

ЗАКОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ БАЛАНСА АЗОТА И ФОСФОРА НА РЕЧНЫХ ВОДОСБОРАХ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЛЕСОСТЕПИ РУССКОЙ РАВНИНЫ В 1990–2020 гг.

© 2021 г. С. В. Долгов^а, *, В. О. Швыдкий^б, Е. В. Штамм^с

^аИнститут географии РАН, Москва, Россия

^бИнститут биохимической физики РАН, Москва, Россия

^сФИЦ химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва, Россия

*e-mail: svdolgov1978@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.10.2020 г.

После доработки 21.02.2021 г.

Принята к публикации 02.03.2021 г.

На основе географо-гидрологического метода и представления о гидрологической ярусности равнинных речных бассейнов выявлены современные особенности формирования водно-биогенного баланса в лесостепной зоне Русской равнины. Определено влияние основных элементов ландшафтно-гидрологической структуры речных бассейнов на содержание биогенов в поверхностном склоновом стоке. Показано, что увеличения поверхностного склонового стока не произошло, несмотря на рост площади урбанизированных территорий, а также площади выведенных из севооборотов сельскохозяйственных угодий с более высоким коэффициентом стока, чем на полях с зяблевой вспашкой. Климатические изменения привели к противоположной тенденции — сокращению стока, с начала 1980-х годов на 69% на уплотненной почве и на 77% на рыхлой пашне. Роль поверхностной составляющей стока в миграции биогенных веществ значительно снизилась, а подземной составляющей, напротив, выросла. С поверхностным стоком с речных водосборов выносятся 41% азота и 48% фосфора от величины годового выноса с полным стоком, с подземным стоком — соответственно 59 и 52%. Приведены результаты расчета внутригодового распределения выноса минерального азота и фосфора с поверхностным и подземным стоком с речных водосборов. Выполнена ориентировочная оценка годового водно-биогенного баланса территории Курской области, сложившегося в последнее десятилетие. Показано, что доля природных факторов в приходной его части (по азоту 24%, по фосфору — 6%) значительно меньше доли антропогенных факторов.

Ключевые слова: речные бассейны, баланс азота и фосфора, антропогенные и природные факторы, поверхностная и подземная составляющие стока, Курская область

DOI: 10.31857/S2587556621030031

ВВЕДЕНИЕ

Отсутствие детальных знаний о генезисе негативной гидроэкологической ситуации, сложившейся в лесостепной зоне Русской равнины, в том числе вследствие неконтролируемого диффузного (рассредоточенного по территории) поступления в реки и водохранилища биогенных элементов — соединений азота и фосфора, существенно осложняет разработку эффективных водоохраных мер.

Оценке выноса биогенных элементов в водные объекты с их водосборов посвящено большое число исследований. Вместе с тем, в них не в полной мере учтены существенные современные изменения климата и хозяйственной деятельности. Кроме того, рассмотрена в основном лишь фаза весеннего половодья (Назаров, 1996; Хрисанов,

Осипов, 1993; Чернышев и др., 1992; Шилькрот, Ясинский, 2002; Ясинский, Гуров, 2006 и др.), когда поступление в речную сеть биогенных элементов осуществляется преимущественно с поверхностным склоновым стоком. Другие пути их миграции с водосборов, в том числе с подземным стоком, обычно не анализируются, априори полагается, что их вклад незначительный. Однако неучитываемая часть выноса с подземной составляющей стока в остальные сезоны может составлять значительную величину, особенно в связи с изменением климата (Долгов, Коронкевич, 2019).

В настоящее время остаются недостаточно изученными не только пути миграции биогенных элементов в водные объекты, но и вклад различных природных и антропогенных факторов в их поступление на водосборную площадь и вынос в гидрографическую сеть, а также происходящие за

последние годы (начиная с 1990-х годов) изменения. Кроме того, состояние экосистем водных объектов недостаточно детально увязывается с изменениями ландшафтной структуры их водосборов. Более полные знания о закономерностях вещественного обмена вод в системах “бассейн—река” могут быть получены исходя из представления о гидрологической ярусности речных бассейнов (Долгов, Коронкевич, 2010).

Цель исследования заключается в оценке роли современных изменений климатических и антропогенных факторов в формировании водно-биогенного баланса речных водосборов лесостепной зоны, в том числе в оценке весьма важной в экологическом отношении его составляющей — стока азота и фосфора.

Особенно актуальна такая задача для регионов, испытывающих интенсивную антропогенную нагрузку на водные объекты, в том числе со стороны сельского и водного хозяйства. К их числу относится Курская область, обладающая небольшими ресурсами местного стока, на ее примере выполнен основной объем данного исследования.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ИСХОДНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Методологической основой исследования служит географо-гидрологический метод, дополненный представлением о гидрологической ярусности речного бассейна, элементы которой (атмосферный приземный слой, растительность, поверхностный слой почвы, зоны аэрации и насыщения) по-разному трансформируют осадки в сток и по-разному изменяют их химический состав. Инструментом изучения вертикального гидрологического устройства территории служит элементная структура водного баланса (Коронкевич, 1990) и тесно связанного с ним водно-биогенного баланса (Долгов, Коронкевич, 2010, 2019).

Непосредственные наблюдения за элементами водно-биогенного баланса речных водосборов до настоящего времени не проводятся. Поэтому использовались опубликованные данные об отдельных источниках поступления биогенных элементов (Закруткин и др., 2004; Обзор..., 2016; Родин, Базилевич, 1965; Родин и др., 1968; Семькин и др., 2019; Хрисанов, Осипов, 1993), анализировались результаты экспедиционных работ ИГ РАН.

В качестве исходной информации также использовались многолетние ряды наблюдений Росгидромета за водным стоком в 11 створах на реках Курской области. Анализировались как полный речной сток, так и поверхностная и подземная его составляющие. Подземный сток рассчитан путем расчленения гидрографов речного

стока по видам питания. Поверхностная составляющая стока (включающая сток верховодки) определена по разности полного речного стока и подземного стока. В расчетах биогенного стока роль этих составляющих оценивалась как в отношении величины их водного стока, так и относительно содержания в них минерального азота и фосфора.

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

$$= \frac{C_{\text{поверх.ст.}} = (C_{\text{реч.ст.}} \cdot H_{\text{реч.ст.}} - C_{\text{подз.ст.}} \cdot H_{\text{подз.ст.}}) / H_{\text{поверх.ст.}}, \quad (1)$$

в котором $C_{\text{поверх.ст.}}$ — концентрация азота (фосфора) в поверхностной составляющей стока $H_{\text{поверх.ст.}}$, $C_{\text{подз.ст.}}$ — концентрация азота (фосфора) в подземной составляющей $H_{\text{подз.ст.}}$, рассчитанная по их содержанию в реках в межень холодного периода, $C_{\text{реч.ст.}}$ — концентрация азота (фосфора) в полном речном стоке $H_{\text{реч.ст.}}$.

