КАЧЕСТВО ВОДЫ В УСТЬЕ ВОЛГИ КАК ОТРАЖЕНИЕ СОВРЕМЕННОЙ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ВОДОСБОРЕ РЕКИ*

© 2018 г. С.И. Шапоренко

ФГБУН «Институт географии Российской академии наук», Москва, Россия

Ключевые слова: водный сток, водосбор, гидрохимические параметры, водозабор, сточные воды, загрязняющие вещества, качество воды, многолетняя изменчивость, р. Волга.

С.И. Шапоренко

Работа выполнена по данным Росгосстата и Росгидрометслужбы за период 1990–2015 гг. Анализ показал наличие четко выраженной тенденции сокращения водопотребления и водоотведения сточных вод разных категорий в поверхностные водные объекты в целом для всего водосбора Волги. Тенденции по отдельным категориям прерывались короткими отрезками стабилизации или роста в конце 1990-х, в начале и второй половине 2000-х и в отдельные периоды 2010-х годов. Сокращение в 2–6 раз сбросов загрязняющих веществ по большинству параметров (органическое вещество, взвешенные вещества, фенолы, нитриты, аммоний и фосфаты, медь, цинк) сочеталось с пропорциональным ростом сбросов количества нитратов. Выявлены связи некоторых гидрохимических параметров в створе Верхнее Лебяжье (среднегодовые концентрации нефтепродуктов и меди, максимальные и, менее явно, среднегодовые концентрации фенолов) с поступлением отдельных загрязняющих веществ с определенными категориями сточных вод.

Объемы выноса со стоком Волги биогенных и загрязняющих веществ в большей степени определяются водностью года. Соединения фосфора и меди, нефтепродукты, органические вещества, фенолы проявляют тенденцию к сокращению выноса с 1996 г. Суммарный вынос нитратов демонстрирует наиболее тесную корреляционную связь с водным стоком, но при этом определенную асинхронность с его многолетней тенденцией. Основные факторы, влияющие на многолетнюю изменчивость поступления нитратов и их вынос с речным стоком – технологические недостатки в работе основной массы очистных сооружений на водосборе Волги и диффузные источники.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 17-05-00948

Среди видов водохозяйственной деятельности изъятие стока для использования в различных производственных процессах и коммунальном хозяйстве с возвратом в виде сточных вод в речную сеть считается наиболее мощным антропогенным фактором, влияющим на формирование качества речных вод. Количественный учет разных стадий процесса водопользования проводится органами бассейновых управлений и Росстата на основании официальных сведений, предоставляемых зарегистрированными водопользователями. Реальная картина может существенным образом искажаться теми водопользователями, которые не обязаны отчитываться и не делают это официально. Как правило, сточные воды из-за недостатков технологических процессов очистки могут нести массу дополнительных веществ, которые не учтены в отчетной ведомости и в разной степени загрязняют речные воды. Кроме этого, загрязняющие вещества могут поступать из так называемых рассеянных источников (диффузное загрязнение), которые количественно оценить значительно труднее и возможно, чаще всего, только косвенными методами.

Последние десятилетия интенсивность водохозяйственной деятельности испытывала значительные колебания в связи с перестройкой экономических отношений в стране и развитием периодических кризисов в производстве, которые отражались и на динамике процессов водопользования. Сокращение производства и водопотребления во многих случаях сопровождалось увеличением водоемкости продукции в период 1990–1997 гг., который сменил период значительного снижения удельных показателей использования свежей воды [1, 2]. Однако антропогенные процессы камуфлируются разнообразием природных условий в пространстве обширного водосбора Волги. Климатические изменения последних десятилетий оказывают влияние на пространственно-временные соотношения между поверхностной и подземной составляющими склонового стока, что влияет на перераспределение потоков биогенных и загрязняющих веществ, связанных с диффузными источниками [3]. Изменения климата сказываются и на скоростях продукционно-деструкционных процессов в речных экосистемах и, следовательно, на процессах эвтрофирования и качестве речных вод вдоль всего русла реки и в ее устье.

На протяжении нескольких веков антропогенная деятельность влияла на экосистему р. Волги. Имеются расчеты, что в середине XX в. антропогенный пресс на качество речного стока был сопоставим с интенсивностью загрязнения нефтью в его начале [4]. Но именно на современном историческом этапе развития эффективных технологий очистки сточных вод предотвращение загрязнения речных вод отходами жизнедеятельности становится первоочередной задачей, и пока она не решена, исследования в этом направлении будут оставаться актуальными.

Количество загрязняющих веществ в речном стоке служит важнейшим составным аддитивным показателем интегральной экологической оценки с применением комплексного индекса [5]. Изучение влияния водохозяйственной деятельности на качество воды в реке, представляющей собой крупнейший «коллектор совокупного загрязнения водосборной территории», имеет важное значение не только для обоснования необходимых мер по ее улучшению и переходу к устойчивому состоянию речной экосистемы [5], но и для прогнозирования качества воды на шельфе Северного Каспия, которое во многом зависит от объема и химического состава волжского стока [6]. Нефтяные углеводороды, поступающие с речным стоком, идентифицируются даже в западной части южной котловины моря [7].

