, что подобное влияние может быть как в приходной, так и в расходной составляющей в водном балансе речных водосборов. Так, при анализе влияния на весеннее половодье изменений климата, проявляющихся в росте средних зимних температур [Оценочный доклад..., 2008] и уменьшении весеннего стока вследствие оттепелей зимой, необходимо рассматривать и антропогенный фактор. В пределах бассейна Дона он проявляется не только в прямом регулировании стока и промышленном водопотреблении: большую роль играет современная динамика сельскохозяйственного водопользования и инфраструктуры водных объектов, созданной в середине XX в.

Сложность процессов формирования и развития весеннего половодья определяется их нестационарностью и протеканием на обширных территориях в условиях неоднородности физико-географической среды. Именно по этой причине в современных условиях изменения климата столь актуальным становится анализ условий формирования стока половодья, направленный на поиск причин изменения его качественных и количественных характеристик, оценки ожидаемой величины водного стока в ближайшие десятилетия, а также путей изменения сложившейся ситуации с дефицитом водных ресурсов в зоне умеренного и засушливого климата.

В основе широко распространенных методов расчетов и прогнозов стока половодья лежит использование квазистационарных рядов данных. Однако вторая половина XX в. – это бум гидротехнического строительства, интенсивное развитие агропромышленного комплекса в СССР и начало изменения климата.

По данным на 2018 г. общий объем забора воды из природных водных объектов в РФ составил 68,02 км³, в том числе из поверхностных – 51,15 км³: 44,90 км³ для водопользования и 6,25 км³ для переброски стока; из подземных источников – 11,41 км³. Из них свежей воды было использовано 53 км³ [Государственный доклад..., 2019]. Наибольший объем воды забирался в Южном ФО (12,57 км³), а в нем – в Краснодарском крае (6,28 км³) и Ростовской области (3,56 км³), далее в Ленинградской (5,62 км³) и Тюменской (4,06 км³) областях, Республике Даге-

стан (3,41 км³), Московской (3,37 км³) и Тверской (2,27 км³) областях, Карачаево-Черкесской Республике (3,17 км³) [Ресурсы..., 2019]. По отраслям экономики из использованной свежей воды в РФ в 2018 г. 29 км³ (55%) пришлось на промышленность, 6,6 км³ (12,5%) на орошение и 7,6 км³ (14,3%) на хозяйственно-питьевые цели.

В бассейне Дона общий водозабор после 2011 г. несколько сократился (7,2 км³) и за 2012–2018 гг. изменялся в диапазоне от 4,1 до 4,9 км³ [Государственный доклад..., 2019]. Общий объем забора воды в 2018 г. составил 4,90 км³, из поверхностных водных объектов – 4,08 км³. Объем сброшенных в бассейн Дона вод достиг 5,03 км³, в том числе 1,66 км³ поступили с переброской стока [Ресурсы..., 2019].

Большую часть всех нужд различных отраслей хозяйства обеспечивают водохранилища, пруды и каналы. На территории РФ находятся в эксплуатации 2650 водохранилищ емкостью более 1 млн м³, 90% из них имеют емкость более 10 млн м³. Комплексно используются 230 из них, для нужд энергетики – 30, сельского хозяйства – 1760, водоснабжения – 297 [Государственный доклад..., 2019]. По данным [Вода России..., 2000], в пределах российской части бассейна Дона водохранилищ, прудов и других сооружений различного назначения, регулирующих водный режим рек, насчитывается 8298, из них малых (с полезным объемом менее 1 млн м³) – 1168 [База данных..., 2020], объемом от 1 до 10 млн м³ – 570 и 48 водохранилищ объемом более 10 млн м³. Сток Дона зарегулирован на 50%. Приведенные выше величины указывают на значительную антропогенную нагрузку на водные объекты и необходимость учета ее при анализе факторов формирования стока.

Совместное влияние климатического и антропогенного факторов в последние десятилетия привело к существенной деградации половодья на подавляющем большинстве рек Донского бассейна [Джамалов и др., 2017; Киреева, Фролова, 2013]. По этой причине авторами поставлена задача оценки произошедших изменений весеннего стока, а также сделана попытка разделить влияние на формирование стока климатических и антропогенных факторов. Для ее решения, в частности, проведен анализ количественных характеристик весеннего стока и оценены сроки начала его наиболее значительных изменений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использованы опубликованные в изданиях Государственного водного кадастра данные о ежедневных расходах воды половодья

в пределах российской части бассейна Дона, а также об объемах водопользования [Ресурсы..., 1982–2008]. Гидрологические посты выбирались с условием их относительно равномерного распределения по водосбору (рис. 1). Анализ проводился по слою стока половодья. В качестве дополнительных сведений привлекались ряды годового стока.

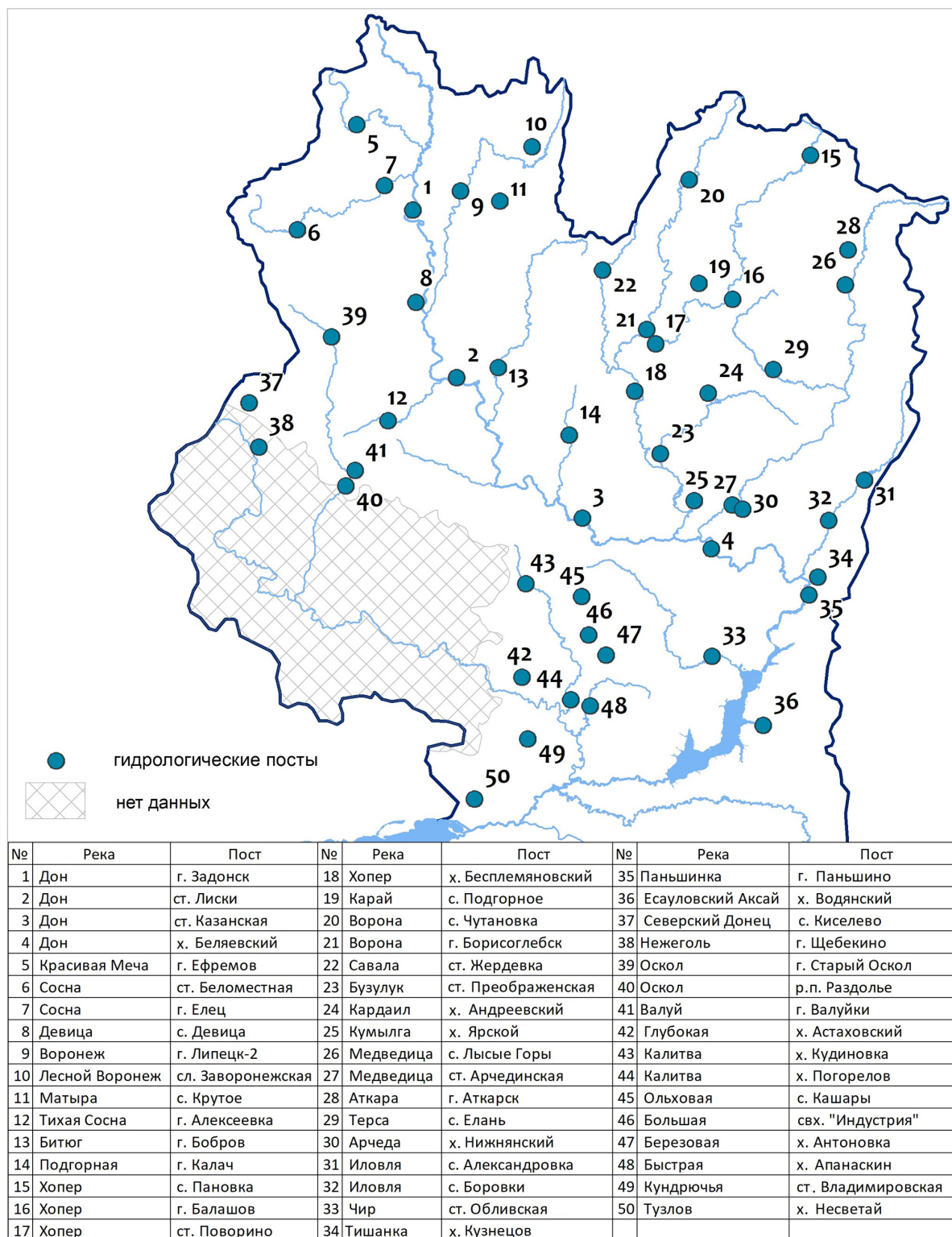


Рис. 1. Гидрологические посты в бассейне Дона, данные по которым использованы для оценки изменения стока половодья

Fig. 1. Gauging stations in the Don River basin which data were used to estimate spring flood flow changes

Анализ характеристик стока и формирующих его факторов позволяет определить причины его изменения, интенсивность и потенциальную обратимость воздействия. Количественная оценка суммарного воздействия на весенний сток климатических и антропогенных факторов проведена статистическими методами. За основу анализа рядов данных взят графоаналитический метод построения интегральной кривой стока (ИКС) вида

$$\sum_1^n Y = f(t), \quad (1)$$

где Y – слой стока половодья, t – время, n – количество лет [Фролова, 2006]. Изменение угла наклона графика такой зависимости отражает направленную тенденцию изменения стока.

Наряду с базовыми статистическими методами, изменение весеннего стока рек производилось путем анализа суммарного отклонения фактического слоя стока от его условно-естественного значения $W_{\text{изм}}$ под влиянием определяющих факторов и его средней величины за период нарушенного режима стока $\Delta Y_{\text{изм}}$. Для каждой ИКС за 1981–2017 гг. восстановлена интегральная кривая условно-естественного стока (ИКСЕ), за который принят период наблюдений с 1960 по 1980 г. Соответственно, величина изменения слоя стока $W_{\text{изм}}$ определялась по формуле:

$$W_{\text{изм}} = \sum_1^N Y_{\text{ИКС}} - \sum_1^N Y_{\text{ИКСЕ}}, \quad (2)$$

а $\Delta Y_{\text{изм}}$ рассчитывался по формуле

$$\Delta Y_{\text{изм}} = \frac{W_{\text{изм}}}{N}, \quad (3)$$

где N – число лет с нарушенным режимом. Следует отметить, что под условно-естественным в работе понимается водный режим рек в середине XX в.

