

СОВРЕМЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ДИНАМИКА БАЛАНСА БИОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В БАССЕЙНЕ РЕКИ КУДЬМЫ 1. ГОДОВОЙ БАЛАНС БИОГЕНОВ¹

© 2020 г. С. В. Долгов^{a, *}, Н. И. Коронкевич^{a, **}

^aИнститут географии РАН, Москва, 119017 Россия

*e-mail: svdolgov1978@yandex.ru

**e-mail: hydro-igras@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.06.2019 г.

После доработки 24.08.2019 г.

Принята к публикации 10.10.2019 г.

Определены основные составляющие годового воднобиогенного баланса бассейна р. Кудьмы с характерной для южной части лесной зоны ландшафтной структурой. Оценен вклад природных и антропогенных факторов в поступление биогенов в бассейн р. Кудьмы и их вынос с водосборной площади. Установлено, что к числу наиболее важных природных факторов поступления биогенов на водосбор р. Кудьмы относится опад лесной растительности, а антропогенных — отходы животноводства. Дана оценка выносу биогенов с речным стоком, с поверхностной и подземной его составляющими. Установлено, что за счет изменившихся гидроклиматических условий, приведших к уменьшению поверхностной составляющей стока и значительному увеличению подземной составляющей, вынос с водосборной площади азота и фосфора за последние годы существенно вырос.

Ключевые слова: годовой баланс и вынос азота и фосфора, поверхностный и подземный сток, изменения.

DOI: 10.31857/S0321059620020030

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на наметившуюся в последние годы тенденцию уменьшения антропогенной нагрузки, в том числе в отношении сброса сточных вод и в их составе загрязняющих веществ, заметного улучшения качества воды в Волге и ее водохранилищах не происходит. Остается, в частности, высоким содержание в речной воде биогенов — соединений азота и фосфора, способствующих эвтрофированию и другим негативным процессам. Вклад различных факторов в качественное состояние водных ресурсов остается в значительной мере неизвестным. В то же время без достаточно детальных знаний о генезисе негативной гидроэкологической ситуации, сложившейся в том числе вследствие неконтролируемого диффузного (рассредоточенного по территории) выноса биогенных веществ с речных водосборов, весьма проблематичной представляется разработка эффективных водоохранных мер. Выявление природных и антропогенных источников и путей

диффузного выноса биогенов, в частности в Чебоксарское водохранилище, относится к числу основных задач, решаемых в ходе работ Института географии (ИГ) РАН по проекту “Оздоровление Волги” при общем руководстве Института водных проблем РАН.

Оценке выноса биогенов в водные объекты с их водосборов посвящено довольно много публикаций, однако рассмотрена главным образом фаза весеннего половодья, когда речной сток формируется преимущественно за счет поверхностного стока талых вод [8, 16–20]. За исключением весеннего поверхностного склонового стока, пути миграции с водосборов биогенов с другими составляющими водного стока, в том числе с подземным стоком, обычно не анализируются при предположении априори, что вклад их незначителен.

Однако в структуре весеннего водного баланса речных водосборов, в том числе на пашне в бассейне Волги, за последние десятилетия произошли весьма существенные изменения [2] — значительно увеличилась инфильтрация осадков в почву, а величина поверхностного склонового стока уменьшилась, соответственно снизилась и его роль в миграции биогенов. В то же время роль

¹ Статья подготовлена по материалам исследований по проектам ГЗ № 0148-2019-0007 (разработка методики и расчеты) и № 0148-2018-0037 (полевые исследования, исходные данные), РФФИ № 18-05-00479 (анализ полученных результатов).

подземного стока в поступлении биогенов в водные объекты существенно возросла. Об этом свидетельствует значительное увеличение подземной составляющей речного стока во многих районах бассейна Волги, а также установленное в результате экспедиционных исследований ИГ РАН обычно более высокое содержание биогенов в дренируемых гидрографической сетью грунтовых водах по сравнению с речными водами [7].

В изменившихся за последние десятилетия климатических условиях акцентирование внимания лишь на периоде весеннего половодья может приводить к существенному недоучету выноса биогенов в водные объекты с их водосборов. В наибольшей степени оказывается неучтенным вынос биогенов с подземной составляющей стока, преобладающий в продолжительный маловодный период (~10 мес. в году) и во многом определяющий состояние речных экосистем. Не учитываемая часть выноса с поверхностной составляющей стока в остальные сезоны также может составлять существенную величину.

Остаются недостаточно ясными не только пути миграции биогенных веществ в водные объекты, но и вклад различных природных и антропогенных факторов в суммарное их поступление на водосборную площадь и вынос в гидрографическую сеть, а также произошедшие за последние годы его изменения. В этой связи представляется целесообразным рассмотреть перечисленные вопросы на генетической основе — путем анализа воднобиогенного баланса бассейна р. Кудьмы с ландшафтной структурой, типичной для южной части лесной зоны.

Цель выполненного исследования заключается в оценке воднобиогенного баланса речных бассейнов, занятых смешанными и широколиственными лесами Русской равнины (на примере бассейна Кудьмы), и наиболее важной в гидроэкологическом отношении расходной составляющей — выноса биогенов в речную сеть, а также в выявлении современных тенденций в его динамике.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Кудьма — правый приток Чебоксарского водохранилища, протекает по территории Нижегородской области через Богородский (35.2% от площади водосбора), Дальнеконстантиновский (34.4%), Кстовский (21.1%) и другие районы. Устье расположено близ с. Кадницы. Длина реки — 157 км, площадь водосбора — 3246 км².

На водосборной площади Кудьмы наиболее распространены серые лесные почвы. Территория с лесной растительностью (смешанные и широколиственные леса) занимает 42.6%, сельскохозяйственные угодья — 56.2% (в том числе залив-

ные луга — 7.1%). На долю болот и других водных объектов приходится 1%, населенных пунктов — 0.22%. Характерная особенность пород зоны аэрации в верхней части водосбора — закарстованность. Так, в створе у д. Новой она составляет 46% площади водосбора (1700 км²). Значительная часть атмосферных осадков расходуется на пополнение глубоких подземных вод, не дренируемых рекой в этом створе. В результате речной сток с водосборной площади здесь в 2 раза меньше зональной величины.