В данной статье современные тенденции качества воды в Волге, намеченные в работе [8], оцениваются путем сопоставления их с многолетней изменчивостью объемов сбросов сточных вод разных категорий и поступающими с ними загрязняющими веществами. Выявлены гидрохимические показатели в замыкающем створе Верхнее Лебяжье, которые можно рассматривать в качестве характеристик, имеющих многолетнюю изменчивость, в неявном виде отражающую динамику сбросов загрязняющих веществ на водосборе Волги.

Работа выполнена на основании сведений официальных справочных изданий Росгидромета за период с 1985/1990 по 2015 гг. [9, 10]. Данные по выносу биогенных и других веществ взяты из ежегодников Гидрохимического института [11]. Процедуры учета и контроля водовыпусков – точечных источников загрязнения, которых в конце прошлого века насчитывалось около 6 тыс., имеют существенные недостатки (неполнота сведений, ошибки химических анализов проб сточных вод и др.), что сказывается на искажении статистических данных. В частности, на это указывалось в работе [6]. Ряды по сбросам различных загрязняющих веществ имеют разные длины и прерываются, по возможности они восстановлены из других источников, в чем большую помощь оказали публикации А.П. Дёмина [12]. Указанные недостатки в исходных данных влияют на корректность выводов, которые можно рассматривать в значительной степени ориентировочными.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВОДНОГО РЕЖИМА, КАЧЕСТВА ВОДЫ И ВЫНОС ВЕЩЕСТВ В СТВОРЕ ВЕРХНЕЕ ЛЕБЯЖЬЕ

С 1985 по 2015 гг. средний годовой водный сток Волги в створе Верхнее Лебяжье составлял 250 км^3 , многолетний тренд за указанный период демонстрирует его сокращение с 283 до 217 км^3 . Внутри периода можно выделить два интервала: первый с 1985 по 1995 гг., когда по тренду наблюдался рост годового стока с 255 до 289 км^3 , второй с 1995 по 2015 гг., когда наблюдалось его падение с 260 до 215 км^3 . Следует указать, что в ежегодниках

Государственного гидрологического института (ГГИ) при градации водного стока использовано исчисление среднего, равного 227 км^3 , за период с 1930 по 1985 гг. [10]. Исследуемый период, таким образом, в целом можно считать периодом повышенной водности, нисходящий тренд в котором пересек принятое среднее многолетнее значение, по данным ГГИ, в 2011 г.

У гидрохимических характеристик, представленных в базе данных наиболее длинными рядами (БПК₅, нефтепродукты, фенолы, азот нитритный, соединения железа общего и меди), с годовым водным стоком проявляется умеренной силы корреляционная связь среднегодовой и максимальной концентраций азота нитритного невысокой статистической значимости (соответственно $r = 0,48$ и $0,44$; $p = 0,1$ и $0,05$), максимальной концентрации железа ($r = 0,50$; $p = 0,02$). Многолетние тенденции лучше всего описываются полиномами второй степени у среднегодовых и максимальных концентраций нефтепродуктов, а также максимальных концентраций фенолов ($R^2 = 0,51$). У всех характеристик, кроме железа, хорошо выражено в разной степени (до десяти и более ПДК) уменьшение концентраций с середины 1990-х до 2005–2006 гг., после чего отмечается относительная стабилизация указанных параметров (рис. 1).

Наименее заметно – в пределах ПДК – происходило падение среднегодовых концентраций легкоокисляемых органических соединений по БПК₅ и максимальных концентраций азота нитритного. Можно констатировать, что тенденция сокращения водного стока сопровождалась в разной степени выраженности уменьшением концентраций гидрохимических характеристик, за исключением средних концентраций железа (слабый рост и стабильность) и максимальных концентраций железа и показателей БПК₅, которые можно характеризовать относительно стабильными.

Полученные результаты в некоторой степени подтверждают предположение о возможном влиянии водности на содержание гидрохимических веществ в водах Волги в работе [6]. Вместе с тем, выполненное в рамках данного исследования прямое сопоставление годовых значений параметров показало, что наиболее значимая корреляция наблюдается между водным стоком и максимальными концентрациями железа и азота нитритного (соответственно $r = 0,48$ и $0,45$ при $p = 0,05$), средними годовыми значениями азота нитритного и нефтепродуктов (соответственно $r = 0,48$ и $0,36$ за пределами уровня статистической значимости). По другим параметрам коэффициенты корреляции на уровне слабых и очень слабых. Такой же неоднозначный результат оценки влияния водности на качество вод приводится в работе [13]: отмечено, что показатель качества ИЗВ (рассчитанный по шести показателям) не коррелирует с водностью, а при расчетах средних значений по группировкам лет разной водности показатели имеют суще-

Рис. 1. Многолетняя изменчивость среднегодовых (А) и максимальных (Б) гидрохимических характеристик в створе Верхнее Лебяжье. В скобках – показатели достоверности аппроксимации (R^2).

