

УДК 551.16:502.51

АНТРОПОГЕННАЯ НАГРУЗКА И ВЛИЯНИЕ ВОДОСБОРА НА ДИФфуЗНЫЙ СТОК БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В КРУПНЫЙ ВОДНЫЙ ОБЪЕКТ (НА ПРИМЕРЕ ВОДОСБОРА ЧЕБОКСАРСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА)¹

© 2020 г. С. В. Ясинский^a, *, Е. А. Кашутина^a, М. В. Сидорова^a, А. Н. Нарыков^a

^aИнститут географии РАН, Москва, 119017 Россия

*e-mail: yasisergej@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.01.2020 г.

После доработки 13.04.2020 г.

Принята к публикации 16.04.2020 г.

Дана краткая характеристика природных условий и хозяйственной деятельности на местном водосборе Чебоксарского водохранилища (без бассейна Оки). Раскрыты основные положения новой версии ландшафтно-гидрологического метода оценки стока биогенных элементов с водосбора в водные объекты. Приведены результаты расчетов стока этих элементов в Чебоксарское водохранилище с учетом влияния водосбора и антропогенной нагрузки от внесенных минеральных и органических удобрений на сельскохозяйственные поля и поступления на водосбор отходов от населения, не имеющего доступа к центральной канализации.

Ключевые слова: ландшафтно-гидрологический метод, диффузное загрязнение, ландшафтная структура, азот, фосфор, водосборы притоков, удобрения, население, животноводство.

DOI: 10.31857/S0321059620050223

В настоящее время на водосборах водных объектов, особенно в Европейской части России, практически не осталось территорий, не преобразованных хозяйственной деятельностью. При снеготаянии и выпадении сильных дождей с этих территорий в водные объекты стекают потоки воды, насыщенные взвесью и разнообразными химическими веществами. Процесс стока этих элементов с водосбора называется диффузным (рассеянным) загрязнением водных объектов [16]. Диффузное загрязнение не регистрируется и не регулируется ни одним природоохранным ведомством. Оценка объема стока этих веществ проводится с использованием расчетных методов, разработанных на основе специальных экспериментальных работ [9, 15, 16]. Комплекс этих методов использован в научной части приоритетного национального Проекта “Оздоровление Волги” для оценки влияния диффузного загрязнения от различных источников, расположенных на водосборах, на экологическое состояние водных объектов в бассейне Волги [13].

Диффузное загрязнение водных объектов зависит от многих факторов, в том числе климати-

ческих: высоты и запаса воды в снежном покрове на начало снеготаяния, количества аккумулярованных в нем за зиму загрязняющих веществ (ЗВ), интенсивности снеготаяния и выпадения жидких осадков; свойств водосбора: ландшафтной структуры, содержания ЗВ в верхних слоях почвы; антропогенных факторов: внесения удобрений, разведения скота, попадания на водосбор отходов человеческой жизнедеятельности и промышленного производства и пр.

Опасность представляют диффузные источники соединений азота и фосфора — биогенных элементов (БЭ), в наибольшей степени ответственных за эвтрофирование водных объектов, особенно с замедленным водообменом, например водохранилищ.

В то же время не весь объем ЗВ, формирующийся на водосборе диффузным путем, поступает в водный объект и достигает русел и замыкающих створов рек [6, 11, 19, 20]. Значительная его часть регулируется и удерживается самим водосбором и различными звеньями гидрографической сети (оврагами, балками, поймами и др.). Оценка вклада антропогенной нагрузки в формирование диффузного стока БЭ — азота и фосфора в данной работе рассмотрены на примере местно-

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания 0148-2019-0007/AAAA-A19-119021990093-8.



Рис. 1. Картограмма территории водосбора Чебоксарского водохранилища.

го водосбора Чебоксарского водохранилища (ниже Горьковского гидроузла и без бассейна Оки).

Краткая характеристика природных условий и хозяйственной деятельности на водосборе Чебоксарского водохранилища

Чебоксарское водохранилище — пятая ступень Волжского каскада. С его созданием планировалось завершить регулирование Волги на всем ее протяжении. На территории водосбора водохранилища расположены 11 субъектов РФ (рис. 1). Наибольшую площадь территории занимают Нижегородская (40% площади бассейна), Пензен-

ская (15%), Костромская (11) области, Республика Мордовия (9), Ульяновская область (8), Республика Чувашия и Республика Марий Эл (по 6%). Остальные субъекты занимают <5% территории местного водосбора Чебоксарского водохранилища.

Рельеф водосбора Чебоксарского водохранилища

Водосбор Чебоксарского водохранилища разделен долиной р. Волги на 2 области, различающиеся своими геолого-геоморфологическими условиями: высокое Правобережье и низинное Левобережье. Высокое Правобережье представ-

лено северными отрогами Приволжской возвышенности, имеющей полого-холмистую поверхность, изрезанную долинами притоков р. Волги, оврагами и балками и издавна подвержено оползневым процессам. Абсолютные высоты колеблются от 120 до 205 м. Левобережье представлено обширной слабонаклоненной Ветлужско-Унженской низменностью. Постепенно понижаясь к реке, равнина переходит в надпойменные террасы и пойму р. Волги. В геологическом строении водосбора водохранилища принимают участие пермские, юрские, неогеновые и четвертичные отложения.

Геоморфология и гидрогеология водосбора Чебоксарского водохранилища

Среди естественных физико-геоморфологических процессов, свойственных всему водосбору, необходимо отметить следующие, не обусловленные созданием водохранилища: выветривание коренных пород, осыпи и обрушения, водная эрозия, оползни, подтопление и заболачивание, переработка берегов. Деятельность постоянных и временных водотоков на склонах долины приводит к образованию оврагов. Гидрогеологические условия характеризуются дренированием долиной р. Волги всех водоносных горизонтов, заключенных в татарских, юрских и четвертичных отложениях.

Основные черты климата водосбора Чебоксарского водохранилища

Климат — умеренно континентальный, с теплым летом и холодной зимой, с хорошо выраженными переходными сезонами. Средняя годовая температура воздуха меняется от 3°C на севере до 4,5°C на юге территории. Осадков выпадает ~550 мм в год.

Почвенный и растительный покров водосбора Чебоксарского водохранилища

Левый берег водохранилища находится в подзоне южной тайги, возвышенный правый — в подзоне хвойно-широколиственных лесов. В настоящее время естественная растительность водосбора водохранилища сильно изменена хозяйственной деятельностью человека. Преобладающие типы почв на территории водосбора — дерново-подзолистые, серые лесные, лугово-серые, дерново-глебовые и перегнойно-глебовые почвы. В поймах рек распространены аллювиальные почвы, в плохо дренируемых ландшафтах — болотно-подзолистые почвы. Детальная характеристика почв водосбора приведена в Едином Государственном реестре почвенных ресурсов Рос-

сии, в котором для большинства почв имеется информация о содержании в их разных слоях основных питательных элементов растений: азота, фосфора, калия [7]. Эта информация использована для расчетов выноса БЭ с эрозией почвы.

На рис. 2 представлена карта ландшафтной структуры водосбора Чебоксарского водохранилища. Для создания слоев: “малоэтажная застройка”; “территории с высокой долей непроницаемых поверхностей”, включающие в себя в том числе урбанизированные территории с многоэтажной застройкой и промышленные площадки; “овражно-балочная сеть и поймы” — использовались топографические карты масштаба 1 : 1000000. Выделены населенные пункты и участки с высокой долей непроницаемых поверхностей. На основе изолиний на карте выделены полигональные участки овражно-балочной сети.

