

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 556.532; 556.512

СОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВЫНОСА БИОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ
В РЕКИ БАСЕЙНА ВОЛГИ НА ЮГЕ ЛЕСНОЙ ЗОНЫ

© 2019 г. С. В. Долгов*, Н. И. Коронкевич**

Институт географии РАН, Москва, Россия

**e-mail: svdolgov1978@yandex.ru*

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

Поступила в редакцию 28.12.2018 г.; после доработки 28.12.2018 г.; принята в печать 30.05.2019 г.

На примере бассейна р. Линды, притока Чебоксарского водохранилища, оценен вклад основных элементов его вертикальной гидрологической структуры – атмосферных осадков, поверхностной и подземной составляющих стока, стока верховодки в формирование выноса биогенов с речных водосборов в южной части лесной зоны Русской равнины. Рассчитан вынос биогенов с различными составляющими водного стока за год в целом, многоводный и маловодный его периоды. Показано, что за счет возросшей роли изменившихся гидроклиматических условий, особенно увеличения стока инфильтрационного происхождения (подземного и верховодки), вынос биогенов в последние годы увеличился. Выявлена антропогенная составляющая в выносе биогенов в Чебоксарское водохранилище с водосбора р. Линды, которая в последние десятилетия снижается на фоне рассредоточенного по водосборной площади диффузного выноса биогенов с поверхностным и подземным стоком природного происхождения.

Ключевые слова: баланс биогенов в речном бассейне, атмосферные осадки, поверхностная и подземная составляющие речного стока, внутрigoдовая и многолетняя изменчивость.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587-55662019543-55>

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на наметившуюся в последние годы тенденцию уменьшения антропогенной нагрузки, заметного улучшения качества воды в Волге и ее водохранилищах не происходит. Вклад различных факторов в состояние водных ресурсов остается в значительной мере неизвестным, в том числе неконтролируемого диффузного (рассредоточенного по территории) выноса биогенных веществ с речных водосборов. 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 РАН (ИГ РАН) по проекту “Оздоровление Волги” при общем руководстве Института водных проблем РАН.

Отдельные методические аспекты оценки выноса биогенов в водные объекты с их водосборов, в том числе на основе ландшафтно-гидрологического метода, приведены во многих публикациях [8, 13–17 и др.]. При этом рассмотрена (в основном для средних многолетних условий) лишь фаза весеннего половодья.

За исключением поверхностного склонового стока, главным образом весеннего [13, 14,

17 и др.], пути миграции биогенов с различными элементами вертикальной гидрологической структуры речных водосборов [5], в том числе с подземным стоком, обычно не анализируются, априори полагая, что вклад их незначительный. Однако в структуре весеннего водного баланса в бассейне Волги за последние десятилетия произошли 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 подземного стока в поступление биогенов в водные объекты существенно возросла. Об этом свидетельствует значительное увеличение подземной составляющей речного стока во многих районах бассейна Волги [3], а также обычно более высокое содержание биогенов в дренируемых грунтовых водах по сравнению с речными водами [7].

В отличие от ранее выполненных исследований, ориентированных на оценку главным образом выноса биогенов с весенним поверхностным склоновым стоком, в данной статье оценивается недостаточно изученный вклад других основных элементов вертикальной

гидрологической структуры речного бассейна – атмосферных осадков, поверхностной и подземной составляющих стока, стока верховодки, с учетом многолетней и внутригодовой их изменчивости.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Река Линда – левый приток Чебоксарского водохранилища, протекает по территории Нижегородской области, устье расположено напротив Сормово (района Нижнего Новгорода). Площадь водосбора – 1681 км², длина реки – 122 км. На водосборной площади преобладают дерново-подзолистые почвы. Территории с лесной растительностью занимают 74.8%, сельскохозяйственные угодья – 24% (в том числе заливные луга – 3%). На долю болот и других водных объектов приходится 1.2%.

При других одинаковых условиях изменения во времени выноса биогенов с речного водосбора тесным образом связаны с изменениями водного стока. За период исчисления нормы (1949–1975 г.) модуль годового стока р. Линды в створе д. Васильково (площадь водосбора 1010 км²) составлял 5.77 л/с · км², поверхностной составляющей, включая верховодку – 3.53 л/с · км² (61%) и подземной 2.24 л/с · км² (39%) (рис. 1). Поверхностной составляющей свойственна более высокая многолетняя изменчивость, коэффициент вариации (C_v) равен 0.38. Гораздо меньше C_v для многолетних коле-

баний подземного стока – 0.13, поскольку он формируется не только осадками текущего года, но и осадками за предшествующие годы (в бассейне Волги преимущественно от 2 до 5 лет [4]).

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСХОДНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Методологической основой исследования служат представления о высотно-пространственной дифференциации речного бассейна, инструментом изучения гидрохимического функционирования элементов которой является воднобиогенный баланс [5]. Использовались также результаты оценки зональной средней многолетней структуры стока половодья, полученные в работе [6] путем привязки данных воднобалансовых и стоковых стационаров к зональной величине стока половодья на реках Русской равнины.

В качестве исходной информации использовались многолетние ряды водного стока по состоянию на 1975 г. – полного речного, поверхностного и подземного. Подземный сток рассчитан путем расчленения гидрографов речного стока по видам питания (см. рис. 1). Поверхностная составляющая стока определена по разности полного речного стока и подземного стока. Сток верховодки рассчитывался по зональной средней многолетней структуре стока половодья, установленной в работе [6].