Для оценки выноса азота и фосфора с водным стоком обобщены гидрохимические данные Росгидромета за годы разной водности (1991, 1995, 1996 гг.) и результаты экспедиционного обследования рек (без учета р. Сейм). Средняя концентрация общего минерального азота и фосфора в речных водах Курской области в период половодья наибольшая — 1.81 и 0.16 мг/л соответственно. В маловодный сезон теплого периода она значительно снижается — до 0.91 и 0.13 мг/л соответственно, концентрация возрастает затем в маловодный сезон холодного периода до 1.66 и 0.12 мг/л.

Недостающая информация восполнена результатами химического анализа проб атмосферных осадков, речных и грунтовых вод, отобранных в ходе экспедиционных работ ИГ РАН в 1997, 1998, 2017, 2018, 2020 гг. в половодье, летне-осеннюю и зимнюю межень. В связи с недостаточностью режимных наблюдений Росгидромета при экспедиционном обследовании особое внимание уделено малым рекам, находящимся в условиях интенсивного, преимущественно сельскохозяйственного воздействия.

Возможность обогащения биогенными элементами атмосферных осадков в различных ландшафтах оценивалась по водным вытяжкам из образцов растений, почв и грунтов зоны аэрации (при фиксированных параметрах: соотношении их твердой фазы с дистиллированной водой 1 : 100, 30-минутном контакте и температуре 25°C). Полученные в лабораторных условиях данные характеризуют возможную (потенциальную) активность поверхности почвы насыщать биогенными элементами атмосферные осадки. В реальных условиях содержание биогенов в образующихся по-

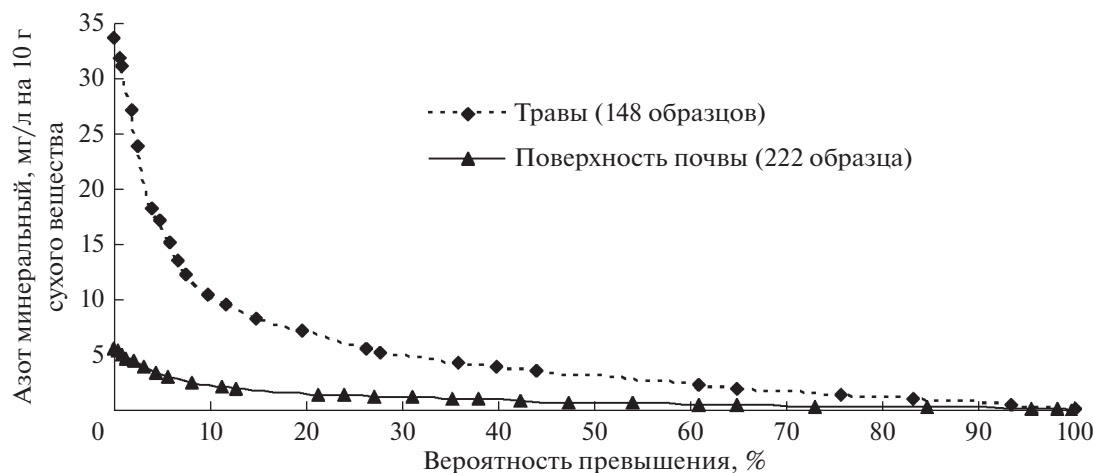


Рис. 1. Содержание минерального азота в водных вытяжках из трав и поверхности почв в бассейне Дона.

верхностно-почвенных водах в значительной мере зависит от сочетания этих параметров.

Химический анализ водных вытяжек, проб поверхностных и подземных вод выполнен с помощью портативного спектрофотометра DR/2010 фирмы «НАСН» во время экспедиционных работ и в Институте биохимической физики РАН (ИБХФ РАН).

Содержание биогенных элементов определялось фотометрическим методом в соответствии с ГОСТ 33045–2014: ионов аммония с использованием реактива Несслера, нитритных ионов с использованием реактива Грисса. Концентрация нитратных ионов определялась с предварительным восстановлением кадмием до нитритов по методике, аттестованной ВНИИМС (свидетельство об аттестации № 16-09 от 4 мая 2009 г.). Содержание минерального фосфора оценивалось по методу определения ортофосфатов и полифосфатов с использованием аскорбиновой кислоты (ГОСТ 18309-2014).

Значительный объем исходной информации представлен результатами многолетних наблюдений Росгидромета за температурой воздуха и атмосферными осадками (данные ВНИИГМИ — МЦД), а также материалами наблюдений за поверхностным склоновым стоком на Новосильском стационаре ВНИАЛМИ (Барабанов, 2017; Барабанов и др., 2018). Кроме того, анализировались данные Росреестра и Росстата об использовании земельного фонда Курской области.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Формирование водно-биогенного баланса речных водосборов тесным образом связано с их ландшафтной неоднородностью не только в плане, но и в вертикальном направлении, не менее важно

для изучения источников поступления и путей миграции биогенных элементов в речную сеть.

Особенности гидрохимического функционирования элементов гидрологической ярусности речных бассейнов. Расчеты показали, что уже с *атмосферными осадками* на речные водосборы привносится весьма существенное количество биогенов. Если судить по репрезентативным наблюдениям метеостанции им. Небольсина (31 км к юго-западу от центра Москвы) за 1958–1966 гг., то величина среднегодовой концентрации минерального азота в осадках составляет 1.05 мг/л (Ресурсы..., 1973). Тогда величина поступления биогенов с годовыми осадками оказывается достаточно высокой (азота минерального — 641 кг/км²).

Ежегодно возобновляемым источником поступления биогенов на речные водосборы является также *растительность*, в водных вытяжках из которой минерального азота и фосфора содержится значительно больше, чем из поверхностного слоя почв (рис. 1). Существенное влияние на миграцию биогенных элементов растительность оказывает даже в вегетационный период, в который осадки насыщаются минеральным азотом и фосфором при вымывании их не только из мертвых тканей растений (опада, подстилки), но и живых. В дождевом смыве из крон деревьев биогенов содержится нередко в разы больше, чем в самих осадках (табл. 1).

Важную роль в миграции биогенных веществ в реки с их водосборов играет *поверхностный слой почв*. В нем формируются поверхностный склоновый сток и инфильтрация атмосферных осадков, аккумулируются биогенные элементы, поступающие в результате их вымывания осадками из растений и минерализации остатков наземной и подземной частей растительности, почвенных водорослей, а также за счет фиксации азота из атмосферы почвенными микроорганизмами.

