

УДК 556.51;556.532

ТРАНСГРАНИЧНЫЙ ВОДООБМЕН В БАССЕЙНЕ ДОНА

© 2023 г. С. В. Долгов^a, *, Н. И. Коронкевич^a, **, Ю. Ю. Алентьев^a, ***

^aИнститут географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: svdolgov1978@yandex.ru

**e-mail: koronkevich@igras.ru

***e-mail: alentev49@mail.ru

Поступила в редакцию 14.07.2022 г.

После доработки 23.11.2022 г.

Принята к публикации 28.12.2022 г.

Рассмотрены разные виды водообмена через государственные (по состоянию на конец февраля 2022 г.), административные и природные границы в бассейне Дона. Приведены показатели атмосферного влагопереноса и ветрового перемещения снега, водного стока через границы лесостепной и степной зон и границы отдельных ландшафтов. Большая часть воды переносится через все границы в атмосфере. Речной сток составляет лишь 4% от величины атмосферного переноса влаги. Из лесостепи к границам степной зоны притекает 42% общего годового стока, 39% стока половодья и 55–65% минимального стока летне-осенней и зимней межени. Определен обмен речной водой между отдельными субъектами РФ в российской части донского бассейна. Наблюдается значительное улучшение водообеспеченности регионов с учетом транзитного стока. Рассмотрен перенос с водой химических веществ. Выявлены особенности формирования диффузного стока биогенных элементов в разных ландшафтах. Приведены результаты сравнительного анализа динамики содержания загрязняющих веществ в составе сточных вод Ростовской, Воронежской и Липецкой областей за период 1995–2018 гг. Дана оценка воздействия местных и транзитных сточных вод на качество водных ресурсов Ростовской области. Выявлены особенности трансграничного водообмена в связи с произошедшими за последние десятилетия изменениями климата и хозяйственной деятельности. В основном вследствие климатических изменений речной сток на Нижнем Дону значительно сократился – в среднем на 20%. Роль поверхностной составляющей стока в перемещении воды вместе с загрязняющими веществами через административные и природные границы существенно снизилась, а роль подземной составляющей, напротив, возросла. Предложены пути решения основных проблем, обусловленных трансграничным водообменом.

Ключевые слова: бассейн Дона, административные и природные границы, водообмен, количество и качество водных ресурсов, климатические и антропогенные факторы, изменения

DOI: 10.31857/S2587556623020048, **EDN:** KESAHY

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Проблемы трансграничного водообмена и содержащихся при этом в воде загрязняющих веществ приобретают все большую остроту по мере роста антропогенной нагрузки на водные ресурсы. Рассмотрение трансграничного водообмена весьма важно как для выявления генезиса сложившейся в отдельной стране (регионе, районе) гидроэкологической ситуации, так и для выделения своей доли водных ресурсов и определения платы за загрязнение воды.

Обычно рассматриваются проблемы, связанные с межгосударственным речным водообменом. Но не менее актуальными могут быть, как показано в статье (Коронкевич и др., 2021), проблемы обмена водой и содержащимися в ней химическими веществами между административными выделами внут-

ри страны, а также между отдельными ландшафтами. Причем обмен осуществляется не только в виде речного стока, но и атмосферного переноса влаги, снегопереноса, склонового стока и т.д. В данной статье такое расширенное понимание трансграничного водообмена применено к бассейну Дона. Ее авторами особое внимание уделено недостаточно изученным особенностям трансграничного водообмена в связи с произошедшими за последние десятилетия изменениями климата и хозяйственной деятельностью.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ, ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По состоянию на конец февраля 2022 г. бассейн Дона площадью 422 тыс. км² расположен в Российской Федерации (369 тыс. км², или 87.4%

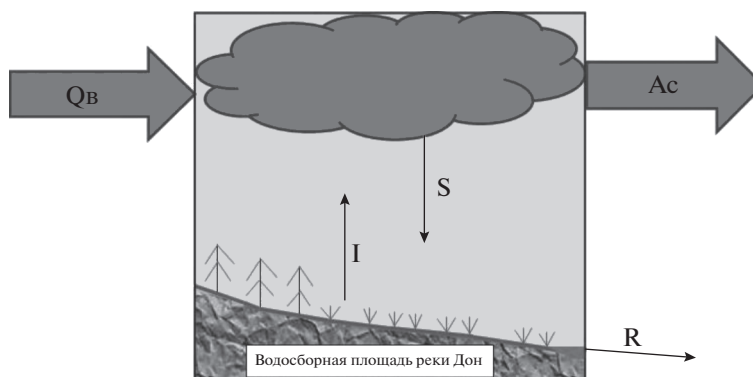


Рис. 1. Схема водообмена в бассейне Дона. Q_v — водяной пар, поступающий извне; S — осадки внешнего происхождения и местные; I — испарение; R — речной сток; A_c — атмосферная влага, покидающая бассейн Дона.

площади) и на Украине, в Луганской народной республике (ЛНР) и Донецкой народной республике (ДНР) (общей площадью 53.0 тыс. км² или 12.6%)¹. На территории донского бассейна в указанный период находилось 15 субъектов РФ. Дон протекает по трем почвенно-географическим зонам: лесостепной с оподзоленными, выщелоченными и типичными черноземами, степной с обыкновенными и южными черноземами и сухостепной с темно-каштановыми и каштановыми почвами.

Среднегодовое количество осадков уменьшается с северо-запада на юго-восток от 600 до 350 мм. Для рек характерно хорошо выраженное весеннее половодье, летне-осенняя и зимняя межень. По состоянию на начало 1960-х годов средний многолетний сток Дона в устье составлял 29.5 км³/год (в створе ст. Раздорская — 27.5 км³/год) (Водные ресурсы и водный ..., 1967). Средняя многолетняя величина стока Дона в устье составляет 28.1 км³/год (Водные ресурсы и водное ..., 2007–2018). По данным Водного кадастра (Ресурсы ..., 2001–2019) в среднем за 1930–1980 гг. сток Дона у ст. Раздорская — 25.3 км³/год. Согласно монографии (Водные ресурсы России ..., 2008) водные ресурсы бассейна Дона за 1930–2005 гг. составили в среднем 26.8 км³/год, что меньше на 4.6% относительно нормы (28.1 км³/год), опубликованной в (Водные ресурсы СССР ..., 1987).

В качестве исходной информации использовались данные многолетних наблюдений Росгидромета, а также сведения из различных литературных источников и статистических справочников (Водные ресурсы и водное ..., 2007–2018; Водные ресурсы и водный ..., 1967; Водные ресурсы России ..., 2008; Государственный ..., 2019; Научно-прикладной ..., 2020; Ресурсы ..., 2001–2019).

¹ Согласно Федеральному конституционному закону от 4 октября 2022 г. № 6 ДНР и ЛНР вошли в состав РФ.

Исследование выполнено на основе методических подходов, предложенных в работе (Коронкевич и др., 2021), и географо-гидрологического обобщения опубликованных данных о водном стоке, химическом составе сточных вод, результатов гидрохимического обследования почв, выполненного Институтом географии РАН (ИГ РАН) и Институтом биохимической физики РАН (ИБХФ РАН).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Атмосферный перенос влаги

Наиболее полно вопросы, связанные с влагопереносом над территорией СССР и России в целом и наиболее крупных регионов, рассмотрены в работах Г.П. Калинина (1968), Л.П. Кузнецовой (1978), (Водные ресурсы России ..., 2008).