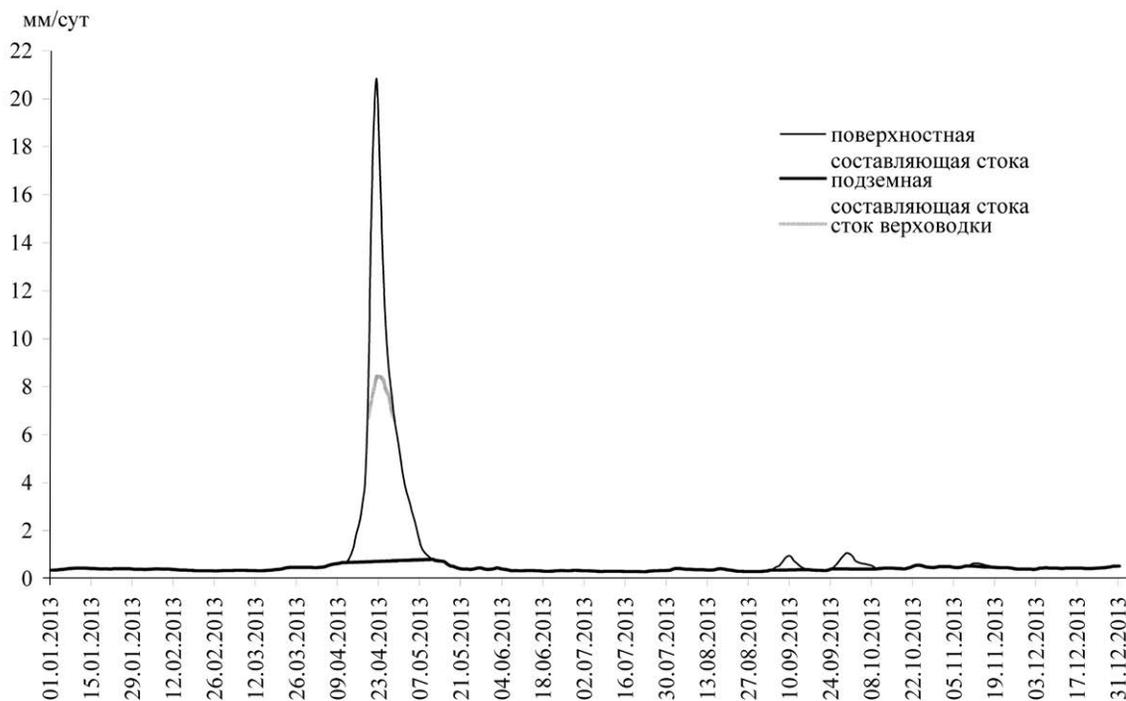


Рис. 1. Гидрограф стока р. Линды у д. Васильково за 2013 г.

Привлекались также данные наблюдений Росгидромета за водным стоком р. Линды за последние годы (2008–2018).

Другой массив исходной информации включает данные Росгидромета по содержанию биогенов в р. Линде в створе с. Васильково по состоянию на 1975 г., а также гидрохимические данные за последние годы (2008–2018), использованные в работах ИГ РАН по проекту “Оздоровление Волги”. Кроме того, привлекались результаты экспедиционных гидрохимических работ ИГ РАН, проведенных в 2018 г.

ВЫНОС БИОГЕНОВ С ВОДОСБОРА р. ЛИНДЫ ЗА ПЕРИОД ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ

Отчетливо выраженной зависимости концентрации биогенов от расхода воды в период половодья не наблюдается. Во многом это обусловлено генетической неоднородностью речного стока – меняющимся от года к году соотношением долей основных его составляющих – поверхностного склонового стока, стока с площади гидрографической сети (участков, расположенных ниже бровок речных долин, оврагов, балок, лощин), стока верховодки и подземного стока, с разной концентрацией биогенов. В связи с отсутствием зависимости концентрации биогенов от расхода воды, а также в связи с тем, что до 1975 г. наблюдения за концентрацией аммонийного азота и фосфатов не проводились, содержание биогенов принято одинаковым для всего периода инструментальных наблюдений и соответствующим природно-климатическим и антропогенным условиям последующего периода (2008–2018 гг.).

Вынос биогенов с основными составляющими водного стока

Элементы структуры речного стока за период половодья рассчитаны для среднеегоголетних условий (по состоянию на середину 1970-х годов) по зональным зависимостям элементов весеннего водного баланса водосбора от речного стока половодья [6]. Если принять среднеегоголетний слой стока половодья р. Линды у д. Васильково ($H_{\text{реч.ст.}} = 101$ мм [11]) за 100%, то поверхностный склоновый сток, доходящий до реки, составляет 20% ($H_{\text{скл.ст.}} = 20.2$ мм), сток с площади гидрографической сети – 23% ($H_{\text{гидр.ст.}} = 23.2$ мм), сток верховодки – 37% ($H_{\text{верх.ст.}} = 37.4$ мм) и подземный сток – 20% ($H_{\text{подз.ст.}} = 20.2$ мм) (табл. 1).

Для расчета выноса биогенов в связи с отсутствием данных экспериментальных наблюдений приняты следующие допущения. Поскольку поверхностный склоновый сток и сток почвенной верховодки близки по величине динамичности,

то отделить их друг от друга без проведения 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 ($C_{\text{скл.ст.}} = C_{\text{верх.ст.}} = C_{\text{пов.ст.}}$). В связи с отсутствием экспериментальных данных концентрация биогенных элементов в талых водах на площади гидрографической сети ($C_{\text{гидр.ст.}}$) принята также по величине такой же, как в поверхностном стоке со склонов ($C_{\text{гидр.ст.}} = C_{\text{пов.ст.}}$).

По данным Росгидромета средняя многолетняя концентрация азота минерального в суммарном речном стоке в половодье ($C_{\text{реч.ст.}}$) составила 1.14 мг/л и фосфора – 0.031 мг/л, а в его подземной составляющей ($C_{\text{подз.ст.}}$) – соответственно 1.804 мг/л и 0.030 мг/л. Содержание биогенов в подземном стоке ($C_{\text{подз.ст.}}$) определено по их концентрации в речном стоке в зимнюю межень. Содержание азота в поверхностной составляющей ($C_{\text{поверх.ст.}}$) равно 0.974 мг/л, фосфора – 0.031 мг/л. Оно определено по уравнению баланса биогенов в речном стоке для периода половодья:

$$C_{\text{реч.ст.}} H_{\text{реч.ст.}} = C_{\text{подз.ст.}} H_{\text{подз.ст.}} + C_{\text{поверх.ст.}} H_{\text{поверх.ст.}}$$

в котором $C_{\text{поверх.ст.}}$ – концентрация азота (фосфора) в поверхностной составляющей речного стока $H_{\text{поверх.ст.}}$ за период половодья. Тогда

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

Из результатов расчета, приведенных в табл. 1, следует, что наибольший вынос азота с водосбора в р. Линда наблюдался со стоком инфильтрационного происхождения (верховодки и подземным) – около 63% от суммарного выноса, с поверхностным стоком (склоновым и с площади гидрографической сети) – 37%. Примерно в таком же соотношении наблюдался вынос фосфора. Лишь с подземным стоком и верховодкой фосфора выносятся меньше (на 6%), чем азота.