Таблица 1. Минерализация и содержание биогенных веществ в элементах водного баланса в бассейне р. Бузулук (г. Новоаннинский, Волгоградская область, 01.09.2017 г.), мг/л

Элемент водного баланса	Минерализация	Аммонийный азот ($N-NH_4^+$)	Нитраты ($N-NO_3^-$)	Нитриты ($N-NO_2^-$)	Азот минеральный	Фосфаты ($P-PO_4^{3-}$)
Дождевой сток с шиферной кровли	27	1.28	0.1	0.04	1.42	0.02
Дождевой смыв с кроны яблони	57	1.19	2.0	0.03	3.22	0.14
Поверхностный сток по грунтовой дороге	74	1.29	7.2	0.36	8.85	1.20
Сток грунтовых вод (колодец, глубина 12 м)	1363	0.13	15.5	0.77	16.4	0.22
Речной сток (р. Бузулук – г. Новоаннинский)	1720	0.28	1.4	0.01	1.69	0.43

Кроме того, в этом слое накапливаются биогены антропогенного происхождения, поступающие из производственных и бытовых отходов, мусорных свалок, минеральных удобрений и т.д.

Часть биогенных элементов вымывается из поверхностного слоя почвы с поверхностным склоновым стоком, другая часть мигрирует с фильтрующей влагой в почвогрунты *зоны аэрации*. Достигая водоносных горизонтов в *зоне насыщения*, биогены могут накапливаться вследствие низкой скорости водообмена. По этой причине в грунтовых водах нередко обнаруживается более высокое содержание биогенных веществ, чем в речных водах – в среднем на 35–40% (рис. 2). В летне-осеннюю межень такой ситуации также способствует активное потребление биогенных элементов при-

брежной водной растительностью и речным фитопланктоном.

Миграция биогенных элементов, особенно нитратов, в грунтовые воды возможна даже при большой мощности зоны аэрации (более 3–5 м). Это связано с тем, что, просачиваясь ниже 3–5 м от поверхности земли, осадки уже практически не испаряются и могут достигать грунтовых вод (Долгов, Коронкевич, 1999). О возможности миграции нитратов на значительную глубину свидетельствуют результаты полевых исследований в степной зоне (Агроценозы..., 1984; Закруткин и др., 2004). Вероятна также миграция фосфора минерального, на это указывает, например, его наличие в водных вытяжках из суглинистых почво-

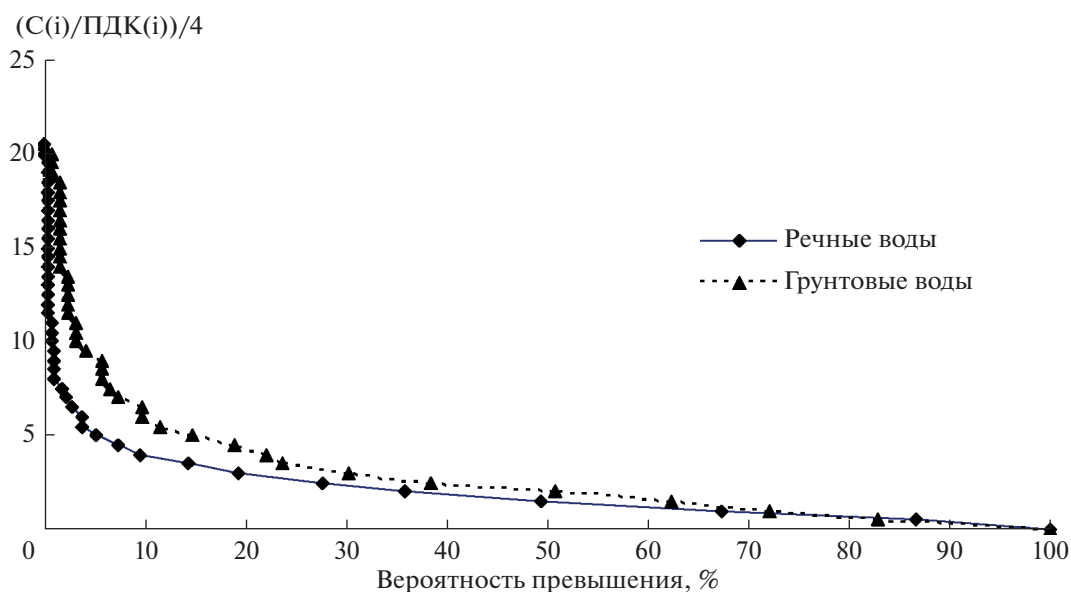


Рис. 2. Содержание биогенов в речных и грунтовых водах Донского бассейна в летнюю межень 1993–2004 гг.
Примечание: $(C(i)/ПДК(i))/4$ – среднее отношение концентрации нитратов, нитритов, аммония и фосфатов к их предельно допустимой концентрации.

грунтов зоны аэрации на водосборе р. Бузулук в слое от 0 до 5 м (рис. 3).

Таким образом, каждый из вышеперечисленных слоев вертикальной гидрологической структуры речного бассейна обладает специфическими особенностями гидрохимического функционирования. Кроме того, свои коррективы вносит ландшафтная структура речного водосбора, обуславливающая пространственную неоднородность миграции биогенов с водным стоком, прежде всего, с поверхностной его составляющей.

Роль ландшафтной структуры территории в миграции биогенов с поверхностным склоновым стоком. На рассматриваемой территории преобладают сельскохозяйственные угодья. Полями с рыхлой к началу половодья почвой (зябью и черным паром) занято 45% площади Курской области. Доля угодий с уплотненной почвой (озимые, многолетние травы, пастбища, залежи) — 26.7%. На земли лесного фонда и лесные насаждения, не входящие в лесной фонд, приходится 9.6%, на урбанизированные территории с высоким коэффициентом стока (земли застройки, промышленности, под дорогами) — 5.9%, на гидрографическую сеть — 12.8% территории.

Ландшафтная неоднородность территории начинается сказываться на содержании биогенных элементов в поверхностном склоновом стоке и инфильтрации уже в начальной стадии их формирования. Существенное влияние оказывает территориальная дифференциация растительности. В лесных массивах поверхностный склоновый сток небольшой, нередко даже отсутствует, вынос биогенов осуществляется главным образом в процессе инфильтрации и далее со стоком верховодки и с подземным стоком (Долгов, Коронкевич, 2019).

В лесу снег к началу весеннего половодья обогащен биогенами нередко больше, чем на открытых полевых участках. Так, результаты химического анализа 19 образцов снега, отобранных в Курской области 26–29 января 2018 г., показали, что более высокое содержание минерального азота и фосфора наблюдается в снежном покрове на участках с лесной растительностью (соответственно 1.47 и 0.021 мг/л), чем на открытых полевых и луговых участках (1.35 и 0.020 мг/л).

К наиболее важному региональному фактору антропогенного преобразования ландшафтов относится растениеводство. Площадь посевов в Курской области к 1980 г. достигла 1957 тыс. га (пашня — 2044.7 тыс. га). Затем она уменьшилась в 1990 г. до 1855.4 тыс. га (пашня — 1970.8 тыс. га). В связи с экономическим спадом к 2010 г. посевная площадь значительно сократилась — на 31% по отношению к уровню 1980 г. (пашня — на 23%). Впоследствии она постепенно восстанавливалась и составила в 2018 г., как и пашня, 83% от уровня 1980 г. Структура посевной площади с 1980 г.

