

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 556.048

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК МАКСИМАЛЬНОГО СТОКА ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ В БАССЕЙНЕ р. ДОН В НЕСТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ¹

© 2020 г. Н. В. Осипова^а, *, М. В. Болгов^а

^аИнститут водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

*e-mail: osina14@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.02.2020 г.

После доработки 12.02.2020 г.

Принята к публикации 26.02.2020 г.

Обобщены данные о максимальном стоке рек бассейна Дона в период половодья, выявлены нарушения стационарности временных рядов и выделены периоды, когда происходили эти изменения. На основе полученных результатов проведена оценка характеристик максимального стока весеннего половодья в нестационарных условиях с применением байесовского подхода. Результаты представлены в виде карты слоев максимального стока весеннего половодья 1%-й обеспеченности и рекомендованы для гидрологических расчетов при проектировании водохозяйственных объектов.

Ключевые слова: река Дон, максимальный сток весеннего половодья, совместный анализ, байесовский прогноз, нестационарные ряды.

DOI: 10.31857/S0321059620060103

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия в бассейне р. Дон активно увеличивается антропогенная нагрузка на водные объекты на фоне масштабных климатических изменений, происходящих на территории России и в мире.

Решение проблем, связанных с нарушением стационарности водного режима в бассейне р. Дон, имеют важное значение в связи с многообразием водохозяйственных задач и нужд этого региона, поэтому в последнее десятилетие этим проблемам посвящено много работ. В [3] проведен комплексный анализ водного режима рек региона. В [1] на примере рек бассейна Верхнего Дона рассмотрены проблемы оценки водных ресурсов. Работа [5] посвящена изменчивости водного режима в верховьях Дона в современный климатический период. Водные ресурсы и экологическое состояние бассейна Дона в современных условиях формирования и распределения водных ресурсов при нестационарном климате последних десятилетий наиболее подробно освещены в [4].

Цель данной работы заключается в получении расчетных характеристик максимального стока половодья в бассейне р. Дон в нестационарных условиях и оценке его расчетных значений с уче-

том прогнозируемого развития гидрологической ситуации на период до 2030 г.

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ МАКСИМАЛЬНОГО СТОКА В БАССЕЙНЕ р. ДОН

Для анализа изменений максимального стока рек в бассейне р. Дон использованы данные многолетних наблюдений за стоком средних рек бассейна в период половодья.

Для исследования отобрано 49 гидрологических постов, расположенных на реках бассейна с продолжительностью наблюдений более 35 лет и площадями водосборов от 1000 до 30000 км².

Посты расположены по территории водосбора неравномерно, часть бассейна р. Оскол (правый приток) и бассейн р. Северский Донец расположены на территории Украины, актуальная гидрологическая информация о наблюдениях там отсутствует, также практически нет данных о наблюдениях за стоком на реках Сал и Егорлык (левые притоки в низовьях Дона). Для анализа использованы данные гидрологических постов на реках, где антропогенное воздействие на сток отсутствует или минимально. Ряды максимального стока не приводились к единому периоду, поскольку основной задачей было выявление пространственных закономерностей изучаемых колебаний стока. Выборочные оценки параметров уточнялись методом группового анализа.

¹ Работа выполнена при частичном финансировании в рамках государственного задания ИВП РАН (тема 0147-2019-0003, государственная регистрация АААА-А18-118022090105-5).