Кластеры — лесные ландшафты, пахотные земли, сельскохозяйственные земли с уплотненной почвой (нераспаханные с осени) — определялись по спектрально-космическим снимкам Landsat 8.

Структура земель водосбора Чебоксарского водохранилища приведена в табл. 1. Наибольшую площадь на левом, северном берегу водохранилища занимают леса, на его правом, южном берегу — сельскохозяйственные земли, наименьшую — территории с высокой долей непроницаемых поверхностей.

Гидрография водосбора, водный и химический режим рек, впадающих в Чебоксарское водохранилище

В водохранилище впадают 46 рек, водный режим и химический сток которых в значительной степени обуславливают гидроэкологические проблемы этого водного объекта. Наиболее крупные левые притоки — Ветлуга и Керженец, правые — Ока и Сура. Реки водосбора водохранилища характеризуются значительной неравномерностью распределения стока в течение года. Доля стока весеннего половодья в средний по водности год составляет 70–80, летне-осеннего 10–22, зимнего 5–8%. В связи с потеплением климата на большей части водосбора Волги произошло изменение структуры водного баланса водосбора, в том числе и характеристик стока. Доля весеннего половодья в годовом стоке снизилась до 40–50%, соответственно — увеличилась доля меженного стока рек на 20–30%.

Качество воды большинства притоков водохранилища в последние годы оценивалась как “очень загрязненная” и “грязная”. На ряде рек загрязнение соединениями азота превышали

Таблица 1. Ландшафтная структура подводосборов Чебоксарского водохранилища

Название подводосбора*	Площадь, км ²	Структура земель, %					
		пашня	сельскохозяйственные земли, нераспаханные с осени	лес	малоэтажная застройка	территории с высокой долей непроницаемых поверхностей	овражно- балочная сеть
Алатырь	11236	60.4	1.6	26.7	6.3	0.5	4.5
Барыш	5927	50.6	0.5	40.7	5.1	0.4	2.5
Ватома	1385	0.0	0.0	92.4	5.5	0.3	1.8
Ветлуга Устье	5433	5.6	0.3	88.2	2.8	0.3	2.8
Ветлуга	22258	14.2	0.5	81.0	2.7	0.4	1.3
Ветлужский	5363	12.7	0.8	80.3	2.9	0.4	2.9
Дорогуча	1400	0.0	0.0	96.0	1.9	0.5	1.6
Керженец Устье	3233	0.0	0.0	96.9	1.1	0.3	1.7
Кудьма	3246	28.3	2.1	44.1	7.5	0.7	17.2
Линда	1681	7.7	1.2	80.4	4.0	0.1	6.5
Парат	3118	8.7	0.0	86.0	2.8	0.5	2.1
Параша	219	0.0	0.0	67.1	29.2	0.9	2.7
Пенза	15484	57.2	1.9	32.9	4.5	0.5	3.1
Порецкое	17629	45.8	1.6	43.1	5.1	0.5	4.0
Пыра	190	0.0	0.0	91.6	5.8	0.5	2.1
Пьяна	8117	72.4	1.3	14.7	6.1	0.5	5.0
Рахма	231	24.2	0.0	36.8	35.1	0.4	3.5
Сундовик	1266	71.3	1.2	20.3	6.2	0.6	0.4
Сура Устье	9970	58.3	1.2	29.9	7.0	0.7	2.9
Узола	2140	27.5	0.8	60.5	5.1	0.5	5.6
Уста	6060	24.1	0.2	69.8	4.2	0.5	1.1
Хахалы	3602	13.3	0.1	83.8	2.3	0.5	0.0
Черная	655	1.2	0.0	83.1	10.2	0.9	4.6
Юнга	1340	46.8	5.2	29.0	17.6	0.5	0.9
Весь водосбор Чебоксарского водохранилища	131183	36.6	1.0	53.9	4.7	0.5	3.2
Правобережье Чебоксарского водохранилища	75510	54.2	1.5	33.5	6.1	0.5	4.2
Левобережье Чебоксарского водохранилища	55673	12.7	0.4	81.7	2.9	0.4	1.9

* Для удобства расчетов выделенный подводосбор притока мог включать в себя соседнюю бесприточную область или объединять несколько небольших притоков.

большее влияние на водные ресурсы и в значительной степени характеризует эту деятельность на всем водосборе рассматриваемого водохранилища.

В сельскохозяйственном производстве Нижегородской области ведущей отраслью остается животноводство. Посевные площади занимают 1098.9 тыс. га. На начало 2019 г. население Нижегородской области составляло 3.2 млн человек, из которых 20% — сельские жители [12].

Особое место в экономике Чувашии занимает агропромышленный комплекс. Основная специализация сельского хозяйства — производство зерна, мясомолочное скотоводство, свиноводство и птицеводство [14]. В 2018 г. посевные площади во всех хозяйствах занимали 538.9 тыс. га. На начало 2019 г. население Чувашии составляло 1.2 млн человек. На долю сельского населения приходилось ~37% общей численности.

Ведущая отрасль сельского хозяйства республики Марий Эл — животноводство и птицеводство. В 2018 г. во всех хозяйствах было засеяно 297.5 тыс. га. На начало 2019 г. население Марий Эл составляло 0.68 млн чел., ~33% относилось к сельскому населению [14].

Расчеты характеристик диффузного стока биогенных элементов

Для расчетов характеристик диффузного стока БЭ с водосбора в Чебоксарское водохранилище использовался ландшафтно-гидрологический метод (ЛГМ), созданный ранее в Институте географии (ИГ) РАН и существенно усовершенствованный в ходе реализации данного проекта. Метод разработан для среднесезонных условий. В первых версиях этого метода рассчитывался диффузный перенос БЭ только с поверхностным весенним склоновым стоком и эрозией почвы с учетом ландшафтной структуры водосбора (территории геосистем, занятые лесом, распаханными и нераспаханymi с осени сельскохозяйственными угодьями, урбанизированные территории, овражно-балочная сеть) [17]. В последней его версии, реализованной для водосбора Чебоксарского водохранилища, добавлен учет переноса БЭ с подземным стоком как в течение весеннего половодья, так и в остальной период года, а также их перенос с подповерхностным стоком (“верховодкой”), который формируется только весной при таянии снежного покрова [18]. Отметим, что сама ландшафтная структура местного водосбора Чебоксарского водохранилища — продукт многовекового воздействия. Здесь практически не осталось непреобразованных, первичных ландшафтов, характеризующих зональный природный фон. Даже леса уже не могут рассматриваться как

эталон природного ландшафта, поскольку в значительной степени подвергаются как хозяйственному использованию, так и воздействию загрязненной промышленными выбросами атмосферы. Таким образом, современная ландшафтная структура водосбора Чебоксарского водохранилища, учитываемая в ЛГМ, — это природно-антропогенный фактор, косвенно отражающий антропогенную нагрузку на водосбор.

Принципиально новым в этой версии ЛГМ стал прямой учет основных видов антропогенной нагрузки на водосбор, влияющей на диффузный сток (в дальнейшем изложении — “прямая антропогенная нагрузка”). К ним относятся внесение минеральных и органических удобрений на сельскохозяйственные поля и поступление отходов жизнедеятельности из поселений, не обеспеченных канализацией, в подземные воды. Показатели прямой антропогенной нагрузки проще регламентировать с целью сокращения загрязнения водных объектов.