Для анализа по графоаналитическому методу выбраны 51 гидрологический пост с непрерывными рядами наблюдений за 1960–2017 гг. (58 лет), из которых 11 постов – с наблюдениями за 1930–2017 гг. Некоторые из них расположены на одном водотоке, что позволило оценить многолетние изменения водного стока с нарастанием площади водосбора.

Получаемая величина изменения слоя стока $W_{\text{изм}}$ в явном виде не отображает глубину наблюдаемых изменений. Для наглядности ее допускается сравнивать с иными характеристиками стока, например слоем стока за половодье или за год. Полученная при этом величина показывает кратность превышения произошедших изменений. Однако следует учитывать, что сравнение $W_{\text{изм}}$ с периодом N является не совсем корректным в силу наличия тренда в

ряду слоя стока половодья. По этой причине в данной работе рассматривалось отношение $W_{\text{изм}}$ к годовому стоку W_0 (мм):

$$k_i = W_{\text{изм}} / W_0, \quad (4)$$

поскольку значимый тренд W_0 за период N отсутствует вследствие роста стока в межень [Джамалов и др., 2017].

Выделение масштаба антропогенной составляющей изменений стока произведено на основании данных о полезной емкости водохранилищ с полным объемом более 1 млн м³ в бассейне Дона с использованием данных из [Каталог..., 1988]. Водоохранилища сезонного и многолетнего регулирования стока используются для его перераспределения с целью накопления водных ресурсов в многоводные фазы (половодье) и сработки запасов в маловодные (межень). То есть климатически обусловленное снижение стока воды в половодье дополняется антропогенным снижением за счет аккумуляции части стока в полезных емкостях водохранилищ. Учесть ежегодную аккумуляцию не представляется возможным из-за отсутствия данных об уровне наполнения водоемов (не каждый год происходит сработка до УМО и последующее наполнение до НПУ), поэтому расчет аккумуляции воды по величине суммарной полезной емкости водохранилищ в бассейне реки – это величина максимально возможного сокращения стока половодья. Выбор рек для такой оценки был обусловлен наличием гидрологической информации в близких к устьям створах. Из анализа исключены Воронежское и Краснооскольское водохранилища, поскольку гидропосты Липецк и Купянск расположены выше по течению.

Для оценки эффективности управления водными ресурсами речных систем, гидрологический режим которых регулируется одним или несколькими одиночными водохранилищами или их каскадом, применен показатель техногенного потенциала регулирования (ТПР) речного стока [Эдельштейн, 2005]. Он представляет собой отношение полезного объема водохранилищ при НПУ ($W_{\text{п}}$) к объему стока рек рассматриваемой территории в многоводные фазы ($\Sigma Q_{\text{мф}}$) при среднесуточных расходах воды ($Q_{\text{мф}}$), превышающих их среднегодовое значение за многолетний период гидрометрических наблюдений (\bar{Q}) в створах, соответствующих местоположению гидроузлов – регуляторов речного стока:

$$\Theta = \sum_n \frac{W_{\text{п}}}{\sum_m Q_{\text{мф}} \cdot t}, \quad (5)$$

где n – количество водохранилищ, m – число случаев со среднесуточными расходами выше нормы

$(Q_{\text{мф}} > \bar{Q})$, $t = 86\,400$ с – количество секунд в сутках. Он отражает возможность ограничения катастрофических наводнений в речных долинах путем заблаговременного опорожнения полезной емкости водохранилища в случаях прогноза притока в него объемов воды, соизмеримых с размером этой емкости, равной проектной величине динамических водных ресурсов [Вуглинский, 1991] того или иного водохранилища. Для расчета величины $\Sigma Q_{\text{мф}}$ были использованы сведения о стоке до 1970 г., т. е. за период, который можно считать условно естественным.

Для оценки суммарного испарения с искусственных водоемов в бассейне р. Дон выше Цимлянского водохранилища использованы различные методы. Сведения о количестве водоемов, их площади и объеме при НПУ получены из справочника [Каталог..., 1988] и материалов ФГУП «Центр Российского регистра гидротехнических сооружений». В исследуемом бассейне находится 384 средних и больших водохранилищ объемом более 1 млн м³ с суммарной площадью 408,4 км², а также 938 малых водохранилищ и прудов объемом 0,01–1 млн м³ и суммарной площадью 111 км². Суммарный объем всех искусственных сооружений оценивается в 1,6 км³.

Первый способ расчета испарения с поверхности водохранилищ заключался в определении характерных значений испаряемости в бассейнах притоков Дона по карте атласа Мирового водного баланса (АМВБ) [Атлас..., 1974]. Полученные характерные значения умножались на площадь поверхности водохранилищ при НПУ. Для 390 крупных водоемов общей площадью 408,4 км² объем испаряющейся воды в среднем за многолетний период (до 1975 г. по материалам, послужившим основой атласа) был оценен в 0,27 км³. При этом средний слой испаряемости составил 665 мм. Для небольших водоемов эта величина равнялась 0,07 км³. Суммарная величина испарения с искусственных водоемов по данному методу оказалась равной 0,35 км³.

Второй способ – определение испарения с поверхности водохранилищ по формуле Б.Д. Зайкова [Зайков, 1949]

$$E = 0,14(e_0 - e_{200})(1 + 0,72w_{200}), \quad (6)$$

где e_0 – максимальная упругость водяного пара при температуре поверхности воды (мб), e_{200} , w_{200} – влажность воздуха (мб) и скорость ветра (м/с) на высоте 2 м над поверхностью воды.

Основной проблемой для возможности применения данного метода является отсутствие открытых данных или измерений температуры воды водохранилищ. Для оценки использованы среднедекадные данные температуры поверхности воды Воронежского и Матырского водохранилищ за 2016–2017 гг.,

а также данные Воронежской метеостанции (архив по метеостанции Липецк для 2016–2017 гг. отсутствует) [Архив погоды..., 2019]. В 2016–2017 гг. среднегодовая температура воздуха в Воронеже составила соответственно 7,5 и 6,5°C, а за наиболее энергоактивный период с апреля по октябрь – 15,1 и 11,9°C соответственно. Оценка суммарной величины испарения в 2016–2017 гг. при использовании данных о температуре воды Воронежского водохранилища составила 0,58 и 0,41 км³, а по данным Матырского водохранилища – 0,45 и 0,4 км³ соответственно.

Испаряемость для водоемов степной зоны также рассчитывалась по среднемесячной температуре и относительной влажности воздуха [Константинов, 1968] как

$$E = 0,0018(T + 25)^2(100 - r), \quad (7)$$

где T и r – среднемесячная температура и относительная влажность воздуха.

Использование этого метода дало величину суммарного испарения с поверхности водохранилищ в 2016 и 2017 гг. 0,37 и 0,34 км³ соответственно.

При расчетах вторым и третьим способами необходимо учитывать трансформацию метеозлементов при переходе воздушной массы с суши на акваторию водоема путем внесения поправки в исходные данные через коэффициент трансформации [Руководство..., 1983]. Однако, при средней площади водохранилищ порядка 1 км² данной поправкой авторы сочли возможным пренебречь.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Водный режим рек бассейна Дона, в соответствии с классическими представлениями, характеризуется высоким весенним половодьем. В среднем на юге бассейна оно начинается во второй половине февраля, на реках северной части – в третьей декаде марта и продолжается от 10 дней на малых реках до 1,5–2 месяцев – на крупных. За этот небольшой отрезок времени по ним проходит от 35 до 100% годового стока [Кислов и др., 2008]. На реках Верхнего и Среднего Дона, как правило, половодье проходит одной волной, однако из-за частого возврата холодов их может быть несколько, что особенно характерно для низовья Дона и в годы с растянутой весной.

За последние 40 лет водный сток в период половодья сократился на реках бассейна Дона в среднем на 30–40%: от 10% в верховьях Воронежа, Хопра и Медведицы до более чем 50–60% в бассейнах рек Северский Донец и Оскол [Джамалов и др., 2017].

Построение ИКС и их анализ совместно с рассчитанными стандартными критериями оценки од-

нородности рядов (критерии Фишера и Стьюдента) подтвердили наличие значимых изменений стока половодья (рис. 2).

За год начала изменения стока принималась дата, с которой наблюдалось его устойчивое отклонение от условно-естественных значений (разница между

ИКС весеннего половодья и условно-естественного стока, см. рис. 2). Также проведена оценка величины этих изменений.

В результате начавшегося в бассейне Дона маловодья на 21 гидрологическом посту переломным стал 1972 г., по 6–7 случаев пришлось на 1971