ственные различия. В работе [14] применение такого же подхода по створу Верхнее Лебяжье за период с 1978 по 2013 гг. позволило сделать вывод, что высокая водность способствует поступлению и повышению концентраций Cu, Zn и фенолов соответственно в 1,37, 1,95 и 1,38 раз предположительно за счет диффузного загрязнения. При этом содержание нефтепродуктов и органического вещества по БПК₅ существенных различий между периодами разной водности не показало. Качество вод по индексу УИКЗВ в устье Волги ниже г. Астрахани с 2006 по 2016 г. стабильно держится в разряде 4а «грязная» [11], что на один пункт хуже по сравнению со створом Верхнее Лебяжье (3б – «очень загрязненная») за счет загрязнения промышленными и коммунальными предприятиями городской агломерации [6].

Выявляемая по отдельным гидрохимическим параметрам некоторая синхронность в их многолетнем ходе с водным стоком вполне закономерно

отражается и во взаимосвязи концентраций в речных водах. В межгодовой изменчивости средних годовых величин наиболее тесная связь с ХПК – положительная у нефтепродуктов ($r = 0,867$, $p = 0,02$) и отрицательная у меди ($r = -0,593$, статистически не значима). С БПК₅ – положительная у фенолов ($r = 0,597$, $p = 0,01$) и отрицательная у азота нитритного ($r = -0,632$, $p = 0,05$). Корреляционные связи подкрепляются и соответствующими тенденциями (рис. 2). При этом у фенолов с азотом нитритным и нефтепродуктов с медью связи не проявляются. Такие соотношения, вероятно, можно объяснить ростом содержания фенолов при разложении органического вещества и попутным увеличением в воде нитритов. Рост содержания нефтепродуктов – увеличением разлагающихся устойчивых органических веществ с попутной адсорбцией на них соединений меди.

Отсутствие тесных прямых корреляционных связей водного стока с гидрохимическими параметрами определяет и отсутствие ярко выраженных многолетних тенденций, обусловленных совместным действием двух факторов или одним из них. Многолетняя изменчивость выноса веществ проявляет три типа тенденций. Нефтепродукты, фенолы и соединения меди, для которых выше отмечалась прямая связь с объемом водного стока, демонстрируют уменьшение, чаще по нисходящей ветви квадратичной функции или по экспоненте (рис. 3 Б, В, Г). Аналогично выглядит многолетняя изменчивость выноса цинка. Величины достоверности аппроксимаций для кривых меди и цинка 0,2–0,3, а для нефтепродуктов и фенолов возрастают до 0,5–0,6. Сокращение водного стока приводит к уменьшению загрязнения речных вод за счет диффузного поступления указанных веществ [14], т. е. проявляется совместное действие природного и антропогенного факторов.

Изменчивость выноса органического вещества, фосфора и железа общего проявляется в увеличении с 1990 до 2005–2007 гг. и последующем уменьшении. Наиболее высокая амплитуда в колебаниях объема стока свойственна соединениям железа (рис. 3 Б, В). Показатель достоверности аппроксимации отрицательной квадратичной функцией у железа выше, чем у других перечисленных параметров (0,37 и менее 0,2 соответственно). На изменчивость количества стока органического вещества и фосфора, по-видимому, также влияет совокупное действие природного и антропогенного факторов, но с некоторым опозданием по сравнению с нефтепродуктами, фенолами, цинком и медью.

Считается, что сток кремния мало подвержен антропогенному воздействию и по нему даже можно оценивать влияние данного фактора на сток других биогенных веществ [15]. Таким образом, две ветви квадратного трехчлена, описывающего многолетнюю тенденцию изменчивости указанной характеристики, могут показывать, скорее всего, обратную ее связь с объемом водного стока, перелом в ходе которого с роста на падение произошел в конце 1990-х – начале 2000-х годов (рис. 3 Г).

Исключительным образом ведет себя показатель объемов выноса нитратов и производный от него вынос минерального азота, т. к. нитраты занимают в нем основной объем. Выделение из всего временного ряда более короткого с 1996 г. показывает, что ход этих характеристик определяют высокие показатели до 1995 г., резкое падение во второй половине 1990-х годов и значительный рост в первой половине 2000-х годов с наступившей стабилизацией в 2010–2015 гг. (рис. 3 А). Как будет показано ниже, такой многолетний ход в 2000-х годах можно связать с антропогенным фактором, а именно – поступлением нитратов со сточными водами очистных сооружений.

Рис. 3. Многолетняя изменчивость стока веществ в створе Верхнее Лебяжье.

ВОДОЗАБОР ПОВЕРХНОСТНЫХ И СБРОСЫ СТОЧНЫХ ВОД

Из всех крупнейших рек России бассейн Волги отличается наиболее высокими величинами показателей водозабора из поверхностных водных объектов и сбросов в них сточных вод как по абсолютным значениям, так и по отношению к водному стоку (табл. 1).

Таблица 1. Средние многолетние (1985–2015 гг.) показатели суммарных годовых водозаборов и сбросов сточных вод на водосборе Волги в сопоставлении с другими крупнейшими реками, км³/год

Бассейн реки	Средний много- летний водозабор из поверхностных источников, км ³ /год	Отношение водозабора из поверхностных источников к водному стоку, %	Сбросы в поверхност- ные водные объекты, км ³ /год	Отношение сбросов в поверх- ностные водные объекты к водному стоку, %
Волга	20,430	8,17	16,237	6,49
Северная Двина	0,556	0,53	0,536	0,52
Печора	0,393	0,35	0,403	0,35
Обь	8,880	2,08	7,565	1,84
Енисей	3,140	0,52	3,040	0,50
Лена	0,188	0,03	0,232	0,04

Особенно заметно превосходство по сбросам загрязненных стоков, достигающее 5–6 раз и более по средним многолетним величинам (табл. 2). Волга на протяжении веков испытывает высочайшую антропогенную нагрузку на речную экосистему, которая в последние десятилетия существенно не уменьшается. Величины показателей в табл. 1 и табл. 2 отличаются от приводимых ранее [5] в пределах 10–15 % и связаны, вероятно, не только с изменчивостью водного стока и показателей водохозяйственной деятельности, но и с различиями в интервалах осреднения.