Важное в современной версии ЛГМ — разработка подхода к оценке поглощения водосбором и гидрографической сетью части потоков БЭ, сформировавшихся на водосборе. Кроме того, предполагается, что их перенос с продуктами эрозии, поверхностным склоновым стоком и верховодкой в исследуемом районе происходит только в период весеннего половодья. Перенос с подземным стоком осуществляется в течение всего года.

Общая схема факторов формирования стока БЭ с водосбора как от диффузных источников, учитываемых в ЛГМ, так и от точечных источников приведена на рис. 3.

Материалами, использовавшимися в работе, послужили данные Росгидромета [2], Росстата [5, 12], Агрохимслужбы, Единого Государственного реестра почвенных ресурсов России [7], материалы водохозяйственной статистики [2], собственные полевые наблюдения ИГ РАН, спутниковые снимки высокого разрешения, данные из работ [15, 17, 19–21].

В использованной версии ЛГМ не учитываются многие важные факторы; например, интенсивность снеготаяния и дождевые паводки, сроки внесения удобрений, их детальное распределение по площади пашни речного подводосбора. Ограничения вызваны как недостатком статистических и экспериментальных данных, так и использованием в методе зональных эмпирических воднобалансовых соотношений. Однако метод показал свою пригодность для среднесезонных климатических условий в первые десятилетия XXI в. на водосборах южной части лесной зоны Восточно-Европейской равнины [17–19].

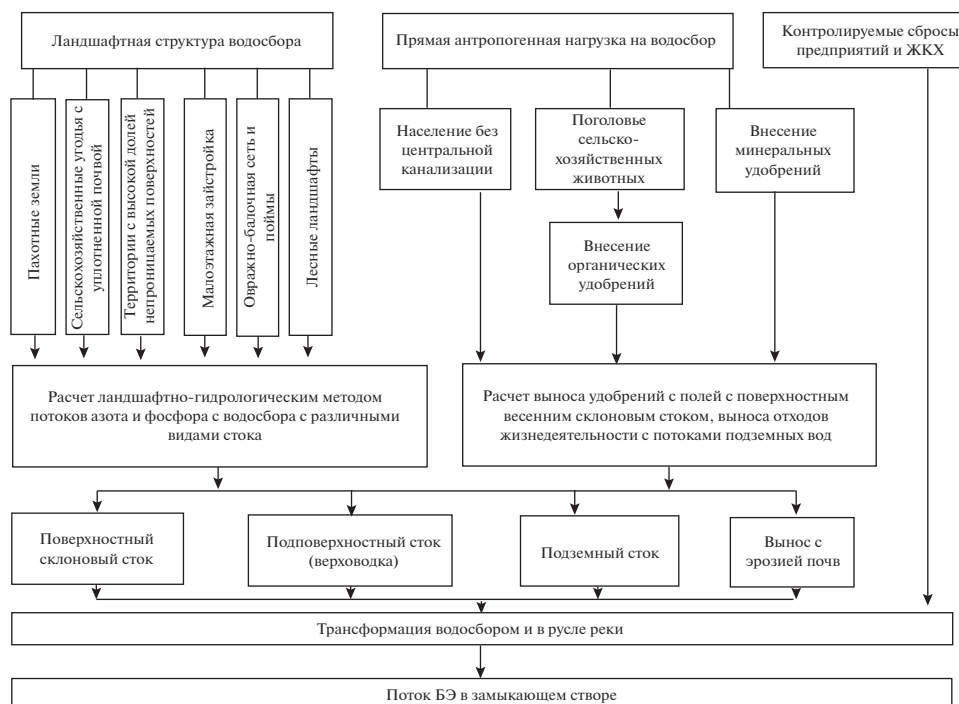


Рис. 3. Блок-схема расчета стока БЭ с водосбора с учетом ландшафтной структуры и антропогенной нагрузки.

Сток БЭ из естественных и антропогенно-преобразованных геосистем описывается через характерные для исследуемых геосистем измеренные концентрации веществ в потоках воды со склонов, в грунтовых водах, в руслах рек:

$$S_{ij} = kC_{ij}Y_{ij}F_i, \quad (1)$$

i – геосистема, или угодье (лес; сельскохозяйственные земли, распаханнные и не распаханнные с осени; малые населенные пункты; территории со слабопроницаемыми поверхностями, в том числе зоны многоэтажной застройки, промплощадки и пр.), овражно-балочная сеть; j – вид стока: а) жидкий: 1 – поверхностный склоновый, 2 – подповерхностный (верховодка), 3 – подземный; б) 4 – сток наносов (продуктов эрозии); k – переводной коэффициент, учитывающий размерность; Y – сток (слой жидкого стока, мм, или модуль стока наносов, кг/га); S – перенос БЭ с j -м видом стока с i -го угодья; F – площадь угодья на водосборе; C – концентрация БЭ в стоке. Концентрации оценивались в процессе собственных полевых работ и по литературным данным.

Слой поверхностного склонового стока с полевых и лесных угодий оценивались в соответствии с аппроксимациями С.В. Ясинского [17] эмпирических зависимостей Н.И. Коронкевича [10]:

$$Y_{il} = f(Y_{rr}), \quad (2)$$

Y_{il} – слой поверхностного склонового стока с i -го угодья; Y_{rr} – слой стока половодья, определяемый по гидрографам стока.

Слой поверхностного склонового стока с урбанизированных территорий и с овражно-балочной сети рассчитывались по соотношениям характерных коэффициентов стока с этих поверхностей и с полевых участков.

Слой подземного стока в половодье определялся расчленением гидрографов стока, предполагался одинаковым для всех угодьев. Рассчитывался подповерхностный сток (верховодка) и для всего водосбора, и для лесных угодьев. Он оценивался по разнице речного стока за половодье, поверхностного склонового стока за половодье и подземного стока за половодье. Поверхностный склоновый сток в половодье для всего водосбора рассчитывался как средневзвешенный поверхностный склоновый сток с разных угодьев с учетом ландшафтной структуры водосбора. Если расчетный объем стока верховодки со всего водосбора превышал расчетный объем верховодки с леса, предполагалось, что оставшаяся часть равномерно (в слоях стока) стекает с селитебных территорий и с полевых участков. Если же расчетный объем стока верховодки со всего водосбора был меньше расчетного объема верховодки с леса, объем стока верховодки с леса уменьшался до расчетного объема стока верховодки со всего водосбора. В этом случае предполагалось, что верховодка на других угодьях не образовывалась.

Слой подземного стока в период вне половодья оценивался по разнице объемов годового гидрографа речного стока и стока за половодье.

Таблица 2. Содержание общего азота и фосфора в отходах жизнедеятельности сельскохозяйственных животных, кг/год на 1 голову [4, 9]

Животные	Общий фосфор	Общий азот
Крупный рогатый скот	42.0	82.1
Свиньи	13.2	31.2
Овцы и козы	2.4	8.5
Лошади	24.5	50.8
Кролики	1.0	0.7
Птицы	1.4	1.5

Модуль стока наносов Y_{i4} за период половодья рассчитывался по следующему соотношению [3]:

$$Y_{i4} = f(Y_{i1}). \quad (3)$$

Учет прямой антропогенной нагрузки на водосбор в ЛГМ

Для урбанизированных территорий расчет сформированной на них антропогенной нагрузки выполнялся исходя из численности проживающего там населения. По материалам HELCOM [21], от одного жителя поступает 0.9 кг общего фосфора и 4.4 кг общего азота в год. В расчетах диффузного загрязнения принято, что при отсутствии центральной канализации в сельских населенных пунктах отходы жизнедеятельности поступают в подземный сток в пределах населенных пунктов и выносятся равномерно в течение года. Предполагается, что все городское население водосбора Чебоксарского водохранилища имеет доступ к центральной канализации и в расчетах диффузного стока не учитывается.