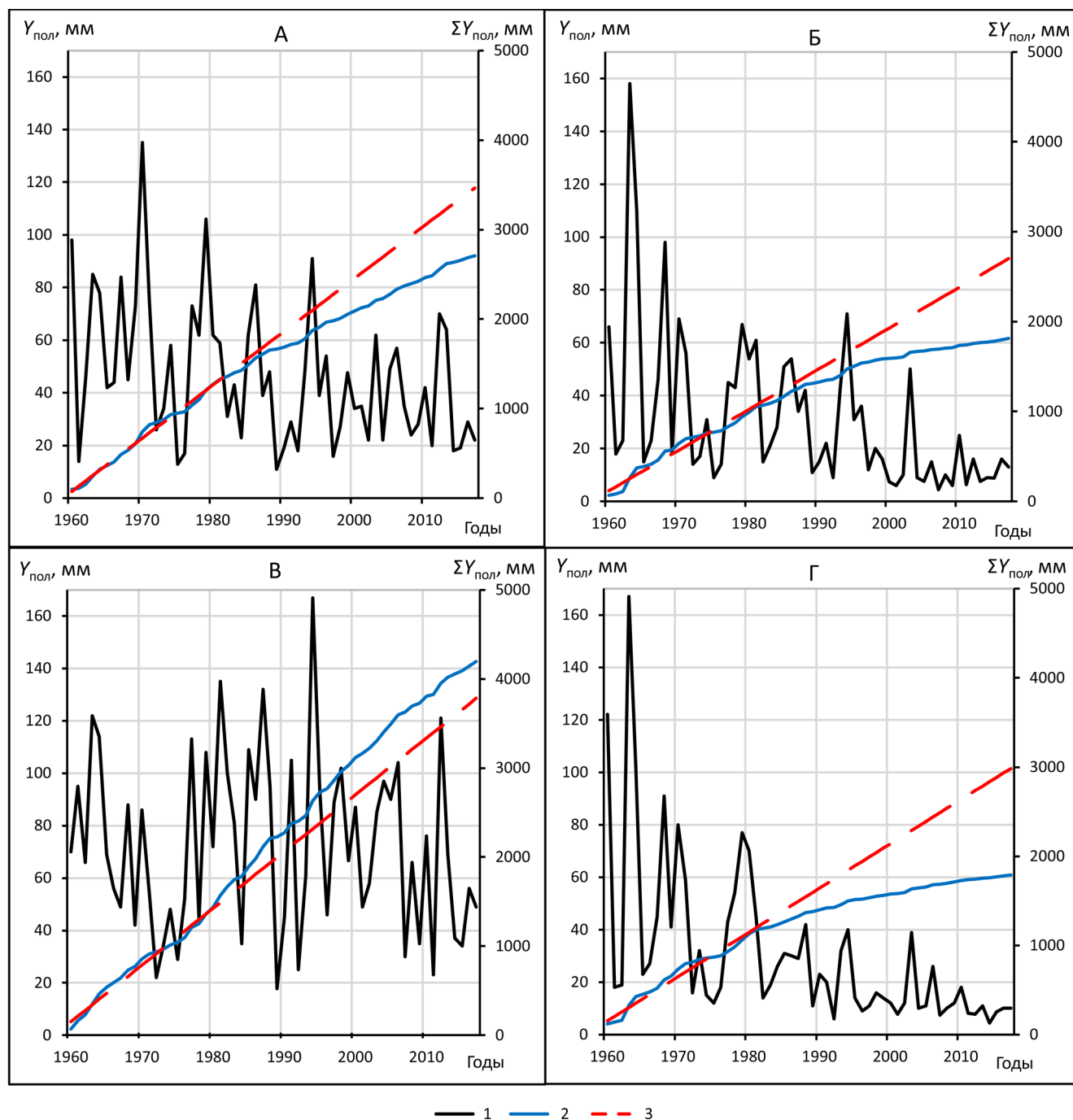


Рис. 2. Динамика слоя стока и ИКС весеннего половодья в бассейне Дона за 1960–2017 гг.:

А – р. Дон – г. Задонск; Б – р. Тихая Сосна – г. Алексеевка; В – р. Хопер – с. Пановка; Г – р. Нежеголь – г. Щебекино; 1 – слой стока половодья (мм); 2 – ИКС весеннего половодья (мм); 3 – ИКС условно-естественного стока за 1930–1970 гг. (мм)

Fig. 2. Dynamics of runoff depth and the integral flow curves (IFC) of spring floods in the Don River basin during 1960–2017:

А – the Don River – Zadonsk; Б – the Tikhaya Sosna River – Alekseevka; В – the Khooper River – Panovka;

Г – the Nezhgol' River – Schebekino; 1 – flood runoff depth (mm); 2 – IFC of spring floods (mm);

3 – IFC of conditionally unmodified river flow during 1930–1970 (mm)

и 1973 г. Так, слой стока весеннего половодья в 1972 г. составил в среднем 19% от нормы того периода, варьируя от менее чем 10% в бассейнах малых рек Нижнего Дона до 15–30% от нормы в бассейнах Хопра и Медведицы и 40–47% от нормы в бассейнах Красивой Мечи, Сосны и Иловли. Последовавшие за ним половодья четырех лет характеризовались большим стоком, но в среднем составили лишь 42, 71, 30 и 44% от нормы соответственно. За рассматриваемый период близкая к норме водность наблюдалась лишь в бассейнах Хопра, Медведицы и Иловли в 1974 г.

Хотя весеннее маловодье 1972–1976 гг. отразилось на всех ИКС, для подавляющего большинства рек условно-естественный режим формирования стока можно продлить до 1980 г., поскольку в 1977–1980 гг. устойчивость линейного тренда ИКС сохранилась (см. рис. 2). Последовавшие за этим два периода сокращения стока в 2006–2010 гг. и 2012–2017 гг. имели чисто климатические причины: в результате роста зимней температуры воздуха,

формировавшийся снежный покров оказывался недостаточным для развития полноценного половодья [Киреева и др., 2017].

На общем фоне выделяется многолетняя динамика слоя весеннего стока в бассейне Хопра. По рядам многолетних данных за 1959–2017 гг. диагностируются признаки циклических колебаний: однородных в верховьях р. Хопер (с. Пановка) (см. рис. 2В) и с уменьшающейся дисперсией вниз по течению (участок Балашов – Бесплемяновский). На графиках ИКС подобные изменения проявляются в виде локальных неровностей на фоне небольшого увеличения угла ИКС в верховьях после 1980 г. и уменьшения угла наклона ИКС – на участке Балашов – Бесплемяновский. Установленное отличие в динамике, вероятно, определяется ростом антропогенной нагрузки по мере увеличения площади водосбора, а также различиями в изменении климата по направлению к южным степям (рис. 3).

Аналогичные особенности выявлены и для паводочного стока в верховьях р. Медведицы.

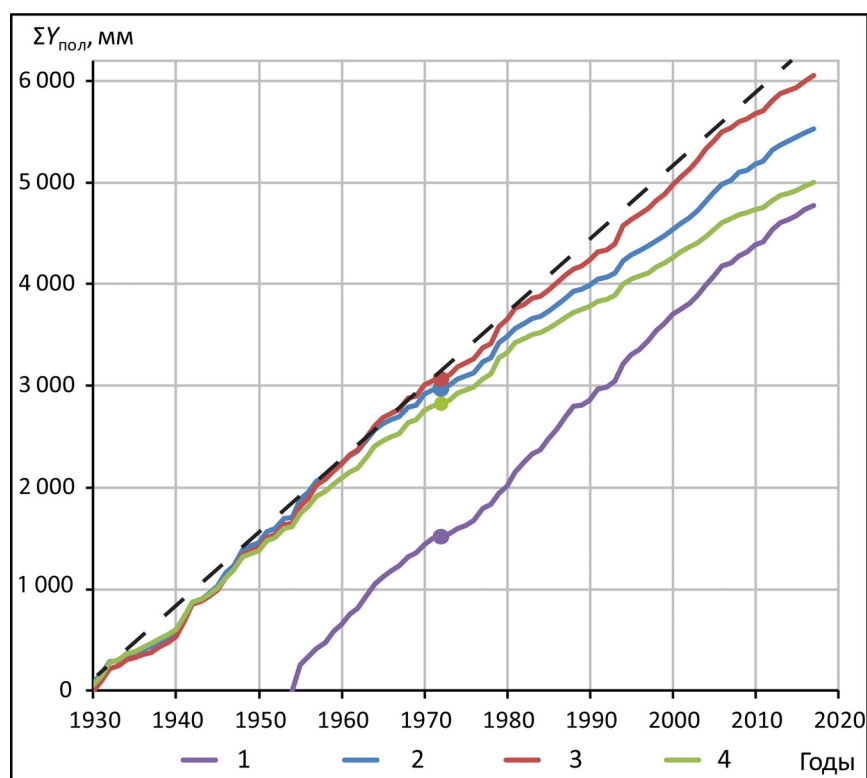


Рис. 3. Интегральные кривые стока реки Хопер:

1 – Пановка (898 км от устья); 2 – Балашов (595 км); 3 – Поворино (437 км);
4 – Бесплемяновский (244 км).

Точка – начало изменения режима весеннего половодья; пунктирная прямая – тренд условно-естественного стока

Fig. 3. Integral flow curves of the Khopra River:

1 – Panovka (898 km from the mouth); 2 – Balashov (595 km); 3 – Povorino (437 km);
4 – Besplemyanovskiy (244 km).

Point – start of the drift in spring flood regime; dotted line – trend of conditionally unmodified flow

Гораздо позже начались изменения стока весеннего половодья на ряде малых рек Среднего и Нижнего Дона: на Елани (1989), Кундрючьей (1991), Тузлове (1996), Матыре (1997), Березовой (2001). Определить причины столь позднего начала изменений стока половодья довольно сложно. В рассматриваемые сроки также отмечались маловодные периоды, обусловленные климатическими изменениями, однако и антропогенная нагрузка на малые водосборы менялась значительно в зависимости от экономической ситуации.

По результатам проведенного анализа многолетних изменений стока половодья все реки бассейна Дона могут быть разделены на три группы. К *первой* относятся реки, на которых сокращение стока весеннего половодья наблюдалось после 1980 г., например р. Дон на участке Задонск – Лиски и его притоки (Красивая Меча, Сосна, Девица), Савала, Иловля у с. Александровка, Северский Донец и его притоки (Нежеголь, Оскол, Валуй, Калитва у хут. Погорелов, Ольховая), а также р. Кундрючья (рис. 4А). Частными случаями этой группы стали реки Лесной Воронеж, Кардаил и Тузлов, на которых

заметное сокращение весеннего стока началось только в 1990-х гг. после череды многоводных лет. Поскольку начало изменений пришлось на участок превышения фактическими значениями ИКЕС, то суммарные изменения $W_{изм}$, наблюдаемые в настоящий момент, представляются незначительными (см. рис. 4Б).

На реках *второй* группы существенных изменений в многолетней динамике весеннего стока не наблюдалось вплоть до начала засушливого периода 2006–2010 гг. На ИКС это могло выражаться как практически полным соответствием ИКЕС до указанного периода, так и формированием параллельной кривой после засушливого периода 1980–1990 гг. В нее попали реки Дон (ст. Казанская и хут. Беляевский), Воронеж (г. Липецк-2), Матыра (с. Крутое), Хопер (хут. Бесплемяновский), Ворона (с. Чутановка и г. Борисоглебск), Бузулук (ст. Преображенская), Аткара (г. Аткарск), Терса (с. Елань), Арчеда (хут. Нижнянский), Иловля (с. Боровки), Есауловский Аксай (хут. Водянский), Чир (ст. Об-

ливская), Глубокая (хут. Астаховский), Калитва (хут. Кудиновка) (см. рис. 4В).

К *третьей* группе были отнесены реки, на которых значительных изменений многолетней динамики стока не диагностировано: Хопер на участке Пановка – Поворино, Карай (с. Подгорное), Кумылга (хут. Ярской), Медведица (с. Лысье Горы) (см. рис. 4Г).

