

СОВРЕМЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ДИНАМИКА БАЛАНСА БИОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В БАССЕЙНЕ РЕКИ КУДЬМЫ 2. СЕЗОННЫЙ ВЫНОС АЗОТА И ФОСФОРА¹

© 2021 г. С. В. Долгов^а, *, Н. И. Коронкевич^а, **

^аИнститут географии РАН, Москва, 119017 Россия

*e-mail: svdolgov1978@yandex.ru

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

Поступила в редакцию 20.12.2019 г.

После доработки 01.12.2020 г.

Принята к публикации 21.01.2021 г.

На примере р. Кудьмы, притока Чебоксарского водохранилища, оценен вклад поверхностной и подземной составляющих стока, стока верховодки в диффузный вынос минерального азота и фосфора с речных водосборов в северной части лесостепной зоны в бассейне Волги. Показано, что роль элементов водного баланса в выносе биогенных веществ существенно меняется по сезонам года и в многолетнем плане. Определено соотношение в нем атмосферной и ландшафтной составляющих. Установлено, что за счет возросшей роли изменившихся гидроклиматических условий, особенно увеличения стока инфильтрационного происхождения (подземного и верховодки) сток биогенов в последние годы существенно вырос. Предложены перспективные направления дальнейшего изучения выноса биогенных веществ с речных водосборов.

Ключевые слова: сезонный вынос азота и фосфора, поверхностная и подземная составляющие стока, изменения.

DOI: 10.31857/S0321059621050096

ВВЕДЕНИЕ

Цель выполненного исследования заключается в выявлении особенностей внутригодового распределения выноса биогенов с поверхностным и подземным стоком с речных водосборов в северной части лесостепной зоны в бассейне Волги и в оценке современных его изменений на примере р. Кудьмы.

В 1-й части статьи [3] рассмотрены методические особенности оценки влияния вертикальной гидрологической структуры речного бассейна на миграцию биогенных веществ. Определены основные составляющие годового воднобиогенного баланса бассейна р. Кудьмы с характерной для северной части лесостепной зоны ландшафтной структурой. Выявлена роль природных и антропогенных факторов в поступлении биогенов на водосбор р. Кудьмы. Оценен вклад атмосферных осадков, поверхностной и подземной составляющих стока в годовой вынос биогенов в Чебоксарское водохранилище. Определено соотношение

атмосферной и ландшафтной составляющих в выносе биогенов. Показано, что за счет изменившихся гидроклиматических условий, приведших к уменьшению поверхностного стока с водосбора р. Кудьмы и значительному увеличению подземного стока, диффузный вынос азота и фосфора за последние годы существенно вырос.

В данной части статьи представлены результаты оценки и анализа основных составляющих воднобиогенного баланса за отдельные сезоны – весеннее половодье, маловодные сезоны холодного и теплого периодов года.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ИСХОДНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Методологической основой выполненного исследования послужили представления о высотнo-пространственной дифференциации речного бассейна, инструмент изучения гидрохимического функционирования ее элементов, в частности воднобиогенный баланс [1]. Использованы также результаты оценки зональной средней многолетней структуры стока половодья, полученные в работе [5] путем привязки данных воднобалансовых

¹ Статья подготовлена по материалам исследований в рамках Государственного задания (тема 0148-2019-0007, разработка методики) и РНФ (проект 20-17-00209, расчеты и обобщение результатов).

и стоковых стационаров к зональной величине стока половодья на реках Русской равнины.

В данной статье исследуется как полный речной сток р. Кудьмы, так и выделенные по видам питания на его гидрографах поверхностная и подземная составляющие. Поверхностная составляющая стока (включая сток верховодки) определена по разности полного речного и подземного стока. Сток верховодки и сток с площади гидрографической сети рассчитаны по зональной средней многолетней структуре стока половодья, установленной в работе [5].

Для расчета выноса биогенов в реку с составляющими водного стока в связи с отсутствием данных экспериментальных наблюдений приняты следующие допущения.

1. Как и в 1-й части статьи, в связи с тем, что до 1975 г. наблюдения за концентрацией аммонийного азота и фосфатов не проводились, их содержание принято одинаковым для всего периода инструментальных наблюдений и соответствующим содержанию в анализируемый современный период (2008–2018 гг.).

2. По данным Росгидромета, в суммарном речном стоке средняя многолетняя концентрация азота минерального в половодье $C_{\text{реч ст}}$ составила 1.58 и фосфора 0.055 мг/л. В подземной составляющей стока $C_{\text{подз ст}}$ содержание минерального азота составило 3.52 и фосфора 0.062 мг/л. Оно определено по концентрации биогенных веществ в речном стоке в зимнюю межень. В поверхностной составляющей стока $H_{\text{пов ст}}$ содержание азота $C_{\text{пов ст}}$ равно 1.10, фосфора – 0.053 мг/л. Оно определено по уравнению баланса биогенов в речном стоке для периода половодья:

$$C_{\text{реч ст}} H_{\text{реч ст}} = C_{\text{подз ст}} H_{\text{подз ст}} + C_{\text{пов ст}} H_{\text{пов ст}},$$

в котором $C_{\text{пов ст}}$ – концентрация азота (фосфора) в $H_{\text{пов ст}}$ за период половодья. Тогда

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

3. Поскольку поверхностный склоновый сток $H_{\text{скл ст}}$ и сток почвенной верховодки $H_{\text{верх ст}}$ близки по ходу развития, то отделить их друг от друга без специальных экспериментальных исследований не представляется возможным. Поэтому для этих показателей стока принято одинаковое содержание биогенов – соответствующее их концентрации в поверхностной составляющей речного стока в половодье ($C_{\text{скл ст}} = C_{\text{верх ст}} = C_{\text{пов ст}}$).