Соотношение атмосферной и ландшафтной составляющих в выносе азота

Под атмосферной составляющей понимается поступление азота с осадками из атмосферы, ландшафтной – обогащение азотом талых вод вследствие вымывания из растительности, почвогрунтов в различных ландшафтах.

За анализируемый период данные о содержании азота в снежном покрове на водосборе р. Линды отсутствуют, но есть основания полагать, что оно в многолетнем разрезе по территории южной части лесной зоны изменяется 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 жилой застройке Москвы составила 1.13 мг/л (12 образцов). Если судить, например, по наблюдениям на метеостанции имени Небольсина (31 км к юго-западу от центра Москвы) за 1958–1966 гг. [11], 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 перед началом весеннего половодья в 2018 г. На водосборе р. Линды было отобрано

4 образца снега на лесных участках и 4 образца на полевых. При этом в каждой обследуемой точке снег отбирался по всей его высоте – от поверхности до почвы. На участках с лесной растительностью средняя концентрация азота в снеге составила 0.525 мг/л и на полевых участках – 0.413 мг/л. Средневзвешенное, с учетом ландшафтной структуры водосбора, содержание азота в снеге составило 0.498 мг/л.

Средние многолетние (1936–1975 гг.) запасы воды в снежном покрове на водосборе р. Линды перед весенним половодьем (вместе с осадка-

Таблица 1. Вынос азота и фосфора минерального с водосбора р. Линды за период весеннего половодья с основными элементами водного баланса по состоянию на 1975 г.

Элемент водного стока	Водный сток, мм	Вынос азота		Вынос фосфора	
		кг/км ²	%	кг/км ²	%
Суммарный речной сток	101	115	100	3.13	100
Поверхностный сток с водосбора, в том числе:	43.4	42.3	37	1.36	43
поверхностный склоновый сток	20.2	19.7	17	0.63	20
сток с площади гидрографической сети	23.2	22.6	20	0.73	23
Сток верховодки	37.4	36.4	31	1.17	37
Подземный сток с водосбора	20.2	36.4	32	0.61	20

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

Элемент водного стока	Водный сток, мм	Суммарный вынос азота, кг/км ²	Вынос азота из снега, кг/км ²	Атмосферная составляющая, %	Ландшафтная составляющая, %
Суммарный речной сток	101	115	50.3	44	56
Поверхностный сток с водосбора, в том числе:	43.4	42.3	21.6	51	49
поверхностный склоновый сток	20.2	19.7	10.0	51	49
сток с площади гидрографической сети	23.2	22.6	11.6	51	49
Сток верховодки	37.4	36.4	18.6	51	49
Подземный сток с водосбора	20.2	36.4	10.1	28	72

ми, выпадающими во время половодья) равны 149 мм. В снеге на каждом квадратном километре водосбора содержалось 74.2 кг азота. Из этого количества 21.6 кг азота мигрировало в реку с поверхностным стоком (склоновым и стоком с площади гидрографической сети), составляющим 43.4 мм (см. табл. 1, 2). Отсюда следует, что доля осадков (атмосферной составляющей) в выносе азота с поверхностным стоком (42.3 кг/км^2) составляет 51%. Примерно столько же приходится на долю ландшафтной составляющей (вымывания азота из почвы, растительности, лесной подстилки) – 49%.

В половодье на водосборе р. Линда наблюдался наиболее значительный вертикальный нисходящий поток миграции азота, в 1.7 раза больше, чем в горизонтальном направлении – с поверхностным стоком с водосбора. В процессе инфильтрации талых вод в почву – осадков за вычетом поверхностного стока с водосбора (106 мм), с каждого квадратного километра площади в почвогрунты зоны аэрации поступало 52.8 кг азота, содержащегося в осадках. Часть этого вертикального потока азота (35% от поступившего в почву с осадками) затем перехватывалось стоком верховодки и расходовалось на вынос с водосбора в горизонтальном направлении, который составил 18.6 кг/км^2 . Отсюда следует, что доля осадков (атмосферной составляющей) в суммарном выносе азота со стоком верховодки (36.4 кг/км^2), как и в поверхностном стоке, равна 51%, а на долю ландшафтной составляющей приходится 49% (см. табл. 2). Это соотношение получено при допущении о равенстве концентрации биогенов в верховодке и поверхностном склоновом стоке. Поэтому оно нуждается в дальнейшей корректировке (скорее всего в сторону увеличения).

Осадки, поглощенные почвой в процессе инфильтрации, расходуются затем не только на образование стока верховодки, но и на пополнение запасов влаги в почвогрунтах зоны аэрации и 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. Линдой подземного стока – 20.2 мм, вынос с которым азота осадков составляет 10.1 кг/км^2 . По сравнению с поверхностным стоком и стоком верховодки доля атмосферной составляющей в нем снижается до 28%, а доля ландшафтной составляющей (включаящей и азональные гидрогео-

логические условия), напротив, увеличивается до 72%.