Примечательно, что пространственное распределение типов многолетних изменений весеннего половодья, соответствующих характерным рисункам ИКС относительно ИКЕС, достаточно тесно связано с расположением водохранилищ и прудов в пределах бассейна Дона (рис. 5). Так, в области наибольшей плотности малых и средних водохранилищ в бассейнах Верхнего Дона (в т. ч. рек Сосна и Битюг), Северского Донца в верховьях и низовьях в пределах РФ практически повсеместно на реках сокращение весеннего стока наблюдалось после 1980 г. В бассейне р. Хопер, где плотность искусственных водоемов на порядок ниже, сокращение стока началось позже

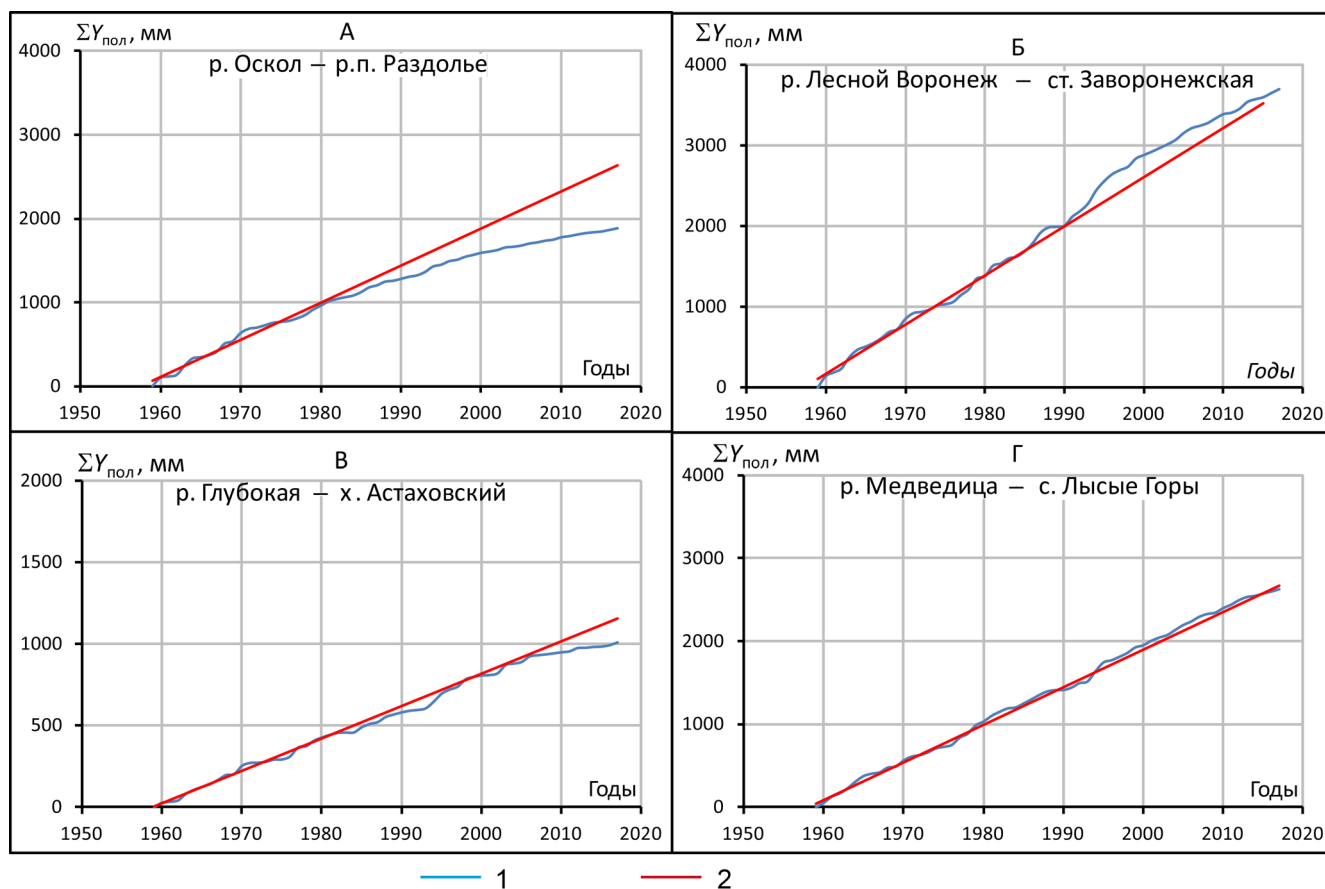


Рис. 4. Характерные ИКС весеннего половодья в бассейне Дона.

А – сокращение стока после 1980 г.; Б – изменение стока после 1990 г.; В – сокращение стока после 2006 г.; Г – без изменений многолетней динамики стока; 1 – интегральная кривая стока; 2 – кривая условно-естественного стока

Fig. 4. Typical IFC of spring floods in the Don River basin.

А – flow decrease after 1980; Б – flow change after 1990; В – flow decrease after 2006; Г – no changes in the long-term flow dynamics; 1 – Integral flow curve; 2 – conditionally unmodified flow trend

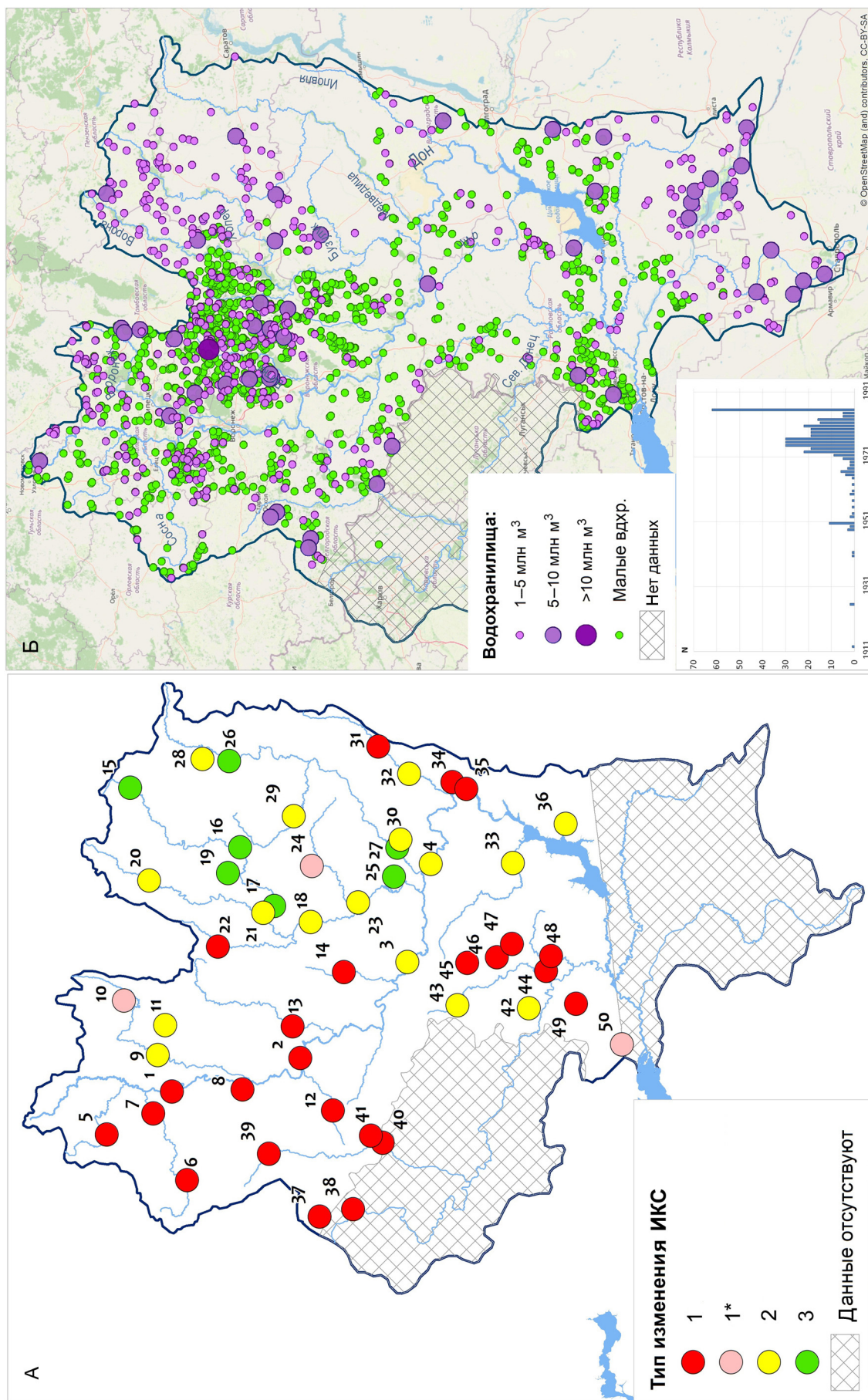


Рис. 5. Сопоставление характера изменения весеннего стока рек (А) и расположения водохранилищ в бассейне Дона (Б).
Сокращение весеннего стока: 1 – после 1980 г.; 1* – после 1990 г.; 2 – после 2006 г.; 3 – без изменений стока

Fig. 5. Comparison of spring river flow changes (A) depending on the location of reservoirs within the Don River basin (Б).
Spring flow decrease: 1 – after 1980; 1* – after 1990; 2 – after 2006; 3 – no changes in river flow

(после 2006 г.) или не наблюдалось совсем (реки второй и третьей групп). При этом на самом Хопре вниз по течению отмечена нарастающая деградация весеннего стока с переходом ИКС от третьего ко второму типу, наиболее заметная ниже впадения рек Вороны и Савалы со значительным антропогенным воздействием в пределах их водосборов. По мнению авторов, подобная смена группы определенно связана с нарастанием суммарной полезной емкости водохранилищ выше анализируемого поста. Так, выше г. Балашова она составляет 48,8 млн м³, увеличиваясь к г. Поворино незначительно – до 53,9 млн м³. Ниже впадения р. Вороны суммарная полезная емкость водохранилищ (к г. Новохоперск) возрастает практически вдвое – до 98,4 млн м³, а ниже впадения не крупной р. Савалы – до 126,8 млн м³.

Обратная тенденция (некоторого уменьшения деградации весеннего стока) наблюдается на самом Дону. Если в его верхнем течении при значительной антропогенной нагрузке малыми и средними водохранилищами сокращение весеннего стока значительно и характеризуется первым типом ИКС, то ниже по течению с увеличением водности и постепенным снижением нагрузки дефицит весеннего стока уменьшается, а после впадения Хопра тип ИКС меняется с первого на второй (см. рис. 5).