Изменения стока биогенных веществ во времени тесным образом связаны с изменениями водного стока. За период наблюдений 1944—1975 гг. годовой сток Кудьмы в створе д. Новой составлял в среднем 3.6 л/с км², в том числе поверхностная составляющая, включая динамичный сток верховодки, — 2.16 л/с км² (60%) и подземная — 1.44 л/с км² (40%). Поверхностной составляющей свойственна более высокая многолетняя изменчивость, коэффициент вариации $C_v = 0.53$. Гораздо меньше C_v многолетних колебаний подземного стока, формирующегося не только осадками текущего года, но и осадками за предшествующие годы (преимущественно от 2 до 5 лет [4]) — 0.19. В годы экстремально высокой водности (5%-й обеспеченности) величина суммарного стока возрастает по отношению к норме до 5.20 л/с км², поверхностной и подземной составляющих — соответственно до 3.64 и 1.56 л/с км². В экстремально маловодные годы (95%-й обеспеченности) полный сток снижается до 2.0 л/с км², поверхностная и подземная составляющие уменьшаются соответственно до 0.78 и 1.22 л/с км².

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ИСХОДНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Методологической основой выполненного исследования является ландшафтно-гидрологический метод, дополненный представлением о гидрологической ярусности речного бассейна [5]. В качестве инструмента изучения гидрохимического функционирования элементов его вертикальной стратификации (растительности, поверхностного слоя почвы, зон аэрации и насыщения) используется воднобиогенный баланс, тесно связанный с водным балансом [5, 6].

До настоящего времени непосредственные наблюдения за элементами воднобиогенного баланса, в том числе выносом биогенов (как и других химических веществ) с речных водосборов в бассейне Чебоксарского водохранилища с поверхностным и подземным стоком, а также со стоком верховодки не проводились. Поэтому приходится прибегать к косвенным методам оценки — по опубликованным данным о составляющих баланса биогенов [1, 11, 13, 14, 16], а так-

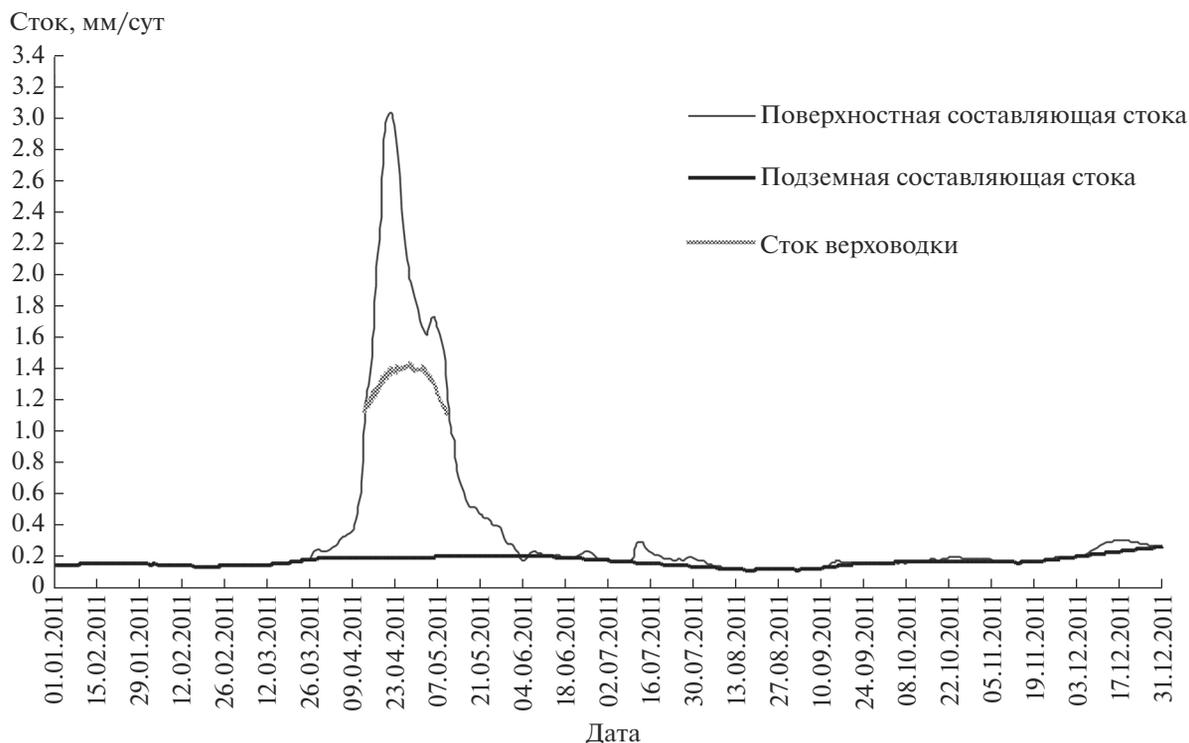


Рис. 1. Гидрограф стока р. Кудьмы у г. Кстово за 2011 г.

же по данным о водном стоке и его химическом составе в замыкающем створе. Недостающая информация восполнена результатами химического анализа проб воды и атмосферных осадков, отобранных в 2018 г. в ходе экспедиционных работ ИГ РАН.

В качестве исходной информации использовались многолетние ряды наблюдений за водным стоком Кудьмы у д. Новой (площадь водосбора 1700 км²) за 1944–1975 гг. и в створе г. Кстово (площадь водосбора 1750 км²), куда был перенесен наблюдательный створ в 1976 г. Анализировались как полный речной сток, так и поверхностная и подземная его составляющие. Подземный сток рассчитан путем расчленения гидрографов речного стока по видам питания (рис. 1). Поверхностная составляющая стока (включающая сток верховодки) определена по разности полного речного стока и подземного стока.

Поскольку, несмотря на закарстованность водосбора, коэффициент подземного питания Кудьмы (по состоянию на 1975 г., в створе д. Новой) — 40% от полного стока, практически такой же, как у ближайшей с зональным стоком р. Линды (39%), то сток верховодки рассчитывался по зональной средней многолетней структуре стока половодья, установленной в работе [6]. Приведенные в этой работе зависимости позволяют определить среднюю величину стока верховодки

для периода половодья в целом. Вследствие отсутствия экспериментальных данных оценка изменений стока в период половодья остается нерешенной, и приведенный на рис. 1 ход стока верховодки носит предположительный характер.