Расчеты для полного речного стока за период половодья (101 мм) показали, что на его формирование расходовалось около 68% от величины стокообразующих осадков (149 мм). При этом с одного квадратного километра водосбора в р. Линду поступало в среднем 50.3 кг содержащегося в осадках азота, доля атмосферной составляющей в миграции биогенов с полным речным стоком (115.1 кг/км^2) составила 44%, а доля ландшафтной составляющей – 56%. Причем около 71% (52.6 кг/км^2) от всего количества азота в снежном покрове (74.2 кг/км^2) с поверхностным стоком (склоновым и стоком с площади гидрографической сети) с водосбора р. Линды не выносилось, а поступало в почвогрунты зоны аэрации и достигало верхних водоносных горизонтов с грунтовыми водами.

Из материалов табл. 2 видно, что не все количество азота в снеге (74.2 кг/км^2) выносилось с водосбора р. Линды с различными составляющими речного стока. Если судить по выносу азота с полным речным стоком (50.3 кг/км^2), в пределах водосбора оставалось 23.9 кг/км^2 . То есть коэффициент доставки азота, содержащегося в снеге на водосборной площади, к замыкающему створу составляет в среднем около 0.7.

Современные тенденции в выносе биогенов в половодье

За последние годы антропогенная нагрузка, как будет показано ниже, существенно снизилась и произошедшие изменения в диффузном выносе биогенов обусловлены, прежде всего, климатическими изменениями. В основном вследствие увеличения осадков холодного периода (по данным метеостанции Нижнего Новгорода – на 35%) сток половодья р. Линда за 2008–2018 гг. увеличился относительно нормы на 27%. При этом подземная (26 мм) и поверхностная (102 мм) составляющие возросли одинаково – на 26–27%.

Исходя из этих изменений в табл. 3 приведена современная структура водного стока и стока биогенов в створе у д. Васильково. Содержание азота в подземном стоке принято по результатам химического анализа проб воды, отобранных в зимнюю межень, и равно 1.804 мг/л. Концентрация азота в суммарном речном стоке составила 1.14 мг/л. Содержание азота в поверхностной его составляющей определено по приведенному выше уравнению воднобиогенного баланса. Оно равно 0.974 мг/л. Концентрация фосфора принята в размере 0.031 мг/л для полного стока и поверхностной

его составляющей и 0.030 мг/л для подземной составляющей.

Расчеты показали, что за последние годы в период весеннего половодья вынос азота и фосфора с поверхностной и подземной составляющих стока увеличился на 25–27%, в том числе нитратов – на 24%. Причем это минимальная величина, обусловленная лишь изменением водности. Если принять во внимание данные о концентрации нитратов в половодье за 1952–1958 гг., приведенные в гидрологических ежегодниках, то их вынос в последние годы увеличился более чем в 2 раза (с 22.7 до 53.5 кг/км²). Концентрация азота нитратов при этом выросла с 0.225 мг/л и стала равной в среднем 0.418 мг/л.

ВЫНОС БИОГЕНОВ С ВОДОСБОРА р. ЛИНДЫ ЗА ГОДОВОЙ ПЕРИОД

По состоянию на 1975 г. величина полного годового речного стока составляла 182 мм, поверхностной составляющей – 111 мм (61% от полного стока), подземного стока – 71 мм (39%). За последние годы (2008–2018) годовой сток р. Линды увеличился до 233 мм (на 28% по отношению к норме), поверхностная составляющая возросла до 119 мм (7%), подземная – до 114 мм (60%). Доля подземной составляющей в годовом речном стоке увеличилась в последние годы и составляет в среднем 49%, то есть стала на 10% больше, чем за период исчисления нормы.

Для оценки поступления биогенов в р. Линда с подземным стоком в связи с отсутствием данных

наблюдений за их содержанием в летне-осеннюю межень в расчетном створе (у д. Васильково) в качестве аналога использовался устьевой участок реки. По данным за 2008–2018 гг. на этом участке отношение концентрации азота минерального в осенне-зимнюю межень к его концентрации в летне-осеннюю межень составляет в среднем 2.40, фосфора – 1.14. Тогда по содержанию биогенов в расчетном створе в осенне-зимнюю межень (азота 1.80 мг/л и фосфора 0.030 мг/л) можно рассчитать их содержание в этом створе в летне-осеннюю межень. Оно составило в расчетном створе 0.75 мг/л азота и 0.026 мг/л фосфора.

Снижение содержания биогенов в р. Линде в летне-осеннюю межень (азота на 58% и фосфора на 13%), по сравнению с меженью холодного периода года, во многом обусловлено активизацией самоочищающих процессов, в том числе потреблением биогенов водной растительностью. Рассчитанная средневзвешенная (с учетом величины подземного стока в холодный период, половодье и теплый период – 48, 19 и 47 мм соответственно) концентрация минерального азота в годовой подземной составляющей стока составила 1.37 мг/л, фосфора 0.028 мг/л.

Среднегодовое содержание биогенов в р. Линде определено также с учетом внутригодового распределения водного стока. Величина полного стока за маловодный сезон холодного периода (с ноября до начала весеннего половодья) составляет 53 мм, в половодье – 128 мм, в межень теплого периода (от окончания по-

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

Элемент водного стока	Водный сток, мм	Вынос азота		Вынос фосфора	
		кг/км ²	изменение, %	кг/км ²	изменение, %
Суммарный речной сток	128	145.9	27	3.94	26
Поверхностный сток с водосбора, в том числе:	55.0	53.5	26	1.70	25
поверхностный склоновый сток	25.6	24.9	26	0.79	25
сток с площади гидрографической сети	29.4	28.6	27	0.91	25
Сток верховодки	47.4	46.2	27	1.47	26
Подземный сток с водосбора	25.6	46.2	27	0.77	26

ловодья по октябрь) – в размере 52 мм. Тогда по данным за последние годы средневзвешенная концентрация азота в годовом речном стоке составляет 1.20 мг/л, фосфора – 0.030 мг/л. Содержание азота в поверхностной составляющей годового стока, определенное по той же расчетной схеме, как и выше для периода половодья, равно 1.037 мг/л, фосфора – 0.032 мг/л.