Нами по данным, приведенным в вышеперечисленных работах, были выполнены расчеты и составлена усредненная схема атмосферного влагопереноса над водосборной площадью Дона за год в целом (рис. 1). Для ориентировочной оценки использовались средние многолетние данные, приведенные в работе ГГИ (Водные ресурсы России ..., 2008) для западной части РФ. Поскольку в основных чертах особенности влагопереноса в атмосфере над бассейном Дона такие же, как на большей части Западного региона России, то из этих данных следует, что соотношение между атмосферными осадками и влагой, циркулирующей в атмосфере, составляет 0.37. Поскольку в динамике годовых осадков за период 1976–2015 гг. в бассейне Дона статистически значимого изменения не установлено (Джамалов и др., 2017), то для расчетов принята их норма 240 км³/год, приведенная в монографии (Водные ресурсы и водный ..., 1967). Тогда количество атмосферной влаги, поступающей на водосборную площадь Дона (Q_v), составляет 649 км³/год. Этот объем влаги суммирует ат-

мосферный влагоперенос разных направлений, причем преобладает, особенно осенью, западное и северо-западное направление переноса влаги (Кузнецова, 1978). Поступившая влага (Q_v) расходуется на выпадение в виде атмосферных осадков (S) $240 \text{ км}^3/\text{год}$, из которых в атмосферу за вычетом речного стока (R) $26.8 \text{ км}^3/\text{год}$ возвращается в процессе испарения (I) $213 \text{ км}^3/\text{год}$. Количество атмосферной влаги, покинувшей бассейн Дона (Ac), составляет $622 \text{ км}^3/\text{год}$.

Расчеты показали, что атмосферный влагоперенос через границы бассейна Дона значительно превосходит речной водообмен. Речной сток составляет лишь 4% от величины атмосферного переноса влаги.

Ветровой перенос снега

Ветровой перенос снега как через природные, так и через административные границы на несколько порядков меньше атмосферного переноса (Коронкевич и др., 2021). На открытых пространствах европейской части России, в том числе в бассейне Дона, предельная дальность метелевого переноса снега составляет 1.5–2 км (Котляков, 1994). Однако ветровой перенос снега — весьма существенный фактор локального формирования стока во время весеннего половодья. В результате ветрового переноса снега в лесостепных и степных районах донского бассейна его запасы на плакорах и склонах к началу весеннего половодья в 2–3 раза меньше, чем в оврагах и балках, где снег накапливается, и коэффициент стока выше, чем на прилегающих склонах.

Водный сток через границы лесостепной и степной зон

По сравнению с бассейном Волги, значительная часть которого находится в лесной зоне, условия формирования стока в донском бассейне не

столь благоприятные. Здесь преобладают ландшафты с гораздо меньшим увлажнением атмосферными осадками.

По данным, приведенным в (Научно-прикладной ..., 2020), нами выполнены расчеты площадей, занимаемых отдельными природными зонами, и стока, формирующегося в их пределах. В основном водосборная площадь Дона занята типичной и южной степью (в сумме 76%), на лесостепь и полупустыню приходится соответственно 23 и 1% (табл. 1). Несмотря на меньшую площадь, лесостепная зона играет весьма существенную гидроэкологическую роль, особенно в миграции загрязняющих веществ. Из лесостепи к границам степной зоны притекает 42% общего годового стока, 39% стока половодья и 55–65% меженного стока (преимущественно подземного).

Речной водообмен через границу России

Приток донских речных вод на территорию России через государственную границу согласно монографии (Водные ресурсы и водный ..., 1967), в которой в отличие от последующих публикаций приводятся сведения о трансграничном обмене водами рек донского бассейна, значительно — в 2.5 раза превышает отток (табл. 2). Причем приток с территории Украины (в границах на начало февраля 2022 г.) практически отсутствовал, осуществлялся он главным образом через границы ЛНР. Приток донской воды из ЛНР в Ростовскую область значительно, более чем в 35 раз, превышал отток и существенно сказывался на ее гидроэкологической ситуации. Отток из России происходил на территорию Харьковской области Украины в основном из Белгородской области (74% местного стока рек донского бассейна).

Приведенные выше осредненные соотношения могут существенно меняться от года к году под влиянием антропогенных и климатических факторов. При этом может возрастать или сни-

Таблица 1. Распределение стока по физико-географическим зонам в бассейне Дона

Природная зона	Площадь	Годовой сток	Половодье	Минимальный 30-суточный летне-осенний сток	Минимальный 30-суточный зимний сток
	$\text{км}^2/\%$	$\text{км}^3/\%$			
Лесостепь	97060/23	10.67/42.2	5.43/39	0.43/65.4	0.45/54.5
Степь типичная	253200/60	12.66/50	7.09/51	0.20/30.4	0.33/40
Степь южная	67520/16	1.89/7.5	1.35/9.7	0.026/4.0	0.044/5.3
Полупустыня	4220/1	0.084/0.3	0.042/0.3	0.001/0.2	0.002/0.2
Бассейн Дона в целом	422000/100	25.30/100	13.91/100	0.657/100	0.826/100

Таблица 2. Водообмен донской водой через границу России (по состоянию на конец февраля 2022 г.)

Регион	Приток в Россию	Отток из России	Местный сток рек бассейна Дона
	км ³		
Харьковская область (Украина)	0	1.72	1.33
ЛНР	4.81	0.128	1.33
ДНР	0	0	0.297
Всего за границей РФ	4.81	1.85	2.96
Белгородская область	0	1.85	2.49
Воронежская область	0	0	3.75
Ростовская область	4.81	0	3.11
Всего в границах РФ	4.81	1.85	9.35

жаться роль отдельных составляющих речного стока в перемещении воды и загрязняющих веществ через административные и природные границы. Так, по сравнению с приведенными в табл. 2 величинами в последние годы произошло климатически обусловленное уменьшение стока Дона, снизилась доля его поверхностной составляющей и возросла доля подземной.

Обмен речной водой через административные границы субъектов РФ

Гидроэкологическая ситуация в отдельном регионе обусловлена не только природными и антропогенными факторами, действующими в пределах его административных границ, но и существенным образом зависит от особенностей обмена речной водой с соседними регионами. При других одинаковых условиях, чем больше транзитный приток (сток), тем менее напряженной становится гидроэкологическая ситуация в данном регионе, прежде всего в отношении его водообеспеченности. Особенно важную роль играет транзитный приток для наиболее обжитых регионов.

Для оценки степени влияния транзитного притока воды целесообразно использовать соотношение его величины с величиной общего стока. В работе (Коронкевич и др., 2021) выделено шесть категорий по величине транзитного притока в долях от общего стока: 1) отсутствует; 2) незначительное (менее 20%); 3) малое (20–40%); 4) среднее, сбалансированное с местным стоком (40–60%); 5) большое (60–80%); 6) доминирующее (>80%).