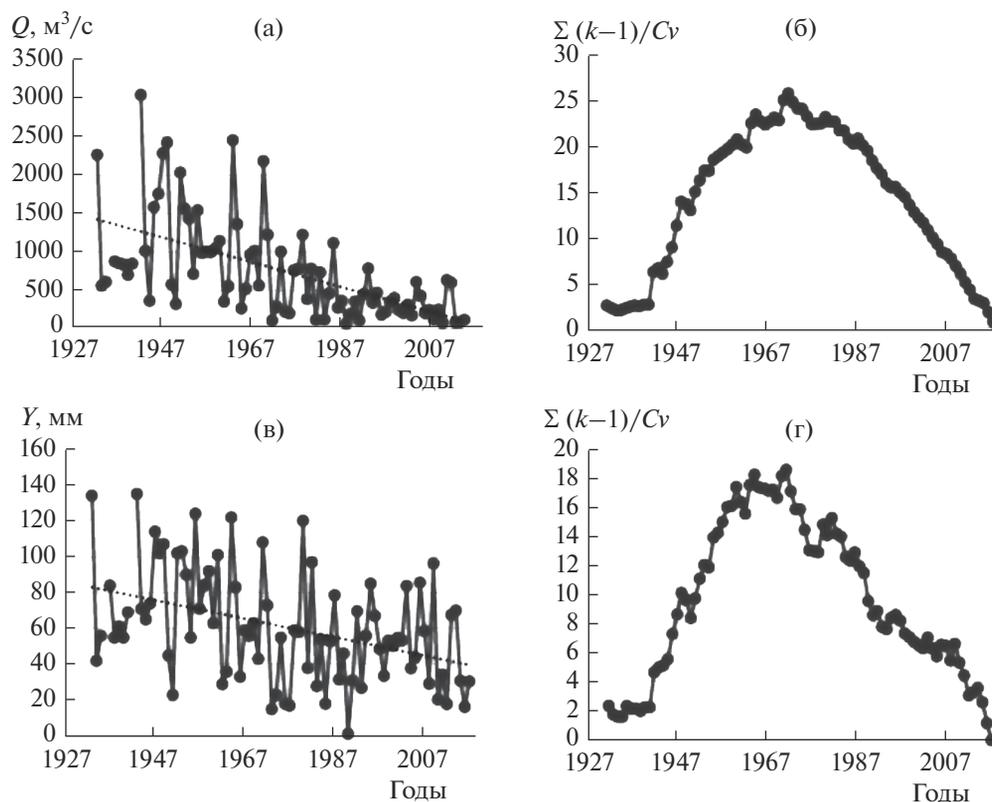


Рис. 1. Хронологический график (а) и разностно-интегральная кривая (б) максимальных расходов р. Воронеж—г. Липецк 2 за период половодья, хронологический график (в) и разностно-интегральная кривая (г) суммарного слоя стока р. Воронеж—г. Липецк 2 за период половодья.

На первом этапе исследования визуально оценивались нарушения нестационарности в рядах стока, обусловленные климатическими изменениями на водосборе, на основе анализа разностно-интегральных кривых (РИК) [7] и хронологических графиков максимального срочного расхода и слоев стока за период половодья. На графиках на рис. 1 четко видна смена фаз циклов водности в многолетнем разрезе.

Проверка однородности исходных рядов проводилась по критериям Стьюдента (t) и Фишера (F). В результате для каждого района определена дата, разделяющая ряд на два условно стационарных периода, характеризующих отклик речной системы на происходящие глобальные климатические изменения в регионе.

Анализ РИК показал, что основные изменения в рядах наблюдаемых максимальных расходов воды произошли в 1971 и 1980 гг. На рис. 2 приведен пример хронологических графиков и РИК для р. Воронеж — г. Липецк.

Изменения в рядах наблюдаемых величин суммарных слоев максимального стока не имеют такой четкой привязки к годам. Это связано с тем, что величина слоя стока — интегральная характеристика, отражающая распределение стока

по всей площади водосбора, поэтому происходящие изменения суммарного слоя стока более растянуты по времени и менее выражены. В таком случае возможно выделить только однородные районы по срокам смены фаз водности, произошедшим в разных частях бассейна. С помощью пространственного обобщения для района выделено два таких периода: 1970—1980, 1981—1990 гг.

Для анализа произошедших изменений и уточнения статистических характеристик параметров для каждого условно-стационарного периода выполнено районирование территории по коэффициенту изменчивости максимального стока и суммарного слоя стока рек в период половодья с помощью методики совместного анализа данных [8] и определены средние по району значения коэффициентов вариации и асимметрии с использованием обобщенного распределения экстремумов (GEV-распределения). Результаты представлены на рис. 3.