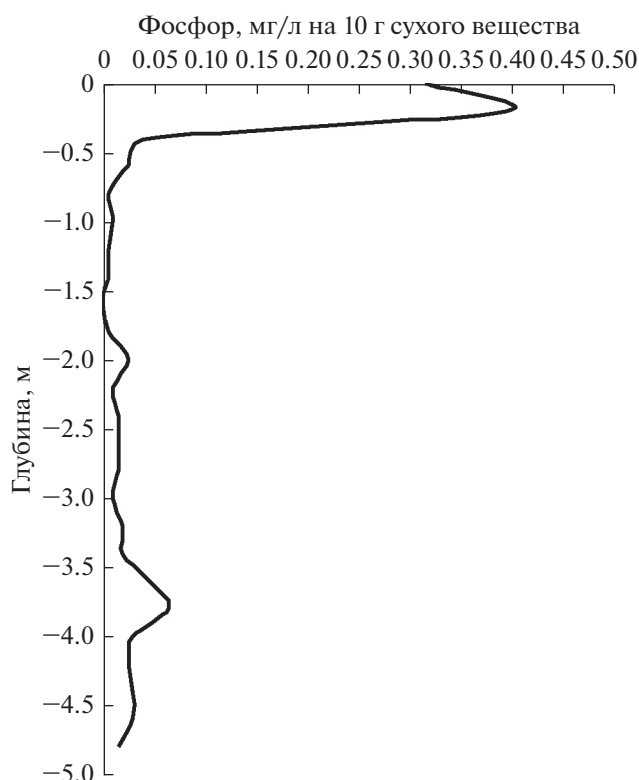


Рис. 3. Содержание фосфора фосфатов в водных вытяжках из почвогрунтов зоны аэрации (плакор, залежь, г. Новоаннинский, Волгоградская область, июнь 2017 г.).

практически не изменилась. Доля уплотненной пашни к началу весеннего половодья почвы по-прежнему составляет 31–32%.

Сокращение площади пашни (при практически не изменившейся ее структуре) способствовало снижению формирующегося на ней объема поверхностного склонового стока — на 18–24% относительно уровня 1980 г. (рис. 4). Однако выводимые из севооборотов площади представляют собой уплотненную почву, с более высоким коэффициентом стока, чем поля с осенней вспашкой. Приняв посевную площадь 1980 г. за основу, можно для большей части территории Курской области (69%) оценить динамику совокупного влияния на объем поверхностного стока сохранившейся структуры посевов и выведенных из севооборота площадей.

Расчеты показали, что в результате уменьшения площади пашни объем весеннего поверхностного склонового стока (с ее площади 1980 г.) должен был увеличиться в последнее десятилетие на 9–12%. Однако изменения сельского хозяйства и климата на современном этапе действуют на весенний поверхностный склоновый сток разнонаправленно. Причем вклад климатической составляющей в изменения склонового стока

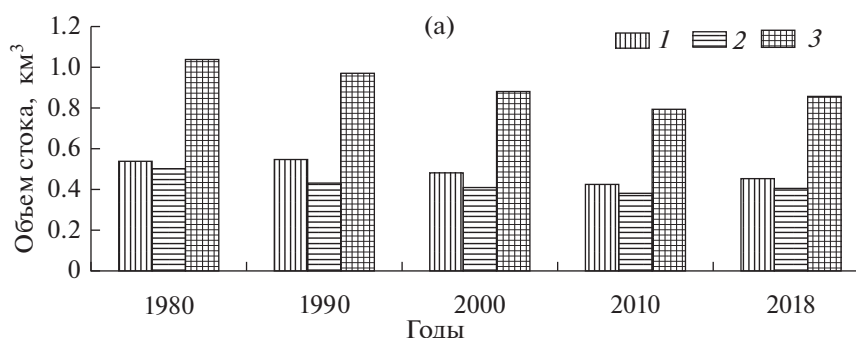


Рис. 4. Динамика весеннего поверхностного склонового стока в Курской области с фактической пашни (посевной площади и чистого пара) при климатических условиях и норме стока по состоянию на 1980 г. 1 – зябь, 2 – уплотненная пашня, 3 – вся площадь пашни.

преобладает и составляет около 85% (Барабанов и др., 2018). В результате климатические изменения привели к противоположной тенденции – значительному сокращению поверхностного склонового стока и выноса с ним биогенов.

На посевной площади такой тенденции способствовало также снижение уровня использования удобрений. Особенно значительно сократилось применение минеральных удобрений в конце 1990-х годов – до 10% от уровня 1990 г. Если судить по водным вытяжкам, то в эти годы минеральным азотом обогащались талые и дождевые воды, прежде всего, на залежах (в среднем на 20% больше, чем на пашне) (Закруткин и др., 2004). В самые последние годы использование удобрений существенно возросло (в Курской области достигло 84% от уровня 1990 г.), но по-прежнему с единицы площади залежей в поверхностно-почвенные воды биогенов поступает больше, чем с единицы площади пашни (на 8% по минеральному азоту и 33% по фосфору) (табл. 2).

Из результатов гидрохимического обследования почв, выполненного ИГ РАН и ИБХФ РАН 18–25 июля 2020 г., следует, что в наибольшей

степени насыщаются атмосферные осадки в широколиственных лесах, а в наименьшей – в сосняках (см. табл. 2).

Вынос биогенов с поверхностным стоком обусловлен не только ландшафтной структурой речного водосбора, но и влиянием климатических факторов, роль которых в последние десятилетия значительно возросла.

Влияние климатических факторов на вынос биогенов с водным стоком двоякое. С одной стороны этими факторами обусловлена концентрация биогенных веществ в водном стоке, а с другой – его величина. Для изучения гидрохимической роли отдельных климатических факторов особый интерес представляют лабораторные экспериментальные исследования, позволяющие исключить влияние других факторов.