По данным (Водные ресурсы и водный ..., 1967) рассчитана структура водообмена в основных субъектах РФ, по территории которых протекает Дон (рис. 2). Для всех областей характерно большое (Тульская, Липецкая, Воронежская области) и даже доминирующее (Волгоградская, Ростовская области) влияние транзитного стока

на складывающуюся в них гидроэкологическую ситуацию. При этом в Тульской области она мало зависит от притока рек донского бассейна (их доля около 1% в общем стоке) и во многом обусловлена транзитным притоком рек бассейна Оки (62%). Гидроэкологическая роль транзитного стока донских рек весьма значительна в Воронежской области (73% от общего стока) и особенно в Ростовской (88%).

Учет транзитного притока позволяет не только существенно уточнить водообеспеченность отдельных субъектов РФ, но и оценить напряженность складывающейся в них гидроэкологической ситуации. Для этого используется ряд показателей (Долгов, 2002; Закруткин и др., 2004; Коронкевич и др., 2019; Коронкевич и др., 2021; и др.), в том числе отношение величины водозабора к величине общего годового стока (местного плюс транзитного), а также кратность разбавления поступающих в водные объекты сточных вод. Расчеты выполнены по регионам с долей притока рек донского бассейна в общих ресурсах стока не менее 60%. К ним относятся Липецкая, Воронежская и Ростовская области. Доля их площади во всей площади водосбора Дона составляет соответственно 5.7, 12.4 и 21.7%. Анализировались данные за год с наибольшей антропогенной нагрузкой (1990 г.) и год с ее уровнем, наблюдающимся в последние годы (2018 г.).

Вследствие несовпадения тенденций в пространственно-временной динамике общего стока водность в рассматриваемые годы на Верхнем и Нижнем Дону существенно не совпадает. Так, в Липецкой и Воронежской областях в 1990 г. общий сток был ниже нормы на 11–13%, в 2018 г. — выше нормы на 13–23%. В Ростовской области в 1990 г. наблюдался общий сток существенно ниже нормы (на 34%), а в 2018 г. был близким к норме (меньше лишь на 8%).

Из результатов расчетов, приведенных в табл. 3, следует, что за период с 1990 по 2018 г. нагрузка со

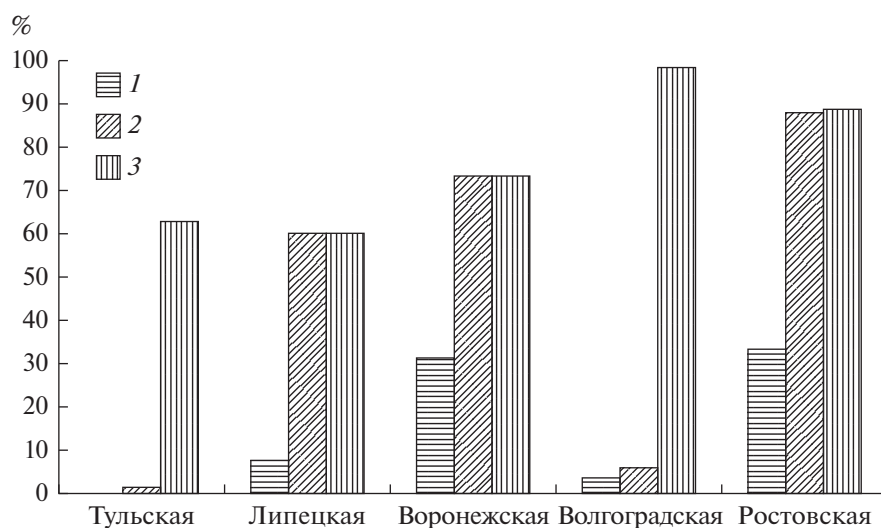


Рис. 2. Доля притока в общих ресурсах речного стока в областях РФ, по территории которых протекает Дон. 1 – р. Дон; 2 – Дон и другие реки донского бассейна; 3 – суммарный приток.

стороны водного хозяйства на сток Дона заметно снизилась. Водозабор сократился: в Липецкой области на 63%, Воронежской – 66%, Ростовской – 49%. В верхней части бассейна Дона его соотношение с общим (местным плюс транзитным) стоком значительно уменьшилось (с 9–10 до 2.4–2.7%). Однако на Нижнем Дону, в Ростовской области, где наиболее интенсивно используются ресурсы общего стока, доля водозабора от общего стока остается высокой, в 2018 г. даже несколько увеличилась (с 14 до 15%).

С 1990 по 2018 г. значительно сократился сброс сточных вод: в Липецкой области на 66%, Воронежской – 74%, Ростовской – 54%. Кратность их разбавления общим стоком на Верхнем Дону, в Липецкой и Воронежской областях, существенно возросла – соответственно с 24 до 89 раз и с 14 до 73 раз. В меньшей мере кратность разбавления увеличилась на Нижнем Дону, в Ростовской об-

ласти – с 5 до 14 раз. Здесь негативное воздействие водного хозяйства на гидроэкологическую ситуацию существеннее, чем на Верхнем Дону.

Конечно, если иметь в виду только сток донских вод и водопотребление в донской части этих областей, то кратность разбавления сточных вод будет меньше. В целом же для бассейна Дона кратность разбавления сточных вод небольшая, в 1990 г. составляла 2.1 раза, в 2018 г. – 7.3 раза.

Перенос с водой химических веществ

Вследствие преобладания западного и северо-западного атмосферного влагопереноса, на территорию донского бассейна попадает значительная часть загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферу предприятиями различных отраслей промышленности и транспорта зарубежной Европы, в том числе Украины (Клюев, 2017). Один из наибо-

Таблица 3. Гидроэкологические показатели Липецкой, Воронежской и Ростовской областей РФ

Область	1990 г.		2018 г.	
	доля водозабора от общего стока, %	разбавление сточных вод, раз	доля водозабора от общего стока, %	разбавление сточных вод, раз
Липецкая	9.4	23.5	2.7	88.8
Воронежская	9.9	13.8	2.4	73.0
Ростовская	13.8	4.8	14.8	14.2

Таблица 4. Содержание биогенов в водных вытяжках из поверхностного слоя черноземных почв Курской, Воронежской и Волгоградской областей, мг/л на 10 г сухого вещества

Элемент ландшафтной структуры	Число почвенных образцов	Азот минеральный	Фосфор минеральный
Широколиственный лес и лесопосадки	16	0.46	0.049
Залежь и целина	16	0.51	0.037
Сосновый лес	3	0.20	0.026
Сельскохозяйственные поля, занятые:	29	0.29	0.028
пшеницей	6	0.24	0.026
кукурузой	3	0.24	0.032
подсолнечником	16	0.32	0.031
чистым паром	4	0.36	0.022

лее известных результатов этого переноса — радиоактивное заражение Белгородской, Курской, Орловской, Воронежской, Тульской областей в результате аварии на Чернобыльской АЭС.

Немало загрязняющих веществ поступает также от внутрироссийских источников. Суммарное поступление веществ с осадками от природных и антропогенных источников может быть весьма существенным. Так, в годовом водно-биогенном балансе территории Курской области поступление с атмосферными осадками минерального азота составило в среднем 641 кг/км², а минерального фосфора — 13 кг/км². При этом поступление азота с осадками весьма существенно — оно в 2 раза превышает вынос с водным стоком (без учета сточных вод), менее заметно поступление фосфора — около 40% от величины выноса.