Анализ полученных результатов показывает, что на всей территории водосбора произошли значительные изменения максимального срочного расхода весеннего половодья. Максимальный срочный расход по всей территории уменьшился в среднем в два раза, а для отдельных постов сток

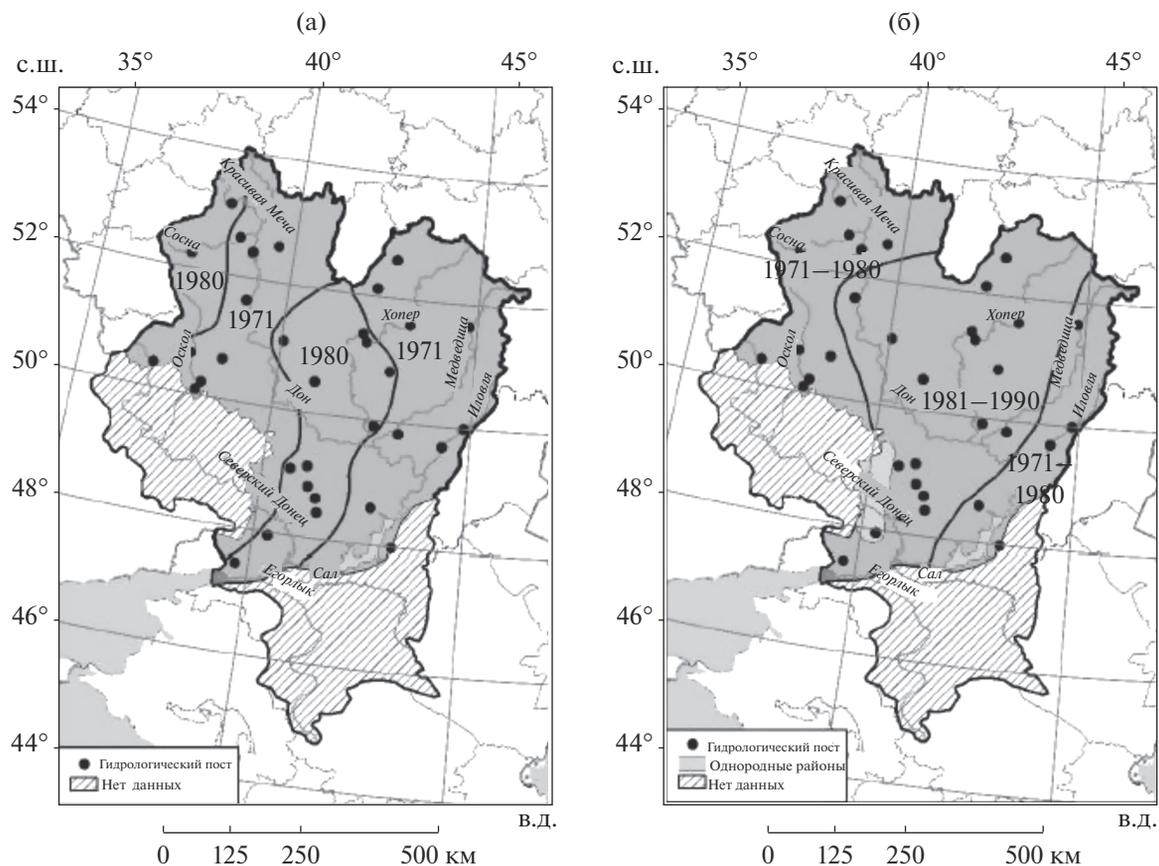


Рис. 2. Карты нарушения стационарности в рядах максимальных срочных расходов воды (а) и суммарных слоев стока (б) в период половодья. (Годы – даты нарушения стационарности).

уменьшился в 4–5 раз, особенно выраженные изменения произошли в юго-западной части бассейна р Дон (бассейны рек Оскол и Северский Донец, Быстрая, Тузлов, Битюг, Тихая Сосна), значения коэффициентов вариации почти для всех рядов увеличились так же, как и отношение коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации.

Суммарный слой стока весеннего половодья уменьшился в среднем в полтора раза, коэффициент вариации изменился незначительно, величина отношения коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации увеличилось. Наибольшие изменения наблюдаются в бассейнах верховьев рек Оскол и Северский Донец, на реках Валуй, Быстрой, Большой и Ольховой.