Что касается территории гидрографической сети (ниже бровок оврагов, балок, речных долин), то здесь, с одной стороны, снегозапасы в среднем в 1.2–1.3 раза больше, чем на склонах [5], а коэффициент стока выше, чем на склонах, – достигает 0.7–0.8. Это способствует разбавлению растворов талых вод, поступающих со склонов, и

снижению концентрации в них биогенов. С другой стороны, за счет контакта талых вод с неистощенной под сельскохозяйственной нагрузкой почвой, а также с обычно более высокой, чем на склонах, фитомассой и мортмассой возрастает концентрация биогенов. В связи с отсутствием экспериментальных данных концентрация азота в талых водах на площади гидрографической сети $C_{\text{гидр ст}}$ принята такой же, как в поверхностном стоке со склонов: $C_{\text{гидр ст}} = C_{\text{скл ст}}$.

В качестве исходной информации, наряду с данными Росгидромета, использованы результаты полевого гидрохимического обследования снежного покрова, речных и подземных вод, проведенного Институтом географии РАН (ИГ РАН) с участием авторов перед началом весеннего половодья в 2018 г. Определение содержания биогенных элементов в пробах воды выполнено с помощью портативного спектрофотометра DR/2010 фирмы “НАСН” (США) на основе аттестованных в России методик. Концентрация аммонийного азота определялась с использованием реактива Несслера (предел обнаружения, за который принята минимальная определяемая концентрация с вероятностью 99%, – 0.06 мг/л), азота нитритов – с использованием реактива Грисса (0.001 мг/л), азота нитратов – с предварительным восстановлением кадмия до нитритов (0.1 мг/л). Содержание минерального фосфора оценивалось методом определения ортофосфатов и полифосфатов с использованием аскорбиновой кислоты (предел обнаружения – 0.003 мг/л).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Вынос биогенов с водосбора р. Кудьмы за период весеннего половодья

Весеннее половодье по-разному сказывается на водном балансе речного бассейна и балансе в нем биогенов. В этот период ресурсы речного стока значительно увеличиваются, но запасы биогенов в речном бассейне, напротив, уменьшаются за счет вымывания тальми и дождевыми водами из различных элементов его вертикальной гидрологической структуры [1].

Для среднемноголетних условий (по состоянию на середину 1970-х гг.) оценка выноса биогенов выполнена по зональным зависимостям элементов весеннего водного баланса водосбора от речного стока половодья [5]. Если принять среднемноголетний слой стока половодья р. Кудьмы у г. Кстово по данным в створе у д. Новой ($H_{\text{реч ст}} = 64$ мм [7]) за 100%, то поверхностный склоновый сток, доходящий до реки, составляет 20, сток с площади гидрографической сети 23, сток верховодки 37 и подземный сток 20% (табл. 1).

Из результатов расчетов, приведенных в табл. 1, следует, что вынос минерального азота со стоком

Таблица 1. Вынос минерального азота и фосфора с водосбора р. Кудьмы у г. Кстово за период весеннего половодья с основными элементами водного стока по состоянию на 1975 г.

Элемент водного стока	мм	Вынос азота		Вынос фосфора	
		кг/км ²	%	кг/км ²	%
Суммарный речной сток	64	101	100	3.52	100
Поверхностный сток с водосбора	28	30.3	30	1.46	41
склоновый	13	14.2	14	0.68	19
с площади гидрографической сети	15	16.1	16	0.78	22
Сток верховодки	23	26.3	26	1.26	36
Подземный сток с водосбора	13	44.5	44	0.80	23

в половодье составлял весьма существенную величину – 43% величины его выноса за весь годовой период (фосфора – 55%). Причем наибольший вынос биогенных элементов с водосбора в р. Кудьму наблюдался со стоком инфильтрационного происхождения (верховодки и подземным) – азота 70 и фосфора 59% суммарного выноса. Вынос азота с поверхностным стоком (склоновым и с площади гидрографической сети) существенно меньше – 30, фосфора – 41%.

Соотношение атмосферной и ландшафтной составляющих в выносе азота

Под атмосферной составляющей понимается поступление азота с осадками из атмосферы, под ландшафтной – обогащение азотом талых вод вследствие вымывания из растительности, почв и грунтов зоны аэрации в различных ландшафтах (угодьях) [2].

За анализируемый период данные о содержании азота в снежном покрове на водосборе р. Кудьмы отсутствуют, но есть основания полагать, что в многолетнем разрезе оно меняется не столь существенно. Так, по результатам экспериментальных работ лаборатории гидрологии ИГ РАН в феврале 2018 г., средняя концентрация азота минерального в снежном покрове в парках и на территориях жилой застройки Москвы составила 1.13 мг/л (12 образцов). Если судить, например, по наблюдениям на метеостанции им. Небольсина (31 км к ЮЗ от центра Москвы) за 1958–1966 гг. [6], она незначительно отличается от концентрации азота в осадках холодного периода за прошлые годы (1.09 мг/л).