Выполненные расчеты позволяют дать ориентировочную оценку выноса биогенов по состоянию на 1975 г. с поверхностной и подземной составляющими стока (табл. 4) при условии неизменности их содержания в течение всего анализируемого периода. Из полученных результатов следует, что за год в целом преобладал среднесезонный вынос азота с поверхностной составляющей стока, включая верховодку, (54%) по сравнению с подземным стоком (46%), особенно значительно в отношении фосфора (соответственно 64 и 36%). В годы с экстремально высокой водностью (5% обеспеченности) вынос азота с поверхностной составляющей стока с водосборной площади достигал 62% от выноса с полным стоком, снижаясь в годы с экстремально низкой водностью (95% обеспеченности) до 37%, а в отношении подземного стока – соответственно до 38 и 63%.

Наибольший вынос фосфора с поверхностной составляющей стока наблюдался в годы с экстремально высокой водностью, составляя около 71% от величины выноса с полным стоком (с подземным стоком – 29%). В экстремально маловодные годы вклад поверхностной составляющей стока с водосборной площади существенно снижается – до 47%, однако при этом увеличивается вклад подземного стока, достигая 53%. Результаты расчета выноса биогенов за последние годы приведены в табл. 5. Они показали, что их вынос с водосборной площади р. Линды существенно увеличился (более чем на 25%). Основная причина этого заключается в значительном усилении роли подземного стока в миграции биогенов в речную сеть, величина которого возросла до 114 мм (на 60%). Вклад подземной составляющей в годовой сток азота при этом вырос до 56% (против 46% по состоянию на 1975 г.), а фосфора – до 46% (было 36%). С каждого квадратного километра площади водосбора с подземным стоком в реку в последние годы стало поступать азота в среднем на 33 кг больше, чем с поверхностной составляющей стока. Однако более значимой остается роль поверхностной составляющей стока в миграции фосфора – на 0.61 кг/км² больше, чем с подземным стоком.

нов за последние годы приведены в табл. 5. Они показали, что их вынос с водосборной площади р. Линды существенно увеличился (более чем на 25%). Основная причина этого заключается в значительном усилении роли подземного стока в миграции биогенов в речную сеть, величина которого возросла до 114 мм (на 60%). Вклад подземной составляющей в годовой сток азота при этом вырос до 56% (против 46% по состоянию на 1975 г.), а фосфора – до 46% (было 36%). С каждого квадратного километра площади водосбора с подземным стоком в реку в последние годы стало поступать азота в среднем на 33 кг больше, чем с поверхностной составляющей стока. Однако более значимой остается роль поверхностной составляющей стока в миграции фосфора – на 0.61 кг/км² больше, чем с подземным стоком.

Роль атмосферной составляющей в годовом выносе азота

Если судить по наблюдениям на упомянутой выше метеостанции имени Небольсина за 1958–1966 гг., то величина среднегодовой концентрации минерального азота в осадках составляет 0.97 от величины его концентрации в осадках холодного периода года. Как уже отмечалось, содержание азота в снежном покрове на водосборе р. Линды равно 0.498 мг/л. Определенная с учетом этого коэффициента среднегодовая концентрация азота в осадках составляет 0.483 мг/л. Она мало отличается от таковой (0.464 мг/л) на ближайшей станции фоновой мониторинга Росгидромета в Приокско-Террасном биосферном заповеднике [10].

Рассчитанная по данным метеостанции Нижнего Новгорода средняя годовая величина

Таблица 4. Вынос биогенов с водосбора р. Линды за год в целом по состоянию на 1975 г.

Элемент водного стока	Водный сток, мм	Вынос азота, кг/км ²			Вынос фосфора, кг/км ²		
		в среднем	5% обеспеченности	95% обеспеченности	в среднем	5% обеспеченности	95% обеспеченности
Суммарный речной сток	182	212.4	309.2	120.1	5.54	8.31	2.92
Поверхностная составляющая стока (включая верховодку)	111	115.1	191.7	44.5	3.55	5.91	1.37
Подземный сток с водосбора	71	97.3	117.5	75.6	1.99	2.40	1.55

Таблица 5. Вынос биогенов с водосбора р. Линды за год в целом в среднем за 2008–2018 гг. и изменение по сравнению с периодом исчисления нормы

Элемент водного стока	Водный сток			Вынос азота			Вынос фосфора		
	мм	%	изменение, %	кг/км ²	%	изменение, %	кг/км ²	%	изменение, %
Суммарный речной сток	233	100	28	279.6	100	32	6.99	100	26
Поверхностная составляющая стока (включая верховодку)	119	51	7	123.4	44	7	3.80	54	7
Подземный сток с водосбора	114	49	60	156.2	56	60	3.19	46	60

Таблица 6. Структура водного стока с водосбора р. Линды и вынос биогенов за маловодный период года (2008–2018 гг.)

Элемент водного стока	Водный сток		Вынос азота		Вынос фосфора	
	мм	%	кг/км ²	%	кг/км ²	%
Суммарный речной сток	105	100	133.7	100	3.05	100
Поверхностная составляющая стока	16.6	16	23.7	18	0.63	21
Подземный сток с водосбора	88.4	84	110	82	2.42	79

Таблица 7. Основные составляющие годового биогенного баланса бассейна р. Линды

Биогенные вещества	Поступление						Вынос	
	Городское население	Сельское население	Животноводство	Минеральные удобрения	В сумме от всех видов нагрузок	Атмосферные осадки (климатический фон)	р. Линда— д. Васильково (1010 км ²)	р. Линда — устье (1681 км ²)
Азот минеральный	42	20	232	80	374	325	280	212
Фосфор минеральный	7	3	135	18	163	20	7	7

осадков за последние годы (2008–2016) равна 673 мм. Тогда в среднем за год поступление азота минерального с осадками, выпадающими на поверхность водосбора р. Линды, составляет около 325 кг/км², что на 45 кг/км² больше, чем вынос азота с речным стоком – 280 кг/км². Таким образом, современный годовой баланс минерального азота в системе “водосбор – р. Линда” при учете даже одного их источника – осадков, положительный. Этот вывод подтверждается также тем, что речь идет лишь 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 от поступившего на водосбор с осадками азота выносятся с поверхностной его составляющей. Коэффициент поверхностной составляющей стока с водосборной площади (доля осадков, расходуемых на ее образование) в последние годы составляет в среднем 0.18 от средней годовой суммы осадков. С учетом этого коэффициента поверхностным путем в реку поступает лишь 58.5 кг/км². Наиболее значительный поток азота атмосферного происхождения (266 кг/км², 82% от всего азота в осадках) наблюдается в процессе вертикальной фильтрации в почвогрунты зоны аэрации. Причем до реки с подземным стоком доходит 59% от этого количества азота (156 кг/км²), а 41% (110 кг/км²) остается в зоне аэрации и верхних водоносных горизонтах.