В межгодовой изменчивости показателей водохозяйственной деятельности проявляются внутренние взаимосвязи и связи с величиной водности. С речным годовым водным стоком коэффициент корреляции годовых объемов водозабора умеренной величины ($r = 0,31$) при низкой статистической значимости ($p = 0,1$). Коэффициенты корреляции суммарных сбросов, загрязненных вод и в т. ч. недостаточно очищенных выше и статистически значимее ($r = 0,44 - 0,46$; $p = 0,05$). Значения этих показателей свидетельствуют, что при увеличении объема речного стока следует небольшое увеличение водозабора (вероятно на орошение), при этом возрастают и сбросы сточных вод (дренажных).

Таблица 2. Средние многолетние (1985–2015 гг.) показатели суммарных годовых сбросов загрязненных сточных вод (без очистки и недостаточно очищенных) на водосборе Волги в сопоставлении с другими крупнейшими реками

Бассейн реки	Средний много- летний годовой сток, км ³ /год	Сбросы загряз- ненных сточных вод, км ³ /год	Отношение сбросов загрязненных сточных вод в поверхностные водные объекты к водному стоку, %
Волга	250	7,693	3,08
Северная Двина	104	0,410	0,39
Печора	114	0,030	0,03
Обь	412	2,551	0,62
Енисей	614	1,488	0,24
Лена	562	0,104	0,02

Сопоставление объемов водозабора с объемами сточных вод показывает прямую зависимость: чем больше забирается воды из поверхностных источников, тем больше поступает сточных вод разных категорий. Для суммарных сбросов, в т. ч. без очистки, недостаточно очищенных и суммарно загрязненных $r = 0,86 - 0,92$, $p = 0,001$. Для чистых стоков корреляция ослабевает: $r = 0,62$, $p = 0,01$.

Все категории сбросных загрязненных сточных вод тесно коррелируют между собой и с суммарными сбросами ($r > 0,83$, $p = 0,001$). Связь сбросов чистых стоков с суммарными сбросами на таком же уровне, но ослабевает с загрязненными и недостаточно очищенными стоками до средних величин ($r = 0,61 - 0,62$, $p = 0,01$) и до умеренного значения с водами без очистки ($r = 0,48$, $p = 0,05$).

Если обратиться к имеющимся наиболее длинным рядам показателей водозабора и водоотведения, то в многолетней их изменчивости по интервалам роста и падения можно выделить несколько периодов, обусловленных изменениями в хозяйственной деятельности страны и на речных водосборах за последние четверть века (рис. 4).

Объемы всех категорий вод за весь рассматриваемый период имеют тенденцию к сокращению, особенно быстро – величины водозаборов. У сбросов чистых стоков с 1996 по 2007 гг. общее падение прерывалось небольшим ростом. Наблюдающаяся динамика объемов сбросных вод объясняется сокращением использования поверхностных вод во всех отраслях экономики (табл. 3). Приведенные данные также показывают, что происходит и сокращение использования воды в системах оборотного и повторного (последовательного) водоснабжения. Но при этом доля таких вод по отношению к

водозабору возрастает с 2 в 1990 г. до 2,6 в 2015 г. В общем виде тенденции в многолетней динамике показателей водопользования, наметившиеся в 1990-е годы [16], сохраняют свою направленность и в XXI в.

Таблица 3. Использование пресных поверхностных вод в бассейне Волги, млн м³

Год	Всего использовано свежей воды	Производство	Хозяйственно-питьевые нужды	Орошение	В системах оборотного и повторного (последовательного) водоснабжения
1990	30 901	17 827	6894	3678	69 153
1995	24 951	12150	6850	2979	54 070
2000	21 376	11 742	6442	1612	50 927
2005	19 753	11 336	6030	1068	49 868
2008	19 525	11 850	5410	4944	52 704
2009	17 858	10 718	4944	1085	48 843
2011	15 866	8408	3999	1284	46 036
2012	17 107	9948	4193	653	46 709
2013	17 178	10 125	4065	359	46 109
2014	17 109	10 216	3966	670	44 818
2015	15 784	9147	3782	695	44 123