Поэтому для расчетов использовались результаты экспериментальных работ ИГ РАН, проведенных в Нижегородской области перед началом весеннего половодья в 2018 г. В ходе этих работ на водосборе р. Кудьмы было отобрано 4 образца снега на лесных участках, 4 на полевых и 7 на урбанизированных (населенные пункты и автодороги). 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 лесных 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).

Средние многолетние (1936–1975 гг.) запасы воды в снежном покрове на водосборе р. Кудьмы перед весенним половодьем (вместе с осадками, выпадающими во время половодья) равны 133 мм. В снеге на каждом квадратном километре водосбора содержалось 57.9 кг азота. Из этого количества 11.9 кг азота мигрировало в реку с поверхностным стоком (склоновым и стоком с площади гидрографической сети), составляющим 28 мм (табл. 1). Отсюда следует, что доля осадков (атмосферная составляющая) в выносе азота с поверхностным стоком (30.3 кг/км²) составляет 39%. Ландшафтная составляющая (вымывания азота из почвы, растительности, лесной подстилки) на 22% больше (табл. 2).

В половодье на водосборе р. Кудьмы наблюдался наиболее значительный вертикальный поток азота осадков в почвогрунты зоны аэрации – почти в 4 раза больше, чем в горизонтальном направлении с поверхностным стоком с водосбора. В процессе инфильтрации талых вод в почву (осадки за вычетом поверхностного стока с водосбора, 106 мм) с каждого квадратного километра площади в почвогрунты зоны аэрации поступало 46 кг азота, содержащегося в осадках. Часть этого вертикального потока азота (22% поступившего в почву с осадками) затем перехватывается стоком верховодки и расходуется на вынос с водосбора в горизонтальном направлении (10.3 кг/км²). Отсюда следует, что доля осадков (атмосферная

Таблица 2. Атмосферная и ландшафтная составляющие выноса азота минерального с водосбора р. Кудьмы за период весеннего половодья с основными элементами водного баланса (по состоянию на 1975 г.)

Элемент водного стока	мм	Суммарный вынос азота	Вынос азота из снежного покрова	Атмосферная составляющая	Ландшафтная составляющая
		кг/км ²	кг/км ²	%	%
Суммарный речной сток	64	101	27.9	28	72
Поверхностный сток с водосбора,	28	30.3	11.9	39	61
склоновый	13	14.2	5.6	39	61
с площади гидрографической сети	15	16.1	6.3	39	61
Сток верховодки	23	26.3	10.3	39	61
Подземный сток с водосбора	13	44.5	5.6	12	88

составляющая) в суммарном выносе азота со стоком верховодки (26.3 кг/км²) близка к доле в поверхностном стоке и равна 39%, а на ландшафтную составляющую приходится 61% (табл. 2). Это соотношение получено при допущении о равенстве концентраций биогенов в верховодке и в поверхностном склоновом стоке. Поэтому оно нуждается в дальнейшей корректировке (скорее всего, в сторону увеличения), прежде всего на основе экспериментальных данных.

Осадки, поглощенные почвой в процессе инфильтрации, расходуются затем не только на сток верховодки, но и на пополнение запасов влаги в почвогрунтах зоны аэрации и на испарение. За вычетом перечисленных составляющих водного баланса остальная часть осадков достигает верхних водоносных горизонтов с грунтовыми водами, в которых азот нередко накапливается за счет суммирования потерь его из верхних слоев речного бассейна (растительности, почвы, грунтов зоны аэрации).

Величина инфильтрационного питания грунтовых вод для средних многолетних условий примерно равна величине дренируемого р. Кудьмой подземного стока – 13 мм, вынос с которым азота осадков составляет 5.6 кг/км². По сравнению с поверхностным стоком и стоком верховодки доля атмосферной составляющей в нем снижается до 12%, а доля ландшафтной составляющей (включаящей и азональные гидрогеологические условия), напротив, увеличивается до 88%.

Расчеты для полного речного стока (64 мм) за период половодья показали, что на его формирование расходовалось ~48% величины стокообразующих осадков (133 мм). При этом с одного квадратного километра водосбора в р. Кудьму поступало в среднем 27.9 кг содержащегося в осадках азота, доля атмосферной составляющей в миграции биогенов с полным речным стоком (101 кг/км²) составила 28, а доля ландшафтной составляющей 72%. Причем ~79% (46 кг/км²)

всего количества азота в снежном покрове (57.9 кг/км²) с поверхностным стоком (склоновым и стоком с площади гидрографической сети) с водосбора р. Кудьмы не выносилось, а поступало в почвогрунты зоны аэрации и достигало верхних водоносных горизонтов с грунтовыми водами.

Из табл. 2 видно, что не все количество азота (57.9 кг/км²) в снеге выносилось с водосбора р. Кудьмы с различными составляющими речного стока. Если судить по выносу азота из снега с полным речным стоком (27.9 кг/км²), в пределах водосбора оставалось 30 кг/км²; т.е. коэффициент доставки азота, содержащегося в снеге на водосборной площади, к замыкающему створу составляет в среднем ~0.5.