Отходы от животноводства и птицеводства частично поступают на пашню как органические удобрения и формируют потенциальные диффузные источники загрязнения водных объектов БЭ. По данным [4, 8] определено содержание азота и фосфора в продуктах жизнедеятельности сельскохозяйственных животных (табл. 2).

При определении количеств азота и фосфора, внесенных с минеральными удобрениями, использовалось соотношение $NPK\ 22 : 11 : 11$, характерное для Восточно-Европейской равнины [4, 8].

При расчетах среднего многолетнего стока БЭ с пахотных земель принято, что величина потоков обусловлена как их фоновыми региональными значениями, так и выносом неусвоенных растениями и почвой удобрений. В расчетах предполагается, что вынос неусвоенной части удобрений осуществляется поверхностным склоновым стоком в период половодья.

К фоновым потокам азота и фосфора, стекающих со склоновым стоком с сельскохозяйственных полей, добавляется поступление азота и фосфора с минеральными и органическими удобрениями:

$$L_{agr} = (\alpha_1 M_{min} + \alpha_2 M_{org}), \quad (4)$$

L_{agr} – неусвоенная сельскохозяйственными культурами масса БЭ; M_{min} и M_{org} – массы внесенных на поля минеральных и органических удобрений; α_1 – коэффициент, учитывающий усвоение минеральных удобрений сельскохозяйственными культурами (0.3 для азота и 0.03 для фосфора); α_2 – коэффициент, учитывающий усвоение органических удобрений сельскохозяйственными культурами (0.1 для азота и 0.02 для фосфора) [8].

По данным [8, 9], фоновые концентрации общего фосфора и общего азота в почвенных водах и первичных звеньях гидрографической сети для различных типов поверхности в южной части лесной зоны составляют ~ 0.05 мгР/л и ~ 0.7 мгN/л для естественных территорий (лесов и болот), что соответствует ~ 0.02 мг/л минерального Р и ~ 0.35 мг/л минерального N. Для пересчета общего азота в минеральный азот использовался коэффициент 2 [9], для пересчета общего фосфора в минеральный – коэффициент 2.5.

Для оценки и учета в ЛГМ указанных выше видов антропогенной нагрузки весь водосбор рассматриваемого водохранилища разделен на 24 подводосбора его притоков, различающихся ландшафтной структурой и антропогенной нагрузкой. Для каждого из них по результатам дешифрирования космических снимков получена ландшафтная структура (рис. 4; табл. 1).

На территории водосбора Чебоксарского водохранилища расположены 136 административных районов 11-ти субъектов РФ. Для каждого из районов на сайтах региональных отделений Росстата приведены данные о величине внесения минеральных удобрений, о количестве различных сельскохозяйственных животных, учтенных в Сельскохозяйственной переписи 2016 г., о площади сельскохозяйственных полей, о численности населения. Эти данные использованы для оценки антропогенной нагрузки с учетом доли площади того или иного района в каждом подводосборе притоков Чебоксарского водохранилища.

Значительная часть БЭ, поступивших на водосбор от различных источников, не достигает замыкающих створов крупных рек, так как удерживается водосбором и различными звеньями гидрографической сети. Материалы эрозии осаждаются в местах уменьшения скоростей потоков, растворенные вещества при взаимодействии с подстилающей поверхностью могут поглощать-

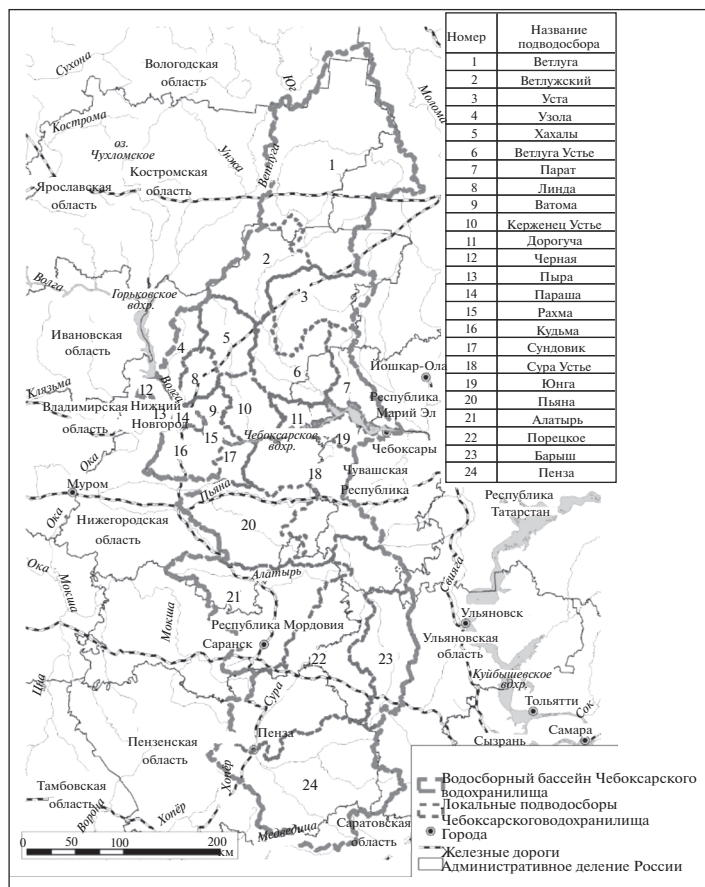


Рис. 4. Картограмма локальных подводосборов притоков Чебоксарского водохранилища.

ся почвой, осажаться при испарении и пр. В результате итоговая нагрузка на водный объект составляет лишь часть поступления БЭ на водосбор. Поглощение водосбором потоков БЭ определяется многими факторами, в том числе расчлененностью рельефа, уклонами, наличием западин, аккумулирующих поверхностный сток, карстом, характеристиками почвенно-растительного покрова, распашкой, урбанизацией, мелиорацией. Значительную роль играет трансформация потоков веществ уже в руслах малых рек и в водохранилищах, где происходят процессы осаждения, разложения, поглощения биотой, вторичного загрязнения от донных отложений. Однако для Восточно-Европейской равнины главный фактор — это время контакта потока веществ с подстилающей поверхностью. Оно приближенно может быть оценено как функция площади водосбора. Чем больше площадь водосбора, тем больше время контакта и, соответственно, тем больше удержание водосбором веществ. Кроме того, необходимо учитывать объем стока воды с водосбора — чем больше сток, тем, вероятно, выше скорость горизонтальных потоков воды на водосборе и меньше потери на фильтрацию и испарение.

В методике ЛГМ реализован учет уменьшения водосбором как твердого, так и растворенного стока БЭ.

Для оценки притока БЭ со стоком наносов M_n к замыкающему створу водосбора используется уравнение:

$$M_n = D_n \sum_{i=1}^6 (S_{i4} F_i), \quad (5)$$

где D_n — коэффициент доставки наносов. Величина D_n рассчитывается как функция площади водосбора [6]:

$$D_n = 0.65 F^{-0.27}. \quad (6)$$

Формула (6) имеет недостаток — при достаточно больших величинах площади водосбора приращение площадей практически не оказывает влияние на задержание водосбором.