СБРОСЫ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ СО СТОЧНЫМИ ВОДАМИ

В перечень загрязняющих веществ, которые поступают со сточными водами и за которыми ведется мониторинг, входят БПК, взвешенные вещества, сухой остаток, нефтепродукты, фосфор общий, азот аммонийный, нитритный и нитратный, фенолы, соединения меди, железа (общего), цинка (в редкие отдельные годы). Обращает на себя внимание взаимосвязь количества сбросов загрязняющих веществ. На водосборе Волги она проявляется, по сравнению с крупнейшими северными реками, почти абсолютно. Все загрязняющие вещества тесно пропорционально связаны с показателем БПК_{полное} ($r = 0,74-0,97$, $p = 0,01$ и выше). Все показатели также тесно коррелируют, но с отрицательным знаком, с нитратами. Почти такие же тесные связи у всех параметров со взвешенными веществами (кроме азота аммонийного, у которого $r = 0,69$, $p = 0,05$) и нефтепродуктами (кроме фенолов, для которых $r = 0,69$, $p = 0,001$). У нескольких веществ корреляционные отношения на уровне средних величин. Только у фенолов с цинком умеренной величины корреляция с $r = 0,34$ за уровнем приемлемой статистической значимости. Получается, что синхронность межгодовых колебаний объемов сбросов почти всех загрязняющих веществ сочетается с их общей асинхронностью с количеством сбросов нитратов.

В многолетней динамике объемов сбросов загрязняющих веществ со сточными водами отчетливо прослеживается тенденция сокращения по всем показателям (рис. 5). Причем уменьшение сбросов загрязняющих веществ по большинству ингредиентов многократно превышает сокращение объемов сточных вод.

Получается, что очистные сооружения с каждым годом все лучше работают? Однако количество чистых сточных вод убывает также пропорционально, как и объемы загрязненных стоков, что противоречит сделанному предположению. Вероятно, происходит постепенное выбывание из эксплуатации мощностей традиционных очистных сооружений, в которых отсутствует стадия удаления нитратов в процессе денитрификации, недостаточно приспособленных для эксплуатации сравнительно небольших норм водоотведения с суточной неравномерностью (малые города, микрорайоны, сельские населенные пункты, отдельные объекты инфраструктуры). Это стало заметно проявляться при сокращении производства и количества жителей в рабочих поселках в 1990-е годы. В качестве альтернативы очистным сооружениям искусственной биологической очистки пришла технология очистки в аэротенках с прикрепленной микрофлорой на саморегенерирующейся загрузке, биофильтры, локальные очистные сооружения [17–19]. При этом увеличивалась нагрузка на остающиеся мощности очистных сооружений, т. е. повышалась их эффективность и за счет этого рос выход нитратов, сбрасываемых в поверхностные водные объекты.

Сделанное предположение подтверждается при сопоставлении сбросов загрязняющих веществ с разными категориями сточных вод. Если не принимать во внимание чистые стоки, то оказывается, что тесно связаны с категориями «суммарные стоки», «загрязненные», «без очистки» и «недостаточно очищенные» загрязняющие вещества по показателям БПК_{полное}, взвешенные вещества, нефтепродукты, фосфор общий, соединения меди, железа и фенолы ($r > 0,7$, $p = 0,01$). Немного слабее связи соединений цинка с недостаточно очищенными и загрязненными стоками ($r = 0,63–0,68$, $p = 0,01$) и еще слабее у азота аммонийного ($r = 0,60–0,66$ с категориями загрязненных стоков и $r = 0,49$ с суммарными сбросами сточных вод, $p = 0,05$ и ниже). С нитратами все категории сточных вод имеют тесную отрицательную корреляцию ($r = -0,85 \div -0,93$, $p = 0,001$). Аммоний удаляется эффективнее других компонентов, но повышается содержание в стоках нитратов.

С чистыми стоками теснота связей загрязняющих веществ уменьшается, а у аммонийного азота пропадает, но общий характер их многолетней изменчивости сохраняется. С нитратами коэффициент корреляции имеет отрицательный знак. Исходя из изложенного, можно заключить, что в целом по водосбору на очистных сооружениях очистка сточных вод происходит не в полном объеме. В сооружениях искусственной биологической очистки, которые стали массово внедряться в 1980-е годы, в выходящем стоке нитратного азота содержится в количестве, «представляющем большую опасность для открытых водоемов и подземных вод» [18]. Даже воды из категории «нормативно чистые» не до конца очищены. Отрицательные

корреляционные связи с нитратами могут быть объяснены отсутствием в таких сооружениях стадии денитрификации с удалением газообразного азота в атмосферу [17]. Следует отметить, что имеются и другие принципы очистки. Так, в биологических прудах, которые являются распространенным методом очистки сточных вод во многих странах, происходит значительное снижение содержания ионов аммония путем их окисления до нитритов и нитратов. Нитраты быстро усваиваются микроводорослями.

СВЯЗЬ КАЧЕСТВА РЕЧНЫХ ВОД В ЗАМЫКАЮЩЕМ СТВОРЕ СО СБРОСАМИ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В СТОЧНЫХ ВОДАХ НА ВОДОСБОРЕ

Вопрос о влиянии загрязнений, поступающих в гидрографическую сеть Волжского бассейна, на качество речных вод в дельте Волги до конца не ясен. С одной стороны, в научной литературе неоднократно указывалось, что влияние собирающихся выше по реке загрязнений очень велико, количество загрязняющих веществ в транзитном речном стоке многократно превышает их ниже Волгоградского водохранилища. В 1980-е годы доля загрязняющих веществ сточных вод Астраханской области составляла для нефтепродуктов 0,01 %, для фенолов – 3 %, меди – 0,1 %, органических и взвешенных веществ – 0,3 и 0,1 % соответственно [20]. В первой половине 1990-х годов доля транзитных загрязняющих веществ несколько уменьшилась, но оставалась подавляющей [21]. Это признается существенным фактором загрязнения воды и донных отложений северной части Каспийского моря [6], а нефтепродуктами и Среднего Каспия [7, 13, 20]. Противники этого утверждения ссылаются на международные документы, касающиеся регламентации экологической деятельности в регионе Каспийского моря, в которых факт загрязнения Каспийского моря волжскими водами никак не фигурирует, например, [22]. При этом остаются незамеченными документы с противоположными выводами [23].