Современные тенденции в выносе биогенов в половодье

За 2008–2018 гг. антропогенная нагрузка существенно снизилась [3] и произошедшие изменения в диффузном выносе биогенов с водосборной площади обусловлены прежде всего климатическими изменениями. В основном вследствие увеличения осадков в холодный период (по данным метеостанции Нижнего Новгорода, на 35%) полный сток половодья (сумма поверхностной и подземной составляющих) р. Кудьмы увеличился относительно нормы на 19%. Подземная составляющая стока в половодье (23% суммарного стока) заметно (на 25%) увеличилась и составляет в последние годы 16 мм. Поверхностная его составляющая (в сумме склоновый сток, сток с площади гидрографической сети и сток верховодки) увеличилась сравнительно мало (лишь на 4%) и равна 53 мм.

По этим изменениям в табл. 3 приведена структура водного стока за последние годы, а также структура стока азота по состоянию на 1975 г. Расчет выноса биогенов выполнен по данным наблюдений Росгидромета (2008–2018 гг.) за кон-

Таблица 3. Структура водного стока с водосбора р. Кудьмы и выноса азота за период весеннего половодья за 2008–2018 гг.

Элемент водного стока	Водный сток	Вынос азота		Вынос фосфора	
	мм (%)	кг/км ²	изменение, %	кг/км ²	изменение, %
Суммарный речной сток	69 (100)	110	8	3.81	8
Поверхностный сток с водосбора	28 (41)	28.4	–6	1.50	3
склоновый	13 (19)	13.2	–7	0.70	3
с площади гидрографической сети	15 (22)	15.2	–6	0.80	3
Сток верховодки	25 (36)	24.8	–6	1.32	5
Подземный сток с водосбора	16 (23)	56.3	26	0.99	24

Таблица 4. Изменения за 2008–2018 гг. водного стока с водосбора р. Кудьмы и выноса биогенов за маловодный период года (относительно нормы по состоянию на 1975 г.)

Элемент водного стока	Водный сток		Вынос азота		Вынос фосфора	
	мм (%)	изменение, %	кг/км ² (%)	изменение, %	кг/км ² (%)	изменение, %
Речной сток	66 (100)	31	189 (100)	43	3.85 (100)	35
Поверхностная составляющая стока	9 (13)	–48	44 (23)	–11	0.53 (14)	–44
Подземная составляющая стока	57 (87)	72	145 (77)	76	3.32 (86)	74

центрацией соединений азота в р. Кудьме у г. Кстово. Как и для периода исчисления нормы, содержание азота в подземном стоке принято по результатам химического анализа проб воды, отобранных в зимнюю межень, и равно 3.52 мг/л. Концентрация азота в суммарном речном стоке составила 1.58 мг/л. Содержание азота в поверхностной его составляющей определено по приведенному выше уравнению воднобиогенного баланса; оно равно 1.00 мг/л. Концентрация фосфора для полного стока принята в размере 0.055, для поверхностной его составляющей 0.053 и для подземной составляющей 0.062 мг/л.

Расчеты показали, что в последние годы вынос в половодье биогенных веществ с суммарным стоком вырос на 8%. Произошло это главным образом за счет увеличения выноса его с подземным стоком (азота на 26 и фосфора на 24%). В то же время вынос с поверхностной составляющей стока, включая сток верховодки, изменился не столь заметно – уменьшился на 6–7% для азота и увеличился на 3–5% для фосфора.

В последние годы вынос нитратов вырос на 8%. Причем это минимальная величина, обусловленная лишь изменением водности. Судя по данным о концентрации нитратов в половодье за 1952–1958 гг., приведенным в гидрологических ежегодниках, то вынос нитратов в последние годы значительно увеличился – в 3 раза (с 23.7 до 70.0 кг/км²). Концентрация азота нитратов при

этом выросла с 0.37 мг/л и стала равной в среднем 1.01 мг/л.

Вынос биогенов с водосбора р. Кудьмы за маловодный период года

Оценка современного поступления биогенов в реку с водным стоком с водосборной площади выполнена по данным табл. 3 данной статьи и табл. 3 в [3]. Из результатов расчетов (табл. 4) следует, что в течение длительного маловодного периода года (от даты окончания весеннего половодья до даты начала следующего) вынос биогенов с полным речным стоком весьма значительный. Так, вынос азота минерального составляет 63% выноса за весь годовой период, а вынос фосфора 50%. Причем в маловодный период года миграция биогенов в речную сеть проходит главным образом с подземным стоком, вклад которого в вынос с полным речным стоком составляет в этот период по азоту ~77 и по фосфору 86%.

Из табл. 4 следует, что в последние годы вынос биогенных веществ с подземным стоком с водосборной площади в маловодный период года возрос значительно – на 75%. В то же время роль поверхностной составляющей стока в миграции биогенов существенно снизилась (вынос азота при этом уменьшился на 11, а фосфора на 44%). В итоге вынос биогенов с суммарным речным стоком все-таки увеличился (на 35–40%) в основ-