Для оценки притока БЭ с жидким стоком к замыкающему створу водосбора $M_{жс}$ используется уравнение:

Таблица 3. Формирование прямой антропогенной нагрузки на водосборе, связанной с жизнедеятельностью человека и применением удобрений, т

Часть водосбора Чебоксарского водохранилища	Итого	Нагрузка от сельского населения	Нагрузка от удобрений	
			органических	минеральных
Азот в пересчете в минеральную форму				
Левобережная часть	2995	508	548	1939
Правобережная часть	37936	1985	4698	31253
Весь водосбор	40931	2493	5246	33192
Фосфор в пересчете в минеральную форму				
Левобережная часть	783	83	277	423
Правобережная часть	9668	325	2520	6823
Весь водосбор	10451	408	2797	7246

$$M_{жс} = D_{жс} \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^3 (S_{ij} F_i), \quad (7)$$

где $D_{жс}$ — коэффициент трансформации потока растворенных БЭ на пути от первичных элементов гидрографической сети до устья реки [8]:

$$D_{жс} = \frac{1}{1 + aq^b}, \quad (8)$$

Q — модуль стока, л/с/км² (зависящий от объема стока воды и площади водосбора); a и b — безразмерные эмпирические параметры, составляющие соответственно 26.6 и -1.71 для фосфора и 1.9 и -0.49 для азота [8].

В расчетах параметры формулы (8) приняты одинаковыми для всех водосборов. Коэффициент трансформации $D_{жс}$ — это интегральный параметр, характеризующий удержание БЭ водосбором во всех средах: на поверхности склонов, в почвах и в грунтах. Дифференциация учитываемых потоков (перенос растворенных веществ поверхностным, внутрипочвенным и подземным стоком) в дальнейшем потребует и дифференциации коэффициентов удержания, зависящих от характеристик среды переноса.

Метод верифицирован по данным наблюдений на гидрологических и гидрохимических постах государственной сети Гидрометслужбы на водосборе Чебоксарского водохранилища и многолетним данным мониторинга Верхне-Волж-

ского бассейнового управления в устьях рек, впадающих в водохранилище.

Результаты расчетов стока биогенных элементов с учетом влияния антропогенных нагрузок и регулирования потоков этих элементов водосбором Чебоксарского водохранилища

Величины поступления азота и фосфора (в пересчете в минеральные формы) на право- и левобережье и всем водосборе Чебоксарского водохранилища в результате прямой антропогенной нагрузки приведены в табл. 3. Анализ приведенных данных показывает преобладающий вклад в прямую антропогенную нагрузку внесения удобрений на поля по сравнению с вкладом сельского населения. Очевидно почти десятикратное по сравнению с левобережьем превышение поступления антропогенно обусловленных БЭ на правобережье водохранилища, где сконцентрировано население и развито сельское хозяйство региона.

В табл. 4 приведены данные по формированию и трансформации потоков БЭ на водосборе Чебоксарского водохранилища, связанных с рассматриваемыми в методике факторами. На рис. 5–8 показаны расчетные карты диффузных потоков БЭ, сформировавшихся на подводосборах бассейна Чебоксарского водохранилища и поступивших после трансформации в Чебоксарское водохранилище.

Таблица 4. Формирование и трансформация потоков БЭ на водосборе Чебоксарского водохранилища

Часть водосбора Чебоксарского водохранилища	Площадь водосбора, км ²	Внесение удобрений на поля, поступление отходов в подземные воды, т/год	Вынос удобрений с полей со склоновым стоком, отходов с подземными водами, т/год	Вынос БЭ с ландшафтов (без учета прямой антропогенной нагрузки), т/год	Суммарный вынос БЭ от диффузных источников на водосборе, т/год	Поступление БЭ от диффузных источников в водохранилище после трансформации водосбором, т/год	Отношение потоков, попавших в водохранилище, к сформированным на водосборе, в %
Азот в пересчете в минеральную форму							
Левобережная	55674	2995	1144	17348	18492	10744	58
Правобережная	75511	37936	11831	8300	20131	10177	51
Весь водосбор	131185	40931	12975	25648	38623	20921	54
Фосфор в пересчете в минеральную форму							
Левобережная	55674	783	101	928	1029	540	52
Правобережная	75511	9668	580	898	1478	409	28
Весь водосбор	131185	10451	681	1826	2507	949	38

Таблица 5. Преобразование потоков БЭ, связанных с внесением удобрений и поступлением отходов человеческой жизнедеятельности, в подземные воды на водосборе до поступления в Чебоксарское водохранилище

Часть водосбора Чебоксарского водохранилища	Внесение удобрений на поля, поступление отходов в подземные воды	Вынос удобрений с полей со склоновым стоком, отходов с потоками подземных вод	Поступление БЭ в водохранилище от диффузных источников прямой антропогенной нагрузки
Азот в пересчете в минеральную форму, % от поступившего на водосбор			
Левый берег	100.0	38.3	22.3
Правый берег	100.0	31.3	15.9
Весь водосбор	100.0	31.8	16.2
Фосфор в пересчете в минеральную форму, % от поступившего на водосбор			
Левый берег	100.0	13.2	7.0
Правый берег	100.0	5.9	1.7
Весь водосбор	100.0	6.7	2.5

Таблица 6. Вклад прямого антропогенного воздействия (внесения удобрений и поступления отходов жизнедеятельности населения) в диффузный сток БЭ в Чебоксарское водохранилище, %

Подводосбор	Берег	Азот минеральный	Фосфор минеральный
Ватома	Левый	20	35
Ветлуга Устье	Левый	3	7
Ветлуга	Левый	2	4
Ветлужский	Левый	2	6
Дорогуча	Левый	13	17
Керженец Устье	Левый	19	25
Линда	Левый	13	19
Парат	Левый	12	22
Узола	Левый	29	24
Уста	Левый	5	9
Хахалы	Левый	8	13
Левый берег Чебоксарского водохранилища	Левый	6	10
Алатырь	Правый	70	47
Барыш	Правый	46	28
Кудьма	Правый	56	45
Параша	Правый	25	26
Пенза	Правый	58	43
Порецкое	Правый	59	38
Пыра	Правый	19	27
Пьяна	Правый	57	35
Рахма	Правый	58	45
Сундовик	Правый	47	33
Сура Устье	Правый	52	34
Черная	Правый	20	15
Юнга	Правый	40	36
Правый берег Чебоксарского водохранилища	Правый	59	39