Для установления связи изменчивости какого-либо гидрохимического параметра в речных водах со сбросами загрязняющих веществ на водосборе предлагается обязательное выполнение четырех условий. Первое – наличие достаточно надежной корреляционной связи концентрации параметра с величинами сбросов загрязняющего вещества. Второе – наличие корреляционной связи концентрации этого параметра с какой-либо категорией сточных вод. Третье – корреляционная связь количества загрязняющего вещества с категорией сточных вод, связанной в свою очередь с гидрохимическим параметром. Четвертым общим условием является высокая достоверность аппроксимаций многолетних тенденций всех трех соотношений. В качестве критериев надежности связей логично использовать стандартные статистические характеристики – величины коэффициента корреля-

ции и их статистическую достоверность, а также величину достоверности аппроксимации. Для статистических характеристик оценочные величины часто применяются, они имеют стандартные величины. Величина достоверности аппроксимации не имеет обоснованных и общепринятых градаций, поэтому может выбираться каждым исследователем самостоятельно в довольно широких диапазонах.

В данной работе связь каждой пары оценивалась величиной трех параметров. Коэффициент корреляции более 0,70 соответствовал сильной связи, от 0,50 до 0,69 – средней. Уровень значимости считался высоким при значениях 0,02 и выше, низким – при значениях 0,05 и 0,1. Величина достоверности аппроксимации тренда хорошей при значении 0,7 и более, допустимой – не ниже 0,4. При этом функция для отсутствия неоднозначности должна быть монотонно возрастающей/убывающей. В ряде случаев наличие пределов функций ограничивало достоверности зависимостей соответствующими интервалами. Комбинациями параметров принимались четыре градации: связь отсутствует; слабо проявляемая связь; связь умеренная; связь хорошо проявляемая. Отсутствие связи принимается, если какой-либо параметр на какой-нибудь стадии не достигает существенной величины, а также в случаях, когда соотношение параметров по знаку коэффициента корреляции противоположно описываемому тенденцией многолетней изменчивости. Слабо проявляемая связь считается в случае, если большинство параметров находятся на низком уровне. Связь умеренная, если большинство параметров попадают на высокий уровень. Связь хорошо проявляемая, если на всех стадиях параметры находятся на высшем уровне. По соотношению параметров (преобладанию) можно выделять промежуточные категории. Применение описанного подхода позволяет говорить о наличии определенного влияния сбросов загрязняющих веществ на водосборе на концентрации нефтепродуктов, фенолов и меди (табл. 4).

Результаты промежуточных расчетов в статье не приведены, но необходимо сделать важное замечание: высокие величины коэффициентов корреляции временных рядов между величиной гидрохимического параметра в створе реки и объемами сбросов загрязняющих веществ не означают, что с другими параметрами связи сохраняются. Например, максимальные концентрации нитритного азота тесно связаны со многими загрязняющими веществами, но слабо со сточными водами без очистки, с другими категориями сточных вод связь отсутствует.

Особо хотелось бы прокомментировать связи с фенолами. Среднегодовое содержание фенолов, с одной стороны, зависит от сбросов загрязняющих веществ по параметру «сухой остаток» (о чем должна свидетельствовать высокая величина коэффициента корреляции 0,716 и достоверности

Таблица 4. Проявляющиеся связи величин гидрохимических параметров в замыкающем створе Волги Верхнее Лебяжье со сбросами загрязняющих веществ в сточных водах разной категории

Параметр	Загрязняющее вещество	Категория сточных вод	Градация связи. Комментарий
Нефтепродукты, концентрация среднегодовая	Аммонийный азот	Без очистки	Слабая. Выражена в интервале концентраций нефтепродуктов до 5 мг/л, при более высоких концентрациях зависит от других факторов
	Нитрат	Без очистки Недостаточно очищенные Сумма всех категорий Загрязненные	Хорошая/умеренная отрицательная
Фенолы, концентрация среднегодовая	Сухой остаток	Недостаточно очищенные Сумма всех категорий	Весьма слабая. Проявляется при концентрации фенолов до 5 мг/л
Фенолы, концентрация максимальная	Сухой остаток	Недостаточно очищенные Сумма всех категорий	Умеренная/хорошая. Проявляется при концентрациях фенолов до 13–16 мг/л
Медь, концентрация среднегодовая	Аммонийный азот	Недостаточно очищенные Сумма всех категорий	Весьма слабая. Проявляется до 10–11 мг/л. При более высоких концентрациях зависит преимущественно от других факторов

аппроксимации – 0,513). Однако низкие величины достоверностей аппроксимации гидрохимического параметра со всеми категориями сточных вод (0,186–0,297) противоречат гипотезе о возможности влияния на среднегодовое содержание фенолов загрязняющих веществ по «сухому остатку», поступающих со сточными водами. Более четкая аппроксимация получена при низких концентрациях фенолов в речных водах, что отмечено в табл. 4. С другой стороны, если брать максимальные концентрации фенолов, то показатели связей концентраций в речных водах с загрязняющими веществами по «сухому остатку» выдерживаются в заданных интервалах. Выходят за границы интервалов показатели связей «сухого остатка» со сточными водами без очистки ($r = 0,475$ за пределами статистической значимости).