Для бассейна Дона в целом характерно сокращение слоя стока половодья на 20–40%, что составляет около 50 мм, но наиболее ярко оно прослеживается в юго-восточном направлении. Самый высокий слой стока, близкий к условно-естественному, формируется в бассейне Хопра (г. Поворино, более 60 мм), относительно пониженный (30–40 мм) – в бассейне Медведицы, а наиболее низкий (20–30 мм) – в бассейнах рек Бузулука, Иловли и притоков Нижнего Дона. Статистический анализ рядов слоя стока в современных климатических условиях свидетельствует о существенной деградации половодья рек как фазы водного режима: на 60% постов зафиксировано статистически значимое уменьшение математического ожидания, на 50% – статистически значимое увеличение дисперсии, т. е. слой стока за половодье отличается большой изменчивостью. Таким образом, сток половодья, близкий к условно-естественному, сохранился лишь в бассейнах рек Хопер, Медведица и в верховьях Воронежа.

Анализ изменений стока половодья с использованием ИКС подтверждает полученные выводы о сокращении половодья. В то же время, метод позволяет с несколько другого ракурса взглянуть на проблему его деградации в бассейне Дона. Так, наблюдаемое суммарное изменение стока $W_{изм}$ для участка Задонск – Лиски за период 1981–2017 гг. составило 759–847 мм (рис. 6А), что эквивалентно суммарному слою стока за 6–8 лет, а $\Sigma Y_{ИКС}$ для фактически наблю-

даемого стока оказался на 21–22% ниже, чем $\Sigma Y_{ИКС}$.

Среди донских притоков наиболее значительные изменения стока весеннего половодья наблюдаются на реках Нежеголь, Тишанка и Панышинка, Валуй, Савала, Тихая Сосна, Оскол, Девица, Ольховая и Быстрая. Примечательно, что все реки имеют площадь водосбора, не превышающую 2–4 тыс. км². Сокращение стока весеннего половодья после 1980 г. на 30–40% для выделенных рек эквивалентно стоку 8–17 лет, а для рек Тишанка и Панышинка – до 26 лет.

Для бассейна Северского Донца (Нежеголь, Оскол и Валуй), Девицы и Тихой Сосны (Верхний Дон) и Савалы (бассейн Хопра) отклонение интегральной кривой фактического стока ($\Sigma Y_{ИКС}$) от $\Sigma Y_{ИКС}$ составляет 30–39%, что эквивалентно суммарному слою стока за 9–10 лет (см. рис. 6А) и согласуется с [Джамалов и др., 2017].

Области относительного сокращения стока половодья на 30–50% [Джамалов и др., 2017] соответствует уменьшение $\Sigma Y_{ИКС}$ в сравнении с $\Sigma Y_{ИКС}$ на 20–29% для верхней части бассейна Северского Донца, большинства рек Верхнего Дона, а также Большой, Калитвы, Подгорной и Иловли в верховьях. Реки, на которых отмечены изменения этого диапазона, имеют площадь водосбора от 1,5 до 69,5 тыс. км². Так, для рек лесостепной зоны (Дон, Красивая Меча, Сосна, Битюг) сокращение стока половодья к 2017 г. составило 759–949 мм, что эквивалентно стоку этих рек за 6–12,4 лет. Для рек севера и юга степной зоны наблюдаемое сокращение стока относительно условно-естественного периода составило порядка 700–750 и 220–500 мм соответственно, что в силу большей аридности климата эквивалентно стоку этих рек за 9–13 лет.

Умеренное сокращение стока весеннего половодья на 10–20% наиболее характерно для рек средней части бассейна Дона. Среднее изменение стока за 1981–2017 гг. здесь составило от 3 до 18 мм, что суммарно за весь период эквивалентно стоку за 2,8–6,6 лет. В то же время на ряде рек этой группы последние 10–20 лет наблюдается продолжение сокращения весеннего стока, усугубляемое маловодьем последнего десятилетия [Киреева и др., 2017]. Лишь для рек Хопер у с. Пановка и Медведица у ст. Арчединская диагностировано некоторое увеличение стока половодья на 2–11 мм, несмотря на маловодье XXI в., которое не подтверждается стандартными статистическими методами.

Среднее изменение стока за период нарушенного режима ($\Delta Y_{изм}$) составило 11,6 мм. Наибольшая интенсивность изменений наблюдалась в бассейне Верхнего Дона и в верхней части бассейна Северского Донца, где $\Delta Y_{изм}$ составил 20–33 мм/год (см. рис. 6Б). Для оценки репрезентативности получен-

ных результатов для 11 рядов аналогичные ИКС были построены по данным за период 1930–2017 гг. Полученные по ним оценки $\Delta Y_{\text{изм}}$, $W_{\text{изм}}$ и k_i согласуются с результатами расчетов на коротких рядах (1960–2017), а относительная ошибка определения величин не превышает 5%.

Изменение весеннего стока и деградация половодья в бассейне ярко проявляются и в динамике максимальных расходов воды. В верховьях Дона (г. Задонск) с начала 1930-х по 2000-е гг. максимальный модуль стока сократился со 100 до 40 л/(с·км²), для р. Сосны – со 140 до 40 л/(с·км²), для р. Вороны (г. Борисоглебск) – с 60 до 20 л/(с·км²). В среднем его сокращение для всего бассейна составило 40–60%. В связи с изменением формы половодья заметно поменялась величина коэффициента его дружности. На всех постах зафиксировано его значимое снижение, причем для многих рек до 1,5–2,0 раз.

Изменение стока $W_{\text{изм}}$ половодья практически полностью компенсируется его ростом в другие фазы гидрологического режима в верховьях Дона (в бассейнах Сосны и Битюга), и не компенсируется в более сухих южных районах нижнего течения Дона и в бассейне Северского Донца (см. рис. 6В), что подтверждается отсутствием значимых трендов годового стока [Джамалов и др., 2017].

Деградация многоводной весенней фазы как таковой ведет к серьезным необратимым последствиям, в числе которых снижение плодородия почв в пределах поймы вследствие прекращения их регулярного удобрения плодородным речным илом, повышенные потери стока на испарение и инфильтрацию для искусственных водоемов, а также ухудшение экологической ситуации на фоне дефицита водных ресурсов в весенний период. Подобные последствия наблюдаемых изме-

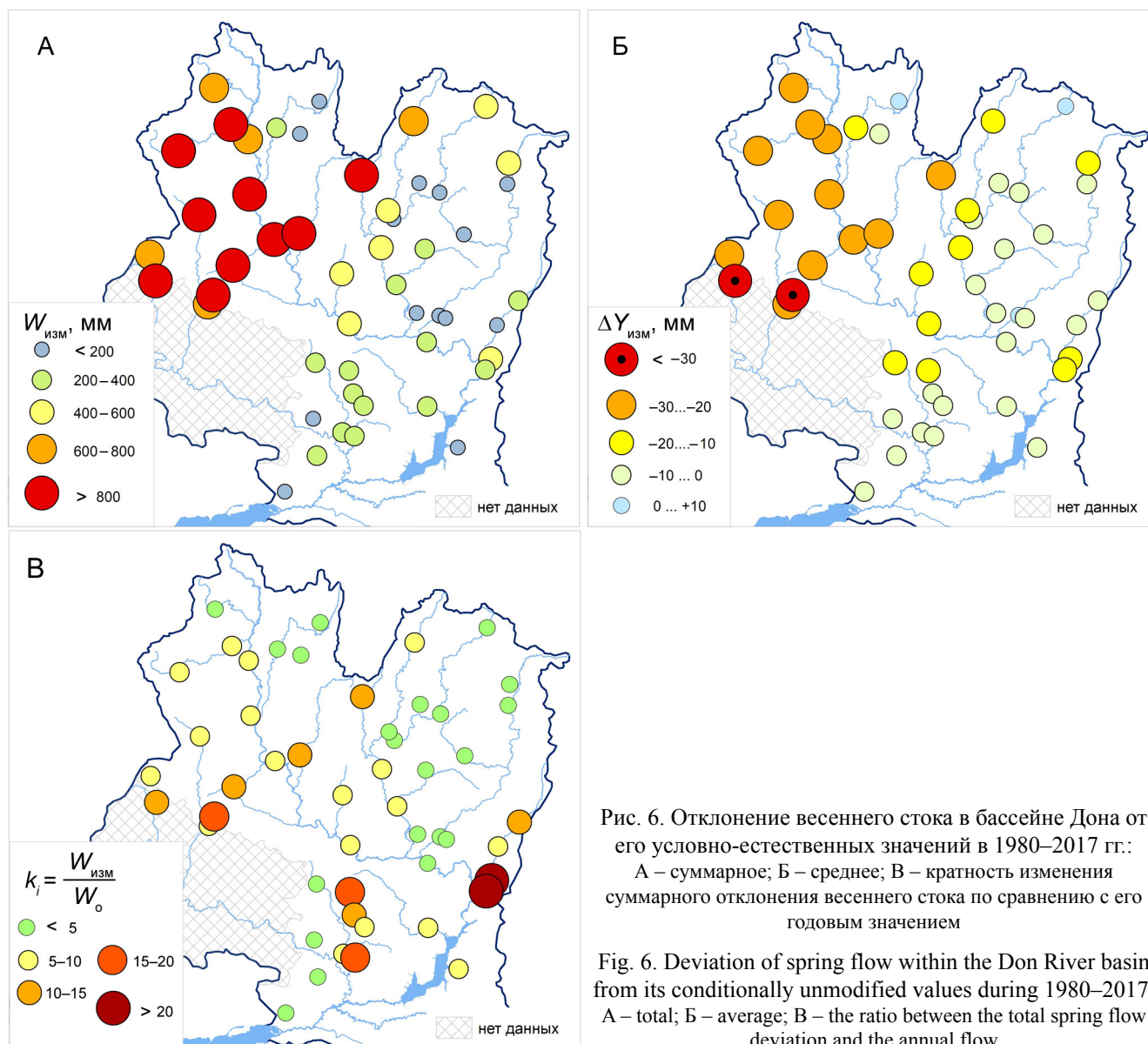


Рис. 6. Отклонение весеннего стока в бассейне Дона от его условно-естественных значений в 1980–2017 гг.: А – суммарное; Б – среднее; В – кратность изменения суммарного отклонения весеннего стока по сравнению с его годовым значением

Fig. 6. Deviation of spring flow within the Don River basin from its conditionally unmodified values during 1980–2017: А – total; Б – average; В – the ratio between the total spring flow deviation and the annual flow

нений уже сейчас требуют пересмотра основных подходов в водопользовании как поверхностными, так и подземными водоисточниками.