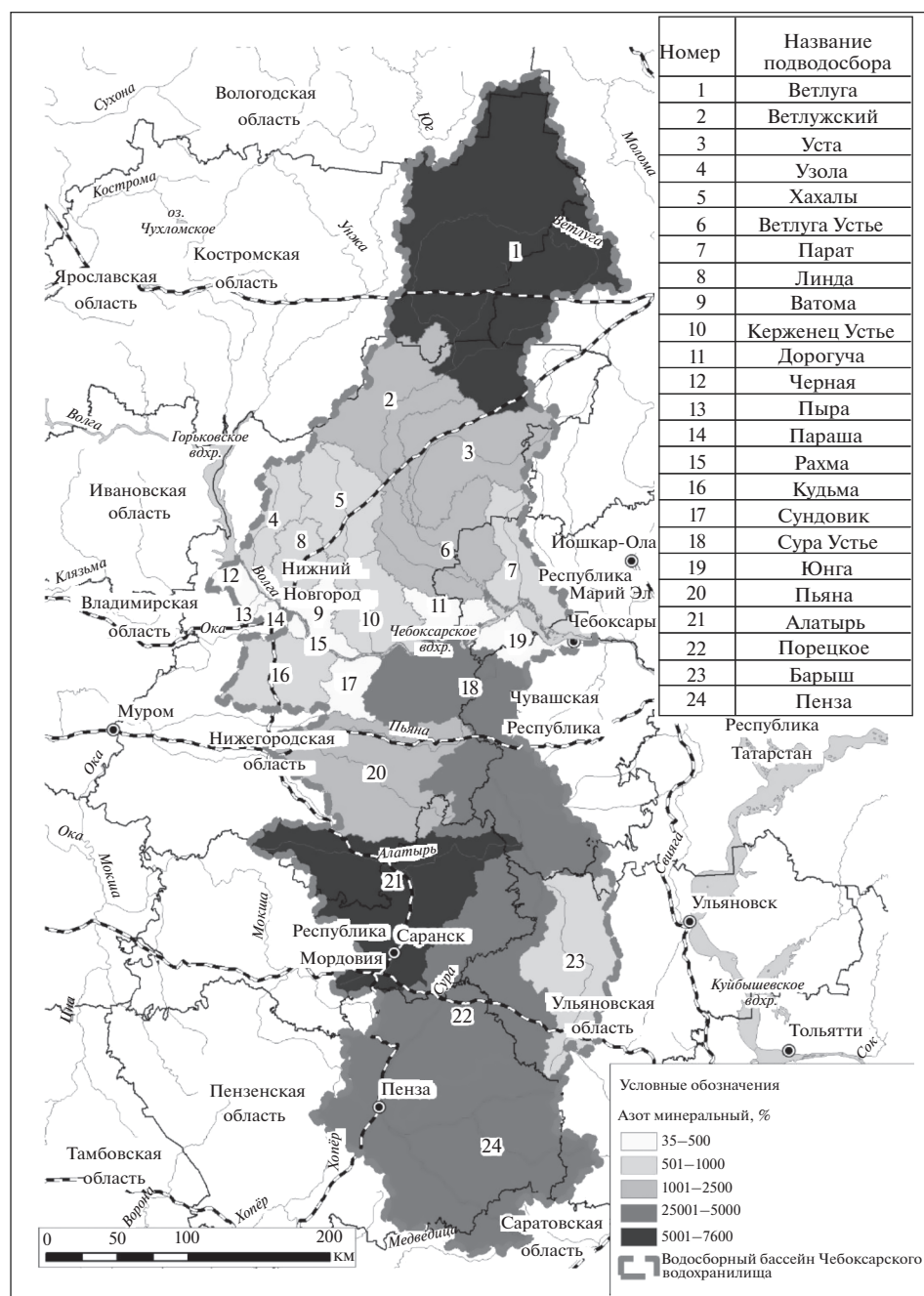


Рис. 5. Потоки азота от диффузных источников, сформировавшиеся на подводосборах бассейна Чебоксарского водохранилища, т/год.

По предварительным оценкам, более половины диффузного потока азота, сформированного на водосборе, поступает в Чебоксарское водохранилище. Фосфор по сравнению с азотом значительно поглощается водосбором. В целом диффузный поток азота сокращается от водосбора к устью в ~2 раза, а фосфора — в 3 раза, т.е. до Чебоксарского водохранилища доходит только 30%

потока фосфора и 50–60% азота от сформировавшихся на водосборе.

Большую роль в поглощении БЭ водосбором оказывает величина водного стока, которая ниже на правобережье [10]. На водосборе Чебоксарского водохранилища это благоприятный фактор, сокращающий поступление БЭ в водохранилище с территорий с большой антропогенной нагрузкой.

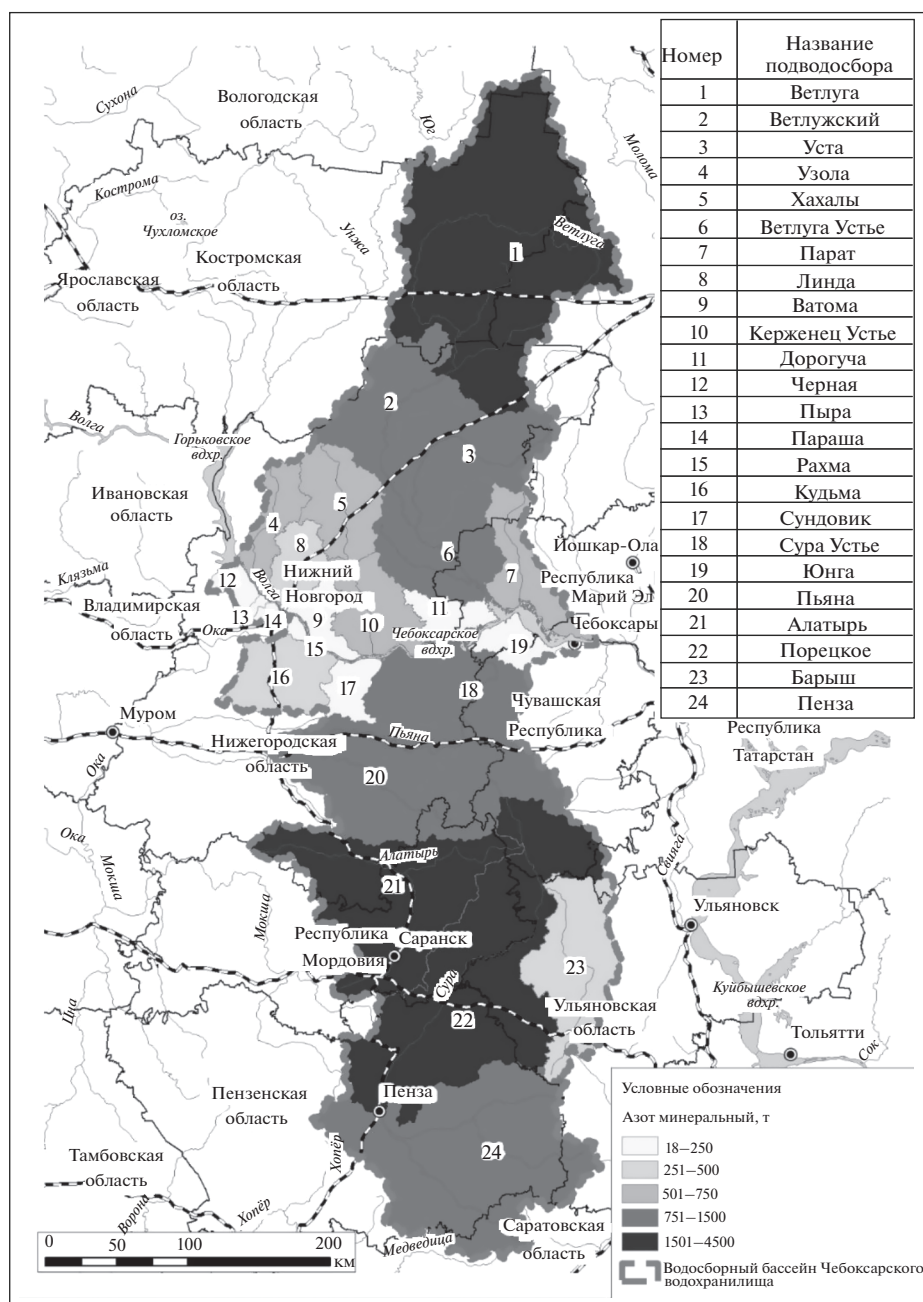


Рис. 6. Поток азота от диффузных источников на подводосборах, поступившие после трансформации в Чебоксарское водохранилище, т/год.