Для оценки изменений в стоке биогенов за 2008–2018 гг. привлекались многолетние данные наблюдений Росгидромета за водным стоком Кудьмы в створе г. Кстово. Другой массив исходной информации включает данные Росгидромета по содержанию биогенов в Кудьме в створе д. Новой по состоянию на 1975 г., а также гидрохимические данные за последние годы на приустьевом участке, использованные в работах ИГ РАН по проекту “Оздоровление Волги”.

Анализ исходной информации показал, что, в отличие от минерализации воды (рис. 2а), в Кудьме зависимости содержания в ней азота нитратов и нитритов от расхода воды практически не наблюдается (рис. 2б).

Более определенной становится зависимость при учете не только нитратов и нитритов, но и аммонийного азота, данные по которому за 1950–1960-е гг. в гидрологических ежегодниках не приведены. По результатам наблюдений в 2008–2018 гг., концентрация биогенных веществ в Кудьме при переходе от зимней межени к периоду весеннего половодья существенно снижается. Однако также отмечается существенный разброс

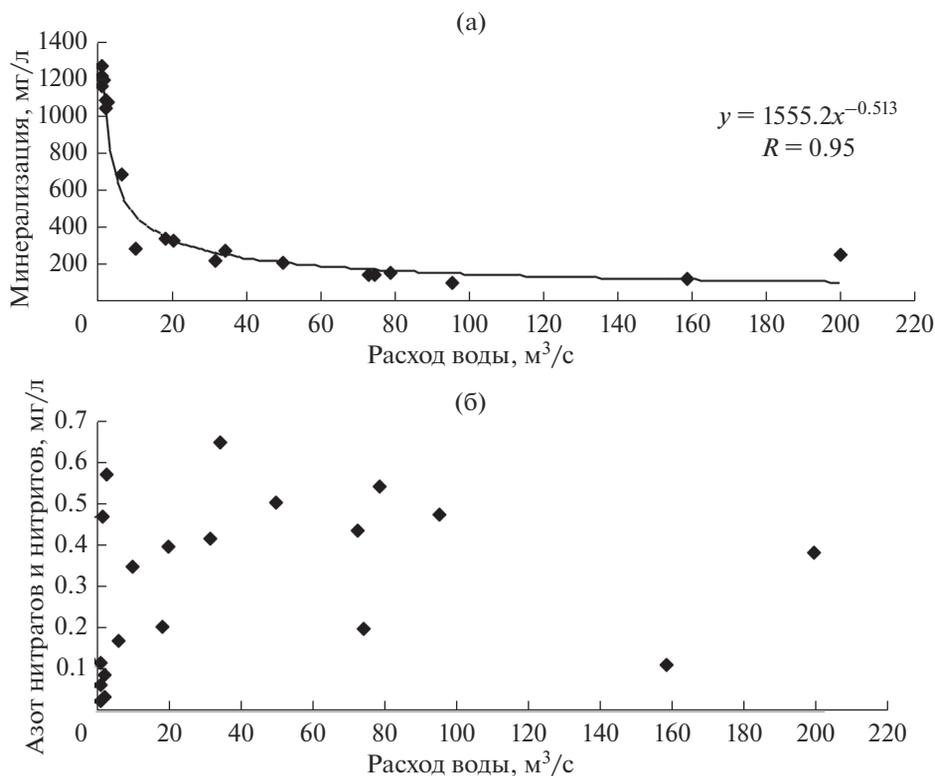


Рис. 2. Связь минерализации (а) и концентрации азота нитратов и нитритов (б) в р. Кудьме у д. Новой с расходом воды за холодный период года, включая весеннее половодье (1958–1962 гг.).

эмпирических точек на графике зависимости концентрации азота и фосфора от расхода воды (рис. 3а, 3б). Помимо ошибок химических определений, он обусловлен генетической неоднородностью речного стока – меняющимся от года к году соотношением долей основных его составляющих, прежде всего поверхностного и подземного стока. В расчетах биогенного стока Кудьмы роль этих составляющих оценивалась в данной работе относительно как величины их водного стока, так и содержания в них биогенов.

Поскольку наблюдения за содержанием биогенов непосредственно в поверхностной составляющей стока не проводятся, оно определялось по уравнению:

$$C_{\text{пов ст}} = (C_{\text{реч ст}} H_{\text{реч ст}} - C_{\text{подз ст}} H_{\text{подз ст}}) / H_{\text{пов ст}},$$

в котором $C_{\text{пов ст}}$ – концентрация азота (фосфора) в поверхностной составляющей стока $H_{\text{пов ст}}$, $C_{\text{подз ст}}$ – концентрация азота (фосфора) в подземной составляющей $H_{\text{подз ст}}$, $C_{\text{реч ст}}$ – концентрация азота (фосфора) в полном речном стоке $H_{\text{реч ст}}$. При этом концентрация биогенов в подземном стоке принята постоянной, независимо от сезона года.

В связи с тем, что до 1975 г. наблюдения за концентрацией аммонийного азота и фосфатов не проводились, для оценки изменений выноса био-

генов их содержание принято одинаковым для всего периода инструментальных наблюдений и соответствующим содержанию в течение анализируемого периода (2008–2018 гг.).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 приведены результаты ориентировочной оценки современного годового воднобиогенного баланса, сложившегося в последнее десятилетие в бассейне Кудьмы. Расчеты показали, что приходная часть баланса (поступление) значительно превышает расходную часть (вынос) – в 6–6.5 раз. Привнесенные в течение года биогены извне и местного происхождения в основном остаются в пределах границ речного водосбора.

Поступление биогенных веществ на водосбор р. Кудьмы

Поступление биогенных веществ на водосбор Кудьмы обусловлено как природными факторами, так и антропогенными. В последние годы природное поступление биогенов остается весьма существенным – по азоту оно почти в 3 раза превышает антропогенное, а по фосфору – в 1.1 раза.