Вынос биогенов с водосбора р. Линды за маловодный период года

Оценка современного поступления биогенов в реку с водным стоком с водосборной площади выполнена по данным табл. 3 и 5. Из результатов расчетов, приведенных в табл. 6, 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. По величине он близок к выносу в половодье, составляя 48% от величины выноса азота за весь годовой период и 44% в отношении выноса фосфора. Причем в маловодный период года миграция биогенов в речную сеть осуществляется главным образом с подземным стоком, вклад которого в вынос с полным речным стоком составляет в этот период около 80%.

Антропогенная составляющая в выносе биогенов в Чебоксарское водохранилище с водосбора р. Линды

Вклад сточных вод в суммарный вынос биогенов с водосбора р. Линды в последние годы небольшой и не превышает 1%. По сравнению

с этой сосредоточенной нагрузкой значительно преобладает диффузный вынос биогенов с поверхностным и подземным стоком.

В табл. 7 приведены данные Е.А. Кашутиной об основных видах современной антропогенной биогенной нагрузки, отнесенной к единице площади всего водосбора р. Линды (1681 км²), которая существенно меньше той, которая была в 1970–1980 гг. Для сравнения антропогенной нагрузки с климатическим фоном в последней колонке таблицы дана величина поступления биогенов с атмосферными осадками. При этом поступление минерального фосфора оценено по его средней концентрации в осадках 0.030 мг/л, взятой из работы [12], что практически совпадает с нашими результатами, полученными при экспедиционном обследовании снежного покрова в бассейне Линды – 0.033 мг/л.

Из результатов расчетов, приведенных в табл. 7 следует, что современная суммарная антропогенная нагрузка на бассейн Линды особенно высока по фосфору, превышая в 8 раз климатический фон, обусловленный поступлением фосфора с осадками. Менее существенно превышение по азоту – 1.2 раза.

К наиболее существенным источникам антропогенного поступления биогенов на водосборную площадь р. Линды относится сельское хозяйство – поступление биогенов от животноводства и в результате внесения минеральных удобрений. Сельскохозяйственная нагрузка составляет от суммарного антропогенного поступления 83% по азоту и 94% по фосфору. Причем в последние годы биогенная нагрузка от животноводства преобладает – по азоту почти в 3 раза, а по фосфору еще больше – в 7.5 раза.

Во многом такая ситуация обусловлена сокращением посевных площадей (по сравнению с 1990 г. на 44%) и низким уровнем применения удобрений, составляющим в последние годы в Нижегородской области по азоту лишь 41% от его максимальной величины 1990 г., еще меньше по фосфору – 25% [1, 9] (рис. 2). Весьма значительно снизилось также использование органических удобрений. Оно составило в 2017 г. 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 годы оказался не компенсированным 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 р. Линды, напротив, оно, как отмечалось выше, даже выросло. Произошло это главным образом за счет возросшей роли

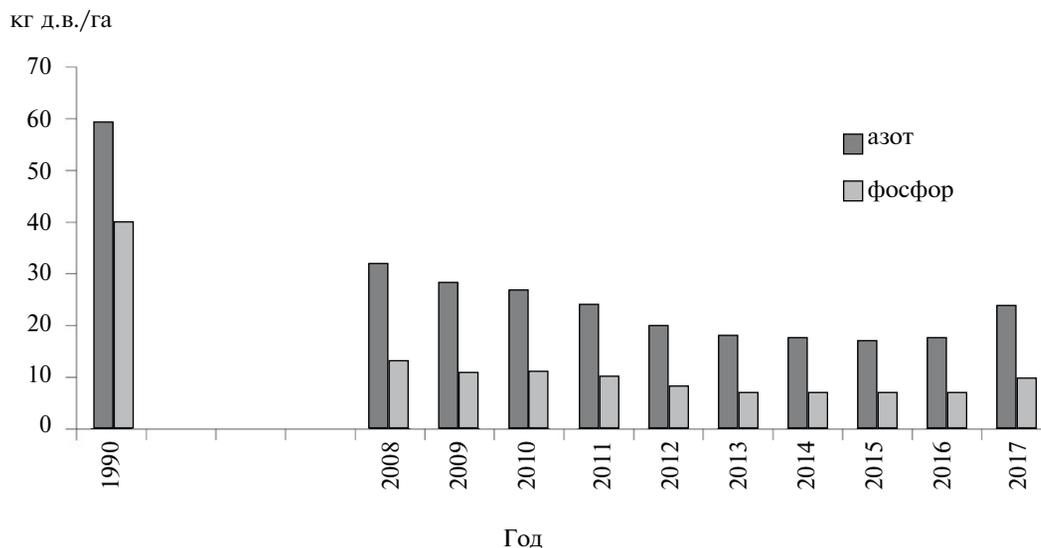


Рис. 2. Динамика внесения азота и фосфора на посевной площади Нижегородской области.

изменившихся гидроклиматических условий, особенно увеличения стока инфильтрационного происхождения. Отсюда следует, что применение минеральных удобрений в последние годы не может рассматриваться в качестве основной причины биогенного загрязнения местных водных ресурсов.