Поскольку до настоящего времени на реках бассейна Дона не начался цикл многоводных лет, говорить о возможном восстановлении стока преждевременно. Однако следует отметить, что подобная продолжительная серия маловодных весен на реках Донского бассейна отмечается впервые за период наблюдений с 1891 г. [Kharlamov et al., 2020].

Для проверки гипотезы о значимом вкладе водохранилищ в изменение характеристик стока половодья на реках Донского бассейна привлечены сведения о времени создания водохранилищ, проведена оценка создаваемого ими дополнительного испарения с водосбора и возможный эффект внутригодового перераспределения стока.

В среднем за многолетний период суммарные потери воды на испарение с поверхности водохранилищ в бассейне р. Дон выше Цимлянского водохранилища (включая водосбор р. Чир), оцененные различными приведенными выше способами, с суммарной площади искусственных водоемов 519,4 км² составляют около 0,4 км³, что соответствует среднему слою испаряемости 770 мм. По данным Атласа мирового водного баланса, слой осадков на исследуемой территории составляет в среднем 600 мм. Тогда видимое испарение составляет 170 мм, что с учетом суммарной площади водоемов дает оценку величины безвозвратных потерь около 0,09 км³ в год, или 0,5% от среднегодового стока Дона, в створе Калач-на-Дону. В маловодные годы эта доля может возрастать до 1,2%.

Наиболее активно строительство водохранилищ происходило в период 1970–1985 гг. (см. рис. 5Б). За этот период на заполнение объема новых водохранилищ (выше Цимлянского) в бассейнах крупнейших притоков Дона, включая бассейн р. Чир, без учета потерь воды на инфильтрацию в береговую зону было затрачено порядка 0,75 км³ речного стока [Каталог..., 1988]. Сведения о дате строительства малых водохранилищ и прудов зачастую отсутствуют, поэтому учесть объем стока на их заполнение не представляется возможным.

Учет малых водоемов с отсутствием гидротехнических сооружений и неизвестной полезной емкостью невозможен, поэтому далее приведены сведения об искусственных водоемах и анализ изменений стока крупнейших притоков Дона первого и второго порядков. Выбор рек обусловлен наличием гидрологической информации в близких к устьям створах. Для анализа использован каталог водохранилищ объемом более 0,1 млн м³, которые оказывают наибольшее влияние на межгодное и сезонное перераспределение стока воды (таблица)

[Каталог..., 1988]. Из анализа исключено Воронежское водохранилище, поскольку пост Липецк расположен выше по течению.

Наибольшее количество водохранилищ рассматриваемой категории находится в бассейнах Хопра, Медведицы и Воронежа (см. табл.). Для большинства бассейнов характерно преобладание водохранилищ сезонного регулирования стока, за исключением Хопра и Медведицы. Наибольший суммарный полезный объем в бассейнах рек Воронеж (за счет крупного Матырского водохранилища, 120 млн м³) и Хопер (за счет небольших, но многочисленных водохранилищ с полезной емкостью не более 6,3 млн м³).

Для выбранных водосборов показатель ТПР изменялся от 3 до 28,5%. Для указанных в таблице постов выполнена оценка изменения стока за многоводные (выделенные по среднемесячным расходам, превышающим их среднегодовые значения) и маловодные (при среднемесячных расходах меньше среднегодовых) фазы для периодов до и после 1970 г. (см. табл.). 1970 год был выбран граничным, поскольку именно после него отмечается наиболее активное возведение плотин. Очевидно, что в среднем за многолетний период регулирующая емкость водохранилищ не использовалась на 100%. Следует заметить, что некоторые гидроузлы малых водохранилищ находятся в аварийном состоянии и не производят регулирование. Тем не менее средняя доля полезного объема водохранилищ в сокращении объема стока в многоводные фазы составила в среднем 43%.

Уменьшение стока в многоводные фазы увеличивалось с ростом площади водосбора и зависело от количества водохранилищ в бассейне (рис. 7А, Б), а относительная доля его уменьшения соответствовала ТПР бассейнов (за исключением р. Чир). Сокращение стока в многоводную фазу в результате регулирования водохранилищами в бассейне Чира имеет меньшее значение, нежели иные факторы его изменения.

Доля прироста стока за маловодные фазы составила 6–11,2% за исключением р. Чир, где не превысила 2,9%. Возможно, это связано с более интенсивным изъятием стока на орошение в южной части бассейна Дона. Увеличение объема стока в маловодные фазы прямо пропорционально площади водосбора и количеству водохранилищ, а его связь с величиной ТПР отсутствует (см. рис. 7). Практически для всех створов характерно более значительное сокращение стока за многоводные фазы, чем прирост за маловодные. Этот факт можно объяснить потерями воды на орошение и водоснабжение в межливневый период. Полученные результаты указывают на значительный вклад во-

Таблица

Основные параметры водохранилищ [Каталог..., 1988] и гидрологические характеристики изменения стока в бассейнах наиболее крупных притоков Дона

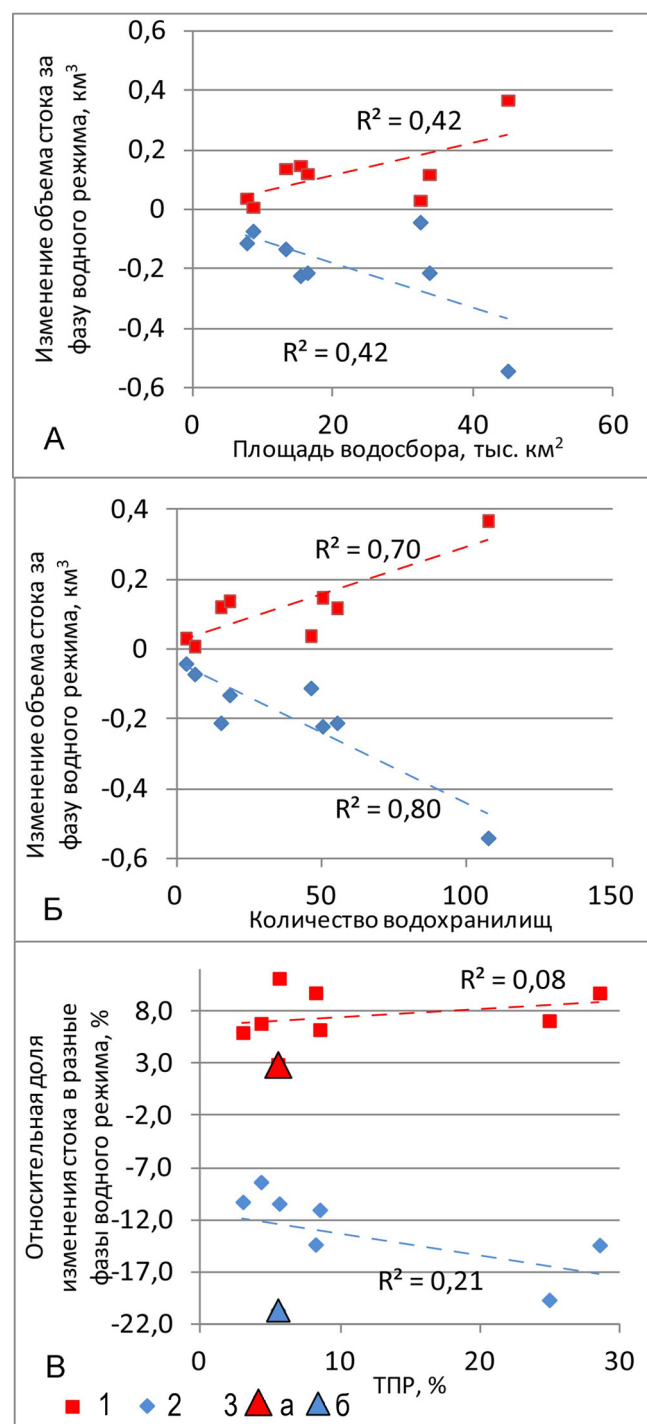
Река	Красивая Меча	Битюг	Чир	Воронеж	Быстрая Сосна	Медведица	Холер	Ворона (приток Хогра)
Пост	Ефремов	Бобров	Обливская	Липецк	Елец	Арчединская	Бесплемяновский	Борисоглебск
Площадь водосбора, км ²	3240	7650	8540	15300	16300	33700	44900	13200
Водохранилища объемом более 0,1 млн м ³ , шт.	3	46	6	50	15	55	107	18
Водохранилища сезонного регулирования стока, шт.	2	24	2	41	14	27	47	14
Водохранилища многолетнего регулирования стока, шт.	1	21	4	9	1	27	60	5
Период строительства	1974–1977	1955–1985	1953–1979	1965–1985	1962–1982	1925–1985	1949–1985	1950–1983
Площадь водохранилищ, км ²	1,3	32,6	7,4	162	8,4	43,2	57,6	11,4
Полный объем водохранилищ, млн м ³	0,0069	0,099	0,02	0,269	0,0231	0,121	0,209	0,047
Доля полного объема водохранилищ, построенных после 1970 г.	100	99	90	95	87	74	92	91
Полезный объем водохранилищ, млн м ³	0,0066	0,092	0,012	0,24	0,0205	0,097	0,18	0,036
Технологичный потенциал регулирования, %	4,3	24,9	5,5	28,5	3	8,5	8,2	5,6
Изменение стока реки за многоводную фазу в 1970–2005 гг. по сравнению с 1936–1969 гг., км ³	-0,04	-0,11	-0,07	-0,22	-0,21	-0,21	-0,54	-0,13
Доля полезного объема от изменения стока за многоводные фазы, %*	18	84	17	109	11	46	33	28
Изменение стока реки за маловодную фазу в 1970–2005 гг. по сравнению с 1936–1969 гг., км ³	0,033	0,04	0,01	0,15	0,123	0,12	0,37	0,14
Средний годовой сток за 1970–2005 гг., км ³	0,48	0,56	0,34	1,53	2,05	1,91	3,77	1,25
Относительная доля** сокращения стока в многоводную фазу, %	-8,3	-19,6	-20,6	-14,4	-10,2	-11,0	-14,3	-10,4
Относительная доля** увеличения стока в маловодную фазу, %	6,9	7,1	2,9	9,8	6,0	6,3	9,8	11,2
Изменение годового стока в 1970–2005 гг. по сравнению с 1936–1969 гг., км ³	-0,004	-0,06	-0,05	-0,07	-0,086	-0,09	-0,17	0,01

Примечание. *Полностью полезный объем водохранилищ используется не ежегодно, поэтому следует понимать это отношение как максимальную оценку роли искусственных водоемов в перераспределении стока по сезонам.