В табл. 1 приведены данные Е.А. Кашутиной об основных видах антропогенной биогенной на-

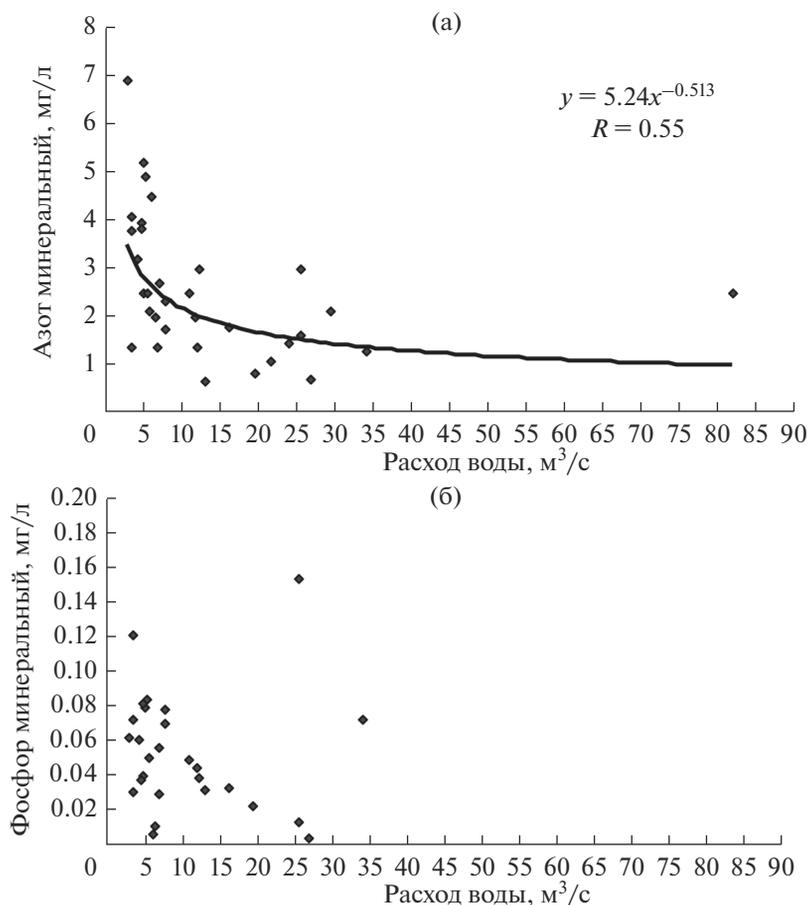


Рис. 3. Зависимость концентрации минерального азота (а) и фосфора (б) от расхода воды р. Кудьмы у г. Кстово за холодный период года, включая весеннее половодье.

грузки, отнесенной к единице площади всего водосбора Кудьмы (3246 км²). К антропогенной нагрузке отнесено также поступление биогенных веществ с органическими удобрениями (солома, навоз, пожнивные остатки, стерня, сидераты и т.д.) на посевной площади Нижегородской области [11], составляющей в последние годы ~15% ее территории.

Конечно, в реальных условиях равномерного распределения антропогенной нагрузки по всей водосборной площади не наблюдается, в том числе от внесения минеральных удобрений. Однако все виды антропогенной нагрузки интегрируются поверхностным и подземным стоком со всей водосборной площади и в совокупности отражаются на содержании биогенов в речном стоке.

В табл. 1 приведено поступление биогенных веществ с атмосферными осадками. Поступление минерального фосфора оценено по его средней концентрации в осадках – 0.030 мг/л (величина взята из [15]), что близко к результатам настоящего исследования, полученным при экспедицион-

ном обследовании снежного покрова в марте 2018 г. в бассейне Кудьмы – 0.041 мг/л.

Из результатов расчетов следует, что современная суммарная антропогенная биогенная нагрузка на бассейн Кудьмы особенно высока по фосфору, превышающая в 16 раз климатический фон, обусловленный поступлением на дневную поверхность фосфора с выпадающими осадками. Менее существенно превышение по азоту – 3.4 раза.

К наиболее существенным источникам антропогенного поступления биогенов на водосборную площадь Кудьмы относится сельское хозяйство – животноводство и внесение минеральных удобрений. Суммарное поступление от сельского хозяйства составляет 84% по азоту и 92% по фосфору. Причем, биогенная нагрузка от животноводства по величине практически такая же, как от растениеводства, а по фосфору даже больше – в 2 раза.

Во многом такая ситуация обусловлена сокращением посевных площадей (по сравнению с 1990 г. на 44%) и низким уровнем применения

Таблица 1. Составляющие годового биогенного баланса бассейна Кудьмы (гор. – городское, сел. – сельское, нас. – население, мин. – минеральные, орг. – органические, уд. – удобрения, раст. – растительный, атм. ос. – атмосферные осадки, посев. – посевных, заболоч. – заболоченных, пастб. – пастбища; $N_{\text{мин}}$, $P_{\text{мин}}$ – минеральные азот и фосфор соответственно)

Биогены	Поступление													Вынос			
	антропогенное						природное							с урожаем*	Кудьма – Кстово	р. Кудьма – устье	
	гор. нас.	сел. нас.	животноводство	мин. уд.	орг. уд.*	сумма	атм. ос.	с дождями из крон деревьев**	лесной раст. опад***	биофиксация на посев. землях*	опад на заболоч. землях****	опад на лугах, пастб. с/х землях****	сумма			с учетом сточных вод	без учета сточных вод
	кг/км ² (со всей площади водосбора р. Кудьмы)																
$N_{\text{мин}}$	102	50	401	367	48	968	284	213	1785	70	19	447	2818	485	298	170	148
$P_{\text{мин}}$	17	8	196	80	13	314	20	13	268	–	1	49	351	93	7.66	10.3	9.8

* [11].
 ** [13].
 *** [16].
 **** [14].

удобрений, составляющим в последние годы в Нижегородской области по азоту лишь 41% от его максимальной величины в 1990 г., еще меньше по фосфору – 25% [1, 9]. Весьма значительно снизилось также использование органических удобрений. Так, в 2017 г. оно составило 48% от уровня 1990 г.