В табл. 5 детально показано сокращение потока БЭ, связанного с прямой антропогенной нагрузкой, от поступления на водосбор до попадания к устьевым участкам притоков водохранилища после трансформации потоков БЭ водосбором и гидрографической сетью. Потоками воды и наносов выносятся азота 30–40% и фосфора ~10% от поступивших на водосбор отходов человеческой жизнедеятельности и удобрений. На левом, северном, берегу водохранилища доля выноса вы-

ше за счет большего слоя стока половодья [10]. Согласно расчетам, только 16–22% азота, поступающего на водосбор с отходами человеческой жизнедеятельности и удобрениями, достигает водохранилища. Фосфор, поступивший на водосбор в результате прямой антропогенной нагрузки, практически весь задерживается на водосборе.

Вклад левого (лесного и слабо освоенного в хозяйственном отношении) и правого (с высокой

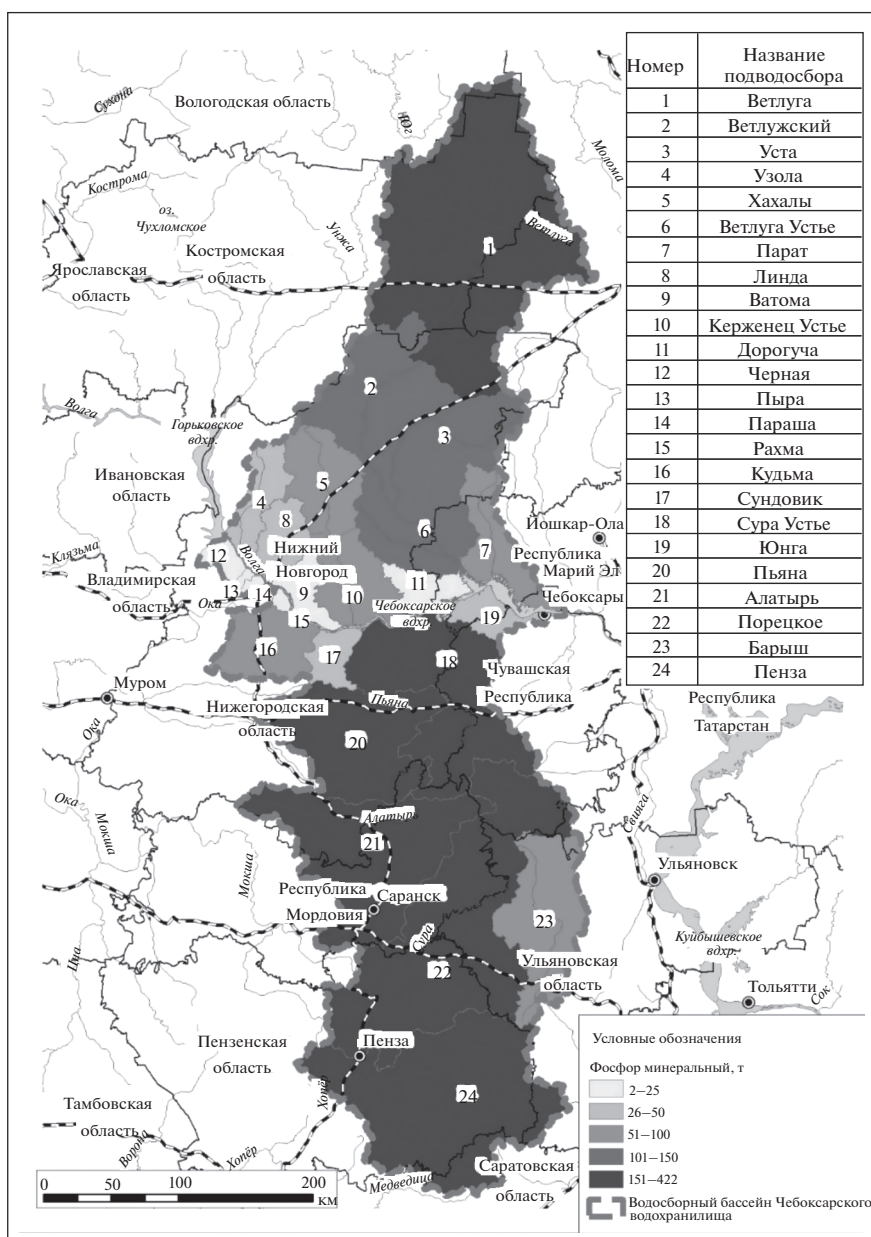


Рис. 7. Потоки фосфора от диффузных источников, сформировавшиеся на подводосборах бассейна Чебоксарского водохранилища, т/год.

антропогенной нагрузкой) берегов в поступление БЭ в водохранилище примерно равноценен (табл. 4). Однако очевидна дифференциация территории водосбора водохранилища по источникам, формирующим диффузные потоки БЭ. На правобережье около половины формирующихся на водосборе потоков связано с прямой антропогенной нагрузкой. Для потоков азота это ~60%, фосфора ~40%. На слабо освоенном и сильно залесенном левобережье вклад прямой антропогенной нагрузки в сток азота и фосфора

составляет <10%, а основной вклад в поступление БЭ с водосбора вносят лесные геосистемы.

На рис. 9, 10 и в табл. 6 показан вклад прямого антропогенного воздействия (внесения удобрений и попадания отходов человеческой жизнедеятельности на водосбор) в диффузный поток БЭ в Чебоксарское водохранилище дифференцированно по подводосборам. В бассейне Алатыря (притока Суры) этот вклад достигает 70% выноса азота. Повышенный вклад прямого антропогенного воздействия в сток БЭ характерен для бас-