**Определена как отношение объема стока в соответствующую фазу водного режима к объему годового стока, выраженное в процентах, за 1936–1969 и 1970–2005 гг.

дохранилищ в изменение характеристик стока при его регулировании.

Для большинства рек доля сокращения стока за многоводную фазу от его годовой величины составила более 10%, наиболее значительны изменения в бассейнах рек Битюг и Чир, где ТПР достиг 24,9 и 5,5% соответственно (см. рис. 7В). Это говорит о том, что для водосбора р. Чир, расположенного южнее, большее значение в уменьшении стока за половодье имеют природные факторы, а не удержание стока в полезных емкостях водохранилищ.



ВЫВОДЫ

Масштабные изменения стока половодья на реках бассейна Дона за последние полвека были приурочены к концу 1970-х гг. В эти периоды наблюдались наиболее существенные климатические изменения, оказывающие прямое и косвенное влияние на факторы формирования весеннего стока.

За последние 40 лет водный сток в период половодья сократился на реках бассейна Дона в среднем на 30–40%: от 10% в верховьях Воронежа, Хопра и Медведицы до более чем 50–60% в бассейнах рек Северский Донец и Оскол. Среднее суммарное уменьшение стока половодья в бассейне Дона $W_{изм}$ по данным 50 постов за 1980–2017 гг. составило 415 мм, а средняя величина его изменения за год $\Delta Y_{изм}$ – 11,6 мм. Наиболее существенное сокращение весеннего стока отмечено на реках Тишанка, Панышинка и Нежеголь. На реках Хопер, Медведица и Воронеж, наоборот, отмечено незначительное увеличение весеннего стока. В бассейнах этих же рек отмечено наибольшее количество водохранилищ объемом более 0,1 млн м³, оказывающих наибольшее влияние на внутригодовое регулирование стока.

По характеру изменения весеннего стока в бассейне Дона выделены три группы рек: в первую вошли реки с сокращением стока после 1980 г. (Дон на участке Задонск – Лиски с притоками, Северский Донец с притоками, Савала, Курдючья); во вторую – с сокращением стока после маловодного периода 2006–2010 гг. (Ворона, Бузулук, Терса, Арчеда, Глубокая, отдельные участки Хопра и Дона и др.); в третью – без значительных изменений в многолетней динамике весеннего стока (Карай, Кумылга, Медведица, Дон и частично Хопер).

Оценено влияние искусственных водоемов на возможное изменение весеннего стока рек бассейна. Величина видимого испарения с поверхности водохранилищ и малых прудов в бассейне Дона выше Цимлянского водохранилища сравнительно

Рис. 7. Влияние водохранилищ на внутригодовое изменение стока рек в бассейне Дона в зависимости от: А – площадей их водосборов; Б – количества водохранилищ; В – их техногенно-потенциального регулирования.

Фазы гидрологического режима: 1 – маловодная; 2 – многоводная; 3 – бассейн р. Чир: а – маловодная; б – многоводная

Fig. 7. Influence of reservoirs on the intra-annual river flow distribution within the Don River basin depending on:

A – the catchments' area; Б – the number of reservoirs;

В – the potential of technogenic regulation.

Phases of the hydrological regime: 1 – low water; 2 – high water; 3 – the Chir River basin: а – low water; б – high water

невелика и составляет 0,09 км³, или 0,5% от среднегодового стока Дона, в створе Калач-на-Дону. Однако в маловодные годы на наиболее антропогенно нагруженных водосборах этот фактор может значительно усиливать дефицит водных ресурсов. Так, например, для Хопра он может достигать 3,1% от годового стока в маловодный год, хотя в средний по водности год составляет около 1%.

Средняя доля суммарного полезного объема водохранилищ в бассейнах крупнейших притоков Дона составляет в среднем 43% от сокращения объема их стока в период половодья, что свидетельствует о значительной возможности сезонного перераспределения стока воды водохранилищами объемом более 0,1 км³.

С увеличением значения ТПР для бассейнов наблюдается увеличение относительного сокращения

стока воды в половодье, что указывает на существенный вклад искусственных водоемов в сокращении стока в весенний период.

Изменения стока в многоводные и маловодные фазы в замыкающем створе притоков имеют прямую связь с количеством водохранилищ в их бассейне.

Применение метода ИКС в совокупности с другими характеристиками стока дает возможность сопоставить влияние природных и антропогенных факторов формирования стока в его внутригодовом распределении. Наилучшие результаты метод ИКС дает при анализе рядов стока по наблюдениям на серии гидропостов, расположенных по длине реки. Для более точного разделения нужны подробные данные о режиме работы водохранилищ.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 19-77-10032 (оценка вклада водохранилищ в изменение характеристик стока половодья) и РФФИ №21-47-00008 (статистический анализ и оценка изменения стока половодья), а также в рамках госзадания АААА-А16-116032810054-3 «Гидрологический режим водных объектов суши в условиях изменения климата и антропогенного воздействия».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас мирового водного баланса. М.; Л.: Гидрометеоздат, 1974. 65 с.
- Болгов М.В., Мишон В.М., Сенцова И.И. Бассейн Верхнего Дона: гидрография, гидрология и водные ресурсы // Труды НИИ геологии ВГУ. Вып. 23. 2005. 138 с.
- Болгов М.В., Мишон В.М., Сенцова И.И. Современное состояние и перспективы использования водных ресурсов бассейна Верхнего Дона // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Серия: География. Геоэкология. 2002. № 1. С. 112–123.
- Вода России. Речные бассейны / под ред. А.М. Черняева. Екатеринбург: АКВА-ПРЕСС, 2000. 536 с.
- Вуглинский В.С. Водные ресурсы и водный баланс крупных водохранилищ СССР. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 223 с.
- Государственный доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2018 году». М.: НИИ-Природа, 2019. 290 с.
- 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.
- Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Киреева М.Б. Современные изменения водного режима рек в бассейне Дона // Водные ресурсы. 2013. Т. 40. № 6. С. 544–556.
- Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Сафронова Т.И. Динамика подземного стока бассейна Дона под влиянием изменений климата // Недропользование XXI век. 2010. № 4. С. 78–81.
- Зайков Б.Д. Испарение с водной поверхности прудов и малых водохранилищ на территории СССР // Труды ГГИ. 1949. Вып. 21(75). 54 с.
- Каталог. Водоохранилища СССР. М.: Союзводпроект, 1988. 276 с.
- Киреева М.Б., Илич В.П., Гончаров А.В., Богачев А.Н., Фролова Н.Л., Пахомова О.М., Соловьева В.В. Влияние маловодья 2007–2015 гг. в бассейне р. Дон на состояние водных экосистем // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2018. № 5. С. 3–13.
- Киреева М.Б., Илич В.П., Фролова Н.Л., Харламов М.А., Сазонов А.А., Михайлюкова П.Г. Вклад климатических и антропогенных факторов в формирование маловодного периода в бассейне р. Дон 2007–2015 гг. // Геориск. 2017. № 4. С. 10–21.
- Киреева М.Б., Фролова Н.Л. Современные особенности весеннего половодья рек бассейна Дона // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2013. № 1. С. 60–76.
- Кислов А.В., Евстигнеев В.М., Малхазова С.М., Соколичина Н.Н., Суркова Г.В., Торопов П.А., Чернышев А.В., Чумаченко А.Н. Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления XXI века. М.: МАКС Пресс, 2008. 292 с.
- Константинов А.Р. Испарение в природе. Л.: Гидрометеоздат, 1968. 532 с.
- Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Водохозяйственные расчеты. Л.: Гидрометеоздат, 1952. 392 с.
- Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. II: Последствия изменений климата. М.: Росгидромет, 2008. 289 с.
- Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество. Ежегодное издание. 1982–2008 гг. / Государственный водный кадастр: справочное издание. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество. Ежегодное издание. 2018 г. / Водный кадастр Российской Федерации: справочное издание. СПб.: Победа, 2019. 153 с.

- Руководство по гидрологическим расчетам при проектировании водохранилищ. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 368 с.
- Справочник водохранилищ СССР. Ч. I. Водоохранилища объемом 10 млн м³ и более. М.: Союзводпроект, 1988. 323 с.
- Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 83 с.
- Фролова Н.Л. Гидрология рек (антропогенные изменения речного стока): учеб. пособие. М.: Географический факультет МГУ, 2006. 112 с.
- Фролова Н.Л., Нестеренко Д.П., Шенберг Н.В. Внутригодовое распределение стока рек России // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2010. № 6. С. 8–16.
- Эдельштейн К.К. Структурная гидрология суши. М.: ГЕОС, 2005. 316 с.
- Kharlamov M., Kireeva M. Drought dynamics in the East European Plain for the period 1980–2018. *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 163, p. 02004, DOI: 10.1051/e3sconf/202016302004.
- Электронные ресурсы
- Архив погоды. Метеостанция Воронеж. URL: <https://rp5.ru> (дата обращения 15.06.2019).
- База данных ФГБУ «Центр Российского регистра гидротехнических сооружений». URL: <http://www.waterinfo.ru/> (дата обращения 10.12.2020).