В итоге сформировался отрицательный баланс содержания азота и фосфора на пашне, поскольку ежегодный их вынос с урожаем сельскохозяйственных культур в 2000-е гг. оказался некомпенсированным внесением удобрений [1]. Вместе с тем значительное сокращение применения удобрений и поголовья скота, уменьшение содержания азота и фосфора в почве пахотных угодий не привело к снижению выноса биогенов с водосбора Кудьмы; напротив, оно, как будет показано ниже, даже выросло. Произошло это в основном за счет изменившихся гидроклиматических условий, особенно – увеличения стока инфильтрационного происхождения (подземного и верховодки). Отсюда следует, что применение минеральных удобрений в последние годы не может рассматриваться в качестве существенной причины биогенного загрязнения местных водных ресурсов (за исключением локальных участков речной сети).

С учетом мер, направленных на сохранение и восстановление плодородия почв [11], скорее всего, баланс азота и фосфора на пашне в последние

годы улучшился. Но даже если на пашне он остается отрицательным, то для всей водосборной площади Кудьмы он все-таки положительный (табл. 1), поскольку пашней занято лишь ~26% этой площади. Причем, баланс становится положительным при учете поступления на водосбор биогенов с одними лишь осадками или в результате антропогенной нагрузки.

Из числа всех учтенных авторами антропогенных и природных факторов поступления биогенов на водосбор Кудьмы (табл. 1) наиболее важен опад лесной растительности (в то время как современная биогенная нагрузка со стороны растениеводства практически полностью компенсируется выносом азота и фосфора с урожаем). Средневзвешенная величина одного лишь листового опада, рассчитанная по данным [16] с учетом структуры лесов, более чем в 10 раз превышает вынос азота в Чебоксарское водохранилище, а фосфора – в 25 раз.

Весьма высокая величина полного опада (ежегодно отмирающие части растений – хвоя, листья, цветки, плоды, мелкие ветки, отмершие корни и т.п.) присуща широколиственным лесам – в среднем 270 ц/га (рис. 4). В ельниках и сосняках она снижается в 6–7 раз. Примерно в таком же соотношении уменьшается и поступление биогенов с опадом. Его величина зависит также от возраста древостоя. В еловых и сосновых лесах наибольшее поступление биогенных веществ с опа-

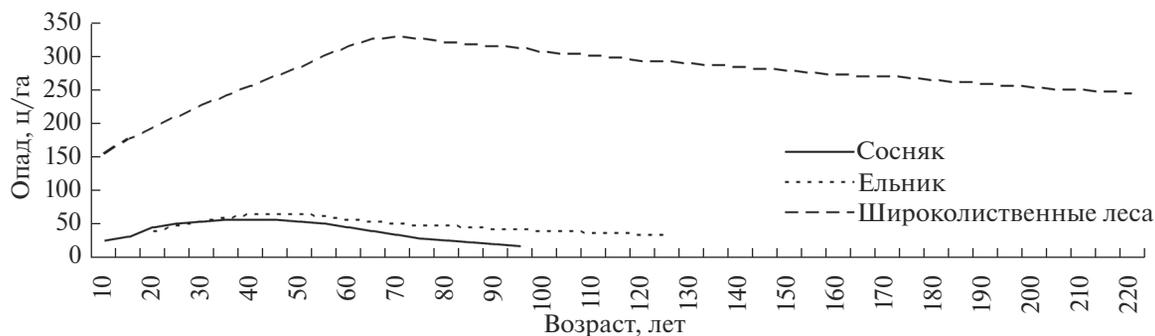


Рис. 4. Полный лесной опад в южной тайге и широколиственных лесах в ЕЧР [13].

дом наблюдается в возрасте 40–50 лет, а в широколиственных в 60–80 лет. В регулировании возраста и состава пород древостоя заключается один из путей снижения биогенной нагрузки на местные водные ресурсы и Чебоксарское водохранилище.

В отличие от посевной площади, в последние годы в лесных ландшафтах обмен биогенами между растительностью и почвой существенно не сбалансирован. Например, по данным [13], в Мордовском заповеднике в полном опаде сосняка в возрасте 71 год азота содержалось в среднем ~2570 кг/км². С суммарным годовым приростом потреблено азота 2500 кг/км². При этом на истинный прирост органических веществ (годовой прирост за вычетом полного опада) израсходовано лишь 1000 кг/км². Отсюда следует, что одного лишь опада может быть достаточно для синтеза органических веществ в лесу. Но при этом остаются неизрасходованными значительные запасы азота в лесной подстилке и почве. Вследствие незамкнутости обмена веществ в системе лес–почва эти запасы служат источником поступления азота в грунтовые воды и его выноса с подземным стоком в речную сеть и далее в Чебоксарское водохранилище.

Вынос биогенов с водосбора р. Кудьмы и его изменения за последние годы

Расчет годового выноса биогенов (в сумме за период весеннего половодья и маловодный период года) позволил наиболее полно учесть вклад поверхностной и подземной составляющих стока в этот процесс. Величина перечисленных составляющих стока в маловодный период летне-осенней и зимней межени весьма существенна (по состоянию на 1975 г., в среднем соответственно 25 и 61% среднегодового их значения).

За период исчисления нормы — 1944–1975 гг. годовой речной сток составлял в среднем 114 мм, его поверхностная составляющая — 68.4 мм (60% полного стока), подземный сток — 45.6 мм (40%).

За 2008–2018 гг. сток Кудьмы увеличился до 135 мм (на 18% по отношению к норме) главным образом за счет роста подземной составляющей (на 60%), достигшей 72.8 мм. При этом поверхностная составляющая несколько снизилась (на 9%) и составила 62.2 мм. Доля подземной составляющей в годовом речном стоке увеличилась в последние годы в среднем до 54%, т.е. стала на 14% больше, чем за период исчисления нормы.

Рассчитанная средневзвешенная (с учетом величины подземного стока в холодный период — с ноября до начала половодья, в половодье и теплый период — от окончания половодья по октябрь — 29, 16, и 27 мм) концентрация минерального азота в годовой подземной составляющей стока Кудьмы у г. Кстово составила 2.75, фосфора 0.059 мг/л.