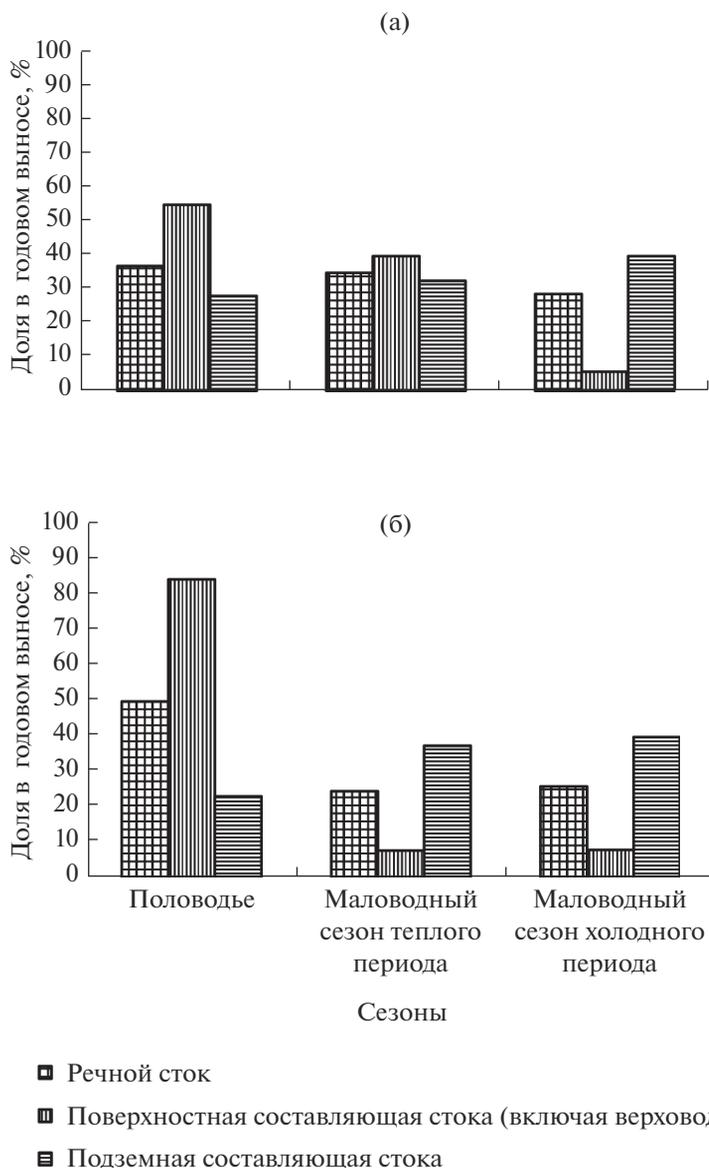


Рис. 1. Внутригодовое распределение выноса азота (а) и фосфора (б) со стоком р. Кудьмы и его составляющими.

ном вследствие увеличения величины подземного стока.

Сказанное относится к маловодному периоду в целом. Он включает в себя маловодный сезон теплого периода года (от окончания половодья по октябрь) и маловодный сезон холодного периода (с ноября до начала половодья) с различными условиями формирования водного и химического стока. Результаты расчетов выноса биогенных веществ за эти сезоны, а также за сезон весеннего половодья приведены на рис. 1. Они показали, что вынос азота с суммарным речным стоком сравнительно равномерно распределяется по сезонам года – с максимумом (37% годовой величины выноса) в половодье и с минимумом (29%) в маловодный сезон холодного периода. Вынос

азота с поверхностной составляющей стока наибольший в половодье и составляет 55% его годовой величины и резко уменьшается в осенне-зимнюю межень (до 6%). Иная ситуация в отношении подземного стока, вынос азота с которым, напротив, минимален (28%) в половодье и максимален (40%) в межень холодного периода.

В отличие от азота, внутригодовое распределение выноса фосфора с речным стоком неравномерное с максимумом (50% годовой его величины) в сезон половодья и минимумом в летне-осеннюю (25%) и осенне-зимнюю межень (25%). В миграции фосфора более важную роль играет поверхностный сток с водосборной площади (по сравнению с подземным стоком). Наиболее активная миграция фосфора отмечается с поверх-

ностной составляющей стока во время половодья и достигает 84% величины выноса за весь год. С подземным стоком наибольший и примерно одинаковый вынос фосфора наблюдается в маловодные сезоны теплого и холодного периодов года (в сумме 77% годового выноса). В половодье он снижается значительно — до 23%.

Перспективы дальнейших ландшафтно-гидрохимических исследований

Результаты изучения авторами диффузного выноса биогенов в реки и водоемы, особенно в бассейне р. Кудьмы, позволили наметить перспективы дальнейших исследований.

В стоке биогенных веществ, как и в речном стоке, интегрированы различные элементы природных и антропогенных ландшафтов речного бассейна, а также различные элементы их вертикальной структуры (растительность, поверхностный слой почвы, зоны аэрации и насыщения) с разной долей вклада. Поэтому при оценке роли отдельного фактора в его формировании зачастую бывает невозможно исключить влияние других факторов.

Даже при отборе проб талых и дождевых вод, стекающих по поверхности почвы в отдельном элементе ландшафтной структуры (что достаточно широко практикуется), получить в полной мере однородную выборку не всегда удается. Это обусловлено тем, что в отобранных пробах воды содержание биогенов может варьировать по территории в широких пределах в зависимости от количества атмосферных осадков, температуры, при которой образуется анализируемая составляющая водного стока, а также длительности контакта стокообразующих осадков с растительностью, почвогрунтами зоны аэрации и водовмещающими породами в зоне насыщения.