СЦЕНАРНЫЙ ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК МАКСИМАЛЬНОГО СТОКА В БАСЕЙНЕ р. ДОН

Одна из основных проблем гидрологического расчета заключается в том, что далеко не всегда в данных гидрометеорологических наблюдений (во временных рядах) можно выделить долгопе-

риодные колебания и тренды, обусловленные климатическими изменениями. В основном это связано с ограниченностью рядов наблюдений. Попытки прибегнуть к математическому моделированию гидрологических процессов дают определенные результаты, однако в большинстве случаев приходится сталкиваться с расчетами, требующими большого количества данных, недоступных для крупных речных водосборов, а также с неудовлетворительным качеством воспроизведения осадков в моделях общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО).

Обсуждаемая проблема характерна для многих видов стока, процесс формирования которых в условиях климатических изменений определяется также множеством параметров, а реакция стока на происходящие изменения имеет “пороговый” характер. Наблюдающийся рост температуры воздуха в зимний период в последние 50–60 лет не сопровождается таким же линейным (монотонным) ростом межлетнего стока или убыванием максимальных расходов весеннего половодья; процесс развивается по более сложному сценарию. Увеличение температуры зимой приводит к росту питания подземных вод, но заметными эти

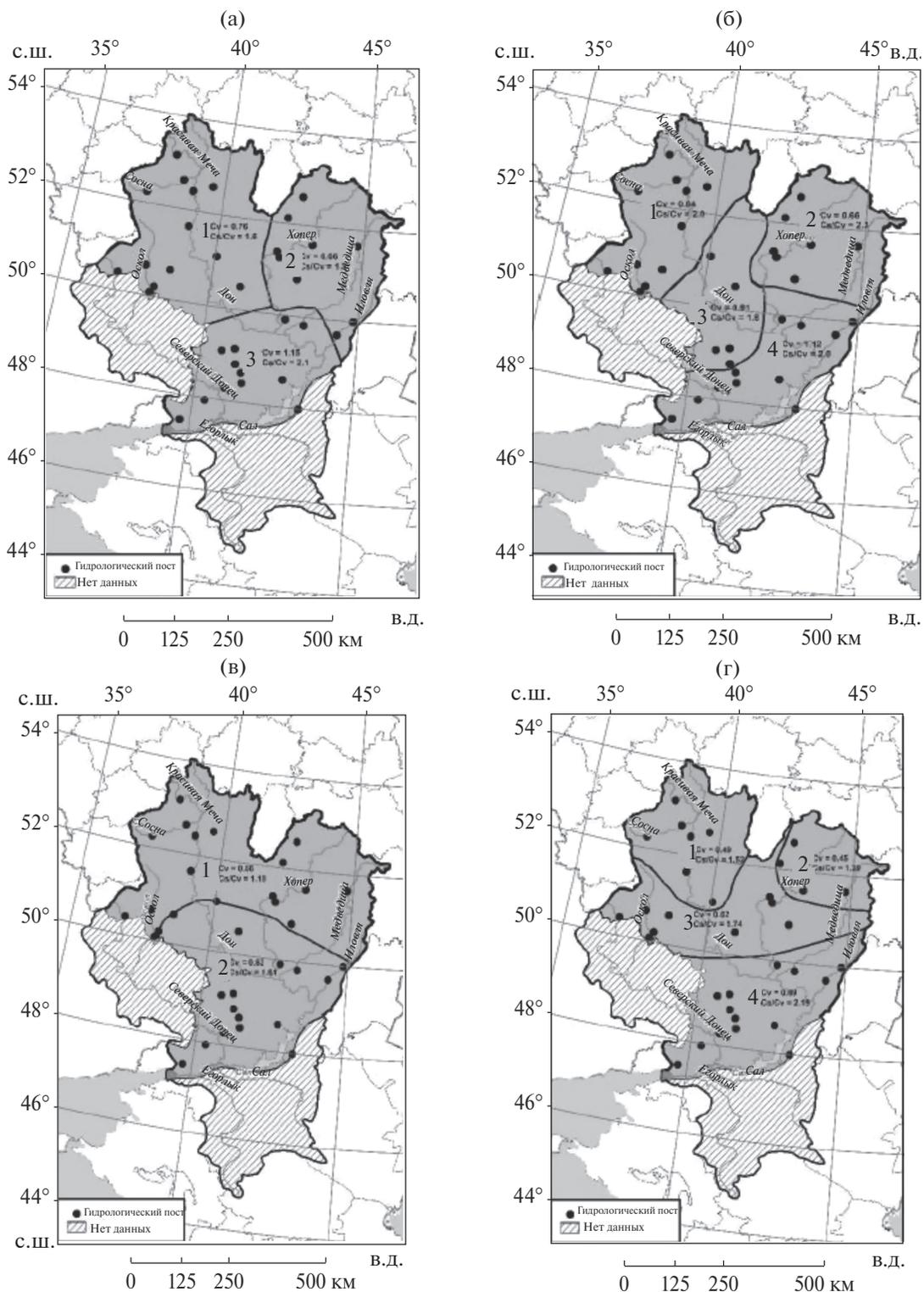


Рис. 3. Карты расположения гидрологических постов с выделенными однородными районами по коэффициенту изменчивости и отношению C_s/C_v максимальных расходов весеннего половодья за первый условно-стационарный период (а), за второй условно-стационарный период (б); с выделенными однородными районами по коэффициенту изменчивости и отношению C_s/C_v суммарного слоя стока за первый условно-стационарный период (в), за условно-стационарный период (г) для бассейнов рек Дона (половодье).

изменения становятся лишь начиная с некоторого критического уровня потепления, когда число оттепелей и жидких осадков зимой обеспечивает заметный рост питания подземных вод и, соответственно, рост меженного стока.

Задача прогноза заключается в ответе на два вопроса: 1) произойдет ли переход случайного нестационарного процесса многолетних колебаний исследуемой стоковой характеристики на новый уровень при дальнейшем росте температуры воздуха, или процесс останется на прежнем уровне; 2) какова дисперсия колебаний стока в прогнозный период.