К числу основных климатических факторов относится температура воздуха и соответствующая ей температура образующихся поверхностно-почвенных вод. Из лабораторного эксперимента следует, что с ростом температуры от 1 до 35°C при одной и той же величине осадков минерализация (вероятно, и содержание нитратов) в

Таблица 2. Содержание биогенов в водных вытяжках из поверхностного слоя почв Курской, Воронежской и Волгоградской областей, мг/л на 10 г сухого вещества

Элемент ландшафтной структуры	Число почвенных образцов	Азот минеральный	Фосфор минеральный
Залежь	8	0.294	0.041
Широколиственный лес	6	0.402	0.044
Сосновый лес	3	0.196	0.026
Сельскохозяйственные угодья (пашня), в том числе поля:	19	0.269	0.027
занятые пшеницей	6	0.241	0.026
занятые подсолнечником	6	0.160	0.027
занятые кукурузой	3	0.242	0.032
под чистым паром	4	0.356	0.022

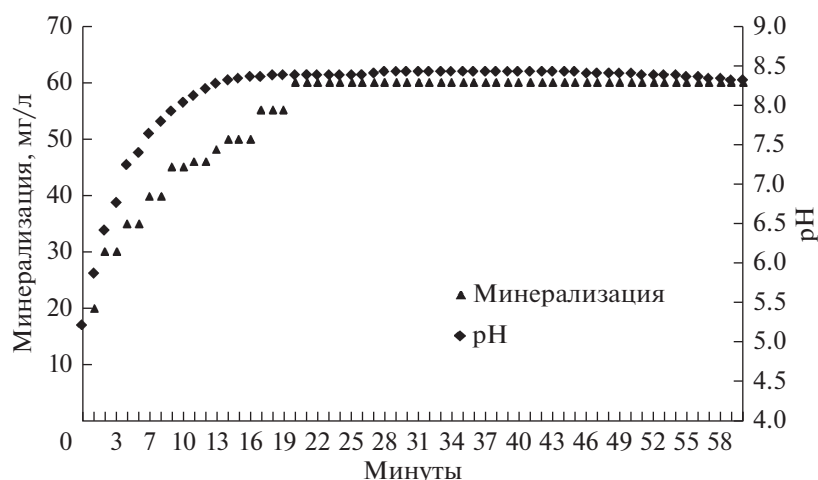


Рис. 5. Динамика минерализации и pH поверхностно-почвенных вод в течение часа от начала контакта почвы с атмосферными осадками (южный чернозем, типчаково-ковыльная степь, бассейн р. Бузулук).

поверхностном склоновом стоке и просачивающейся в зону аэрации влаги может увеличиваться почти в 2 раза.

Концентрация биогенных веществ в поверхностно-почвенных водах обусловлена и *продолжительностью контакта* осадков с почвой. Особенно быстрое насыщение осадков солями и биогенами наблюдается в течение 30 мин от начала контакта (рис. 5), а не столь резко выраженное может продолжаться до 3–4 сут. 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).

Помимо этих параметров содержание биогенов в образующихся растворах поверхностно-почвенных вод существенно зависит от *величины осадков*. Из полученной в лабораторных условиях зависимости (рис. 6) следует, что в годы с низкой увлажненностью осадками концентрация биогенов в поверхностном стоке с водосборной площади может возрастать в разы по сравнению с многоводными годами и значительно изменяться внутри года, достигая максимальной величины при небольших осадках.

Оценка регионального эффекта *изменения климата* за 2008–2016 гг. показала, что в многолетней динамике годовых осадков, осадков за холодный (ноябрь–март) и теплый (апрель–октябрь) периоды отчетливо выраженные тренды отсутствуют. Отмечается небольшой рост осадков холодного периода (на 11% относительно нормы по состоянию на 1980 г.), а осадки теплого периода, напротив, уменьшились (на 4%).

Наиболее важным фактором стало увеличение температуры воздуха, изменение которой сказывается не только на содержании биогенов в образующихся поверхностно-почвенных водах, но и на степени участия поверхностной и подземной составляющих стока в миграции биогенов. С 1981 по 2017 г. рост температуры за холодный период составил 1.7°C, за теплый период – 1°C. Причем в ближайшей перспективе выявленные тенденции в многолетнем ходе температуры воздуха, скорее всего, сохранятся, поскольку в десятилетие 2008–2017 гг. рост температуры не только не замедлился, но даже ускорился. Относительно нормы по состоянию на 1980 г. температура возросла в холодный период на 2.5°C, в теплый период – на 1.9°C.

Увеличение температуры в холодный период привело к уменьшению глубины промерзания почвогрунтов и к участвовавшим оттепелям, во время которых значительная доля талых вод стала расходоваться не на образование поверхностного стока, а на инфильтрацию в зону аэрации. Характерной тенденцией с начала 1980-х годов стало увеличение величины инфильтрации (на 13–16% за весь холодный период года, включая половодье) и резкое снижение величины весеннего поверхностного склонового стока (69% на уплотненной почве и 77% на рыхлой пашне) (Барабанов и др., 2018a) и речного стока в период весеннего половодья.

По этой причине, а также вследствие увеличения испарения в теплый период, годовой речной сток в Курской области за 2008–2016 годы существенно сократился – на 30–40% (средневзвешенный по площадям водосбора 8 рек по отношению к норме, по К.П. Воскресенскому) (Воскресенский, 1962). При этом поверхностная составляющая значительно уменьшилась и составляет в среднем 29 мм (35% от величины годового стока).

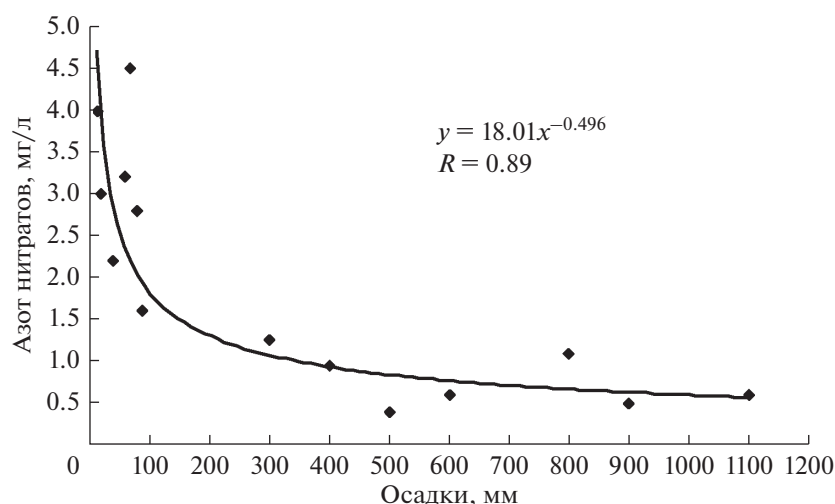


Рис. 6. Содержание нитратов в поверхностно-почвенных водах в зависимости от количества атмосферных осадков (чернозем, типчаково-ковыльная степь, залежь, водосбор р. Бузулук, лабораторный эксперимент, 14 образцов почвы).



Рис. 7. Внутригодовое распределение речного стока Курской области и его составляющих в среднем за 2008–2016 гг. (в % от величины годового суммарного стока).

вого стока), а подземная, напротив, возросла до 54 мм (65%). Соответственно, снизилась роль поверхностной составляющей в миграции биогенных веществ, а подземной, напротив, выросла. Вклад в этот процесс поверхностного стока (в основном стока верховодки) с речных водосборов остается наибольшим в период весеннего половодья (27% от величины годового стока) (рис. 7). Миграция биогенов с подземным стоком происходит главным образом в межень теплого периода (27%) и холодного периода (25%).