В связи с отсутствием стационарных наблюдений Росгидромета за миграцией биогенных веществ в разных ландшафтах речных водосборов основным источником исходной информации служат данные экспериментальных полевых работ. Как правило, они проводятся во время весеннего половодья [6, 9–12], поскольку априори считается, что преимущественно в этот сезон происходит вынос биогенов. Однако, как показали исследования в бассейне р. Кудьмы, их вынос в маловодный период года весьма значительный и в изменившихся климатических условиях составляет для азота 63 и для фосфора 50% годового выноса (для бассейна р. Линды соответственно 48 и 44% [2]). Отсюда следует, что экспериментальные полевые работы необходимо проводить не только в период половодья, но и в летне-осеннюю и зимнюю межень, что сопряжено со значительным увеличением их объема.

Наиболее эффективный путь получения исходной информации, как представляется авторам статьи, — сочетание полевых работ с лабораторным экспериментом, с помощью которого может быть решен ряд задач, в том числе оценка влияния различных природных и антропогенных факторов на вынос биогенов с речных водосборов. В качестве успешного примера этого, пока не нашедшего широкого применения, направления исследований можно привести разработанную Ю.П. Сухановским с соавторами методику определения потерь биогенных веществ из почвы с использованием портативной дождевальной установки [8].

Перспективное также направление исследований — применение геохимических методов, в том числе лабораторного эксперимента (на основе водных вытяжек из растительности и почвогрунтов зоны аэрации). Такой подход использовался, в частности, в Институте географии РАН в совместных работах с Ростовским и Воронежским государственными университетами по проектам ФЦП “Интеграция” в 1999–2004 гг. [4]. Он позволил без непосредственного отбора проб поверхностных склоновых вод значительно сократить объем полевых работ и дать сравнительную оценку влияния природных и антропогенных ландшафтов на вынос биогенов, выявить особенности влияния основных климатических факторов (атмосферных осадков и температуры воздуха) на этот процесс. Химический анализ водных вытяжек выполнен с помощью портативного спектрофотометра DR/2010 фирмы “НАСН” (США), иономера и ионоселективных электродов фирмы “Эконикс” (Россия).

О целесообразности и эффективности использования лабораторного эксперимента для решения ряда задач свидетельствуют, в частности, полученные авторами статьи указанные ниже результаты исследований формирования биогенного стока в бассейнах Верхней Волги и Дона, в том числе на южном черноземе в бассейне р. Бузулук (левый приток р. Хопер).

1. Из полученной в лабораторных условиях зависимости (рис. 2) следует, что в годы с низкой увлажненностью (осадками) речного водосбора концентрация биогенов в поверхностном стоке с водосборной площади может возрастать в разы по сравнению с многоводными годами, а также значительно меняться в течение года, достигая максимальной величины при небольших осадках.

2. Концентрация биогенов в поверхностно-почвенных водах существенно зависит от продолжительности контакта атмосферных осадков с почвой. Особенно значительное насыщение осадков биогенами и солями наблюдается в первые 30 мин от начала контакта (рис. 3) и не столь резко выраженное может продолжаться до 3–4 сут.

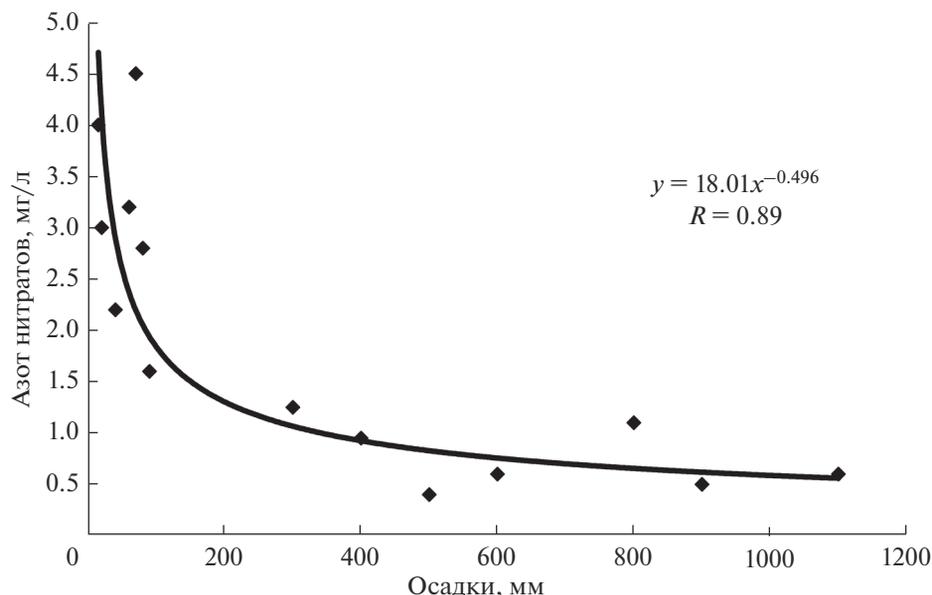


Рис. 2. Содержание нитратов в поверхностно-почвенных водах в зависимости от количества атмосферных осадков (пахотный слой южного чернозема, типчаково-ковыльная степь, водосбор р. Бузулук, лабораторный эксперимент при температуре 25°C, 14 образцов почвы).