При этом вследствие отсутствия данных наблюдений содержание биогенов в летне-осеннюю межень рассчитано по его соотношению с их содержанием в холодный период года. Оно установлено для р. Линды (левого притока Чебоксарского водохранилища), не испытывающей столь существенной антропогенной нагрузки, как Кудьма, и отражает степень трансформации биогенных веществ, поступающих с подземным стоком. Отношение их концентрации в межень холодного периода года к концентрации в межень теплого периода составляет в среднем 2.40 для азота минерального и 1.14 для фосфора. Тогда по содержанию биогенов в расчетном створе у г. Кстово в осенне-зимнюю межень (азота 3.52 и фосфора 0.062 мг/л) можно рассчитать их содержание в этом створе в летне-осеннюю межень. В среднем за последние годы в эту фазу водного режима концентрация азота составила 1.47 и фосфора 0.054 мг/л. В устье Кудьмы при впадении в Чебоксарское водохранилище содержание азота минерального в летне-осеннюю межень становится еще меньше и составляет в среднем 0.79, фосфора — 0.047 мг/л.

Снижение содержания биогенов в летне-осеннюю межень (азота на 58 и фосфора на 13%) по

Таблица 2. Вынос биогенов с водосбора р. Кудьмы за год в целом по состоянию на 1975 г.

Элемент водного стока	Норма водного стока, мм	Вынос азота, кг/км ²			Вынос фосфора, кг/км ²		
		в среднем	5%-я обеспеченность	95%-я обеспеченность	среднее	5%-я обеспеченность	95%-я обеспеченность
Суммарный речной сток	114	233	314	144	6.38	9.10	3.59
Поверхностная составляющая стока (включая верховодку)	68	106	179	39	3.67	6.21	1.35
Подземный сток с водосбора	46	127	135	105	2.71	2.89	2.24

сравнению с меженью холодного периода года во многом обусловлено активизацией самоочищающих процессов, в том числе потреблением биогенов водной растительностью, водорослями. Этому также способствует их потребление наземными прибрежными растениями из капиллярной каймы обычно неглубоко залегающих грунтовых вод в речной пойме.

Среднегодовое содержание биогенов в Кудьме определено также с учетом внутригодового распределения водного стока. В среднем за последние годы (2008–2018) величина полного стока маловодного сезона холодного периода (с ноября до начала весеннего половодья) составляет 34, половодья – 70, межени теплого периода (от окончания половодья по октябрь) – 31 мм. Тогда средневзвешенная концентрация азота в годовом речном стоке составляет 2.04, фосфора – 0.056 мг/л. Содержание азота в поверхностной составляющей годового стока равно 1.56, а фосфора – 0.054 мг/л.

Результаты оценки выноса биогенов с поверхностной и подземной составляющими стока по состоянию на 1975 г. при условии неизменности содержания биогенов в этих составляющих в течение всего анализируемого периода, включая последние годы, приведены в табл. 2. При определении выноса биогенов в годы 5%-й и 95%-й обеспеченности учитывалось изменение концентрации в суммарном речном стоке в зависимости от соотношения его поверхностной и подземной составляющих.

Из полученных результатов следует, что по состоянию на 1975 г. преобладал средний многолетний вынос азота с подземной составляющей стока, (54% величины выноса с полным стоком) по сравнению с поверхностной составляющей, включая верховодку. Однако в отношении фосфора ситуация иная, вынос с подземным стоком (42%) был меньше, чем с поверхностной составляющей стока (58%).

В годы с экстремально высокой водностью (5%-й обеспеченности) вынос азота с поверхностной составляющей стока с водосборной площади существенно возрастал и преобладал над выносом с подземной составляющей, достигая 57% выноса с полным стоком. В годы с экстремально низкой водностью (95%-й обеспеченности) вынос с поверхностной составляющей стока значительно снижался – до 27% выноса с полным стоком.

Наибольший вклад подземной составляющей стока в вынос азота с полным стоком достигал 73% в экстремально маловодные годы (95%-й обеспеченности). В годы с экстремально высокой водностью (5%-й обеспеченности) он существенно снижался – до 43%.

Что касается фосфора, то наибольший его вынос наблюдался с поверхностной составляющей стока в годы с экстремально высокой водностью, составляя ~68% величины выноса с полным стоком (с подземным стоком 32%). В экстремально маловодные годы вклад поверхностной составляющей стока с водосборной площади существенно снижался – до 38%, однако при этом увеличивался вклад подземного стока, достигая 62%.

Результаты расчета выноса биогенов с водосборной площади Кудьмы за последние годы приведены в табл. 3. Они показали, что вынос существенно – на 28% – увеличился. Основная причина этого заключается в значительном усилении роли подземного стока в миграции биогенов в речную сеть, величина которого возросла до 73 мм (на 60%). Вклад подземной составляющей годового стока азота при этом вырос до 67% (против 56% за период исчисления нормы – по состоянию на 1975 г.), а фосфора – до 56% (было 46%). С каждого квадратного километра территории водосбора с подземным стоком в реку в последние годы стало поступать азота в среднем на 104 кг больше, чем с поверхностной составляющей стока, а фосфора – больше на 0.96 кг/км².

Таблица 3. Вынос биогенов с водосбора р. Кудьмы за год в целом в среднем за 2008–2018 гг. и изменение по сравнению с периодом исчисления нормы (1944–1975 гг.)

Элемент водного стока	Водный сток			Вынос азота			Вынос фосфора		
	мм	%	изменение, %	кг/км ²	%	изменение, %	кг/км ²	%	изменение, %
Суммарный речной сток	135	100	18	298	100	28	7.66	100	20
Поверхностная составляющая стока (включая верховодку)	62	46	–9	97	33	–8	3.35	44	–9
Подземный сток с водосбора	73	54	60	201	67	58	4.31	56	59

О роли атмосферной и ландшафтной составляющих в выносе азота

Поступающие с осадками на поверхность водосбора биогены (атмосферная составляющая) оказываются вовлеченными в вертикальный и горизонтальный влагоперенос и далеко не в полном объеме достигают реки. Так, с атмосферными осадками на водосбор Кудьмы привносится значительное количество минерального азота и фосфора, превышая в 2 раза их вынос с водным стоком на приустьевом участке (табл. 1). Величина этого выноса во многом обусловлена ландшафтной составляющей – обогащением биогенами талых и дождевых вод вследствие вымывания из растительности, почв и грунтов зоны аэрации, водоносных и водоупорных слоев в различных ландшафтах (угодьях) и их поглощением почвогрунтами и биотой.