Несмотря на то что баланс азота и фосфора на пашне в последние годы отрицательный, для всей водосборной площади р. Линды он все-таки положительный (см. табл. 7), поскольку пашней занято лишь около 10% этой площади. Причем баланс становится положительным при учете поступления на водосбор биогенов с одними лишь осадками или лишь в результате антропогенной нагрузки. С годовым речным стоком в створе у д. Васильково выносятся лишь 40% от суммарного (антропогенного и с осадками) поступления на водосбор азота и около 4% фосфора.

На участке р. Линды от д. Васильково до устья процессы самоочищения становятся интенсивнее, в том числе вследствие дренирования более глубоко залегающих водоносных горизонтов с меньшим содержанием биогенов. В результате в Чебоксарское водохранилище со стоком р. Линды мигрирует лишь 30% азота и 4% фосфора от суммарного их поступления (антропогенного и с осадками) на водосборную площадь.

ВЫВОДЫ

1. В рамках настоящих исследований разработаны новые подходы и методы к оценке влияния вертикальной гидрологической структуры речных бассейнов на вынос биогенных веществ в речную сеть. На примере бассейна р. Линды оценен вклад атмосферных осадков, поверхност-

ной и подземной составляющих стока, стока верховодки в формирование выноса биогенов с речных водосборов в южной части лесной зоны Русской равнины. Расчеты показали, что вынос биогенов с различными элементами водного стока в последние десятилетия существенно изменяется в многолетнем плане и в зависимости от сезона года.

2. Установлено, что по состоянию на 1975 г. в период половодья наибольший вынос биогенных веществ с водосборной площади р. Линды наблюдался со стоком инфильтрационного происхождения (верховодки и подземным) — около 63% от суммарного выноса азота и 57% фосфора. Вследствие изменившихся гидроклиматических условий за последние годы вынос азота и фосфора с поверхностным и подземным стоками с водосбора р. Линды в половодье увеличился на 25–27%, в том числе нитратов — на 24%.

3. Оценено соотношение атмосферной и ландшафтной составляющих в выносе азота в период весеннего половодья. На долю азота атмосферных осадков в его выносе с полным речным стоком приходится 44%, а на долю ландшафтной составляющей — 56%.

4. Определен вынос биогенов с водосбора р. Линды за годовой период. По состоянию на 1975 г. вынос азота с поверхностной составляющей стока, включая верховодку, преобладал и составлял 54% (фосфора — 64%), на долю подземного стока приходилось 46% (фосфора — 36%). В последние годы вынос биогенов существенно увеличился (более чем на 25%). Вклад подземной составляющей в годовой сток азота при этом вырос до 56%, а фосфора — до 46%.

FUNDING

The work was performed within the framework of the state-ordered research theme of the Institute of Geography RAS, no. 0148-2019-0007.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to express gratitude to S.V. Yasinskii, E.A. Kashutina and A.N. Narykov for the data prepared during the implementation of the project “Volga Recovery” and used in this article.

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. *Барabanов 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. 66–72.
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. 103–110.
8. *Назаров Н.А.* Оценки эрозионного смыва почв и выноса биогенных элементов с поверхностным стоком талых и дождевых вод в речном бассейне // Водные ресурсы. 1996. Т. 23. № 6. С. 645–652.
9. Нижегородская область в цифрах. 2017. / Крат. 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. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 10. Верхне-Волжский район. Кн. 1. М.: Московское отделение Гидрометеоздата, 1973. 477 с.

5. Годовой баланс минерального азота в системе “водосбор – р. Линда” при учете даже одного его источника – осадков, положителен. Наиболее значительный поток азота атмосферного происхождения (266 кг/км², 82% от всего азота в осадках) наблюдается в процессе вертикальной фильтрации в почвогрунты зоны аэрации.

6. Вынос биогенов с водосбора р. Линды за маловодный период года, главным образом за счет подземного стока, весьма значительный и близок к выносу в половодье, составляя 48% от величины выноса азота за весь годовой период и 44% в отношении выноса фосфора.

7. В последние годы преобладает рассредоточенный по водосборной площади диффузный вынос биогенов с поверхностным и подземным стоком природного происхождения. Значительное сокращение посевной площади, поголовья скота и применения удобрений, содержания азота и фосфора в почве пахотных земель не привело к снижению выноса биогенов с водосбора р. Линды. Напротив, оно выросло за счет возросшей роли изменившихся гидроклиматических условий, особенно увеличения стока инфильтрационного происхождения (подземного и верховодки).

8. Низкий уровень применения минеральных удобрений в последние годы (по азоту лишь 41% от его максимальной величины 1990 г., фосфору – 25%) не может рассматриваться в качестве существенной причины биогенного загрязнения местных водных ресурсов. На посевной площади внесение минеральных удобрений составляет от поступления биогенов с атмосферными осадками лишь около 20% по азоту и 90% по фосфору, что привело к отрицательному балансу содержания азота и фосфора на пашне.

10. Полученные результаты носят ориентировочный характер, в дальнейшем могут быть уточнены и детализированы. В частности, требует специального рассмотрения неучтенное поступление биогенов в результате распашки территории, жизнедеятельности растений (древесных и травянистых, дикорастущих и сельскохозяйственных), строительства и эксплуатации дорожной сети и др.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках госзадания № 0148-2019-0007 ИГ РАН.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность С.В. Ясинскому, Е.А. Кашутиной и А.Н. Нарыкову за данные, подготовленные при реализации проекта “Оздоровление Волги” и использованные в данной статье.

