

---

---

**ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ  
И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ**

---

---

УДК 556.168

**СОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВОДНОГО РЕЖИМА РЕК  
В БАССЕЙНЕ ДОНА<sup>1</sup>**

© 2013 г. Р. Г. Джамалов\*, Н. Л. Фролова\*\*, М. Б. Киреева\*\*

\*Институт водных проблем РАН  
119333 Москва, ул. Губкина 3  
E-mail: dzhamal@aqua.laser.ru

\*\*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
119991 Москва ГСП-1, Ленинские горы  
E-mail: frolova\_nl@mail.ru

Поступила в редакцию 10.04.2013 г.

Изучены особенности формирования и распределения современных водных ресурсов под влиянием меняющегося климата, рассмотрены сезонные, годовые и многолетние изменения режима половодного и меженного стока рек с площадью водосборов от 2000 до 20000 км<sup>2</sup>, отражающие зональные ландшафтно-климатические условия формирования стока. Показано, что различные и нередко противоречивые требования потребителей к подаче воды по сезонам года обуславливают зависимость всего водохозяйственного комплекса не только от величины общих водных ресурсов, но и от характеристик водного режима рек в различные фазы гидрологического года. Установлено, что отмечаемые за последние десятилетия климатические изменения существенно меняют картину пространственно-временной изменчивости характеристик стока.

*Ключевые слова:* водные ресурсы, естественные ресурсы подземных вод, речной сток, подземный сток, режим стока.

DOI: 10.7868/S0321059613060047

Исследование современных изменений климата и водного режима проводилось на основе данных наблюдений на 56 метеостанциях и 55 гидрологических постах. Пространственно-временной анализ стока за 1988–2008 гг. выполнен по данным Северо-Кавказского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. При этом ряды наблюдений разделены на два периода – современный (1970–2008 гг.) и ранний (1936–1969 гг.) для более обоснованных выводов о направленности и природе происходящих изменений в режиме стока и формировании водных ресурсов. Полученные данные позволили построить ряд карт водных ресурсов и расчетных характеристик стока с помощью пакета ArcView, всесторонне проанализировать сезонные и годовые изменения стока в разные фазы водного режима с помощью пакетов Statistica и Excel.

Анализ изменений метеорологических характеристик выполнен на основе докладов Росгидромета об особенностях климата на территории РФ за 2008–2012 гг. и информации, предоставленной ВНИИГМИ–МЦД. Глобальные изменения климата на южном склоне Европейской части России (**ЕЧР**) проявились, прежде всего, в потеплении зимнего периода и увеличении суммы осадков за холодный сезон.

#### ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА

На территории России продолжается проявление глобальной тенденции потепления 1976–2012 гг., несколько замедлившегося в зимние сезоны последних лет. Средняя скорость роста среднегодовой температуры в целом для России (0.43°C/10 лет) примерно в два раза превысила этот показатель для глобальной температуры. Основные сезонные особенности 2012 г. в России – очень теплое лето (+1.61°C – вторая по величине аномалия с 1936 г.) и теплая осень (+1.78°C – шестая с 1936 г.). По температурному режиму зимы 2011/2012 гг. территорию России можно разде-

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 11-05-00467, 13-05-00113), НОЦ (проект 2012-1.1-12.000-1008-4763), в рамках государственной поддержки Правительством РФ научных исследований в российских ВУЗах (проект №11.Г. 34.31.0007).

лить на две части: обширную сравнительно теплую северную и узкую несколько холодную южную. В среднем сезонная аномалия зимней температуры равна  $+0.87^{\circ}\text{C}$  (27-я в ряду с 1936 г.). Вместе с тем очень холодно было на юге ЕЧР, особенно на Северном Кавказе, а также на Южном Урале, Алтае и в Саянах. На арктическом побережье Западной Сибири (Ямал, Таймыр и др.), наоборот, отмечены положительные аномалии (на  $10\text{--}15^{\circ}\text{C}$ ). Этот очаг зимнего потепления устойчиво просуществовал над северными районами в течение трех зимних месяцев. Аномалия весенней температуры на большинстве станций в 1961–1990 гг. превышала норму и в среднем составляла  $+1.62^{\circ}\text{C}$  (12-я аномалия с 1936 г.). При этом аномалии свыше 95%-ной обеспеченности (до  $+4.6^{\circ}\text{C}$ ) наблюдались на юге ЕЧР [6, 9].

Рост температуры воздуха в холодный период на юге ЕЧР наиболее ярко выражен. Статистически достоверный рост средних температур в холодный период наблюдается для более чем половины рассмотренных метеостанций за 1936–2008 гг. и в среднем составил  $0.35^{\circ}\text{C}/10$  лет. Наиболее сильное увеличение произошло в бассейнах Среднего Дона и Северского Донца. Потепление сопровождается увеличением суммы положительных температур за холодный период в среднем на 20%.

Статистический анализ временной динамики суммы осадков за холодный период с 1936 по 2010 г. показал, что на 33 метеостанциях из 57 отмечалось значимое уменьшение дисперсии, а на 14 – рост средних значений. Тенденция к увеличению зимних осадков подтверждается и критерием Спирмена (для 35 метеостанций из 57). В среднем коэффициент линейного тренда составил  $9.2$  мм/10 лет. Наблюдаемый некоторый рост осадков за теплый период статистически незначим.

Следует отметить, что сумма осадков за холодный период определяет величину февральских снегозапасов. Запасы воды в снежном покрове в 1966–2006 гг. на севере Донского бассейна в среднем равны  $70\text{--}80$  мм, к югу и юго-востоку они сокращаются до  $20\text{--}50$  мм. Анализ временных рядов снегозапасов не выявил их статистически достоверных изменений, что обусловлено сильным влиянием оттепелей и связано с ростом жидкой составляющей атмосферных осадков за холодный период при некотором увеличении их общей суммы.

На юге ЕЧР происходит также изменение сроков смены сезонов. Средняя дата устойчивого перехода к отрицательным температурам меняется от начала ноября на севере до начала декабря на

юго-востоке. С начала 1990-х гг. для ряда метеостанций проявляется отчетливая тенденция к сдвигу этой даты на более поздние сроки. С другой стороны, средние даты начала пятидневного безморозного периода меняются по территории Донского бассейна от середины февраля на юго-востоке до первых чисел апреля на севере. Для 50% метеостанций характерны значимое увеличение дисперсии этого показателя и сдвиг этой даты в сторону более ранних чисел в среднем на 12 дней.

## ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ ЮГА ЕЧР

Южные регионы ЕЧР – крупные промышленные и сельскохозяйственные агломерации в масштабе страны. Водные ресурсы – основа их экономики. Регулирование стока рек здесь началось еще в XVIII в. Однако водохранилища как объекты активного регулирования стока начали сооружаться лишь в 1950-х гг. В бассейне Дона расположено более 12 тыс. прудов и малых водохранилищ (большую их часть (67%) составляют малые водохранилища и пруды с полезным объемом  $<1$  млн  $\text{м}^3$ ), 48 крупных водохранилищ различного назначения объемом  $>10$  млн  $\text{м}^3$ .