Ответ на первый вопрос может быть дан исходя из того факта, что водные ресурсы бассейна при потеплении практически не меняются. Имеются низкочастотные колебания водности (например, затяжные маловодья), но годовые суммы осадков на водосборе остаются неизменными, увеличение меженного стока компенсируется сокращением стока весеннего половодья. Происходит изменение внутригодового распределения стока. Подавляющая часть водоотдачи из снежного покрова идет на впитывание в почву, весенний половодный сток формируется в основном на увлажненных участках, непосредственно примыкающих к гидрографической сети, на урбанизированных территориях, и этот процесс стабилизировался (при неизменных осадках), т.е. ресурсов для дальнейшего роста подземного питания рек и подземного стока сегодня нет.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что до 2030 г. в бассейне Дона сохранится существующий режим как меженного, так и половодного стока рек. Можно только предположить, что годовой сток останется практически неизменным и произошедшие изменения внутригодового распределения стока останутся такими же, как и в последний условно однородный период наблюдений.

Задача вероятностного прогноза сводится, таким образом, к получению оценки стока, учитывающей три периода: 1) начальный период — с 1960-х гг., когда рост температуры воздуха только начался, но заметных изменений стока еще не произошло и возврат к этому состоянию с некоторой вероятностью возможен; 2) период с начала нового устойчивого состояния — примерно с 1980-х гг. до 2018 г., т.е. современный период; 3) прогнозный период с 2019 до 2030 г.

Согласно результатам моделирования климатических изменений, практически всем моделям и сценариям соответствует рост значений зимней температуры в регионе на 2–3°C до 2030 г. Как уже отмечалось выше, это не должно привести к росту объема водных ресурсов в целом, но дисперсия колебаний может измениться в сторону увеличения. Сегодня нет методов и данных на-

блюдений, которые могли бы позволить решить задачу об изменении дисперсии процесса на период с 2019 до 2030 г., поэтому можно назначить ее равной дисперсии колебаний стока второго периода, увеличив за счет возможной неопределенности, возникающей при оценке дисперсии по короткой выборке, если бы таковая была (10–15 лет); т.е. в дисперсию третьего периода вводится поправка, учитывающая неопределенность оценки за счет ограниченной выборки. В качестве скорректированного значения можно взять значение $D_3 = D_2 + \sigma_{\text{Двыб}}$, или квантиль выборочного распределения параметра обеспеченностью 90%. Здесь D_2 и D_3 — дисперсии колебаний стока во втором и третьем периодах соответственно.

Таким образом, прогнозная кривая обеспеченности стоковой характеристики может быть построена.