Водно-биогеогенный баланс территории Курской области

Природные составляющие поступления биогенов. Результаты ориентировочной оценки годо-

вого водно-биогеогенного баланса территории Курской области, сложившегося в последнее десятилетие, показали, что доля природной составляющей (табл. 3) в суммарной его приходной части значительно меньше доли антропогенного поступления. Она составляет по азоту лишь 24%, еще меньше по фосфору — 6%. Однако по отношению к выносу с речным стоком природное поступление биогенов остается достаточно высоким и превышает их вынос со стоком в 16 раз по азоту и 4.5 раза по фосфору. В основном азот и фосфор поступают с опадом лесной растительности и травянистой на лугах, пастбищах, залежах. Существенным источником поступления биогенов являются атмосферные осадки. Поступление азота с осадками в 3 раза превышает вынос с водным

Таблица 3. Природные составляющие баланса биогенов

Биогенные вещества	Природное поступление							
	атмосферные осадки	вымывание из крон деревьев дождями в лесах*	лесной растительный опад**	биофиксация азота на сельскохозяйственных угодьях***	опад на заболоченных землях****	опад на лугах, пастбищах и заброшенных сельскохозяйственных полях****	с пылью из атмосферы***	в сумме от всех видов природного поступления
	кг/км ² (относительно площади области)							
Азот общий	641	53	443	1788	27	243	40	3235
Фосфор общий	13	3.2	67	—	1.8	27	4.4 ¹⁾	116

Примечание. * Родин, Базилович, 1965; ** Хрисанов, Осипов, 1993; *** Агроценозы..., 1984; **** Родин и др., 1968; ¹⁾ — рассчитано ориентировочно, исходя из соотношения между фосфором и азотом в водных вытяжках из почв, установленного по результатам полевых работ ИГ РАН в июле 2020 г.

стоком (без учета сточных вод), а поступление фосфора, напротив, в 2 раза меньше выноса.

Антропогенные составляющие. Современная суммарная антропогенная биогенная нагрузка значительно превышает поступление биогенов с осадками (климатический фон) — по азоту в 16 раз и особенно по фосфору — в 143 раза (табл. 4). Доля антропогенной составляющей в суммарной приходной части баланса составляет по азоту 76% и фосфору 94%. Наибольшая биогенная нагрузка обусловлена применением минеральных удобрений. Вместе с тем из приведенных в работе (Семькин и др., 2019) данных следует, что наблюдаемое в последние годы увеличение количества вносимых минеральных удобрений не может рассматриваться в качестве основного негативного гидроэкологического фактора. Оно компенсировано еще большей величиной выноса биогенов с урожаем (азота в среднем на 16%, фосфора — на 8% за 2015–2017 гг.). Кроме того, весенний поверхностный склоновый сток значительно сократился, соответственно снизился вынос с пашни привнесенных с удобрениями биогенных элементов.

Существенную негативную роль, с тенденцией к усилению, играет дорожно-транспортная нагрузка, обеспечивая поступление биогенов даже больше, чем со сточными водами при водопотреблении. Плотность одних лишь автомобильных дорог с твердым покрытием (0.36 км/км²) превысила густоту речной сети (0.25 км/км²). В результате экспедиционных работ установлено, что в среднем по территории Курской области концентрация азота минерального в придорожном стоке выше его концентрации в речном стоке в 1.8 раза, а фосфора — в 4.4 раза.

Особенно высокая биогенная нагрузка на речные воды оказывается населенными пунктами (включая их дорожную сеть), особенно вслед-

ствие сброса сточных вод. По данным Росгидромета, для года с максимальной антропогенной нагрузкой (1991 г.) оценено влияние 8 крупных населенных пунктов (с численностью населения от 3500 до 450000 чел.) на содержание в реках минерального азота и фосфора. Наибольшее его увеличение (по отношению к верхнему створу) наблюдается на р. Сейм ниже г. Курска (на 85–90%) и ниже г. Курчатова (лишь по фосфору — более 100%), а также на р. Псел ниже г. Обоянь (55% по азоту и 30% по фосфору). Негативное влияние остальных 5 населенных пунктов меньше (6–7%).

Внутригодовое распределение стока биогенных веществ. Годовой вынос минерального азота с речным стоком в 2008–2016 гг. составляет в среднем для территории Курской области 124 кг/км², минерального фосфора — 13 кг/км². С поверхностным стоком с речных водосборов выносятся 41% азота и 48% фосфора от величины годового выноса с полным стоком, с подземным стоком — больше, соответственно 59 и 52% (табл. 5).

Вынос биогенов с поверхностной составляющей стока максимален в период половодья и составляет 34% по минеральному азоту и 32% по минеральному фосфору (см. табл. 5). В маловодные сезоны холодного и теплого периодов года поверхностный вынос биогенных веществ снижается до 2–5%. Иная ситуация наблюдается в отношении выноса биогенов с дренируемым реками подземным стоком. Небольшая его величина (15% по азоту и 11% по фосфору) отмечается в половодье, а в маловодный сезон холодного периода она существенно возрастает (соответственно до 28 и 20%).

Как было отмечено выше, поверхностная составляющая речного стока в Курской области за 2008–2016 годы значительно сократилась (на 65% относительно нормы по К.П. Воскресенскому),

Таблица 4. Составляющие антропогенной приходной и расходной частей баланса азота и фосфора, относительно площади Курской области, кг/км²

Составляющие баланса		Азот общий	Фосфор общий
Поступление (антропогенное)	Население без доступа к канализации*	38.4	7.8
	Животноводство*	1300	530
	Минеральные удобрения**	7261	1043
	Пожнивные остатки**	1383	249
	Семена***	221	29.5 ¹⁾
	Сумма	10203	1859
Вынос	Урожай сельскохозяйственных культур**	8394	1125
	Газообразные потери из минеральных удобрений***	1089	—
	Эмиссия аммиака из навоза КРС и свиней до его использования****	339	—
	Денитрификация на пашне****	476	—
	Улетучивание и денитрификация на залежах и пастбищах*****	1232	—
	Газообразные потери из органических удобрений после внесения их в почву*****	173	—
	Речной сток, в том числе	248	31.5
	сточные воды при водопотреблении	17	0.8
	Сумма	11951	1156

Примечание. * Ясинский и др., 2020; ** Семькин и др., 2019; *** Агроценозы..., 1984; **** Гриднев, Гриднева, 2017; ***** принято, что на залежах и пастбищах потери азота от денитрификации и улетучивания уравниваются его поступлением в результате биологической фиксации и с выпадения атмосферных осадков; ***** величина потерь (18%) принята такой же, как и для эмиссии аммиака из навоза до его использования; ¹⁾ — рассчитано по соотношению азота и фосфора в урожае.