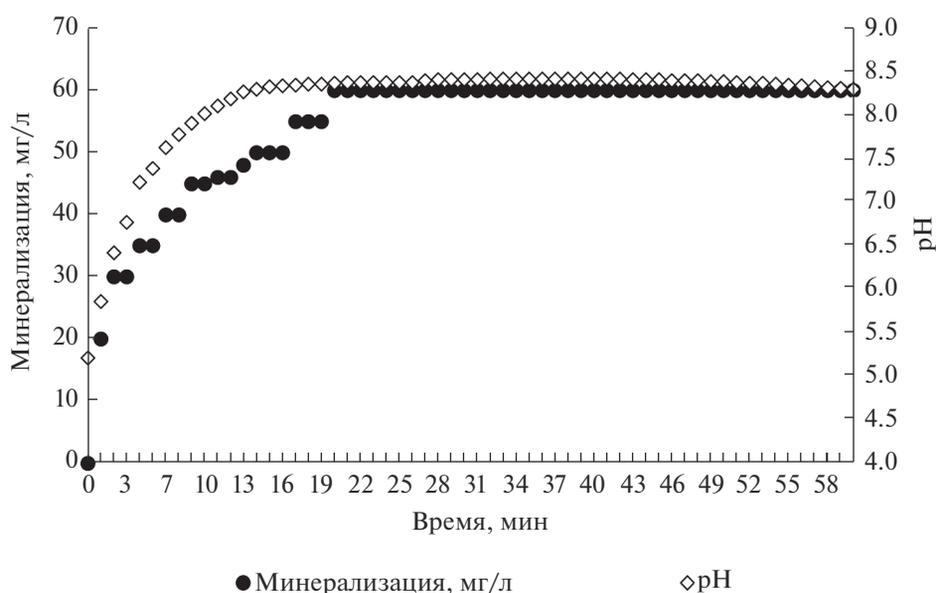


Рис. 3. Динамика минерализации и pH поверхностно-почвенных вод в течение 1 ч от начала контакта почвы с атмосферными осадками (южный чернозем, типчаково-ковыльная степь, бассейн р. Бузулук, один образец почвы, температура 25°C).

Затем наступает равновесное состояние между жидкой и твердой фазами и концентрация стабилизируется. Такая же ситуация отмечается по отношению к показателю pH, отсюда следует, например, вывод, что черноземная почва может достаточно быстро нейтрализовать кислотные осадки.

3. Исследования в бассейне Дона и Верхней Волги показали, что ежегодно возобновляемый

источник биогенов и других химических веществ — растительность. Причем наблюдается их вымывание осадками из живых тканей растений, а не только из мертвых (опада и подстилки). В водных вытяжках из растений биогенных веществ содержится значительно больше по сравнению с поверхностью почв (рис. 4). Вещественный обмен в системе растительность—почва разомкнут. По-

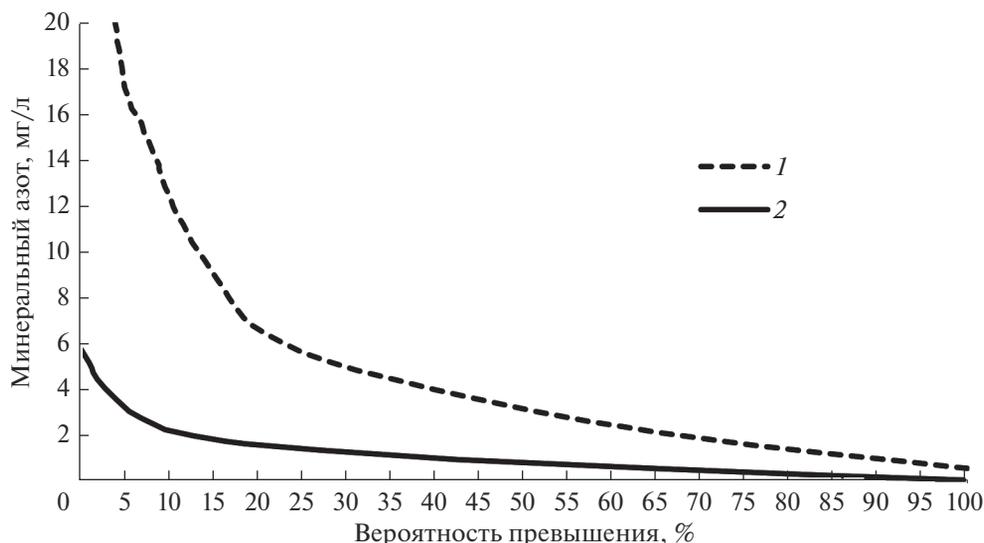


Рис. 4. Содержание азота нитратов в водных вытяжках из 10 г сухого вещества 167 образцов травянистых растений 1 и 249 образцов поверхности почв 2 в бассейнах Дона и Верхней Волги в летний период (температура 25°C, время контакта 30 мин).

этому биогены растительного происхождения с фильтрующейся влагой могут достигать грунтовых вод и в них накапливаться.

4. На минерализации поверхностно-почвенных вод и содержании в них биогенов сказываются внутригодовые изменения температуры воздуха и поверхности почвы. Минерализация (вероятно, и содержание нитратов) в поверхностном склоновом стоке при одном и том же количестве осадков с ростом температуры воздуха от весны к лету (в диапазоне 1–35°C) может увеличиваться почти в 2 раза.