Анализ ландшафтной составляющей выполнен на примере минерального азота, обладающего более высокой миграционной активностью, чем фосфор. За анализируемый период данные о содержании азота в снежном покрове на водосборе Кудьмы отсутствуют. Поэтому для расчетов использовались результаты экспериментальных работ ИГ РАН, проведенных в Нижегородской области перед началом весеннего половодья в 2018 г. На водосборе Кудьмы отобрано 4 образца снега на лесных участках, 4 на полевых и 7 на урбанизированных (населенные пункты и автодороги). При этом в каждой обследуемой точке снег отбирался по всей его высоте – от поверхности до почвы.

Установлено, что более высокая концентрация биогенных веществ в снеге наблюдается на покрытых лесной растительностью территориях, чем на сельскохозяйственных угодьях, что обусловлено, вероятно, удержанием части выпавшего снега кронами деревьев, оттепелями и образованием инея. На участках с лесной растительностью средняя концентрация азота в снеге составила 0.48 (фосфора – 0.042), на полевых –

0.40 (0.040) и урбанизированных – 0.77 мг/л (0.037 мг/л). Средневзвешенное с учетом ландшафтной структуры водосбора содержание азота в снеге составило 0.435 мг/л (фосфора 0.041 мг/л).

Среднегодовая концентрация азота в осадках определена по наблюдениям на метеостанции имени Небольсина (31 км к юго-западу от центра Москвы) за 1958–1966 гг. [12] и составляет 0.97 от величины концентрации азота в осадках холодного периода года. Определенная с учетом этого коэффициента среднегодовая концентрация азота в осадках на водосборе Кудьмы равна 0.422 мг/л. Она мало отличается от таковой на ближайшей станции фонового мониторинга Росгидромета в Приокско-Террасном биосферном заповеднике (0.464 мг/л) [10].

Расчитанная по данным метеостанции Нижнего Новгорода средняя годовая величина осадков за 2008–2016 гг. равна 673 мм. Тогда в среднем за год поступление азота минерального с осадками, выпадающими на поверхность водосбора Кудьмы, составляет ~284 кг/км², что лишь на 14 кг/км² меньше, чем вынос азота с речным стоком – 298 кг/км². Таким образом, в современном годовом балансе минерального азота в системе водосбор–Кудьма осадки играют весьма важную роль. Речь идет главным образом о влажных выпадениях из атмосферы, но остается неучтенным поступление азота с сухими выпадениями – с пылью и другими аэрозолями.

В процессе формирования речного стока лишь часть поступившего на водосбор с осадками азота выносится с поверхностной составляющей стока. Коэффициент поверхностной составляющей стока с водосборной площади (доля осадков, расходуемых на ее образование) в последние годы составляет в среднем 0.09 средней годовой суммы осадков. Тогда с учетом концентрации азота в осадках, равной 0.422 мг/л, в р. Кудьму поверхностным путем с каждого квадратного километра ее водосборной территории поступает 25.6 кг азота. Наиболее значительный поток азота атмо-

сферного происхождения (258 кг/км², 91% всего азота в осадках) наблюдается в процессе вертикальной фильтрации в почвогрунты зоны аэрации. Причем, в реку с подземным стоком может поступать ~78% этого количества азота (201 кг/км²), а 22% (57 кг/км²) оставаться в зоне аэрации и в верхних водоносных горизонтах.

О соотношении антропогенных и природных факторов в диффузном выносе биогенов

Доля сточных вод в выносе азота и фосфора в Чебоксарское водохранилище со стоком Кудьмы сравнительно небольшая и составляет ~13% по азоту минеральному и 5% по фосфору. Значительно преобладает рассредоточенный по водосборной площади диффузный вынос биогенов с поверхностным и подземным стоком.

Результаты расчетов баланса биогенных веществ (табл. 1) позволили дать ориентировочную оценку соотношения антропогенных и природных факторов в суммарном диффузном выносе минерального азота и фосфора в речную сеть (приняв, что это соотношение остается таким же, как в приходной части баланса). Расчеты показали, что в диффузном выносе преобладает природная составляющая, особенно в отношении азота – 74%, в отношении фосфора – 53%. Доля антропогенной составляющей равна соответственно 26 и 47%.

Биогены, поступившие в Кудьму с водосборной площади в результате процессов трансформации, не в полном объеме достигают Чебоксарского водохранилища. На участке реки от г. Кстово до устья процессы самоочищения становятся интенсивнее, в том числе вследствие дренирования более глубоко залегающих водоносных горизонтов с меньшим содержанием биогенов по сравнению с верхними грунтовыми водами. Поэтому, если судить по створу в устье, то в Чебоксарское водохранилище выносятся лишь 57% потока азота (включая сточные воды), зафиксированного в верхнем створе у г. Кстово. В отношении фосфора ситуация иная. Вероятно, за счет повышенной антропогенной нагрузки на устьевом участке вынос фосфора становится больше на 34%. Однако в водохранилище с этого участка поступает все-таки сравнительно небольшая величина биогенов – азота 4% суммарной биогенной нагрузки (без учета сточных вод), окисляемой на водосбор Кудьмы, еще меньше фосфора – 1.5%.

ВЫВОДЫ

На примере р. Кудьмы предложены и апробированы методические подходы к оценке влияния вертикальной гидрологической структуры реч-

ных бассейнов на миграцию биогенных веществ в реки южной части лесной зоны в бассейне Волги.

Оценен годовой воднобиогенный баланс бассейна Кудьмы, сложившийся в последнее десятилетие. Показано, что приходная часть баланса (поступление) значительно превышает расходную часть (вынос) – в 6–6.5 раз. Природное поступление биогенов остается весьма существенным – по азоту оно почти в 3 раза превышает антропогенное, а по фосфору – в 1.1 раза.

Из числа всех учтенных природных и антропогенных факторов поступления биогенов на речной водосбор наиболее важный – опад лесной растительности. Величина поступления азота с листовым опадом более чем в 10 раз превышает его вынос в Чебоксарское водохранилище, а поступления фосфора – в 25 раз.