Учет неопределенности климатических прогнозов при оценивании вероятностных характеристик стока — более сложная задача. Надо учесть в расчетах не выборочную погрешность параметра, а неопределенность другого рода — разброс, связанный с разнообразием мнений о приемлемой структуре моделей циркуляции атмосферы, о сценариях развития экономики и объемах поступления парниковых газов в атмосферу, о приемлемой степени детализации основных моделируемых процессов и т.д. Соответствующее рассеивание оценок называется межмодельным разбросом и должно быть каким-то образом учтено при получении прогнозных оценок стока.

Реакция гидрологической системы на изменения стока, как описано выше, имеет нелинейный характер. С одной стороны, пороговая модель, допускающая изменение прохождения процесса, — довольно сложный механизм, его воспроизведение в моделях формирования стока затруднено как из-за существенного дефицита данных об условиях поверхностного стока и влагопереноса в ненасыщенной зоне, о геофильтрационных процессах, так и из-за неопределенности оценок будущего климата. С другой стороны, для приложений необходима достаточно простая модель, позволяющая оценивать вероятность перехода гидрологической системы в новое состояние.

Временные изменения стока происходят на фоне большой пространственной изменчивости, определяемой разнообразием условий его формирования. Попытки представить (выделить) эффект климатических изменений в виде зависимостей изменений стока от приращений зимней температуры приводят к построению графиков, на поле которых выявляется достаточно очевидная фрагментация данных по пространству и прослеживается зависимость изменений стока от температуры, но, в целом, достаточно слабая. Для меженного стока в [6] показано, что такая зависи-

мость существует, а для максимального стока (и для слоев, и для расходов) такая зависимость отсутствует. Для годового стока такие зависимости также практически не выявляются [6].

Задача долгосрочного прогноза изменений характеристик водности в бассейне р. Дон до 2030 г. сегодня может быть решена при реализации байесовского метода оценивания на основе учета шансов (вероятностей) нахождения гидрологической системы в двух состояниях (относительно среднего значения) и увеличения дисперсии гидрологической характеристики в третьем периоде за счет неопределенности прогноза (межмодельного разброса).

БАЙЕСОВСКОЕ ОЦЕНИВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

Характер нарушения стационарности гидрологических рядов во многих случаях таков, что имеющийся временной ряд можно рассматривать состоящим из двух стационарных участков (состояний), скачкообразно сменяющих друг друга. Сформулированная гипотеза допускает смену стационарных состояний, в пределах которых сохраняются свойства процесса, такие, как, например, марковость. При этом необходимо располагать матрицей вероятностей перехода из одного состояния в другое или предположить более простую гипотезу, а именно: рассматривать сток как полумарковский процесс, в котором математическое ожидание стока в последующем периоде не зависит от предыдущего и подчиняется нормальному закону распределения. Для прогноза стока на ближайшие 10–15 лет предложен более простой подход, использующий байесовский метод решения задач с применением стандартных статистических приемов обработки данных.

В качестве прогноза может быть использовано байесовское прогнозное распределение:

$$\pi\left(\frac{x}{y}\right) = \int_{\theta} \rho(x, \theta) \varphi(\theta/y) d\theta, \quad (1)$$

где $\rho(x, \theta)$ – рассматриваемая вероятностная модель в виде закона распределения вероятностей $\rho(x, \theta)$.

В выражение (1) входит априорная плотность параметров модели ρ , получаемая по данным наблюдений y . Эта плотность и описывает совместное распределение параметров \bar{x} и Cv для каждого стационарного периода. Для расчетов по формуле полной вероятности (1) априорную плотность распределения параметров \bar{x} и Cv для каждого периода представим в следующем виде:

$$\varphi(\bar{x}, Cv) = \frac{n_1}{n_1 + n_2} f_1(\bar{x}_1, Cv_1) + \frac{n_2}{n_1 + n_2} f_1(\bar{x}_2, Cv_2), \quad (2)$$

где f_1 задается путем разложения по полиномам Лежандра [2], в котором в качестве одномерного распределения $\rho(\bar{x})$ и $\rho(Cv)$ используются распределения выборочных оценок \bar{x} и Cv , аппроксимируемые нормальным распределением. Коэффициент корреляции \bar{x} и Cv задан равным 0.3 (по имеющимся данным наблюдений).