За 2000–2010 гг. происходит сокращение объемов забора воды практически по всем категориям водопользователей. Использование свежей воды сократилось с 5 до 3.2 млн  $\text{м}^3/\text{год}$ . Существенно сократилось сельскохозяйственное водоснабжение (в 4 раза), что сопоставимо с сокращением забора воды на орошение – на  $0.7$  км $^3/\text{год}$ . При этом последние 20 лет происходило плавное сокращение площадей пашен, сельскохозяйственных угодий и орошаемых земель. Наиболее крупные заборы воды в бассейне ведутся из Цимлянского водохранилища.

Дефицит водных ресурсов только в бассейне Дона составляет 26.8 млн  $\text{м}^3/\text{год}$ . Наиболее острая нехватка воды наблюдается в бассейне р. Воронеж. Так, в створе г. Липецка достигает 81 млн  $\text{м}^3/\text{год}$ , а на участке от г. Липецка до Воронежского гидроузла – 66 млн  $\text{м}^3/\text{год}$ . Небольшой дефицит воды наблюдается также на р. Оскол в створе Старооскольского гидроузла, и в бассейне р. Сал – 14.4 млн  $\text{м}^3/\text{год}$ . В бассейне р. Егорлык водопотребление на три порядка превышает предельно допустимое изъятие.

Несмотря на дефицит водных ресурсов в некоторых бассейнах, в настоящее время удается обеспечить нужным количеством воды весь водохозяйственный комплекс бассейна р. Дон. Однако в случае возникновения дополнительных потреб-

ностей в воде собственных ресурсов реки не хватает [10].

Объем речного стока в бассейне оценивается в  $26.8 \text{ км}^3/\text{год}$ , а модуль среднегодового стока рек сравнительно невысок и составляет  $\sim 2 \text{ л}/(\text{с км}^2)$ . При этом модуль годовых расходов воды, осредненный за 1970–2008 гг. по 45 постам, изменяется зонально: от 4.7 в верхнем течении Дона до  $0.6 \text{ л}/(\text{с км}^2)$  на левобережье Цимлянского водохранилища и низовьях Дона (рис. 1).

Объем водных ресурсов (среднегодового стока) р. Дон за весь период наблюдений составлял: по оценкам в 1987 г. – 28.1, по оценкам до 2005 г. – 26.8; по выполненным авторами расчетам за 1970–2008 гг. –  $22 \text{ км}^3/\text{год}$ .

Оценить степень влияния климатических и антропогенных факторов на изменения характеристик годового стока и водных ресурсов бассейна возможно на основании анализа восстановленного условно-естественного стока Дона [11]. Анализ характеристик стока показал, что основные изменения как самого годового стока, так и общих водных ресурсов под влиянием антропогенной деятельности отчетливо проявляются ниже Цимлянского водохранилища. С другой стороны, в многолетних изменениях условно-естественного годового стока самого Дона выявляется незначительная тенденция к его уменьшению, а для большинства его притоков наблюдается относительно постоянное среднегодовых расходов.

В качестве характеристик меженного стока рек региона принимаются осредненные значения за июль–сентябрь и декабрь–февраль. Выбор осредненного за шесть месяцев меженного стока обусловлен тем, что данная величина служит характеристикой естественных ресурсов подземных вод, и ее корректная оценка представляет особый интерес. В соответствии с принятыми подходами минимальные месячные значения расходов воды рассчитываются отдельно за летне-осеннюю и зимнюю межени, т.е. характеризуют типично маловодные периоды в режиме стока.

Естественные водные ресурсы – показатель выполнения подземных вод, они отражают их основную особенность как возобновляемого полезного ископаемого. Среднеголетняя величина питания подземных вод за вычетом испарения и родникового стока равна величине подземного стока, поэтому при региональных оценках естественные ресурсы подземных вод часто выражают через среднегодовые модули меженного и минимального месячного стока ( $\text{л}/(\text{с км}^2)$ ).

В связи с природой естественных водных ресурсов условия их формирования непосредственно зависят от возможных климатических изменений (наблюдаемых и прогнозных) и проявляются в динамике годовых и сезонных величин этих ресурсов. Влияние долговременных климатических вариаций оценивается по изменению среднемноголетних и минимальных месячных величин естественных водных ресурсов за 30-летний и более длительный период, рассматриваемый как репрезентативный.

Меженный сток рек региона невелик, что связано с его расположением на юге ЕЧР в зоне недостаточного увлажнения. В среднем для бассейна Дона за 1970–2008 гг. модуль меженного стока (р. Дон – ст. Раздорская) составляет  $1.5 \text{ л}/(\text{с км}^2)$ . Закономерное уменьшение среднего меженного модуля стока происходит в направлении с северо-запада на юго-восток (рис. 2). Наибольшее его значение (до  $3.3 \text{ л}/(\text{с км}^2)$ ) наблюдается в северо-западной части бассейна на р. Красивая Меча (г/п Ефремов). Выше г. Задонска значение модуля составляет  $2\text{--}3 \text{ л}/(\text{с км}^2)$ , а ниже по течению он снижается до  $1 \text{ л}/(\text{с км}^2)$  (г/п Павловск).

Сравнение пространственного распределения полученных величин меженного стока, характеризующего естественные ресурсы подземных вод, с их распределением по оценкам 1960–1970-х гг. показывает, что при общей схожести конфигураций изолиний значений модуля практически повсеместно наблюдается сдвиг в юго-восточном направлении, отражающий увеличение меженного стока в 1.5–2 раза. Так, по результатам прежних оценок – модуль подземного стока в бассейне Северского Донца составлял  $0.3\text{--}0.5 \text{ л}/(\text{с км}^2)$ , а в соответствии с современными расчетами – он увеличился до  $1\text{--}2 \text{ л}/(\text{с км}^2)$ , т.е. современные естественные ресурсы подземных вод в пределах этого бассейна существенно возросли.

Для абсолютного большинства рек бассейна происходящие изменения меженного (подземного) стока статистически значимы. Положительный тренд статистически достоверен для 42 из 49 исследуемых постов (86%) (табл. 1). Увеличение площадного питания подземных вод подтверждается данными режимных наблюдений в 1989–2007 гг. за уровнем грунтовых вод (УГВ) в “Докучаевском колодце” в Каменной степи, где глубина залегания УГВ возросла в среднем с 7 до 4 м [5, 4].

Существенное увеличение средних значений меженного стока произошло за 1970–2008 гг. (интенсивность роста модуля –  $0.4\text{--}0.5 \text{ л}/(\text{с км}^2)$  за 10 лет) за счет как зимней, так и летней межени.