Но при этом указанные показатели высоки для вод недостаточно очищенных и для категории «загрязненные» ($r = 0,874$ и $0,832$, $p = 0,001$ и $0,01$ соответственно). Наличие проявляемых связей максимальных концентраций фенолов со сбросами всех категорий сточных вод по загрязняющим веществам «сухой остаток» свидетельствует, что, вероятнее всего, должно быть влияние и на среднее годовое содержание фенолов. Пусть это влияние не подтверждается всеми статистическими характеристиками из-за низких значений величин достоверности аппроксимаций, но сам характер предпочтений в описании связи степенными функциями говорит о возможном влиянии на ограниченном интервале, т. е. в пределах концентраций в 5 мг/л, когда речные воды еще относительно «чистые».

Величины показателей связи средних годовых концентраций меди и фенолов ограничивает, по всей видимости, их отмеченная связь с водностью [14]. Обращает внимание отрицательная связь средней концентрации нефтепродуктов с нитратами, поступающими со сточными водами. Выше отмечалась их отрицательная связь со всеми другими загрязняющими веществами и загрязненными стоками. Таким образом, нитраты служат своеобразным маркером степени очистки сточных вод, пока на водосборе функционируют водоочистные сооружения старого образца без стадий аэрации, денитрификации и удаления нитратов. Если в многолетнем плане сбросы загрязненных сточных вод сокращались, то сбросы нитратов возрастали до середины 2000-х годов. Этот антропогенный фактор хорошо проявляется в целом по водосбору Волги и влияет на динамику выноса минерального азота в створе Верхнее Лебяжье.

ВЫВОДЫ

В годовом водном стоке Волги по створу Верхнее Лебяжье выявлена смена в 1995 г. тенденции роста на падение. Исследованный в работе период в целом (с 1985 по 2015 гг.) можно характеризовать периодом повышенной водности, нисходящий тренд в котором пересек в 2011 г. среднее многолетнее значение (по данным ГГИ в 227 км³).

У гидрохимических характеристик речной воды с годовым водным стоком установлены умеренной силы корреляционные связи среднегодовой и максимальной концентраций азота нитритного, максимальной концентрации железа. Тенденция сокращения водного стока сопровождалась до 2005–2006 гг. в разной степени выраженности уменьшением концентраций гидрохимических характеристик, за исключением средних концентраций железа (слабый рост и стабильность), максимальных концентраций железа и показателей БПК₅, которые можно характеризовать относительно стабильными. Полученные результаты не противоречат литературным данным о слабом влиянии водности на содержание некоторых гидрохими-

ческих веществ в водах Волги. При этом на разных временных интервалах перечень параметров может меняться.

В многолетней изменчивости выноса веществ через замыкающий створ выявлено три типа тенденций, обусловленных природными и антропогенными факторами. Сток нефтепродуктов, фенолов, соединений меди и цинка сокращается в течение всего исследуемого периода. В изменчивости выноса органического вещества, фосфора и железа до 2005–2007 гг. отмечен рост, затем уменьшение. Многолетняя тенденция изменчивости стока кремния имеет зеркальное отражение хода годового водного стока. В изменчивости выноса первой группы веществ, а также кремния, прослеживается влияние природного фактора – колебания водного стока.

Анализ статистических данных по водозабору, сбросу сточных вод и загрязняющих веществ показал, что Волга, по сравнению с другими крупнейшими реками России, наиболее подвержена антропогенному прессу. Чем больше забирается воды из поверхностных источников, тем больше поступает сточных вод разных категорий, их объемы тесно коррелируют между собой. При этом, как и по другим рекам, происходит снижение величин показателей водохозяйственной деятельности. Однако это почти не отражается на гидрохимических характеристиках в устьевой зоне, а качество воды по УИКЗВ стабильно держится в створе Верхнее Лебяжье в разряде 3б «очень загрязненная», переходя ниже г. Астрахани в категорию 4а «грязная».

Сопоставление объемов сброса сточных вод, загрязняющих веществ и гидрохимических показателей в устьевой зоне позволило установить, что на концентрацию фенолов влияют сбросы загрязняющих веществ по сухому остатку с недостаточно очищенными стоками, на среднегодовые концентрации нефтепродуктов и меди – сбросы аммонийного азота. Рост поступления нитратов с загрязняющими веществами в 1990-е годы происходил из-за отсутствия у большинства очистных сооружений стадии удаления их в атмосферу.