Определение расчетных гидрологических характеристик предлагается выполнять на основе формулы (1) с учетом возможных изменений стока в прогнозном периоде. Следует отметить, что разделение ряда на однородные периоды приводит к уменьшению объема выборки и, соответственно, к увеличению выборочной погрешности квантилей. Прежде чем выполнять расчеты по формуле (1), целесообразно использовать групповой анализ данных для получения более устойчивых (в пространственном аспекте) результатов.

Распределение вероятности, которое рекомендуется использовать в качестве стохастической модели для гидрологических расчетов, получается путем вычислений по формуле (1) с привлечением групповых оценок параметров (Cs/Cv). В результате расчетов получена плотность распределения вероятностей, отражающая нестационарный характер многолетних колебаний максимального стока половодья, а также погрешности определения параметров распределения, в том числе и неопределенность будущих значений. На рис. 4 представлена карта слоя максимального стока весеннего половодья 1%-й обеспеченности с использованием осредненных для однородных районов значений параметра Cs/Cv для бассейна Дона для применения в практических расчетах. Карту рекомендуется использовать для получения квантилей слоев стока 1%-й вероятности для малоизученных территорий, не охваченных данными гидрологических измерений. Получаемые с помощью этой карты расчетные значения – это байесовская оценка, отражающая произошедшие нарушения стационарности временных рядов и учитывающая возможную неопределенность параметров за счет климатических изменений до 2030 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов статистической обработки рядов характеристик максимального стока показывает, что на всей территории водосбора р. Дон произошли значительные изменения максимального срочного расхода весеннего половодья – по всей территории водосбора он уменьшился в среднем в два раза, а для отдельных постов – в 4–5 раз. Значения коэффициента вариации и отношения коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации увеличились.