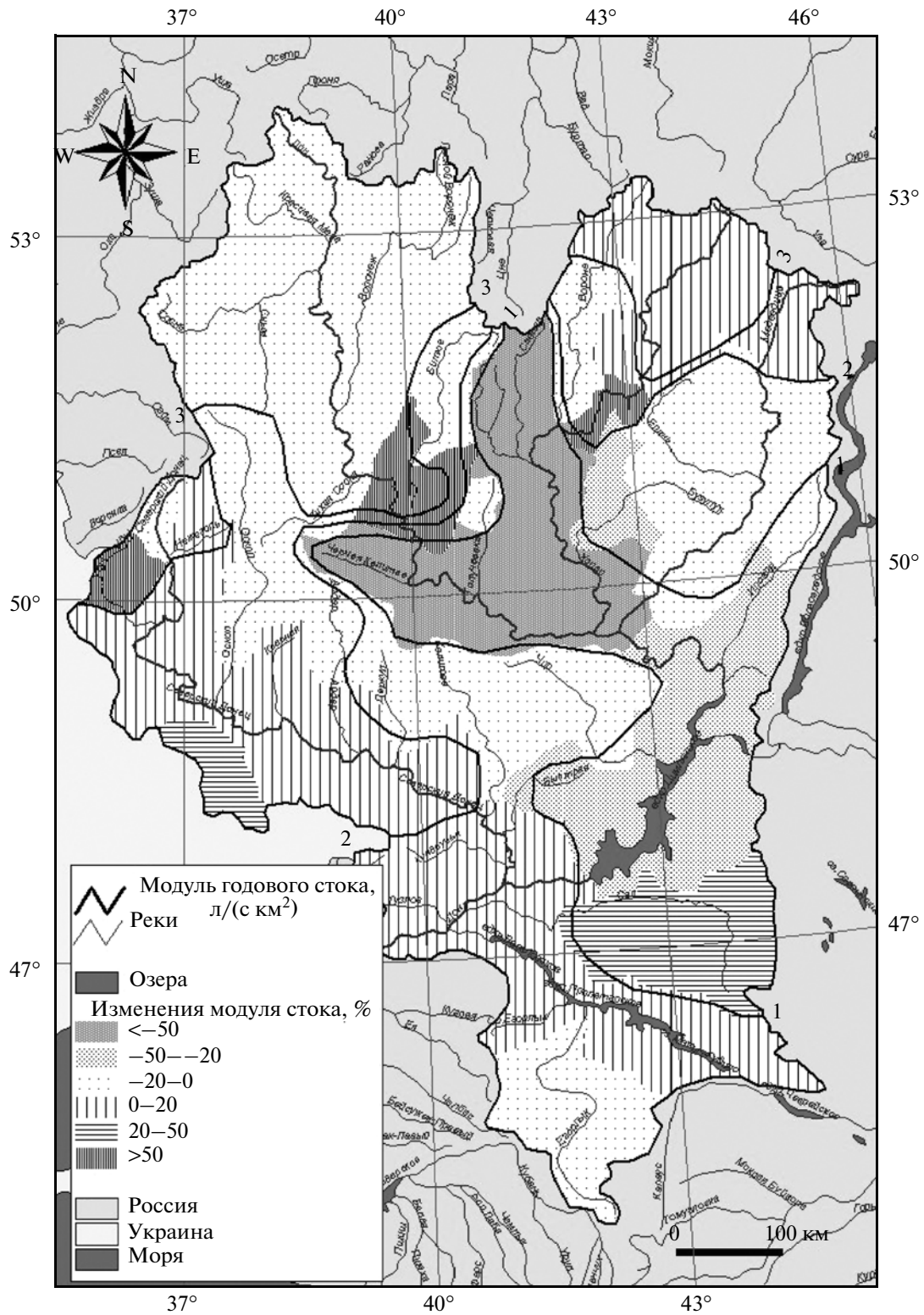


Рис. 1. Карта модуля среднего годового стока рек бассейна Дона за 1970–2008 гг.