Поступила в редакцию 21.01.2021

После доработки 15.02.2021

Принята к публикации 18.03.2021

ASSESSMENT OF CLIMATIC AND ANTHROPOGENIC IMPACT ON SPRING RUNOFF IN THE DON RIVER BASIN

N.A. Varentsova¹, M.G. Grechushnikova², E.S. Povalishnikova³, M.B. Kireeva⁴,
M.A. Kharlamov⁵, N.L. Frolova⁶

¹⁻⁶ *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology*

¹ *Central Department of Hydrometeorology and Environmental Monitoring,
Head of the Department of Hydrological Forecasts*

⁵ *Water Problems Institute of RAS, Laboratory for Surface Water Modeling, Junior Researcher*

¹ *Engineer; e-mail: efrnatalie@gmail.ru*

² *Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: allavis@mail.ru*

³ *Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: elenapovalishnikova@gmail.com*

⁴ *Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: kireeva_mb@mail.ru*

⁵ *Engineer, Ph.D. in Geography; e-mail: maks-xool@mail.ru*

⁶ *Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: frolova_nl@mail.ru*

The article examines the flow features of the spring flood in the Don River basin during 1930–2017. Its large-scale changes over the past half century took place in 1980 and 2006–2010. During these periods the most significant climatic changes were observed, aggravated in the 20th century by significantly increased anthropogenic runoff regulation by numerous reservoirs. The application of the method of integral curves in combination with statistical analysis of the spring runoff by the data of 50 stream gauges made it possible to separate the contribution of climatic changes and anthropogenic impacts to the formation of modern decrease of flood runoff on the rivers of the Don River basin. According to our results over the past 40 years the flood runoff has decreased by an average of 30–40%, i.e. from 10% in the upper reaches of the Voronezh, Khoper and Medveditsa rivers to more than 50–60% in the basins of the Seversky Donets and Oskol rivers. In terms of the changes in spring runoff, the rivers of the Don River basin are divided into three groups: with the runoff decrease after 1980, after 2006–2010 and with no changes in spring runoff. According to calculations, the amount of visible evaporation from the surface of reservoirs in the Don River basin upstream the Tsimlyansk reservoir is relatively small and equals to 0.09 km³ or 0.5% of the Don River's average annual flow for the Kalach-on-Don section. However, in dry years this factor can significantly increase the deficit of water resources for most watersheds with intensive economic activity. It is estimated that the total usable volume of reservoirs in the basins of the largest Don River tributaries averages 43% of the decrease in their runoff during the flood period, thus indicating highly possible seasonal redistribution of water runoff by reservoirs with a volume of more than 0.1 km³. The potential of technogenic regulation (PTR) of reservoirs with a volume of more than 0.1 km³ was evaluated. A decrease of the spring river flow with increasing PTR of reservoirs in their basins was noted.

Keywords: annual distribution of runoff, reservoir, technogenic potential of regulation, seasonal flood, climate change

Acknowledgements. The work was financially supported by the Russian Science Foundation (projects No 19-77-10032 (assessment of the contribution of reservoirs to changes of the characteristics of flood runoff) and No. 21-47-00008 (statistical analysis and assessment of changes in flood runoff), and carried out under the framework of the state assignment AAAA-A16-116032810054-3 “Hydrological regime of terrestrial water bodies under climate change and anthropogenic impact”.

REFERENCES

- Atlas mirovogo vodnogo balansa* [World Water Balance Atlas], Moscow, Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1974, 65 p. (In Russian)
- Bolgov M.V., Mishon V.M., Sentsova I.I. Bassein Verkhnego Dona: Gidrografiya, gidrologiya i vodnye resursy [The Upper Don River basin: hydrography, hydrology and water resources], *Tr. NII geologii VGU*, iss. 23, 2005, 138 p. (In Russian)
- Bolgov M.V., Mishon V.M., Sentsova N.I. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy ispol'zovaniya vodnykh resursov basseina Verkhnego Dona [Current state and prospects for the use of water resources in the Upper Don River basin], *Vestn. Voronezh. gos. un-ta*, Seriya: Geografiya. Geoekologiya, 2002, no. 1, p. 112–123. (In Russian)
- Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Kireeva M.B. Sovremennye izmeneniya vodnogo rezhima rek v basseine Dona [Modern changes in the water regime of rivers in the Don River basin], *Vodnye resursy*, 2013, vol. 40, no. 6, p. 544–556. (In Russian)
- Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Kireeva M.B., Safronova T.I. Dinamika podzemnogo stoka basseina Dona pod vliyaniem izmenenii klimata [Dynamics of underground runoff in the Don River basin under the influence of climate change], *Nedropol'zovanie XXI*, 2010, no. 4, p. 78–81. (In Russian)
- 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 River basin and their ecological state], Moscow, GEOS Publ., 2017, 204 p. (In Russian)
- Edel'shtein K.K. *Strukturnaya gidrologiya sushy* [Structural land hydrology], Moscow, GEOS Publ., 2005, 316 p. (In Russian)
- Frolova N.L. *Gidrologiya rek (antropogennye izmeneniya rechnogo stoka)* [River hydrology (anthropogenic changes of river flow)], tutorial, Moscow, Faculty of Geography MSU, 2006, 112 p. (In Russian)
- Frolova N.L., Nesterenko D.P., Shenberg N.V. Vnutrigodovoe raspredelenie stoka rek Rossii [Intra-annual flow regime of rivers in Russia], *Vestn. Mosk. un-ta*, Ser. 5, *Geogr.*, 2010, no. 6, p. 8–16. (In Russian)
- Gosudarstvennyi doklad “O sostoyanii i ispol'zovanii vodnykh resursov Rossiiskoi Federatsii v 2018 godu”* [State report “On the state and use of water resources of the Russian Federation in 2018”], Moscow, NIA-Priroda Publ., 2019, 290 p. (In Russian)
- Katalog. Vodokhranilishcha SSSR* [Catalog. Reservoirs of the USSR], Moscow, Soyuzvodproekt Publ., 1988, 276 p. (In Russian)
- Kharlamov M., Kireeva M. *Drought dynamics in the East European Plain for the period 1980–2018*, E3S Web of Conferences, 2020, vol. 163, p. 02004, DOI: 10.1051/e3sconf/202016302004.
- Kireeva M.B., Frolova N.L. Sovremennye osobennosti veshennego polovod'ya rek basseina Dona [Modern features of the spring flood of rivers in the Don River basin], *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*, 2013, no. 1, p. 60–76. (In Russian)
- Kireeva M.B., Ilich V.P., Frolova N.L., Kharlamov M.A., Sazonov A.A., Mikhailyukova P.G. Vklad klimaticheskikh i antropogennykh faktorov v formirovanie malovodnogo perioda v basseine r. Don 2007–2015 gg. [The contribution of climatic and anthropogenic factors to the formation of low-water period in the basin of the Don River during 2007–2015], *Georisk*, 2017, no. 4, p. 10–21. (In Russian)
- Kireeva M.B., Ilich V.P., Goncharov A.V., Bogachev A.N., Frolova N.L., Pakhomova O.M., Solov'eva V.V. Vliyaniye malovod'ya 2007–2015 gg. v basseine r. Don na sostoyaniye vodnykh ekosistem [Influence of 2007–2015 extreme low flow period in the Don River basin on water ecosystems], *Vestn. Mosk. un-ta*, Ser. 5, *Geogr.*, 2018, no. 5, p. 3–13. (In Russian)
- Kislov A.V., Evstigneev V.M., Malkhazova S.M., Sokolikhina N.N., Surkova G.V., Toropov P.A., Chernyshev A.V., Chumachenko A.N. *Prognoz klimaticheskoi resursoobespechennosti Vostochno-evropeiskoi ravniny v usloviyakh potepleniya XXI veka* [Forecast of climatic resource availability within the East European Plain under the warming of the XXI century], Moscow, MAKS Press Publ., 2008, 292 p. (In Russian)
- Konstantinov A.R. *Isparenie v prirode* [Evaporation in nature], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1968, 532 p. (In Russian)
- Kritskii S.N., Menkel' M.F. *Vodokhozyaistvennyye raschety* [Water management calculations], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1952, 392 p. (In Russian)
- Otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii, T. II, Posledstviya izmenenii klimata* [Assessment report on climate changes and their consequences within the territory of the Russian Federation, vol. II, Consequences of climate change], Moscow, Rosgidromet Publ., 2008, 289 p. (In Russian)
- Resursy poverkhnostnykh i podzemnykh vod, ikh ispol'zovanie i kachestvo. Ezhegodnoe izdanie. 1982–2008 gg.* [Surface and groundwater resources, their use and quality. Annual edition. 1982–2008], Gosudarstvennyi vodnyi kadastr, spravochnoe izdanie. (In Russian)
- Resursy poverkhnostnykh i podzemnykh vod, ikh ispol'zovanie i kachestvo. Ezhegodnoe izdanie. 2018 god* [Surface and groundwater resources, their use and quality. Annual edition. 2018], Vodnyi kadastr Rossiiskoi Federatsii, spravochnoe izdanie, St. Peterburg, Pobeda Ltd. Publ., 2019, 153 p. (In Russian)
- Rukovodstvo po gidrologicheskim raschetam pri proektirovanii vodokhranilishch* [Guidance on hydrological calculations for reservoir design], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1983, 368 p. (In Russian)
- Spravochnik vodokhranilishch SSSR, Ch. I, Vodokhranilishcha ob'emom 10 mln m³ i bolee* [Reference book of reservoirs of the USSR, pt. I, Reservoirs with a volume

- of 10 million m³ and more], Moscow, Soyuzvodproekt Publ., 1988, 323 p. (In Russian)
- Ukazaniya po raschetu ispareniya s poverkhnosti vodoemov* [Guidelines for calculation of evaporation from the surface of water bodies], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1969, 83 p. (In Russian)
- Voda Rossii. Rechnye basseiny* [Water of Russia. River basins], Chernyaev A.M. (ed.), Ekaterinburg, "AKVA-PRESS" Publ., 2000, 536 p. (In Russian)
- Vuglinskii V.S. *Vodnye resursy i vodnyi balans krupnykh vodokhranilishch SSSR* [Water resources and water balance of large reservoirs in the USSR], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1991, 223 p. (In Russian)
- Zaikov B.D. *Isparenie s vodnoi poverkhnosti prudov i mal'lykh vodokhranilishch na territorii SSSR* [Evaporation from the water surface of ponds and small reservoirs in the USSR], *Trudy GGI*, 1949, iss. 21(75), 54 p. (In Russian)
- Web sources*
- Arkhiv pogody. Meteostantsiya Voronezh [Weather archive. Voronezh Weather Station], URL: <https://rp5.ru> (access date 15.06.2019).
- Baza dannykh FGBU "Tsentri Rossiiskogo registra gidrotekhnicheskikh sooruzhenii" [Database of FSBI "Center for the Russian Register of Hydraulic Structures"], URL: <http://www.waterinfo.ru/> (access date 10.12.2020).

Received 21.01.2021

Revised 15.02.2021

Accepted 18.03.2021