В современном годовом балансе азота в системе водосбор–Кудьма весьма заметную роль играют осадки. С осадками привносится значительное количество минерального азота и фосфора, превышая их вынос с водным стоком на приустьевом участке в 2 раза. Наиболее значительный поток азота атмосферного происхождения (91% всего азота в осадках) наблюдается в процессе вертикальной фильтрации в почвогрунты зоны аэрации, с подземным стоком может мигрировать в реку ~78% этого количества азота.

К наиболее существенным источникам антропогенного поступления биогенов на водосборную площадь Кудьмы относится животноводство. Современная биогенная нагрузка удобрениями практически полностью компенсируется выносом азота и фосфора с урожаем и не может рассматриваться в качестве основной причины биогенного загрязнения местных водных ресурсов.

Установлено, что в диффузном выносе биогенов в водохранилище с приустьевым участком (составляющим 87% суммарного поступления азота и 95% – фосфора) преобладает природная составляющая.

Определен вынос азота и фосфора с водосбора Кудьмы за годовой период. По состоянию на 1975 г., вынос азота с подземной составляющей стока (включая верховодку) преобладал и составлял 55% выноса с суммарным стоком, на долю поверхностной составляющей приходилось 45%. Вынос фосфора был больше с поверхностной составляющей (58%) и меньше с подземной (42%). В годы с экстремально высокой водностью (5%-й обеспеченности) вынос азота с поверхностной составляющей стока достигал 57% выноса с полным стоком, снижаясь в годы с экстремально низкой водностью (95%-й обеспеченности) до 27%. Другая ситуация в отношении подземного стока. Его доля в выносе с полным речным стоком наибольшая (73%) в годы низкой водности и

существенно снижалась (до 43%) в многоводные годы.

Годовой вынос биогенных веществ с водосборной площади Кудьмы в последние годы существенно увеличился (азота на 28, фосфора на 20%). Основная причина заключается в изменившихся гидроклиматических условиях, приведших к снижению (на 9%) поверхностной составляющей стока и значительно увеличению (на 60%) подземной составляющей стока. Ее вклад в годовой сток азота при этом вырос до 67, а фосфора — до 56%. С подземным стоком в реку в последние годы стало поступать азота в среднем на 104 кг/км² больше, чем с поверхностной составляющей стока, а фосфора — на 1 кг/км².

Авторы весьма признательны Е.А. Кашутиной за предоставленные данные по антропогенной нагрузке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамов А.И., Крымова Е.А.* Состояние плодородия пахотных земель в Нижегородской области // ФГБУ Центр агрохимической службы “Нижегородский”, 2014 // <https://agrohim-nn.ru/stati/47-sostoyanei-plodorodiya-pakhotnykh-zemel-v-nizhegorodskoj-oblasti.html>
2. *Барабанов А.Т., Долгов С.В., Коронкевич Н.И., Панов В.И., Петелько А.И.* Поверхностный сток и инфильтрация в почву талых вод на пашне в лесостепной и степной зонах Восточно-Европейской равнины // Почвоведение. 2018. № 1. С. 62–69.
3. *Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Рец Е.П., Сафронова Т.И., Бугров А.А., Телегина А.А., Телегина Е.А.* Современные ресурсы подземных и поверхностных вод европейской части России. М.: ГЕОС, 2015. 320 с.
4. *Долгов С.В.* Влияние метеорологических факторов на многолетнюю изменчивость подземного стока в реки бассейна Волги // Изв. РАН. Сер. геогр. 1998. № 1. С. 102–110.
5. *Долгов С.В., Коронкевич Н.И.* Гидрологическая ярусность равнинной территории // Изв. РАН. Сер. геогр. 2010. № 1. С. 7–25.
6. *Коронкевич Н.И.* Водный баланс Русской равнины и его антропогенные изменения. М.: Наука, 1990. 204 с.
7. *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.
8. *Назаров Н.А.* Оценки эрозионного смыва почв и выноса биогенных элементов с поверхностным стоком талых и дождевых вод в речном бассейне // Вод. ресурсы. 1996. Т. 23. № 6. С. 645–652.
9. Нижегородская область в цифрах. 2017: Краткий стат. сб. / Нижний Новгород: Нижегородстат, 2017. 375 с.
10. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2016 год. М.: Росгидромет, 2017. 216 с.
11. Об утверждении областной целевой программы “Сохранение и восстановление плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения и агроландшафтов в Нижегородской области” на 2009–2013 годы (с изменениями на 13 ноября 2012 года). Правительство Нижегородской области. Постановление от 25 марта 2009 года № 152 // docs.cntd.ru > document/944938629.
12. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 10. Верхне-Волжский район. Кн. 1. М.: Гидрометеиздат, 1973. 477 с.
13. *Родин Л.Е., Базилевич Н.И.* Динамика органического вещества и биологический круговорот в основных типах растительности земного шара. М.; Л.: Наука, 1965. 254 с.
14. *Родин Л.Е., Ремезов Н.П., Базилевич Н.И.* Методические указания к изучению динамики и биологического круговорота в фитоценозах. Л.: Наука, 1968. 145 с.
15. *Савенко В.С., Савенко А.В.* Геохимия фосфора в глобальном гидрологическом цикле. М.: ГЕОС, 2007. 248 с. ISBN 978-5-89118-420-6
16. *Хрисанов Н.И., Осипов Г.К.* Управление эвтрофированием водоемов. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 279 с.
17. *Чернышев Е.П., Барымова Н.А., Иванова Н.Б., Китаев Л.М.* Пространственно-временная дифференциация гидрологических процессов и связанного с ними вещественного обмена в системе “водосбор–река” // Географо-гидрологические исследования. М.: ИГ РАН, МЦ ГО РФ, 1992. 196 с.
18. *Чуян Г.А., Бойченко З.А., Тур О.П.* Методические рекомендации по оценке выноса биогенных веществ поверхностным стоком. М.: ВАСХНИЛ, 1985. 32 с.
19. *Шилькрот Г.С., Ясинский С.В.* Пространственно-временная изменчивость потока биогенных элементов и качества воды малой реки // Вод. ресурсы. 2002. Т. 29. № 3. С. 343–349.
20. *Ясинский С.В., Гуров Ф.Н.* Метод оценки характеристик диффузного загрязнения малых рек на основе ландшафтно-гидрологического подхода (на примере р. Истры) // Вод. хозя-во России. 2006. № 2. С. 41–71.