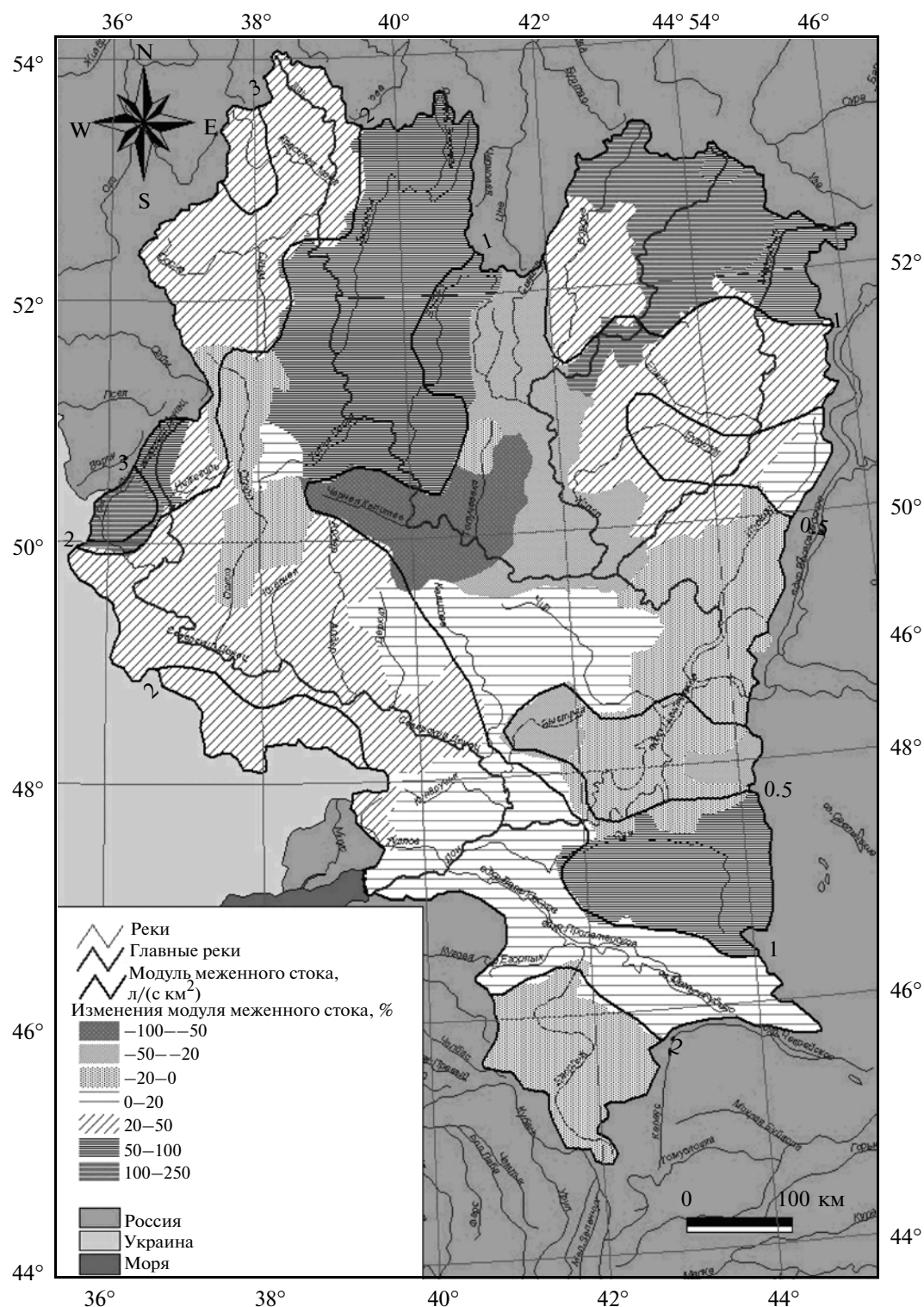


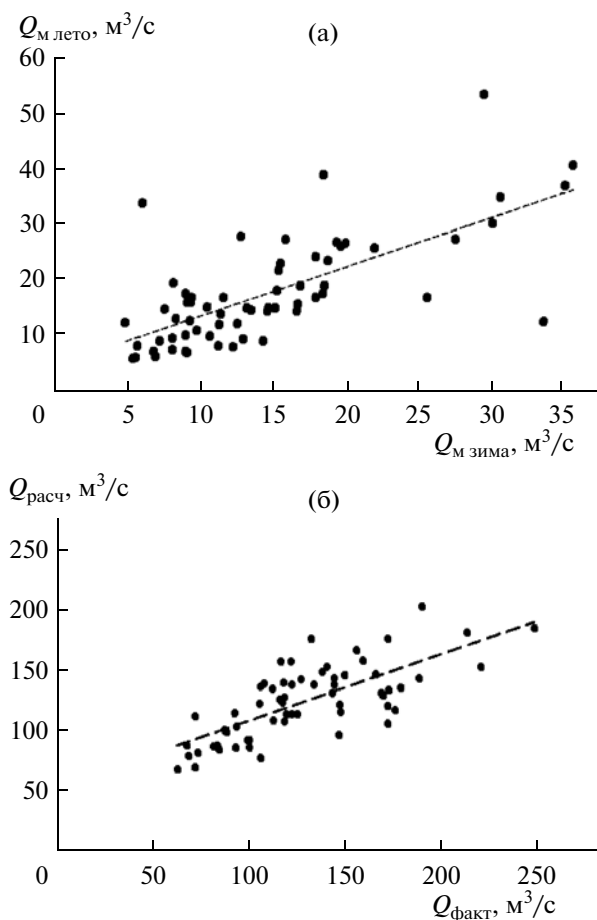
Рис. 2. Карта среднего межennaleго модуля стока и его изменений для бассейна Дона за 1970–2008 гг.

При этом для всех рассмотренных постов выявляются устойчивые связи средних межennaleгих зимних и летних расходов с коэффициентами корреляции  $>0.65$ – $0.7$  (рис. 3а).

Следует отметить, что значение межennaleго стока текущего года отличается высоким коэффициентом множественной корреляции (до 0.75) с суммой осадков за холодный период предше-

Значения статистических критериев для рядов среднего зимнего меженного модуля и минимального месячного стока рек Донского бассейна за 1936–1969 и 1970–2008 гг. (жирный шрифт – статистически значимые изменения)

Река–пост	Число лет	Статистические критерии		
		Спирмана	Фишера	Стьюдента
		меженный сток/минимальный месячный сток		
Дон				
Задонск	78	<b>0.74/10.21</b>	<b>2.15/4.14</b>	<b>-4.86/-4.74</b>
Лиски	126	<b>0.51/6.52</b>	1.4/4.17	<b>-6.06/-6.48</b>
Павловск	125	<b>0.54/8.38</b>	<b>1.82/3.91</b>	<b>-5.52/-7.85</b>
Казанская	105	<b>0.66/12.83</b>	<b>1.94/6</b>	<b>-3.79/-5.15</b>
Беляевский	56	<b>0.7/11.9</b>	1.38/5.71	<b>-3.11/-5.03</b>
Калач	123	<b>0.47/7.1</b>	1.26/3.41	<b>-4.71/-7.73</b>
ЦГУ	124	<b>0.51/7.6</b>	1.54/5.05	<b>-4.94/-7.51</b>
Раздорская	80	<b>0.69/11.75</b>	0.51/1.42	<b>-4.49/-6.67</b>
Красивая Меча–Ефремов	49	<b>0.54/4.66</b>	<b>5.44/16.96</b>	<b>-2.07/-2.23</b>
Сосна				
Елец	61	<b>0.47/7.15</b>	1.23/8.89	<b>-2.66/-4.31</b>
Беломестная	57	<b>0.51/5.29</b>	<b>2.14/4.03</b>	<b>-2.85/-3.2</b>
Воронеж–Липецк 2	73	<b>0.8/8.48</b>	<b>4.32/4.24</b>	<b>-6.18/-4.19</b>
Тихая Сосна–Алексеевка	60	<b>0.51/7.82</b>	0.24/0.65	<b>-0.67/-4.02</b>
Битюг–Бобров	73	<b>0.73/11.43</b>	<b>2.13/4.28</b>	<b>-4.77/-6.73</b>
Подгорная–Калач	61	<b>0.56/9.49</b>	0.04/5.37	0.17/-5.56
Хопер				
Пановка	51	<b>0.7/9.2</b>	<b>10.19/20.26</b>	<b>-3.91/-3.52</b>
Балашов	92	<b>0.47/4.84</b>	<b>7.24/5.92</b>	<b>-6.16/-8.66</b>
Поворино	72	<b>0.84/12.48</b>	<b>4.26/9.58</b>	<b>-8.35/-9.69</b>
Новохоперск	61	<b>0.85/14.54</b>	<b>6.4/10.26</b>	<b>-6.44/-7.21</b>
Бесплемяновский	76	<b>0.77/11.39</b>	<b>2.22/5.84</b>	<b>-6.25/-7.73</b>
Карай–Подгорное	54	<b>0.67/9.02</b>	0.18/15.9	<b>-1.45/-5.28</b>
Ворона				
Чутановка	66	<b>0.84/10.48</b>	<b>4.1/10.1</b>	<b>-7.18/-6.89</b>
Борисоглебск	66	<b>0.86/15.68</b>	<b>3.87/11.94</b>	<b>-6.31/-6.06</b>
Бузулук				
Киквидзе	52	<b>0.56/4.57</b>	<b>3.18/10.5</b>	<b>-2.12/-2.17</b>
Большой Лукьяновский	37	<b>0.57/6.49</b>	0.6/2.11	<b>-0.85/-2.94</b>
Северский Донец				
Змиев	58	<b>0.56/7.41</b>	0.54/2.87	<b>-2.32/-8.01</b>
Лисичанск	49	<b>0.39/4.76</b>	0.91/2.58	<b>-2.38/-4.34</b>
Белая Калитва	73	<b>0.48/5.69</b>	0.68/1.72	<b>-2.62/-3.46</b>



**Рис. 3.** Связи средних значений меженного зимнего и летнего стока р. Ворона — г. Борисоглебск (а) и связь фактических и рассчитанных по уравнению множественной регрессии значений меженного стока р. Дон — г. Лиски (б).