При трансформации выпавших осадков в поверхностный склоновый сток происходит дальнейшее насыщение воды химическими веществами, в том числе загрязняющими, формируется их диффузное поступление в гидрографическую сеть (Коронкевич, Долгов, 2017; Ясинский и др., 2020). Диффузный вынос химических веществ, особенно биогенов, в реки и водоемы во многих случаях существенно больше их поступления со сточными водами и достигает 75–95%. В значительной мере диффузное загрязнение водных объектов обусловлено внесением удобрений и ядохимикатов на сельскохозяйственных полях, расположенных выше гидрографической сети. При этом важно учитывать величину выноса биогенов с урожаем, которая в последние годы нередко оказывается больше их внесения с удобрениями.

Так, в Курской области поступление биогенов с удобрениями компенсировано еще большей величиной их выноса с урожаем (азота в среднем на 16%, фосфора — на 8% за 2015–2017 гг. (Долгов и др., 2021)).

Необходимо также учитывать, что в последние десятилетия в бассейне Дона, как и на всей территории Русской равнины, вследствие потепления климата произошли кардинальные изменения в формировании водного и водно-биогенного баланса. Они не имеют аналогов за весь период инструментальных наблюдений. Особенно это касается значительно возросшей роли инфильтрации и подземного стока в миграции с водосборов биогенных и других химических элементов и резкого сокращения роли весеннего поверхностного склонового стока. Так, в Курской области доля подземной составляющей стока в суммарном годовом выносе азота с речных водосборов стала преобладать над поверхностной составляющей. Вынос с подземным стоком составляет 59% азота и 52% фосфора (от величины выноса с полным стоком), а с поверхностным — соответственно 41 и 48%.

Однако такие изменения в структуре диффузного стока биогенных элементов не привели к улучшению гидроэкологической ситуации, поскольку дренируемые реками подземные воды нередко содержат эти элементы в еще большей концентрации, чем поверхностные.

Роль трансграничного переноса химических веществ с водным стоком в отношении химического состава местных вод усиливается на пути от приводораздельных ландшафтов к гидрографической сети. Возможны самые разные сочетания,

но чем больше разбавление стекающих вод, тем при прочих равных условиях (в том числе уровня очистки) качество природных вод будет лучше. Этому способствуют, например, более высокие запасы снега в оврагах и балках по сравнению с плакорами и склонами.

Содержание химических веществ в водах какого-либо ландшафта зависит как от поступивших в его пределах веществ (местного происхождения), так и от привнесенных с водным стоком веществ из выше расположенных ландшафтов.

Из обобщения результатов гидрохимического обследования почв, выполненного ИГ РАН и ИБХФ РАН 18–25 июля 2020 г. и 1–7 августа 2021 г., следует, что вода атмосферных осадков в наибольшей степени может насыщаться биогенами в широколиственных лесах и лесопосадках, на залежах и целинных участках, а в наименьшей — в сосняках и на сельскохозяйственных полях с истощенной почвой (при внесении удобрений не компенсирующим вынос биогенов с урожаем) (табл. 4). При современном уровне использования удобрений, пока не достигшем его максимума в конце 1980-х годов, роль сельскохозяйственных полей в качестве источника биогенного загрязнения рек и водоемов несколько снизилась. В основном азот и фосфор поступают с опадом лесной растительности и травянистой — на лугах, пастбищах, залежах.

Наиболее очевидна роль трансграничного переноса загрязняющих веществ в составе сточных вод, сбрасываемых непосредственно в реки. Транзитные сточные воды могут быть как более, так и менее загрязненными, чем местные. Возможны самые разные сочетания. В субъектах РФ, по территории которых протекает Дон, роль трансграничного переноса загрязняющих веществ с водным стоком в формировании качества речных вод усиливается на пути от истока до устья. При других одинаковых условиях (включая самоочищение) качество речных вод будет тем лучше, чем меньше содержится загрязняющих веществ в поступивших извне сточных водах, что в свою очередь во многом зависит от особенностей функционирования очистных сооружений.

Для регионов с долей притока рек донского бассейна в общих ресурсах стока не менее 60% (Липецкой, Воронежской и Ростовской областей) в данной работе оценена эффективность очистки сточных вод. Если судить по доле объема загрязненных сточных вод во всем объеме сбрасываемых в водные объекты сточных вод, то можно прийти к выводу, что эффективность очистки в верхней части бассейна Дона за период с 1995 по 2018 г. гораздо ниже, чем на Нижнем Дону. Более того, в Липецкой области доля загрязненных сточных вод за рассматриваемый период даже существенно увеличилась — с 63.5 до 85.9%, в Воронеж-

ской области — с 40.6 до 50.9%. В то время как в Ростовской области она сократилась с 23.5 до 15%.

Для более детальной оценки гидроэкологической роли сточных вод рассчитано среднее годовое содержание загрязняющих веществ за 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 и 2018 гг. по каждому из шести основных показателей — БПК полный, нефтепродукты, сухой остаток, азот аммонийный, нитраты, медь (Водные ресурсы и водное ..., 2007–2018).

Из результатов расчетов следует, что за рассматриваемый период отчетливо выраженной тенденции в динамике легко окисляемой органики в сточных водах (по показателю *БПК полный*) не наблюдается (рис. 3а). В среднем по анализируемым регионам этот показатель составлял в конце 1990-х — начале 2000-х годов около 6 ПДК, затем произошло некоторое его снижение — до 4 ПДК, в 2018 г., напротив, наблюдался рост — до 6 ПДК. В Ростовской области, занимающей самую нижнюю часть донского бассейна, очистные сооружения в отношении легко окисляемой органики работают менее эффективно, чем в других регионах, и превышение ПДК в местных сточных водах в 2000-е годы было больше.

В отношении концентрации *нефтепродуктов* в сточных водах отмечается тенденция к ее снижению — в среднем по анализируемым регионам с 6–9 до 2–4 ПДК (рис. 3б). Причем в Ростовской области хотя и произошло весьма существенное сокращение содержания нефтепродуктов (с 9–12 до 3–5 ПДК), но в самые последние годы оно по-прежнему остается выше, чем в сточных водах Воронежской области.

За рассматриваемый период отчетливо выражена тенденция к уменьшению содержания *меди* в сточных водах — в среднем по регионам с 8–13 до 4–5 ПДК (рис. 3в). Однако очистка сточных вод в Воронежской области от меди менее эффективная, чем в Ростовской области. Такая ситуация может оказывать дополнительное негативное влияние на качество водных ресурсов Ростовской области вследствие поступления меди в более высокой концентрации с транзитным стоком из Воронежской области.

Изменения за рассматриваемый период в величине *сухого остатка* сточных вод Липецкой и Воронежской областей практически отсутствуют. Этот показатель не превышает ПДК (рис. 3г). В экологическом отношении он наиболее важен для водных ресурсов Ростовской области, с характерной для них повышенной фоновой природной составляющей минерализации. Если судить по снижению сухого остатка в сточных водах Ростовской области (с 1.5–2.5 до 1–1.5 ПДК), то можно прийти к выводу о некотором улучшении работы местных очистных сооружений.