12. Савенко В.С., Савенко А.В. Геохимия фосфора в глобальном гидрологическом цикле. М.: ГЕОС, 2007. 248 с.
13. Хрисанов Н.И., Осипов Г.К. Управление эвтрофированием водоемов. СПб.: Гидрометеоздат, 1993. 279 с.
14. 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.
15. Чуйн Г.А., Бойченко З.А., Тур О.П. Методические рекомендации по оценке выноса биогенных веществ поверхностным стоком. М.: ВАСХНИЛ, 1985. 32 с.
16. Шилькрот Г.С., Ясинский С.В. Пространственно-временная изменчивость потока биогенных элементов и качества воды малой реки // Водные ресурсы. 2002. Т. 29. № 3. С. 343–349.
17. Ясинский С.В., Гуров Ф.Н. Метод оценки характеристик диффузного загрязнения малых рек на основе ландшафтно-гидрологического подхода (на примере р. Истры) // Водное хозяйство России. 2006. № 2. С. 41–71.
6. Koronkevich N.I. *Vodnyi balans Russkoi ravniny i ego antropogennye izmeneniya* [Water Balance of the Russian Plain and its Anthropogenic Changes]. Moscow: Nauka Publ., 1990. 204 p.
7. Koronkevich N.I., Dolgov S.V. The runoff from a watershed as a source of a diffuse pollution of rivers. *Voda i Ekologiya: Probl. i Resheniya*, 2017, no. 4, pp. 103–110. (In Russ.).
8. Nazarov N.A. Estimations of soil erosion washout and removal of nutrients with surface runoff of thawed and rainwater in the river basin. *Vodn. Resur.*, 1996, vol. 23, no. 6, pp. 645–652. (In Russ.).
9. *Nizhegorodskaya oblast' v tsifrahk. 2017: Krat. stat. sb.* [Nizhny Novgorod Region in Numbers. 2017: Short Stat. Digest]. Nizhny Novgorod: Nizhegorodstat, 2017. 375 p.
10. *Obzor sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchei sredy v Rossiiskoi Federatsii za 2016 god* [Overview of the State and Pollution of the Environment in the Russian Federation for 2016]. Moscow: Rosgidromet, 2017. 216 p.
11. *Resursy poverhnostnykh vod SSSR* [Surface Water Resources of the USSR], vol. 10: *Verkhne-Volzhskii raion* [Verkhne-Volzhsky District]. Moscow: Gidrometeoizdat Publ., 1973, book 1. 477 p.
12. Savenko V.S., Savenko A.V. *Geokhimiya fosfora v global'nom gidrologicheskom tsikle* [Phosphorus Geochemistry in the Global Hydrological Cycle]. Moscow: GEOS Publ., 2007. 248 p.

REFERENCES

1. Abramov A.I., Krymova E.A. State of fertility of arable land in the Nizhny Novgorod region. In *Aktual'nye Probl. Zemledeliya Evro-Severo-Vostoka RF* [Actual Problems of Agriculture in Euro-North-East of Russia]. Nizhny Novgorod: Dyatlovy Gory Publ., 2014, pp. 15–23. (In Russ.).
2. Barabanov A.T., Dolgov S.V., Koronkevich N.I., Panov V.I., Petel'ko A.I. Surface runoff and snowmelt infiltration into the soil on plowlands in the forest-steppe and steppe zones of the East European plain. *Eurasian Soil Sci.*, 2018, vol. 51, no. 1, pp. 66–72.
3. Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Kireeva M.B., Rets E.P., Safronova T.I., Bugrov A.A., Telegina A.A., Telegina E.A. *Sovremennye resursy podzemnykh i poverkhnostnykh vod evropeiskoi chasti Rossii* [Modern Resources of Underground and Surface Waters of the European Part of Russia]. Moscow: GEOS Publ., 2015. 320 p.
4. Dolgov S.V. Influence of meteorological factors on the long-term variability of groundwater flow in the rivers of the Volga Basin. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 1998, no. 1, pp. 102–110. (In Russ.).
5. Dolgov S.V., Koronkevich N.I. Hydrological layers of the plain territory. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2010, no. 1, pp. 7–25. (In Russ.).
13. Khrisanov N.I., Osipov G.K. *Upravlenie evtrofirovaniem vodoemov* [Management of Water Bodies Eutrophication]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat Publ., 1993. 279 p.
14. Chernyshev E.P., Barymova N.A., Ivanova N.B., Kitaev L.M. Spatio-temporal differentiation of hydrological processes and the associated material exchange in the system “Catchment—River”. In *Geografo-gidrologicheskie issledovaniya* [Geo-Hydrological Studies]. Moscow: IG РАН, MC GO RF, 1992, pp. 4–26.
15. Chuyan G.A., Boichenko Z.A., Tur O.P. *Metodicheskie rekomendatsii po otsenke vynosa biogennykh veshchestv poverkhnostnym stokom* [Guidelines for Assessing the Removal of Nutrients by Surface Runoff]. Moscow: VASKHNIL, 1985. 32 p.
16. Shilkrot G.S., Yasinskii S.V. Spatio-temporal variability of the nutrients flow and water quality of a small river. *Vodn. Resur.*, 2002, vol. 29, no. 3, pp. 343–349. (In Russ.).
17. Yasinskii S.V., Gurov F.N. Method for assessing the characteristics of diffuse pollution of small rivers based on the landscape-hydrological approach (on the example of the Istra river). *Vodn. Khozyaistvo Rossii*, 2006, no. 2, pp. 41–71. (In Russ.).

Modern Changes of Nutrients' Removal into the Southern Forest Zone Rivers of Volga Basin

S. V. Dolgov* and N. I. Koronkevich**

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

**e-mail: svdolgov1978@yandex.ru*

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

Received December 28, 2018; revised December 28, 2018; accepted May 30, 2019

The article analyzes on the example of the Linda river basin, the tributary of the Cheboksary reservoir, contribution of the main elements of its vertical hydrological structure (precipitation, surface and underground runoff, “verhovodka” runoff) in the formation of nutrients' removal from rivers' catchments in the southern forest zone of the Russian plain. The removal of nutrients from the Linda river catchment area with various elements of water flow for the year, its high-water and low-water periods was calculated. It is shown that due to the increased role of the changed hydro-climatic conditions, especially due to the increased flow of infiltration origin (underground and “verhovodka” runoff), the nutrients' removal has increased in recent years. Anthropogenic component of nutrient leaching into the Cheboksary reservoir from Linda river catchment was identified. It is reduced in recent decades by the background dispersion in the catchment, diffuse nutrients leaching to surface and underground flow of natural origin.

Keywords: nutrient balance in the river basin, precipitation, surface and underground components of the river flow, intra-annual and long-term variability.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S2587-55662019543-55>