ствующего года, суммой осадков за холодный период со сдвигом на два года и суммой осадков за теплый период текущего года (рис. 3б). Связь меженного стока с температурой воздуха не проявляется.

Для меженного стока характерна значительная степень инерции, что обуславливает высокие коэффициенты автокорреляции, значимые вплоть до сдвига в 4–5 лет.

**Минимальные месячные расходы рек** региона наблюдаются в летне-осеннюю и зимнюю межень. На северо-западе бассейна они составляют в среднем  $\sim 3$  л/(с км<sup>2</sup>), затем плавно снижаются на юго-восток, где составляют уже 0.3–0.7 л/(с км<sup>2</sup>) и ниже (рис. 4а, 4б). При этом осредненные за 1970–2008 гг. летние расходы в 80% случаев (43 из 50 створов) оказываются меньше зимних. Статистически достоверные изменения характеристик минимального месячного стока как за зимний,

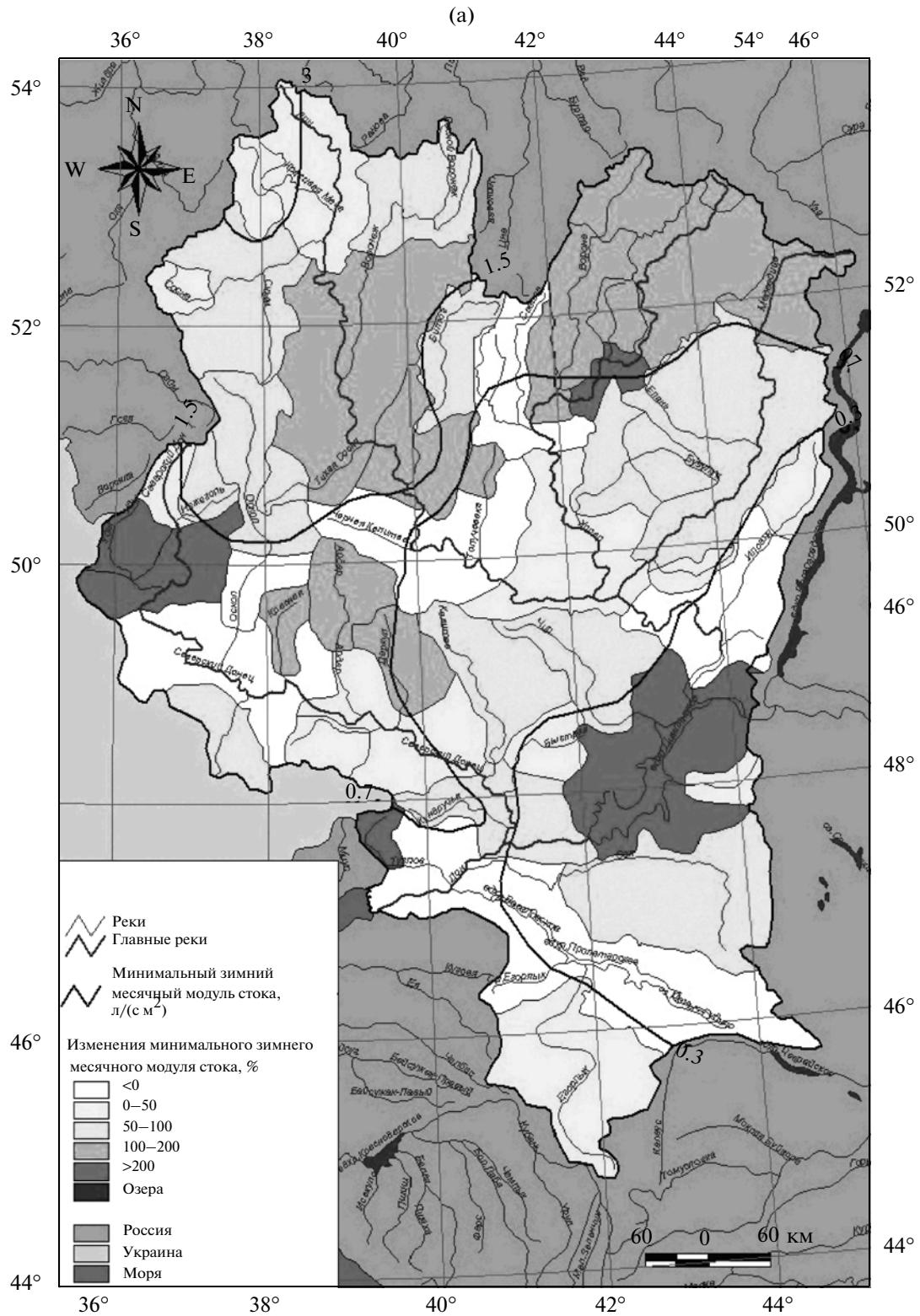
так и за летний периоды фиксируются для всех изученных створов (табл. 1). Наибольшие изменения минимальных месячных расходов проявляются в достаточно широкой полосе, протянувшейся в средней части бассейна Дона с юго-запада на северо-восток, в пределах этой полосы происходит наибольшая трансформация водного режима рек. К юго-востоку от этой полосы не происходит формирования устойчивого снежного покрова в зимний период с первой половины XX в. до настоящего времени, а к северо-западу образуется устойчивый снежный покров, несмотря на существенные изменения зимнего температурного режима в настоящее время.

Изменения минимальных зимних и летних модулей стока носят синхронный характер. Для разных рек значения исследуемых характеристик колеблются, повторяя общий ход с небольшими отклонениями в амплитуде или некоторым запаздыванием. На всех постах наблюдаются линейные регрессионные взаимозависимости этих двух характеристик. Для рек лесной зоны эти зависимости носят четкий характер и имеют коэффициенты корреляции  $>0.6$ – $0.7$ , южнее связи минимальных зимних и летних модулей стока размываются, коэффициенты корреляции снижаются до 0.4.