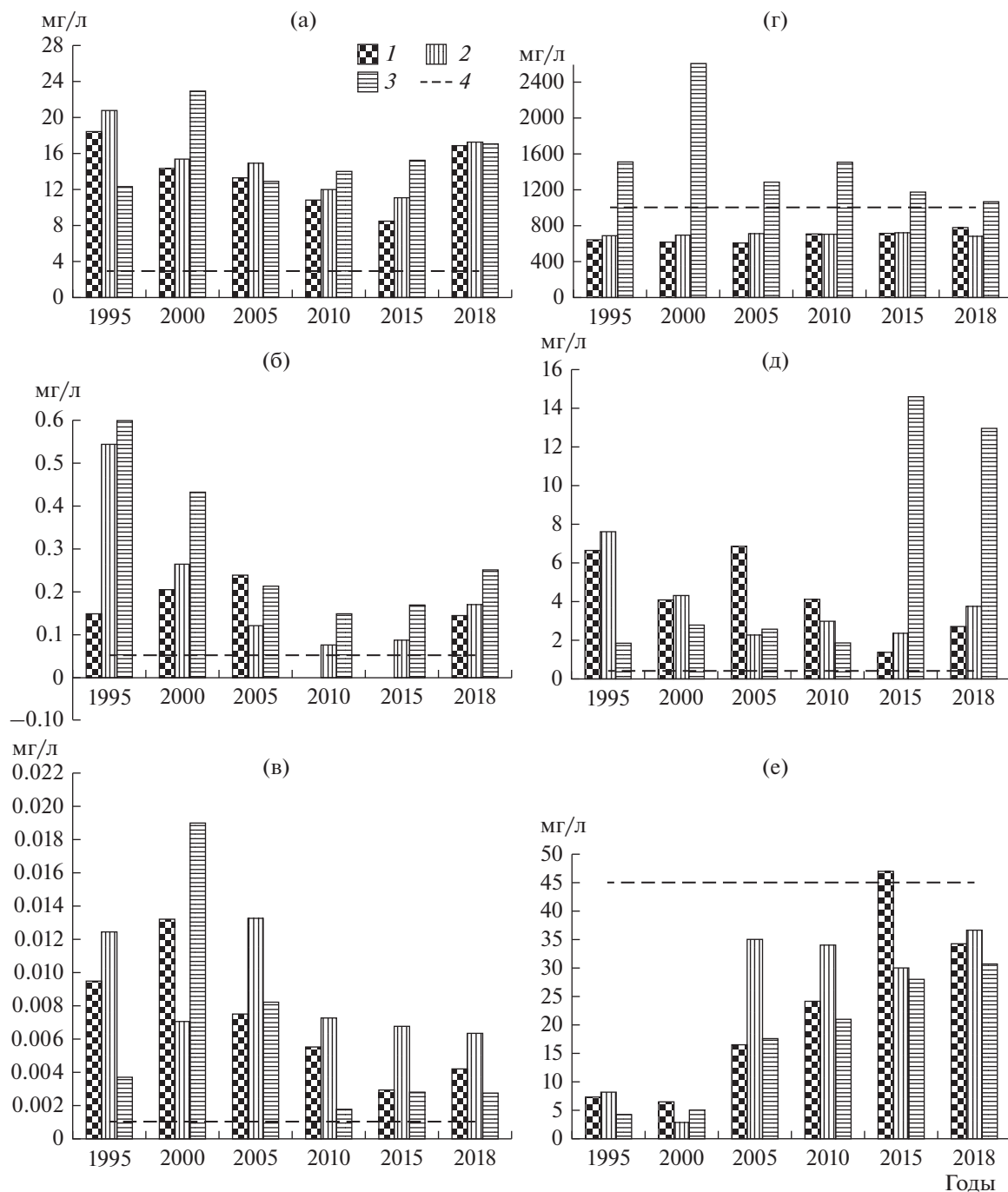


Рис. 3. Динамика содержания загрязняющих веществ в составе сточных вод: (а) легко окисляемая органика (по показателю БПК полный); (б) нефтепродукты; (в) медь; (г) сухой остаток; (д) аммонийный азот; (е) нитраты. 1 – Липецкая область; 2 – Воронежская область; 3 – Ростовская область; 4 – ПДК.

Таким образом, негативное воздействие сточных вод на качество речных вод Ростовской области за анализируемый период по рассмотренным показателям уменьшилось, возможно, из-за меньшей нагрузки на очистные сооружения и повышения эффективности их работы.

В динамике остальных двух показателей отчетливо выражена негативная ситуация. В первую

очередь это относится к продолжающемуся оставаться весьма высокому содержанию в сточных водах всех анализируемых субъектах РФ **аммонийного азота**, относящегося к числу приоритетных показателей качества речных вод в донском бассейне. В период с 1995 по 2010 г. наблюдалось снижение содержания аммонийного азота (в среднем по регионам с 13.5 до 7.5 ПДК) (рис. 3д). При-

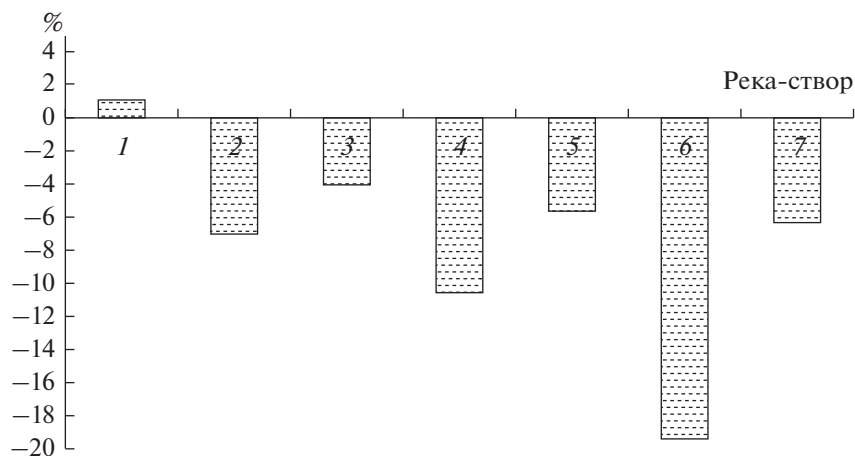


Рис. 4. Изменение годового стока рр. Дон и Северский Донец за 1981–2017 гг. относительно нормы за 1930–1980 гг., %. 1 – Дон – г. Задонск; 2 – Дон – г. Лиски; 3 – Дон – ст. Казанская; 4 – Дон – х. Хованский; 5 – Дон – г. Серафимович; 6 – Дон – ст. Раздорская; 7 – Северский Донец – г. Белая Калитва.

чем более эффективной была очистка сточных вод по этому показателю в Ростовской области. Однако впоследствии содержание аммонийного азота в сточных водах Ростовской области не только не снизилось, но даже значительно выросло (до 32 ПДК в 2018 г.) и стало больше, чем в сточных водах Воронежской и Липецкой областей.

Отчетливо выраженной негативной тенденцией в 2000-е годы стал значительный рост содержания в сточных водах **нитратов** (рис. 3е), свидетельствующий об усилении биогенной нагрузки на реки и водоемы. Причем в сточных водах Ростовской области концентрация нитратов в последнее десятилетие стала ниже, чем в сточных водах, поступающих с транзитным стоком из Воронежской области.

Полученные результаты характеризуют гидроэкологическую роль сточных вод в целом для субъектов РФ, в отдельных же их частях положение может существенно отличаться от средних по субъекту показателей, в том числе в зависимости от доли транзитных и местных сточных вод в величине общего стока.