Таблица 5. Внутригодовое распределение выноса минерального азота и фосфора с речных водосборов Курской области

Показатель водного стока	Год		Маловодный сезон холодного периода		Период половодья		Маловодный сезон теплого периода	
	кг/км ²	%	кг/км ²	%	кг/км ²	%	кг/км ²	%
Азот								
Речной сток, в том числе	124.0	100	41.5	33.4	59.9	48.3	22.7	18.3
подземный сток	73.0	58.9	34.8	28.1	18.2	14.7	20.0	16.1
поверхностный сток	51.0	41.1	6.6	5.3	41.6	33.6	2.7	2.2
Фосфор								
Речной сток, в том числе	12.6	100	4.0	32.0	5.3	42.2	3.3	25.8
подземный сток	6.6	52.3	2.6	20.4	1.3	10.7	2.7	21.3
поверхностный сток	6.0	47.7	1.4	11.1	4.0	31.5	0.6	4.5

что не компенсировано небольшим увеличением подземной составляющей стока (на 20%). В итоге сток биогенных элементов с суммарным стоком существенно снизился, но их концентрация в речных водах остается достаточно высокой и не-

редко превышает ПДК. Вероятно, это обусловлено увеличением в последние годы температуры речных вод, что требует специального рассмотрения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на благоприятное в гидроэкологическом отношении географическое положение Курской области и сокращение объема сточных вод, состояние водных ресурсов в последние годы остается далеким от экологического благополучия, в том числе в отношении содержания биогенов. Негативной гидроэкологической ситуации способствовало усиление с начала 2000-х годов антропогенной нагрузки — роста урбанизированных территорий, дорожно-транспортной сети и др.

Вместе с тем увеличение в последние годы количества вносимых минеральных удобрений не может рассматриваться в качестве основного негативного гидроэкологического фактора, поскольку оно компенсировано еще большей величиной выноса биогенов с урожаем. Кроме того, весенний поверхностный склоновый сток значительно сократился, соответственно снизился вынос с ним биогенных веществ.

В последние десятилетия вследствие потепления климата наблюдаются кардинальные изменения в формировании водного и водно-биогенного баланса в лесостепной зоне. Они не имеют аналогов за весь период инструментальных наблюдений. Особенно это касается значительно возросшей роли инфильтрации и подземного стока в миграции с водосборов биогенных и других химических элементов. Доля подземной составляющей стока в суммарном годовом выносе азота с речных водосборов стала преобладать над поверхностной составляющей. Однако такие климатические изменения в структуре диффузного стока биогенных элементов не привели к улучшению гидроэкологической ситуации, поскольку дренируемые реками подземные воды нередко содержат эти элементы в большей концентрации, чем поверхностные.

Существенное негативное влияние на состояние речных вод оказывает недостаточно эффективная работа природо- и водоохранных органов, особенно по предотвращению загрязнений прибрежных участков многих рек (в том числе в пределах водоохранных зон) производственными и бытовыми отходами, мусором и т.д. Практически отсутствует экологический контроль над сельскохозяйственной деятельностью в многочисленных личных подсобных хозяйствах, находящихся вблизи от рек. Остается неконтролируемым диффузное поступление загрязняющих веществ в реки с их водосборов, которое значительно преобладает над их поступлением со сточными водами.

Полученные результаты носят ориентировочный характер. Более детальный анализ элементов водно-биогенного баланса речных бассейнов, как расходной его части, так и приходной — предмет дальнейших исследований.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Статья подготовлена при финансовой поддержке проекта РНФ № 20-17-00209 (разработка методики, расчет водно-биогенного баланса). Анализ роли климатических и антропогенных факторов проведен в рамках темы Госзадания ИГ РАН № 0148-2019-0007.

FUNDING

The research was funded by the Russian Science Foundation according to the project no. 20-17-00209 (methodology development, the water-biogenic balance calculation). The role of climatic and anthropogenic factors was analyzed within the framework of the state-ordered research theme of the Institute of Geography RAS no. 0148-2019-0007.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность Е.А. Кашутиной, Е.П. Матафонову, Ю.Ю. Алентьеву за участие в экспедиционных работах, результаты которых использовались при подготовке данной статьи.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful to E.A. Kashutina, E.P. Matafonov, Yu. Alent'ev for participation in the field works, results of which were used in the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агроценозы степной зоны / ред. А.А. Титлянова, В.И. Кирюшин, И.П. Охилько и др. Новосибирск: Наука, 1984. 246 с.
- Барабанов А.Т. Эрозионно-гидрологическая оценка взаимодействия природных и антропогенных факторов формирования поверхностного стока талых вод и адаптивно-ландшафтное земледелие. Волгоград: ФНЦ агроэкологии РАН, 2017. 188 с.
- Барабанов А.Т., Долгов С.В., Коронкевич Н.И. Влияние современных изменений климата и сельскохозяйственной деятельности на весенний поверхностный склоновый сток в лесостепных и степных районах Русской равнины // Водные ресурсы. 2018. Т. 45. № 4. С. 332–340.
- 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. 74–81.
- Воскресенский К.П. Норма и изменчивость годового стока рек Советского Союза. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 548 с.
- Гриднев П.И., Гриднева Т.Т. Эмиссия парниковых газов и аммиака из навоза в процессе уборки и подготовки его к использованию // Вестн. ВНИИМЖ. 2017. № 1 (25). С. 25–33.

- Долгов С.В., Коронкевич Н.И. Географо-гидрологическое изучение зоны аэрации // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1999. № 2. С. 17–30.
- Долгов С.В., Коронкевич Н.И. Гидрологическая ярусность равнинной территории // Изв. РАН. Сер. геогр. 2010. № 1. С. 7–25.
- Долгов С.В., Коронкевич Н.И. Современные изменения выноса биогенных веществ в реки бассейна Волги на юге лесной зоны // Изв. РАН. Сер. геогр. 2019. № 5. С. 43–55.
- 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 Рост. ун-та, 2004. 252 с.
- Коронкевич Н.И. Водный баланс Русской равнины и его антропогенные изменения. М.: Наука, 1990. 205 с.
- 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.
- Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2015 год / отв. ред. Г.М. Черногаева. М.: Росгидромет, 2016. 223 с.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 10. Верхне-Волжский район. Кн. 1. М.: Моск. отд. гидрометеоздата, 1973.
- Родин Л.Е., Базилевич Н.И. Динамика органического вещества и биологический круговорот в основных типах растительности земного шара. М.—Л.: Наука, 1965. 254 с.
- Родин Л.Е., Ремезов Н.П., Базилевич Н.И. Методические указания к изучению динамики и биологического круговорота в фитоценозах. Л.: Наука, 1968. 145 с.
- Семыкин В.А., Пигорев И.Я., Никитина О.В. Баланс элементов питания и гумуса в землях сельскохозяйственного назначения Курской области // Вестн. Курской гос. сельскохозяйств. академии. 2019. № 3. С. 6–11.
- Хрисанов Н.И., Осипов Г.К. Управление эвтрофированием водоемов. СПб.: Гидрометеоздат, 1993. 279 с.
- 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.
- 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.
- 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.
- Ясинский С.В., Кашутина Е.А., Сидорова М.В., Нарыков А.Н. Антропогенная нагрузка и влияние водосбора на диффузный сток биогенных элементов в крупный водный объект (на примере водосбора Чебоксарского водохранилища) // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 5. С. 630–648.