Увеличение средних минимальных месячных модулей стока воды за 1970–2008 гг. по отношению к 1936–1969 гг. составляет 30–60% для большей части рек (рис. 5). При этом статистически значимый их рост характерен для 42 постов из 44 (95%), статистически значимый рост дисперсии — для 37 из 44 створов (84%) (табл. 1). Коэффициент вариации минимальных модулей стока за зимний период для юго-восточной части бассейна составляет 0.2–0.35.

Инерцию минимального месячного стока за летний и зимний периоды отражают высокие значения коэффициентов автокорреляции этих величин для смежных лет. Для большинства рек эти коэффициенты превышают 0.6, а для некоторых достигают 0.8. Коэффициенты автокорреляции для рек с высокими их значениями нередко слабо затухают даже при сдвиге в 8–9 лет, при котором они иногда превышают 0.4.

Применение факторного анализа позволяет рассчитать минимальный месячный летний расход по слою стока половодья и среднемесячному расходу за октябрь предшествующего года. Последний показатель служит характеристикой осеннего увлажнения и определяет характер потерь стока во время половодья, что обуславливает минимальные летние расходы воды:



**Рис. 4.** Минимальный модуль месячного зимнего (а) и летнего (б) стока за 1970–2008 гг. и его изменения по сравнению с 1936–1969 гг.



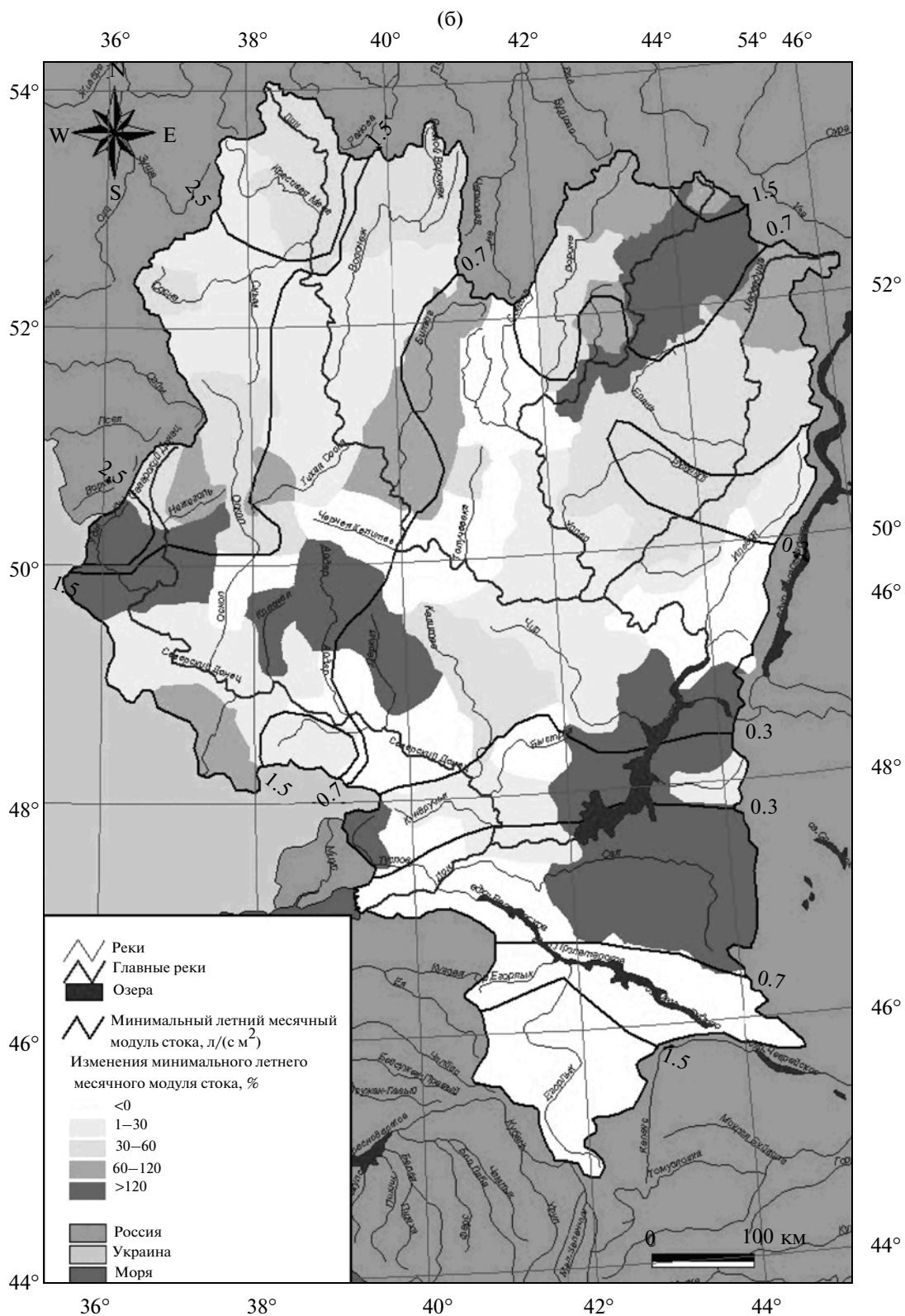


Рис. 4. Окончание.

$$Q_{\min,л}(n) = f[y_n(n); Q_x(n-1)], \quad (1)$$

где  $Q_{\min,л}$  – минимальный месячный расход воды за летне-осенний период, м<sup>3</sup>/с;  $y_n$  – слой стока воды за половодье, мм;  $Q_x$  – среднемесячный расход за предшествующий октябрь, м<sup>3</sup>/с.

Подобные расчеты проведены для ряда постов, они показали сравнительно высокие коэффициенты корреляции расчетных и фактических значений. Так, для поста р. Ворона – г. Борисоглебск коэффициент корреляции расчетных и фактических значений составляет 0.75. Согласно выявленным связям, при повышенном стоке половодья наблюдаются более низкие меженные расходы воды. Высокое сконцентрированное во времени половодье свидетельствует о меньшем объеме питания подземных вод, чем при более сниженном плавном и многопиковом половодье. Факторный анализ для зимнего стока дает приемлемые результаты (значения  $r$  – до 0.75) при построении зависимостей осредненных расходов за зимний период от суммы жидких осадков и средних температур холодного сезона. Необходимо совершенствование и уточнение подобных эмпирико-статистических подходов к прогнозным оценкам сезонного стока.

Следует отметить, что для большинства малых рек региона характерно отсутствие стока. В бассейне Дона – около 100 подобных рек, для которых за период наблюдений зафиксированы бессточные периоды. При этом продолжительность бессточных периодов на малых реках бассейна – одна из самых больших на ЕЧР, а площади водосборов в среднем составляют ~2000 км<sup>2</sup>, изменяясь от 10 (р. Чибрик – с. Рождественское) до 19000 км<sup>2</sup> (р. Сал – с. Мартыновка). За последние 50 лет общее количество пересыхающих рек снизилось в 2–3 раза [7]. Вместе с тем, эпизодическое пересыхание рек или бессточные периоды следует рассматривать как экстремальное гидрологическое явление.