Заметим также, что результаты в отношении оценки гидроэкологической роли транзитных сточных вод могут быть в дальнейшем детализированы, в том числе на основе анализа всего спектра загрязняющих веществ, учитываемых государственной статистической отчетностью. Следует также иметь в виду, что вплоть до настоящего времени не налажен учет объема и химического состава дождевых и талых вод, стекающих с урбанизированных территорий (включая дорожную сеть), гидроэкологическая роль которых за последние десятилетия явно возросла. Величина водного стока, формирующегося на них в настоя-

щее время, соизмерима с его величиной на сельскохозяйственных угодьях.

Антропогенные и климатические изменения стока в бассейне Дона

В последние десятилетия (с 1980-х годов) произошла существенная трансформация использования ландшафтов водосборной площади Дона. Она обусловлена ростом урбанизированных территорий, а также уменьшением площадей под зяблевой (осенней) пахотой, весенний поверхностный сток с которой меньше, чем с нераспаханных с осени полей. Если в 1960–1970 гг. осенью распахивалось до 50% всей площади бассейна Дона, то в самые последние годы площадь зяби сократилась до 25–28%.

Такая трансформация землепользования способствует увеличению поверхностного склонового стока. Однако возобладали другая тенденция — его резкое снижение, вплоть до нуля в отдельные годы. Вклад климатического фактора в современное общее изменение поверхностного склонового стока оказался преобладающим. Он составил для бассейна Дона в целом 75–85%, а вклад антропогенного фактора — лишь 15–25% (Долгов и др., 2020). Что касается изменения современного суммарного речного стока по сравнению с периодом 1930–1980 гг. в створе ст. Раздорская (20%) (рис. 4), то оно практически целиком обусловлено климатическими факторами, так как суммарная антропогенная нагрузка (ландшафтные изменения стока на водосборе, дополнительное испарение с акваторий Цимлянского, Воронежского и других водохранилищ, безвозвратное изъятие воды при водопотреблении) в размере в среднем примерно 5–5.5 км³/год (20–22%) приблизительно одинаковы в сравниваемые периоды, хотя тенденция

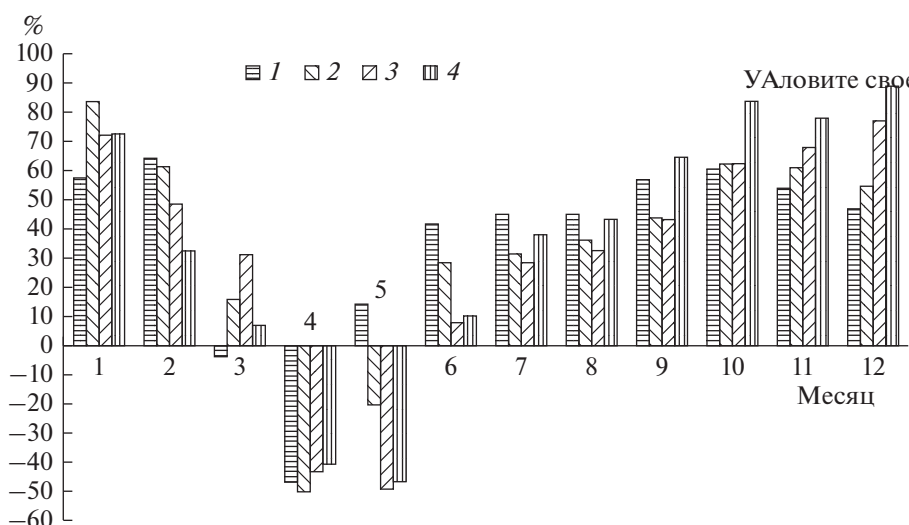


Рис. 5. Изменение среднего за 1981–2016 гг. месячного стока р. Дон относительно нормы за 1930–1980 гг. 1 – г. Задонск; 2 – г. Лиски; 3 – г. Калач-на-Дону; 4 – ст. Раздорская.

изменения была диаметрально противоположной. В первый период нагрузка возрастала, и сток уменьшался, а во второй она снижалась, что способствовало увеличению стока. В то же время возросла роль антропогенных факторов (в первую очередь водохранилищ) во внутригодовом распределении стока.

Основной причиной уменьшения стока после 1980 г. стал рост температуры воздуха в холодный период года, приведший к уменьшению глубины промерзания почвы, учащению оттепелей, росту инфильтрации талых вод в почву. В отличие от температуры воздуха, количество осадков в бассейне Дона изменилось не столь существенно, в том числе в холодный период года.

В последние десятилетия существенно изменилось внутригодовое распределение стока. Произошло резкое снижение стока половодья. Сокращение среднего месячного стока в бассейне Дона в апреле–мае достигло 40–50% (рис. 5), максимальные суточные расходы воды уменьшились в 2 раза (р. Дон у г. Задонск и р. Северский Донец у г. Белая Калитва) и 3.4 раза (Дон у ст. Раздорская), в том числе за счет более полного регулирования стока водохранилищами в последние десятилетия по сравнению с периодом 1930–1980 гг.

На фоне снижения стока в апреле–мае, когда в основном проходит половодье (и за год в целом), сток в маловодный период года (с июня по февраль) значительно увеличился (см. рис. 5), особенно в октябре–январе (в среднем на 65%). Произошло это, скорее всего, за счет увеличения подземного стока с водосборной площади (Долгов и др., 2020). Об этом свидетельствует, в частности, значительный рост (в среднем за период 1981–2017 гг.) минимального зимнего суточного стока

Дона и Северского Донца – в 1.7–2.1 раза и минимального суточного стока в открытом русле – в 1.4–2.4 раза.

В связи со значительным снижением поверхностной составляющей стока соответственно снизилась ее роль в перемещении воды вместе с загрязняющими веществами через административные и природные границы, а роль подземной составляющей, напротив, возросла.

Основные проблемы трансграничного водообмена в бассейне Дона и пути их решения

В числе основных проблем водообмена – деление водных ресурсов трансграничных рек, и особенно качество транзитных вод, сформировавшихся на той или иной территории. Очень важно определить, кто и в каком объеме должен возмещать ущерб, наносимый загрязнением трансграничных рек. Для этого необходимо оценить вклад в их загрязнение не только от точечных источников (в том числе загрязняющих атмосферу и осадки), но и от площадных (диффузных). Препятствием при этом могут служить разные нормативы загрязнения воды, применяемые в России и за рубежом, а также разное природное качество вод.

Наиболее остро ситуация с загрязнением водных объектов в связи с трансграничным переносом складывалась в последние годы в Ростовской области. Сюда по Северскому Донцу осуществлялся перенос загрязняющих веществ из ЛНР. Вклад в загрязнение Северского Донца преобладал и составлял не менее 70% (Клюев, 2017). Ситуация с загрязнением Ростовской области в настоящее время остается во многом неясной из-за геополитических причин.