Regularities of the Nitrogen and Phosphorus Balance Formation in River Catchments in the Central Forest-Steppe of the Russian Plain in 1990–2020

S. V. Dolgov¹, *, V. O. Shvydkii², and E. V. Shtamm³

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

²*Institute of Biochemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

³*Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*e-mail: svdolgov1978@yandex.ru

On the geographic-hydrological basis and the idea of the plain river basins hydrological stratification modern features of the water-biogenic balance in the forest-steppe zone of the Russian Plain are revealed. The influence of the main elements of river basins' landscape-hydrological structure on the nutrients content in the surface slope runoff has been determined. It is shown that there was no increase in surface slope runoff in spite of the fact that the urbanized territories' area as well as the area of agricultural lands removed from crop rotations with a higher runoff coefficient than on fields with autumn plowing increased. Climate change has led to the opposite situation—the surface slope runoff since the early 1980s was declining by 69% on the compacted soil and by 77% on loose arable land. The role of the river runoff surface component in the nutrient's migration has significantly decreased, while, on the contrary, the underground component role increased. Annually surface runoff removes 41% of nitrogen and 48% of phosphorus, and underground runoff 59 and 52%, respectively. The results of calculating the intra-annual distribution of the mineral nitrogen and phosphorus removal with surface and underground runoff from river catchments are presented. An approximate assessment of the annual water-biogenic balance of the Kursk Oblast territory, formed in the last decade, has been carried out. It is shown that the share of natural factors in its incoming part (nitrogen 17%, phosphorus 6%) is significantly less than that of anthropogenic.

Keywords: river basins, nitrogen and phosphorus balance, anthropogenic and natural factors, surface and underground runoff components, changes

REFERENCES

- Agrotsenozy stepnoi zony* [Agrocenoses of the Steppe Zone]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1984. 246 p.
- Barabanov A.T. *Erozionno-gidrologicheskaya otsenka vzaimodeystviya prirodnikh i antropogennykh faktorov formirovaniya poverkhnostnogo stoka talykh vod i adaptivno-landshaftnoe zemledele* [Erosion-Hydrological Assessment of the Interaction of Natural and Anthropogenic Factors in the Formation of Surface Melt Water Runoff and Adaptive Landscape Agriculture]. Volgograd: Fed. Nauchn. Tsentr Agroekol. RAN, 2017. 188 p.
- Barabanov A.T., Dolgov S.V., Koronkevich N.I. The influence of modern climate changes and agricultural activities on the spring surface slope runoff in the forest-steppe and steppe regions of the Russian Plain. *Vodn. Resur.*, 2018, vol. 45, no. 4, pp. 332–340. (In Russ.).
- 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, pp. 66–72. doi 10.1134/S1064229318010039
- 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 *Geografogidrologicheskie issledovaniya* [Geo-Hydrological Studies]. Moscow: Inst. Geogr. RAN, MTs GO RF, 1992, pp. 4–26. (In Russ.).
- Dolgov S.V., Koronkevich N.I. Geographic and hydrological study of the aeration zone. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 1999, no. 2, pp. 17–30. (In Russ.).
- Dolgov S.V., Koronkevich N.I. Hydrological stratification of the plain territory. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2010, no. 1, pp. 7–25. (In Russ.).
- Dolgov S.V., Koronkevich N.I. Modern changes of nutrients' removal into the southern forest zone rivers of Volga basin. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2019, no. 5, pp. 43–55. (In Russ.).
- Gridnev P.I., Gridneva T.T. Greenhouse gas and ammonia emissions from manure during harvesting and preparation for use. *Vestn. VNIIMZh*, 2017, vol. 25, no. 1, pp. 25–33. (In Russ.).
- Khrisanov N.I., Osipov G.K. *Upravlenie evtrofirovaniem vodoemov* [Management of Water Bodies Eutrophication]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat Publ., 1993. 279 p.
- 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. 205 p.
- 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.).
- Obzor sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchei sredy v Rossiiskoi Federatsii za 2015 god* [Overview of the State and Pollution of the Environment in the Russian Federation for 2015]. Chernogaeva G.M., Ed. Moscow: Rosgidromet Publ., 2016. 223 p.
- Resursy poverkhnostnykh vod SSSR* [Surface Water Resources of the USSR]. Vol. 10: *Verkhne-Volzhsckii raion* [Upper-Volga Region]. Yablokov E.Yu., Ed. Moscow: Gidrometeoizdat Publ., 1973, part 1. 239 p.
- Rodin L.E., Bazilevich N.I. *Dinamika organicheskogo veshchestva i biologicheskii krugovorot v osnovnykh tipakh rastitel'nosti zemnogo shara* [Dynamics of Organic Matter and Biological Circulation in the Main Types of Vegetation in the World]. Moscow: Nauka Publ., 1965. 254 p.
- Rodin L.E., Remezov N.P., Bazilevich N.I. *Metodicheskie ukazaniya k izucheniyu dinamiki i biologicheskogo krugovorota v fitotsenozakh* [Methodological Guidelines for Studying the Dynamics and Biological Cycle in Phytocenoses]. Leningrad: Nauka Publ., 1968. 145 p.
- Semykin V.A., Pigorev I.Ya., Nikitina O.V. Balance of nutrients and humus in agricultural lands of the Kursk region. *Vestn. Kursk. Gos. S-kh. Akad.*, 2019, no. 3, pp. 6–11. (In Russ.).
- 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.).
- Voskresenskii K.P. *Norma i izmenchivost' godovogo stoka rek Sovetskogo Soyuza* [Rate and Variability of the Annual Flow of Rivers in the Soviet Union]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1962. 548 p.
- 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.).
- Yasinskii S.V., Kashutina E.A., Sidorova M.V., Narykov A.N. Anthropogenic load and the effect of drainage area on the diffuse runoff of nutrients into a large water body: Case study of the Cheboksary reservoir. *Water. Resour.*, 2020, vol. 47, pp. 810–827. doi 10.1134/S009780782005022X
- Zakrutkin V.Ye., Koronkevich N.I., Shishkina D.Yu., Dolgov S.V. *Zakonomernosti antropogennogo preobrazovaniya malykh vodosborov stepnoi zony Yuga Rossii (v pre-delakh Rostovskoi oblasti)* [Patterns of Anthropogenic Transformation of Small Catchments of the Steppe Zone of the South of Russia (within the Rostov Region)]. Rostov-on-Don: Rostov. Univ. Publ., 2004. 252 p.