### РЕЖИМ СТОКА

Для изучения формирования весеннего стока в бассейне выбрано более 20 гидрологических постов на реках с различной площадью водосбора. В качестве исследуемых показателей рассматривались слой и объем стока за половодье, дата его начала и окончания, дата и величина максимального расхода воды (и его модуль), доля половодья в годовом стоке, коэффициент дружности половодья, равный отношению максимального модуля к слою стока за половодье [8].

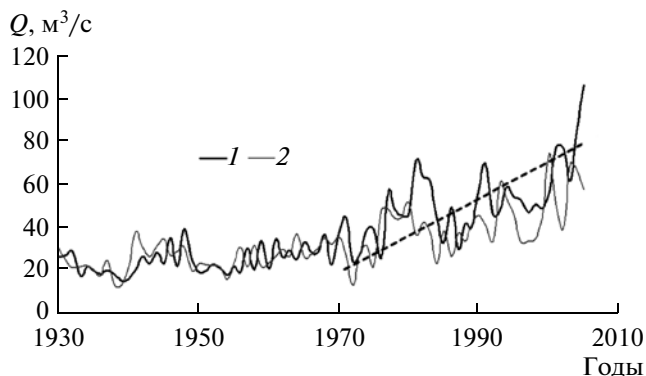


Рис. 5. Изменение минимальных средних месячных расходов воды р. Хопер – хут. Бесплемяновский за зимний (1) и летне-осенний (2) периоды.

Уменьшение слоя стока половодья происходит в юго-восточном направлении и в среднем для бассейна за 1970–2008 гг. составляет ≈50 мм. При этом наиболее высокий слой стока формируется в бассейне Хопра у г/п Поворино (>60 мм), пониженный – в бассейне Медведицы (30–40 мм), а наиболее низкий сток за половодье (20–30 мм) характерен для бассейнов рек Бузулук, Иловля и притоков Нижнего Дона. Для всего бассейна характерно сокращение слоя стока половодья на 10–30%, достигающим максимума в верховьях Дона (выше г/п Лиски), где слой стока за половодье ранее был наибольший. Статистический анализ рядов слоя стока показал, что для 60% постов свойственно статистически значимое уменьшение математического ожидания, а для 50% – статистически значимое увеличение дисперсии, что в совокупности свидетельствует о существенной деградации половодья рек как фазы водного режима в современных климатических условиях. Слой половодья характеризуется большой изменчивостью. Если для бассейна Верхнего и Среднего Дона коэффициент вариации составляет 0.4–0.6, то для притоков Нижнего Дона (Калитва и Чир) – 0.8–0.9.

Изменения весеннего стока и деградация половодья в бассейне ярко проявляются в динамике максимальных расходов воды. С начала 1930-х до 2000-х гг. максимальный модуль стока сократился, л/(с км<sup>2</sup>): в верховьях Дона (г. Задонск) – со 100 до 40, в р. Сосне – со 140 до 40, для р. Вороны (г. Борисоглебск) – с 60 до 20. В среднем сокращение максимального модуля стока в бассейне составляет 40–60%.

Статистический анализ рядов максимальных модулей стока за 1970–2008 гг. показал, что по сравнению с 1936–1969 гг. практически для всех постов наблюдаются статистически значимый от-

рицательный тренд и значительное снижение дисперсии. В связи с изменением формы половодья происходят заметные изменения в величине коэффициента дружности половодья — одной из основных расчетных гидрологических характеристик. Для всех постов свойственно значимое снижение коэффициента дружности, причем для многих рек — до 1.5–2 раз.

Выделение на гидрографах стока половодья как отдельной фазы водного режима в последние годы становится сложной задачей. Увеличение числа оттепелей приводит к “размыванию” начала и окончания многоводной фазы: в западной части региона дата начала волны половодья сместилась на 9–12 дней раньше, в восточной — примерно на неделю. Общей тенденцией становится “запаздывание” дат окончания половодья в среднем на 5–10 дней. Суммарно сдвиг сроков половодья приводит к статистически значимому увеличению его продолжительности: в зависимости от масштаба реки и положения водосбора она увеличивается на 10–20 дней.

Под влиянием изменения климата наблюдаются изменения минимального и максимального стока при относительном постоянстве среднегодовых расходов воды рек бассейна, что приводит к перераспределению стока внутри года и коренным изменениям типичной формы гидрографа.

По классификации Б.Д. Зайкова, реки бассейна до 1970-х гг. относились к восточно-европейскому типу водного режима с четко выраженным весенним половодьем, во время которого проходит свыше 50% годового стока, а максимальные расходы превышают меженные в среднем в 10 раз. Типовые гидрографы 2000-х гг. выглядят совсем иначе. Повышенный “волнообразный” сток за зимний период, связанный с большим количеством оттепелей, срабатывает запасы воды в снежном покрове еще до наступления половодья, гидрограф которого имеет вид пологий и распластанной волны с 3–4 максимумами, на порядок меньшими, чем в первой половине XX в. [1, 2, 3, 4].

Подобные изменения во внутригодовом распределении стока отражаются на динамике коэффициента естественной зарегулированности стока. С одной стороны, уменьшается доля половодья (надбазисный сток), с другой — увеличивается водность межени (базисный сток). Такое двойное воздействие приводит к тому, что для всех рек в бассейне наблюдается статистически значимый рост математического ожидания и статистически значимый положительный тренд коэффициента естественной зарегулированности стока.

Интересно отметить, что пространственное распределение среднего за 1970–2007 гг. значения коэффициента естественной зарегулированности стока носит как бы “противозональный” характер: наибольших своих значений (0.7–0.9) он достигает на западе и юго-западе бассейна Дона (рис. 6).

## ВЫВОДЫ

Выполнены комплексная региональная оценка водных ресурсов южных регионов ЕЧР и пространственно-временное обобщение характеристик водного режима рек с учетом современной гидрометеорологической информации.

Выявлены статистически значимые изменения минимального и половодного стока рек при относительном постоянстве среднегодовых расходов воды. Установлено существенное и статистически достоверное увеличение величины меженного (подземного) стока — естественных ресурсов подземных вод, величина которых для различных районов возросла в 1.5–2 раза.

Анализ многолетних колебаний характеристик минимального месячного стока показал практически повсеместное проявление возрастающих трендов для исследуемых рек. Увеличение минимальных месячных модулей стока воды для большей части региона составляет 30–60% от среднего за 1936–1969 гг., для левобережных притоков Северского Донца — 100–120%.