Решение указанных проблем связано с целым рядом организационно-правовых, экономических и технических вопросов, детальное рассмотрение которых выходит за рамки данной статьи. При этом важно отметить, что принципиальные пути решения проблем трансграничного водообмена уже разработаны. Так, в Соглашении об основных принципах взаимодействия в области рационального использования и охраны трансграничных водных объектов государств – участников СНГ (1998 г.) принят бассейновый подход к решению трансграничных гидрологических проблем. Пути их решения основаны на принципе максимального учета интересов стран, расположенных в бассейнах трансграничных рек. Северский Донец находится в числе рек, по которым заключены соглашения. Правда, судьба Соглашения по этой реке в силу геополитического кризиса остается неясной.

Остается немало и других нерешенных вопросов. Необходимы бассейновые соглашения между отдельными субъектами РФ в бассейне Дона. Следует организовать мониторинг за трансграничным атмосферным переносом загрязняющих веществ, состоянием водных ресурсов не только в руслевой сети, но и на территории водосборов, а также за рассредоточенным (диффузным) стоком. Много неясного остается в расчете современного и будущего водного и вещественного балансов трансграничных речных бассейнов, в прогнозной оценке качественного состава вод с учетом возможных антропогенных воздействий, в составлении комплексных схем рационального использования и охраны водных и связанных с ними земельных и других природных ресурсов.

ВЫВОДЫ

Трансграничный водообмен целесообразно рассматривать как перемещение воды вместе с химическими веществами через границы: государственные, административные между субъектами РФ, а также через природно-антропогенные (физико-географических зон, ландшафтов, сельскохозяйственных угодий и др.).

Основная часть атмосферных осадков и содержащихся в них примесей поступает на территорию донского бассейна благодаря преобладающему западному и северо-западному переносу влаги в атмосфере. Менее существенную роль играют ветровое перемещение снега и перенос воды и химических веществ с водным стоком через границы отдельных ландшафтов. Однако это важно для изучения процессов формирования стока и качества вод, установления фоновых их значений для отдельного региона с учетом его ландшафтной структуры, а также для выявления источников и путей миграции загрязняющих веществ.

Наиболее актуальны в настоящее время вопросы, связанные с перемещением воды с загрязняющими веществами через государственные и административные границы. Выполненный анализ показал значительную долю трансграничного стока в общих водных ресурсах субъектов РФ. Она увеличивается от истока Дона и достигает наибольшей величины (88%) в Ростовской области. Гидроэкологическая роль транзитного стока донских рек весьма значительна также для Воронежской области (73% от общего стока).

Для бассейна Дона в целом объем притока через государственную границу (по состоянию на конец февраля 2022 г.) в 2.5 раза превышал отток. Наиболее острая гидроэкологическая ситуация, обусловленная главным образом снижением (на 20% по сравнению с периодом 1930–1980 гг.) водного стока на Нижнем Дону и трансграничным переносом загрязняющих веществ с водным стоком Северского Донца, сложилась в Ростовской области. Такой ситуации способствует также поступление загрязняющих веществ из верхней части донского бассейна, в первую очередь из Липецкой и Воронежской областей, в которых доля загрязненных сточных вод во всем их объеме за последние годы существенно увеличилась (на 10–20%).

Анализ динамики содержания загрязняющих веществ в составе сточных вод за 1995–2018 гг. показал, что в отношении отдельных показателей их очистка продолжает оставаться недостаточно эффективной (особенно аммонийного азота). Практически отсутствует контроль природоохранных органов за диффузным загрязнением водных объектов. Важно и то, что роль поверхностной составляющей речного стока в перемещении воды вместе с загрязняющими веществами через административные и природные границы снизилась, а роль подземной составляющей, напротив, возросла.

Полученные результаты характеризуют водно-экологическую напряженность в целом для субъектов РФ, в отдельных же их частях положение может существенно отличаться от средних по субъекту показателей, в том числе в зависимости от доли транзитного и местного стока в величине общего стока, эффективности очистки загрязненных вод.

Принципиальные пути решения трансграничных водных проблем известны, в первую очередь это бассейновые соглашения. Их целесообразно дополнить муниципальным уровнем (административных районов), что позволит повысить эффективность управления водохозяйственной и водоохранной деятельностью. К сожалению, нередко действенный контроль отсутствует, и принятые бассейновые соглашения не всегда реализуются.

В заключение важно подчеркнуть, что выполненные расчеты отражают ситуацию, сложившуюся до геополитического кризиса 2022 г.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках Государственного задания Института географии РАН по теме FMGE-2019-0007, государственная регистрация AAAA-A19-119021990093-8 (разработка методики, оценка разных видов трансграничного водообмена в бассейне Дона) и проекта РНФ 20-17-00209 (анализ гидроэкологических показателей сточных вод).

FUNDING

The work was carried out within the framework of the State Task of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences no. FMGE-2019-0007, state registration AAAA19-119021990093-8 (development of methodology, assessment of different types of transboundary water exchange in the Don River basin) and the RNF project no. 20-17-00209 (analysis of hydro-ecological indicators of wastewater).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Водные ресурсы и водное хозяйство России: Стат. сб. / под ред. Н.Г. Рыбальского, В.А. Омеляненко, А.Д. Думнова. М.: НИИ-Природа, 2008–2018.
- Водные ресурсы и водный баланс территории Советского Союза. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 199 с.
- Водные ресурсы России и их использование / под ред. И.А. Шикломанова. СПб.: ГГИ, 2008. 600 с.
- Водные ресурсы Российской Федерации: Стат. сб. / под ред. Н.Г. Рыбальского и А.Д. Думнова. М.: НИИ-Природа, 2007. 205 с.
- Водные ресурсы СССР и их использование. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 301 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. 205 с.

- Долгов С.В. Гидрологические последствия изменений хозяйственной деятельности в Курской области // Изв. РАН. Сер. геогр. 2002. № 5. С. 72–82.
- Долгов С.В., Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А. Ландшафтно-гидрологические изменения в бассейне Дона // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 6. С. 674–685.
- Долгов С.В., Швыдкий В.О., Штамм Е.В. Закономерности формирования баланса азота и фосфора на речных водосборах в центральной лесостепи Русской равнины в 1990–2020 гг. // Изв. РАН. Сер. геогр. 2021. Т. 85. № 3. С. 355–367.
- Закруткин В.Е., Коронкевич Н.И., Шишкина Д.Ю., Долгов С.В. Закономерности антропогенного преобразования малых водосборов степной зоны Юга России (в пределах Ростовской области). Ростов-на-Дону: Изд-во Ростов. ун-та, 2004. 252 с.
- Калинин Г.П. Проблемы глобальной гидрологии. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 377 с.
- Клюев Н.Н. Экологические угрозы в Российском приграничье // Изв. РАН. Сер. геогр. 2017. № 1. С. 35–46.
- Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Георгиади А.Г., Долгов С.В., Зайцева И.С. Трансграничный водообмен в России // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 4. С. 407–416.
- Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Георгиади А.Г., Долгов С.В., Зайцева И.С., Кашутина Е.А. Оценка антропогенных воздействий на водные ресурсы России // Вестн. РАН. 2019. № 6. С. 603–614.
- Коронкевич Н.И., Долгов С.В. Сток с водосбора как источник диффузного загрязнения рек // Вода и экология: проблемы и решения. 2017. № 4. С. 103–110.
- Котляков В.М. Мир снега и льда. М.: Наука, 1994. 286 с.
- Кузнецова Л.П. Перенос влаги в атмосфере над территорией СССР. М.: Наука, 1978. 91 с.
- Научно-прикладной справочник: Основные гидрологические характеристики водных объектов бассейна реки Дон / под ред. В.Ю. Георгиевского. СПб.: Свое издательство, 2020. 262 с.
- Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество: Ежегод. изд-е. СПб.–М., 2001–2019.
- Ясинский С.В., Кашутина Е.А., Сидорова М.В., Нарыков А.Н. Антропогенная нагрузка и влияние водосбора на диффузный сток биогенных элементов в крупный водный объект (на примере водосбора Чебоксарского водохранилища) // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 5. С. 630–648.