В целом водохозяйственная деятельность на водосборе Волги, особенно сброс загрязняющих веществ со сточными водами, остается существенным фактором в формировании качества воды в устьевой зоне реки. По некоторым параметрам это подтверждается выявленными статистически значимыми корреляционными связями и соответствующими тенденциями многолетней изменчивости. Намеченные в приоритетном проекте «Сохранение и предотвращение загрязнения реки Волги» («Оздоровление Волги») мероприятия по модернизации и строительству очистных сооружений весьма актуальны. Очевидно, что проводимые научными организациями исследования по оценке роли диффузного загрязнения не должны ограничиваться только биогенными веществами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зайцева И.С. Некоторые региональные особенности использования водных ресурсов в современной России // Известия РАН. Сер. Геогр., 2001. № 5. С. 17–27.
2. Дёмин А.П. Изменение водоемкости экономики в бассейне р. Волги // Водные ресурсы Волги: настоящее и будущее, проблемы управления. Сб. статей Всеросс. научно-практ. конф. 3–5 октября 2007 г. Астрахань, 2008. С. 101–116.
3. Коронкевич Н.И., Долгов С.В. Сток с водосбора как источник диффузного загрязнения рек // Вода и экология: проблемы и решения. 2017. № 4. С. 92–99.
4. Тарасов А.Г. Биологические последствия загрязнения бассейна Каспийского моря (до 1917 г.) // Водные ресурсы. 1996. Т. 23. № 4. С. 448–456.
5. Волжский бассейн. Устойчивое развитие: опыт, проблемы, перспективы / под ред. Г.С. Розенберга. М.: Институт устойчивого развития Общественной палаты РФ / Центр экологической политики России, 2011. 104 с.
6. Проблемы качества вод Нижней Волги и Северного Каспия / отв. ред. В.Ф. Бреховских, Е.В. Островская. М.: Россельхозакадемия, 2013. 300 с.
7. Леонов А.В., Чичерина О.В., Семеняк Л.В. Математическое моделирование процессов загрязнения морской среды нефтяными углеводородами и их деградации в экосистеме Каспийского моря // Водные ресурсы. 2011. Т. 38. № 6. С. 707–732.
8. Шапоренко С.И. Современные тенденции изменения качества воды в реке Волге по гидрохимическим показателям // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов: Тр. всеросс. науч. конф. с межд. участием, Москва, 15–18 сентября 2015 г. М.: ИВП РАН, 2015. С. 209–211.
9. Водные ресурсы и водное хозяйство в 2015 году / под ред.: Н.Г. Рыбальского, А.Д. Думнова. М.: НИА-Природа, 2016. 267 с.
10. Водный кадастр Российской Федерации. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество. 2015 год. СПб.: ООО «Эс Пэ Ха», 2016. 164 с.
11. Качество поверхностных вод Российской Федерации. 2016. Ростов-на-Дону, 2017. 556 с.
12. Дёмин А.П., Исмаилов Г.Х. Водопотребление и водоотведение в бассейне Волги // Водные ресурсы. 2003. Т. 30. № 3. С. 366–380.
13. Устьевая область Волги: гидролого-морфологические процессы, режим загрязняющих веществ и влияние колебаний уровня Каспийского моря. М.: ГЕОС, 1998. 280 с.
14. Бреховских В.Ф., Волкова З.В., Островская Е.В. О связи речного стока и гидрохимических показателей на Нижней Волге // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов: Тр. всеросс. науч. конф. с межд. участием, Москва, 15–18 сентября 2015 г. М.: ИВП РАН, 2015. С. 143–145.
15. Максимова М.П. Критерии антропогенного евтрофирования речного стока и расчет антропогенной составляющей биогенного стока рек // Водные ресурсы. 1979. № 1. С. 35–40.
16. Вода России. Речные бассейны / под науч. ред. А.М. Черняева. Екатеринбург: Изд-во «АКВА-ПРЕСС», 2000. 536 с.

17. Воронов, Ю.В., Яковлев С.В. Водоотведение и очистка сточных вод. М.: АСВ, 2006. 704 с.
18. Субботина Ю.М. Методы биологической очистки сточных вод // Ученые записки Российского государственного социального университета. 2011. № 6. С. 385–389.
19. Букалова Н.П., Тихонова Н.А. Современный подход к решению вопроса очистки сточных вод // Научное обозрение. Техн. науки, 2014. № 1. С. 86–87.
20. Кирьянов С.В., Афанасьева Н.А. Влияние стока Волги на состояние загрязнения Северного Каспия // Метеорология и гидрология, 1992. № 6. С. 114–117.
21. Чуйков Ю.С., Бухарицын П.И., Киселева А.А., Фильчаков В.А., Сапрыкин В.Н., Лабунская Е.Н. Гидролого-гидробиологический режим Нижней Волги // Экология Астраханской области. Астрахань, 1996. Вып. 4. 256 с.
22. Стратегический план действий по Каспийскому морю. Каспийская экологическая программа. Баку, 2002. 96 с.
23. Сводный отчет по проекту № RER03G31 (00034997) «Изучение и обзор для определения течения основных загрязняющих веществ из Волжского каскада». М., 2006. 119 с.

Сведения об авторе:

Шапоренко Сергей Иванович, канд. геогр. наук, старший научный сотрудник, ФГБУН «Институт географии Российской академии наук» (ИГРАН), Россия, 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 29; e-mail: ser-shaporenko@yandex.ru