Основная причина возникающих изменений водного режима — рост подземного питания рек, вызванный общим увеличением увлажнения Восточно-Европейской равнины, что тесно связано с изменением циркуляции атмосферы, увеличением числа оттепелей и снижением глубины промерзания почвы, что способствует пополнению запасов грунтовых вод в зимний период.

Для большинства рек наблюдается статистически достоверное сокращение слоя стока за половодье на 30–40%. Сокращение максимального модуля стока составляет в среднем 40–60%. При этом уменьшение максимальных расходов воды имеет повсеместный характер. В связи с изменением формы половодья существенно уменьшается значение коэффициента дружности — в 1.5–2 раза.

Изменения характеристик весеннего половодья рек бассейна проявляются в смещении его сроков и продолжительности. Наиболее существенны изменения в западной части региона, где половодье сместилось на 9–12 дней в сторону более ранних сроков.

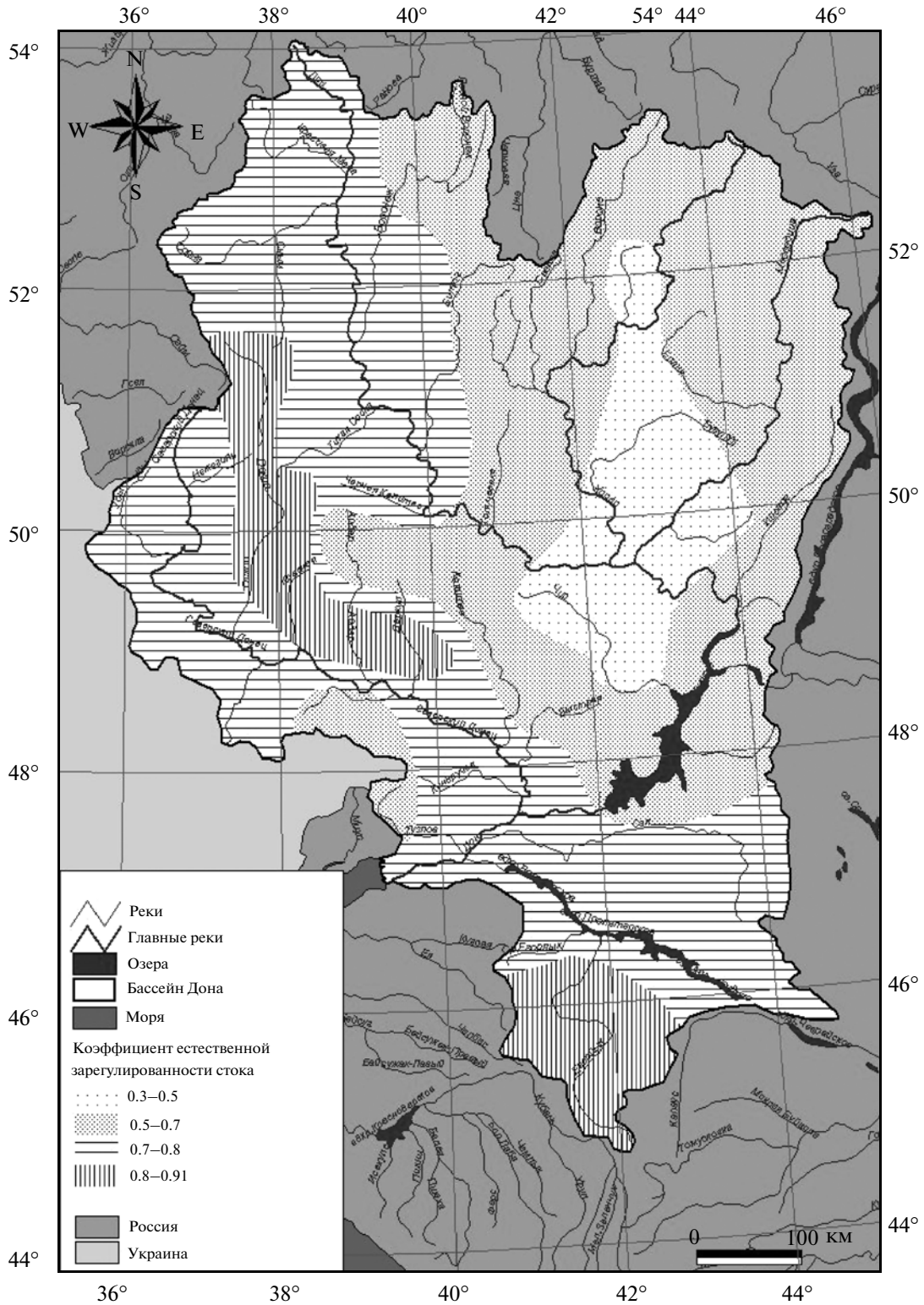


Рис. 6. Распределение среднего значения коэффициента естественной зарегулированности стока за 1970–2008 гг.

Происходящие изменения водного режима вызывают перестройку внутригодового распределения стока и рост коэффициента естественной зарегулированности в 1.5–2 раза, что приводит к изменениям типовой формы гидрографа.

С учетом происходящих климатических изменений, высокой степени использования водных ресурсов и нагрузки на них необходимо предусмотреть риски возникновения экстремальных гидрологических ситуаций.

Выполненные оценки водных ресурсов и режима стока, полученные зависимости и комплекс карт найдут свое применение при разработке мероприятий по использованию и охране водных ресурсов юга России.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Водные ресурсы России и их использование / Под ред. Шикломанова И.А. СПб.: ГГИ, 2008. 598 с.
2. Георгиевский В.Ю. Влияние антропогенных изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы // Изменения климата и их последствия. СПб.: Наука, 2002. С. 152–164.
3. Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Кричевец Г.Н. и др. Формирование современных ресурсов поверхностных и подземных вод европейской части России // Вод. ресурсы. 2012. Т. 39. № 6. С. 571–589.
4. 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.
5. Дмитриева В.А. Географо-гидрологическая оценка водных ресурсов субъекта Российской Федерации в условиях меняющегося климата и хозяйственной. Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. Воронеж, 2012. 47 с.
6. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2012 год. М.: Росгидромет, 2012. 86 с.
7. Киреева М.Б., Фролова Н.Л. Бессточные периоды на реках бассейна Дона // Вестн. МГУ. Сер. 5, География. 2010. № 4. С. 47–54.
8. Киреева М.Б., Фролова Н.Л. Современные особенности весеннего половодья рек бассейна Дона // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2013. № 1. С. 60–76.
9. Кислов А.В., Евстигнеев В.М., Малхазова С.М. и др. Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления XXI века. М.: МАКС Пресс, 2008. 292 с.
10. Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна Дона. [http://www.donbvu.ru/ne\\_4847728](http://www.donbvu.ru/ne_4847728)
11. Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Kireeva M.B., Safronova T.I. Climate-Induced Changes in Groundwater Runoff in Don Basin // Water Resources. 2010. V. 37. № 5. P. 733–742.