Transboundary Water Exchange in the Don River Basin

S. V. Dolgov^{1, *}, N. I. Koronkevich^{1, **}, and Yu. Yu. Alentyev^{1, ***}

¹Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*e-mail: svdolgov1978@yandex.ru

**e-mail: koronkevich@igras.ru

***e-mail: alentev49@mail.ru

Different types of water exchange across state (as of the end of February 2022), administrative and natural borders in the Don River basin are considered. The indicators of atmospheric moisture transfer and wind movement of snow, water runoff across the boundaries of forest-steppe and steppe zones and the boundaries

of individual landscapes are given. Most of the water is transported across all boundaries in the atmosphere. River runoff is only 4% of the value of atmospheric moisture transfer; 42% of the total annual runoff flows from the forest-steppe to the borders of the steppe zone, 39% of the flood runoff and 55–65% of the minimum summer-autumn and winter runoff. The exchange of river water between individual subjects in the Russian part of the Don River basin has been determined. There is a significant improvement in the water availability of the regions, taking into account the transit flow. The transfer of chemicals with water is considered. The features of the formation of diffuse runoff of biogenic elements in different landscapes are revealed. The results of a comparative analysis of the dynamics of the content of pollutants in the wastewater of Rostov, Voronezh, and Lipetsk oblasts for 1995–2018 period are presented. The impact of local and transit wastewater on the quality of water resources of Rostov oblast is assessed. The features of transboundary water exchange in connection with climate changes and economic activity that have occurred over the past decades are revealed. Mainly due to climatic changes, river runoff on the Lower Don has significantly decreased—by an average of 20%. The role of the surface component of runoff in the movement of water together with pollutants across administrative and natural borders has significantly decreased, while the role of the underground component, on the contrary, has increased. The ways of solving the main problems caused by transboundary water exchange are proposed.

Keywords: Don basin, administrative and natural boundaries, water exchange, quantity and quality of water resources, climatic and anthropogenic factors, changes

REFERENCES

- Dolgov S.V. Hydrological consequences of changes in economic activity in Kursk oblast. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2002, no. 5, pp. 72–82. (In Russ.).
- Dolgov S.V., Koronkevich N.I., Barabanova E.A. Landscape-Hydrological Changes in the Don Basin. *Water Resour.*, 2020, vol. 47, no. 6, pp. 934–944. <https://doi.org/10.1134/S0097807820060056>
- Dolgov S.V., Shvydkii V.O., Shtamm E.V. Patterns of nitrogen and phosphorus balance formation in river catchments in the central forest-steppe of the Russian Plain in 1990–2020. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2021, vol. 85, no. 3, pp. 355–367. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2587556621030031>
- 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 Basin and Their Ecological Status]. Moscow: GEOS Publ., 2017. 205 p.
- 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, 2019. 290 p.
- Kalinin G.P. *Problemy global’noi gidrologii* [Problems of the Global Hydrology]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1968. 377 p.
- Klyuev N.N. Environmental Threats to the Russian Borderlands. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2017, no. 1, pp. 35–46. (In Russ.). <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2017-1-35-46>
- Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Georgiadi A.G., Dolgov S.V., Zaitseva I.S., Kashutina E.A. Assessing the Anthropogenic Impact on the Water Resources of Russia. *Her. Russ. Acad. Sci.*, 2019, vol. 89, no. 3, pp. 287–297. <https://doi.org/10.1134/S1019331619030067>
- Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Georgiadi A.G., Dolgov S.V., Zaitseva I.S. Transboundary water exchange in Russia. *Water Resour.*, 2021, vol. 48, no. 4, pp. 502–511. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0097807821040072>
- Koronkevich N.I., Dolgov S.V. The runoff from a watershed as a source of diffuse river pollution. *Voda i Ekologiya: Probl. i Resheniya*, 2017, no. 4, pp. 103–110. (In Russ.). <https://doi.org/10.23968/2305-3488.2017.22.4.103-110>
- Kotlyakov V.M. *Mir snega i l’da* [World of Snow and Ice]. Moscow: Nauka Publ., 1994. 286 p.
- Kuznetsova L.P. *Perenos vlagi v atmosfere nad territoriei SSSR* [Transfer of Moisture in the Atmosphere over the Territory of the USSR]. Moscow: Nauka Publ., 1978. 91 p.
- Nauchno-prikladnoi spravochnik: Osnovnye gidrologicheskie kharakteristiki vodnykh ob’ektov basseina reki Don* [Scientific and Applied Handbook: Basic Hydrological Characteristics of Water Bodies of the Don River Basin]. Georgievsky V.Yu., Ed. St. Petersburg: Svoe izdatel’sтво Publ., 2020. 262 p.
- Resursy poverkhnostnykh i podzemnykh vod, ikh ispol’zovanie i kachestvo: Ezhegodnoe izdanie* [Surface and Groundwater Resources, Their Use and Quality: Annual Edition]. St. Petersburg, Moscow, 2001–2019.
- Vodnye resursy i vodnoe khozyaistvo Rossii* [Water Resources and Water Management of Russia]. Rybalsky N.G., Omelyanenko V.A., Dumnova A.D., Eds. Moscow: NIA-Priroda, 2008–2018.
- Vodnye resursy i vodnyi balans territorii Sovetskogo Soyuza* [Water Resources and Water Balance of the Territory of the Soviet Union]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1967. 199 p.
- Vodnye resursy Rossii i ikh ispol’zovanie* [Water Resources of Russia and Their Use]. Shiklomanova I.A., Ed. St. Petersburg: GGI Publ., 2008. 600 p.
- Vodnye resursy Rossiiskoi Federatsii* [Water Resources of the Russian Federation]. Rybalsky N.G., Dumnova A.D., Eds. Moscow: NIA-Priroda, 2007. 205 p.

- Vodnye resursy SSSR i ikh ispol'zovanie* [USSR Water Resources and Their Use]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1987. 301 p.
- Yasinskii S.V., Kashutina E.A., Sidorova M.V., Narykov A.N. Anthropogenic load and the effect of drainage area on the diffuse runoff of nutrients into a large water body: Case study of the Cheboksary reservoir. *Water Res.*, 2020, vol. 47, no. 5, pp. 810–827.
<https://doi.org/10.1134/S009780782005022X>
- Zakrutkin V.E., Koronkevich N.I., Shishkina D.Yu., Dolgov S.V. *Zakonomernosti antropogennogo preobrazovaniya mal'kikh vodosborov stepnoi zony Yuga Rossii (v pre-delakh Rostovskoi oblasti)* [Regularities of Anthropogenic Transformation of Small Catchments of the Steppe Zone of the South of Russia (within Rostov Oblast)]. Rostov-on-Don: Rostov University Publ. House, 2004. 232 p.