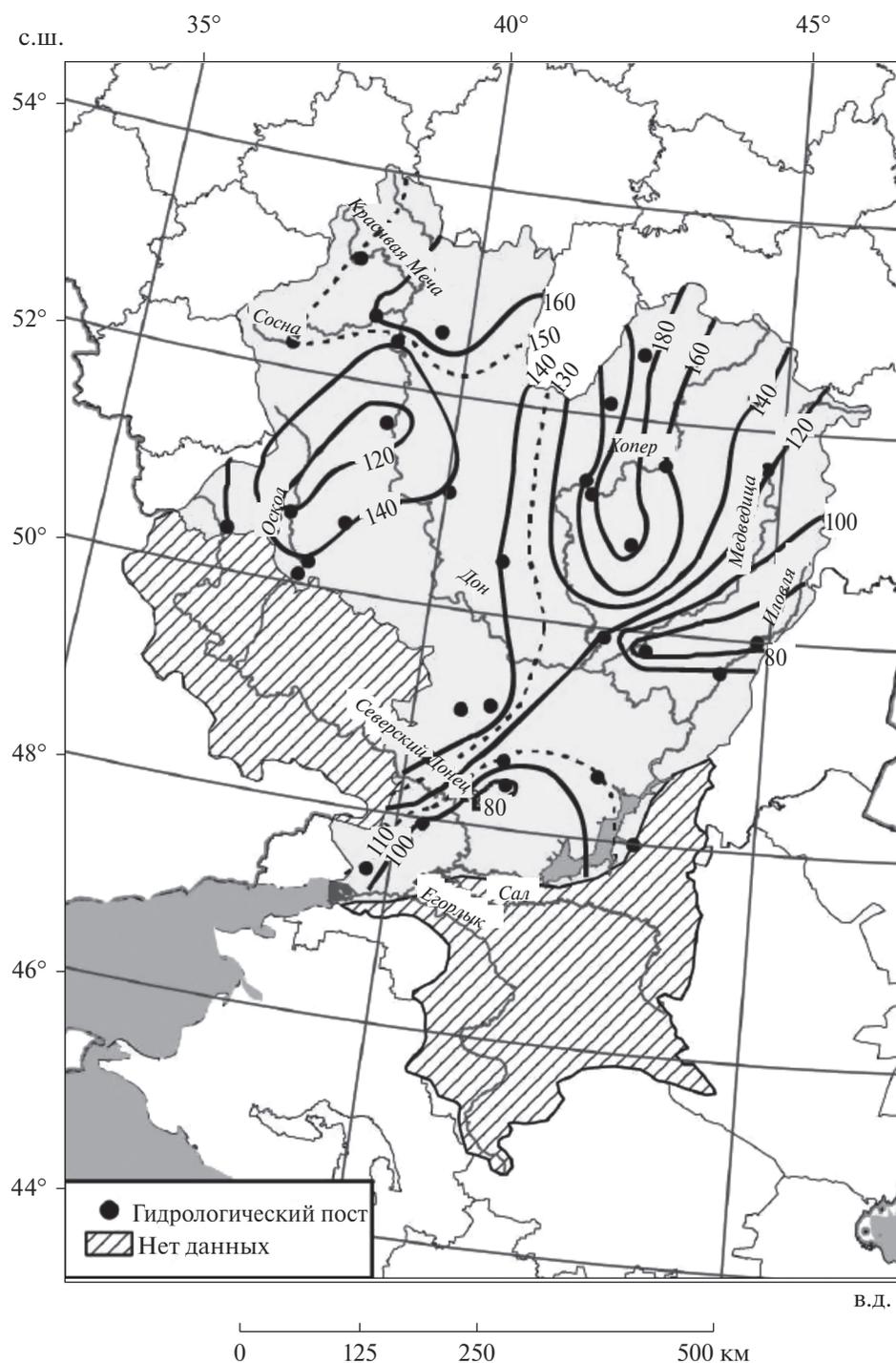


Рис. 4. Карта слоев максимального стока весеннего половодья 1%-й обеспеченности, мм.

Так как слой стока половодья, в отличие от максимального расхода, — интегральная характеристика, отражающая влияние изменений талого стока по всей площади водосбора и за весь период половодья, то происходящие изменения суммарного слоя стока более растянуты по времени и менее выражены. Суммарный слой стока весеннего

половодья уменьшился в среднем в полтора раза, коэффициент вариации изменился незначительно, отношение коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации увеличилось.

Районирование территории, выполненное с использованием методики совместного анализа данных, позволило получить средние для одно-

родных районов статистические выборочные оценки параметров (коэффициента вариации и отношения коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации), отражающие происходящие современные климатические изменения в бассейне р. Дон, для дальнейшего использования в расчетах при проектировании и гидротехническом строительстве. Полученные параметры распределения вероятностей максимальных суммарных слоев стока могут быть использованы при воднобалансовых расчетах и для решения практических задач регулирования стока.

Разработан подход к определению расчетных характеристик, позволяющий учитывать нестационарность временных рядов стока и погрешностей параметров распределений на основе байесовского метода. Учет выборочного рассеивания и возможной неопределенности оценок позволил получить расчетные характеристики максимального стока в условиях климатических изменений.

Результаты вероятностных расчетов стока с использованием рекомендуемой методики учета нестационарного режима многолетних колебаний максимального стока на период до 2030 г. представлены в виде карты слоев стока весеннего половодья 1%-й обеспеченности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болгов М.В., Филиппова И.А., Коробкина Е.А., Осипова Н.В. О методе вероятностного прогнозирования экстремальных гидрологических событий в условиях изменений климата // Проблемы мониторинга и моделирования экосистем. 2018. Т. XXIX. № 2. С. 19–31.
2. Болгов М.В., Мишон В.М., Сенцова Н.И. Современные проблемы оценки водных ресурсов и водообеспечения. М.: Наука, 2005, 317с.
3. Водные ресурсы России и их использование / Под ред. И.А. Шикломанова. СПб.: ГГИ, 2008. 600 с.
4. Джамалов Р.Г., Киреева М.Б., Косолапов А.Е., Фролова Н.Л. Вод. ресурсы бассейна Дона и их экологическое состояние. М.: ГЕОС, 2017. 205 с.
5. Дмитриева В.А., Маскайкина С.В. Изменчивость водного режима в верховье Донского бассейна в современный климатический период // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. География. Геоэкология. 2013. № 1. С. 17–21.
6. Евстигнеев В.М. Речной сток и гидрологические расчеты. М.: Изд-во МГУ, 1990. 304 с.
7. Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определение их расчетных значений по неоднородным данным. СПб.: Нестор-История, 2010. 162 с.
8. СП 33-101-2003. Определение основных гидрологических характеристик М.: Госстрой России, 2004.