Весьма эффективна более детальная количественная оценка сезонного выноса биогенов и других химических веществ с речных водосборов, заключающаяся в сочетании геохимических методов изучения их миграции и экспериментальных наблюдений за водным и химическим стоком на воднобалансовых стационарах в различных природных и антропогенных условиях. К сожалению, большинство их было закрыто в конце 1980-х — начале 1990-х гг., а на оставшихся стационарах наблюдения проводятся лишь за водным поверхностным стоком и по сокращенной программе. На такой генетической основе могут быть получены достаточно надежные результаты физико-математического моделирования внутригодовых и межгодовых величин химического стока, в том числе при его прогнозировании.

ВЫВОДЫ

На примере р. Кудьмы оценен вклад атмосферных осадков, поверхностного и подземного стока с водосборной площади, стока верховодки в

формирование выноса биогенов с речных водосборов в северной части лесостепной зоны Русской равнины в бассейне Волги. Приведенные результаты расчетов показали, что роль элементов водного баланса в миграции биогенных веществ весьма существенно меняется по сезонам года и в многолетнем плане.

В последние десятилетия (с конца 1970-х — начала 1980-х гг.) вследствие потепления климата наблюдаются кардинальные изменения в формировании водного и тесно с ним связанного водно-биогенного баланса речных бассейнов в лесостепной зоне. Они не имеют аналогов за весь период инструментальных наблюдений. Особенно это касается значительно возросшей роли стока инфильтрационного происхождения (стока верховодки и подземного стока) в миграции в реки с их водосборов биогенных веществ на фоне сокращения роли поверхностного склонового стока. Однако климатические изменения в структуре диффузного выноса биогенов не привели к улучшению гидроэкологической ситуации, поскольку дренируемые реками подземные воды нередко содержат эти вещества в большей концентрации, чем поверхностные. Значительный вынос биогенов в маловодный сезон теплого периода, в основном с подземным стоком, способствует ухудшению гидроэкологической ситуации в Чебоксарском водохранилище.

В половине существенно вырос вынос биогенных веществ с суммарным стоком, главным образом за счет увеличения выноса с подземным стоком. Существенную роль в миграции азота в период весеннего половодья играет его поступление с атмосферными осадками. Доля осадков

(атмосферная составляющая) в выносе азота с суммарным речным стоком составляет 28%. На ландшафтную составляющую (вымывание азота из растительности, лесной подстилки, почвы и грунтов зоны аэрации) приходится 72%.

Вынос азота с суммарным речным стоком сравнительно равномерно распределяется по сезонам года – с максимумом в половодье и минимумом в маловодный сезон холодного периода. В отличие от азота, внутригодовое распределение выноса фосфора неравномерное с максимумом (50% годовой его величины) в сезон половодья и минимумом в летне-осеннюю (25%) и осенне-зимнюю межень (25%).

Полученные результаты в дальнейшем могут быть уточнены и детализированы, в том числе при проведении гидрохимических и геохимических экспериментальных исследований. Более детальный анализ элементов как расходной, так и приходной частей воднобиогенного баланса речного бассейна, в том числе поступления биогенов в результате дорожно-транспортной нагрузки, биологической фиксации азота (в лесах, на залежах и лугах), потребления биогенов при синтезе органического вещества в растениях и т.д., – предмет дальнейших исследований. Остается весьма слабо изученной гидрохимическая и гидроэкологическая роль водорослей, в том числе синезеленых, обитающих в почвах и мигрирующих с водным стоком в речную сеть и водохранилища. К числу перспективных направлений дальнейших ландшафтно-гидрохимических исследований относится сочетание полевых работ с лабораторным экспериментом и физико-математическим моделированием процессов формирования диффузного выноса биогенных веществ в реки и водоемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долгов С.В., Коронкевич Н.И. Гидрологическая ярусность равнинной территории // Изв. РАН. Сер. геогр. 2010. № 1. С. 7–25.
2. Долгов С.В., Коронкевич Н.И. Современные изменения выноса биогенных веществ в реки бассейна Волги на юге лесной зоны // Изв. РАН. Сер. географ. 2019. № 5. С. 43–55.
3. Долгов С.В., Коронкевич Н.И. Современные особенности и динамика баланса биогенных веществ в бассейне реки Кудьмы. 1. Годовой баланс биогенов // Вод. ресурсы. 2020. Т. 47. № 2. С. 151–161.
4. 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 Ростовского ун-та, 2004. 252 с.
5. Коронкевич Н.И. Водный баланс Русской равнины и его антропогенные изменения. М.: Наука, 1990. 204 с.
6. 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.
7. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 10. Верхне-Волжский район. Кн. 1. М.: Гидрометеиздат, 1973. 477 с.
8. Сухановский Ю.П., Вытовтов В.А., Соловьёва Ю.А., Прущик А.В., Санжарова С.И., Титов А.Г. Методика определения потерь из почвы биогенных веществ с использованием портативной дождевальной установки // Достижения науки и техники АПК. 2016. Т. 30. № 6. С. 68–71.
9. Хрисанов Н.И., Осипов Г.К. Управление эвтрофированием водоемов. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 279 с.
10. 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. С. 4–26.
11. Чуян Г.А., Бойченко З.А., Тур О.П. Методические рекомендации по оценке выноса биогенных веществ поверхностным стоком. М.: ВАСХНИЛ, 1985. 32 с.
12. Ясинский С.В., Гуров Ф.Н. Метод оценки характеристик диффузного загрязнения малых рек на основе ландшафтно-гидрологического подхода (на примере р. Истры) // Вод. хоз-во России. 2006. № 2. С. 41–71.