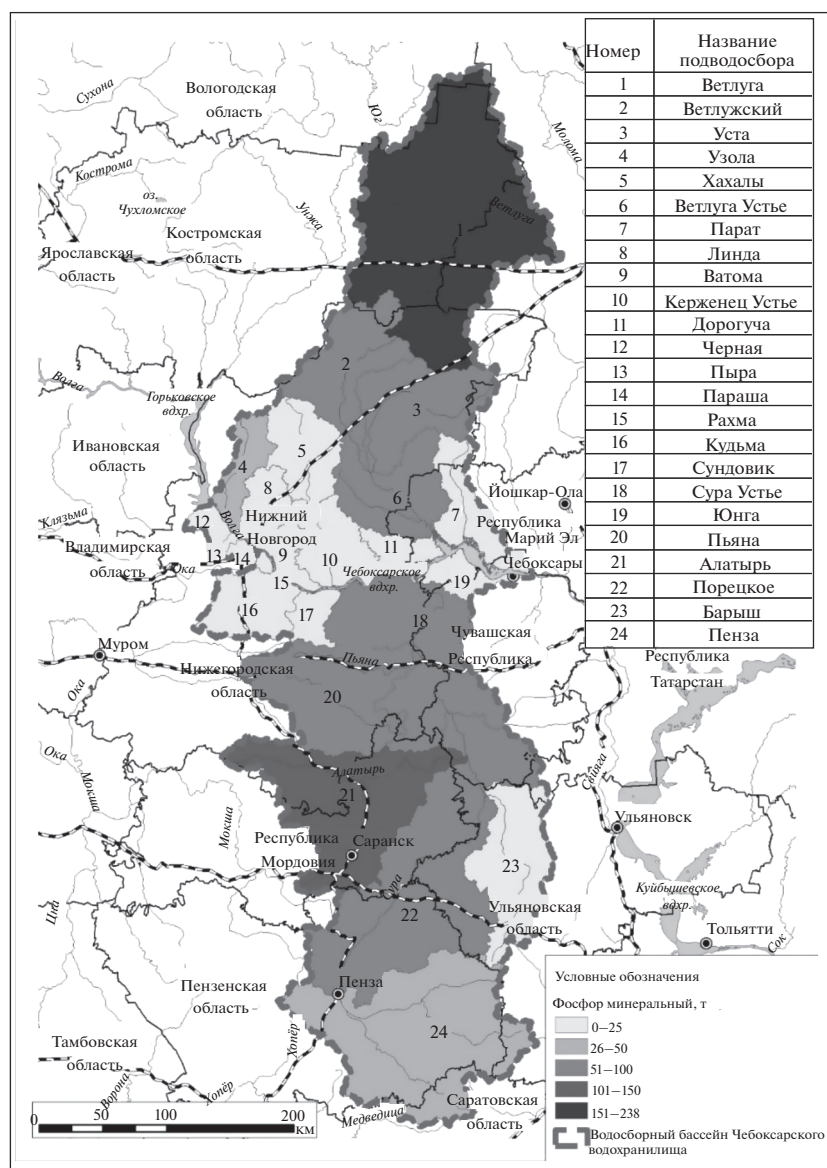


Рис. 8. Потоки фосфора от диффузных источников на подводосборах, поступившие после трансформации в Чебоксарское водохранилище, т/год.

сейна Суры в целом, а также для рек Рахмы и Кудьмы. Это связано со значительной плотностью сельского населения, развитием пахотного земледелия и большим количеством птицеводческих и животноводческих комплексов на этих водосборах.

ВЫВОДЫ

Дана краткая характеристика физико-географических условий и хозяйственной деятельности на местном водосборе Чебоксарского водохранилища (без бассейна р. Оки). Отмечено существен-

ное различие этих условий на левом (залесенном) и правом (с высокой долей сельскохозяйственных полей в ландшафтной структуре) берегах этого водохранилища, оказывающих различное влияние на степень биогенного загрязнения и качество его водных ресурсов.

Раскрыта суть новой версии ландшафтно-гидрологического метода ИГ РАН, в которой к расчету среднего многолетнего диффузного стока БЭ – азота и фосфора – с весенним поверхностным склоновым стоком и эрозией почвы добавился блок расчета этих элементов с подземным стоком во все основные периоды года

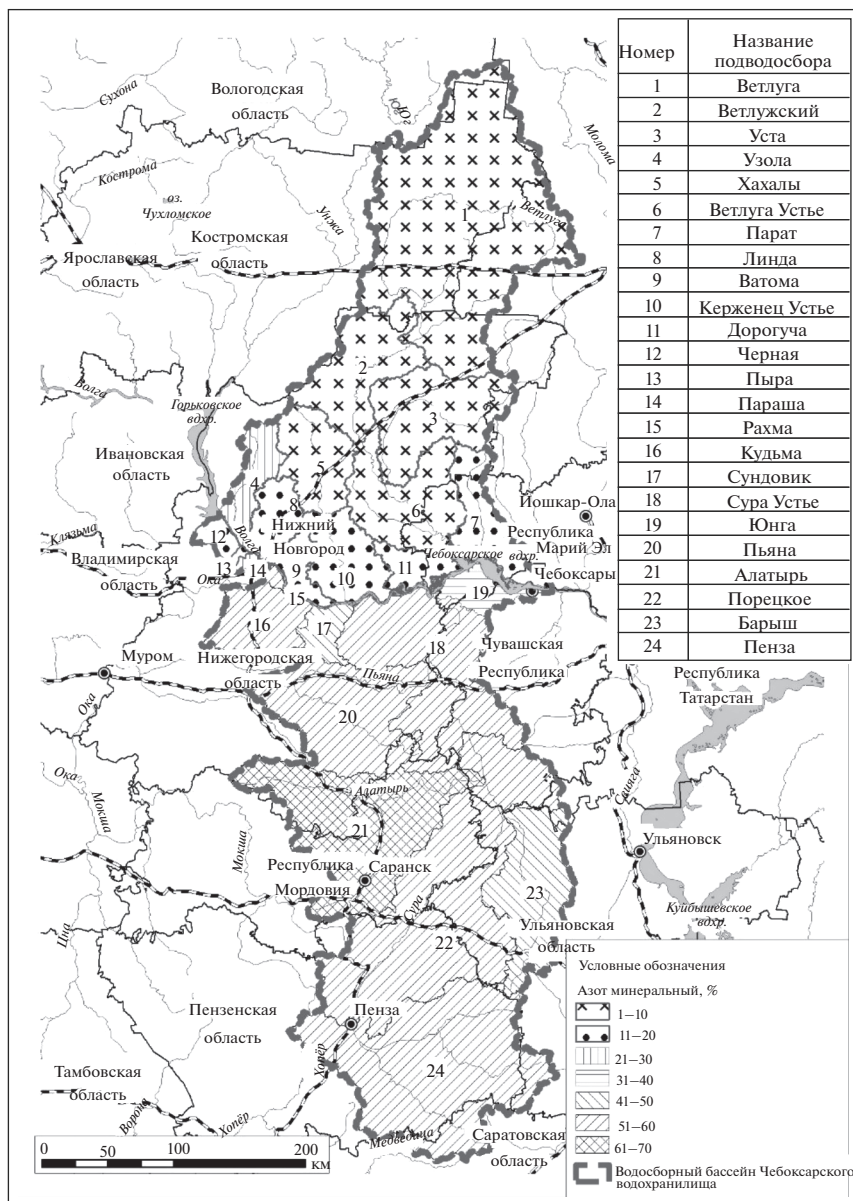


Рис. 9. Вклад прямой антропогенной нагрузки (внесения удобрений и поступления отходов жизнедеятельности населения) в диффузный сток азота с водосбора в Чебоксарское водохранилище, %.

и с подповерхностным стоком (“верховодкой”) только для периода весеннего снеготаяния. Учтены основные виды прямой антропогенной нагрузки на водосбор: внесение минеральных и органических удобрений на сельскохозяйственные поля и поступление отходов жизнедеятельности населения в поселениях, не обеспеченных канализацией, в подземные воды.

Разработана методика и реализован учет интегрального влияния водосборов притоков на снижение диффузного стока растворенных и переносимых со стоком наносов БЭ.

Приведены результаты расчетов диффузного стока минеральных азота и фосфора с левого и правого берегов и всего водосбора Чебоксарского водохранилища с учетом антропогенной нагрузки и удержания БЭ на водосборе. Получены оценки поглощения БЭ водосбором и гидрографической сетью с момента поступления БЭ на водосбор до попадания к устьевым участкам притоков водохранилища. Показано, что до Чебоксарского водохранилища доходит только 30% потоков фосфора и 50–60% азота от сформировавшихся на водосборе.

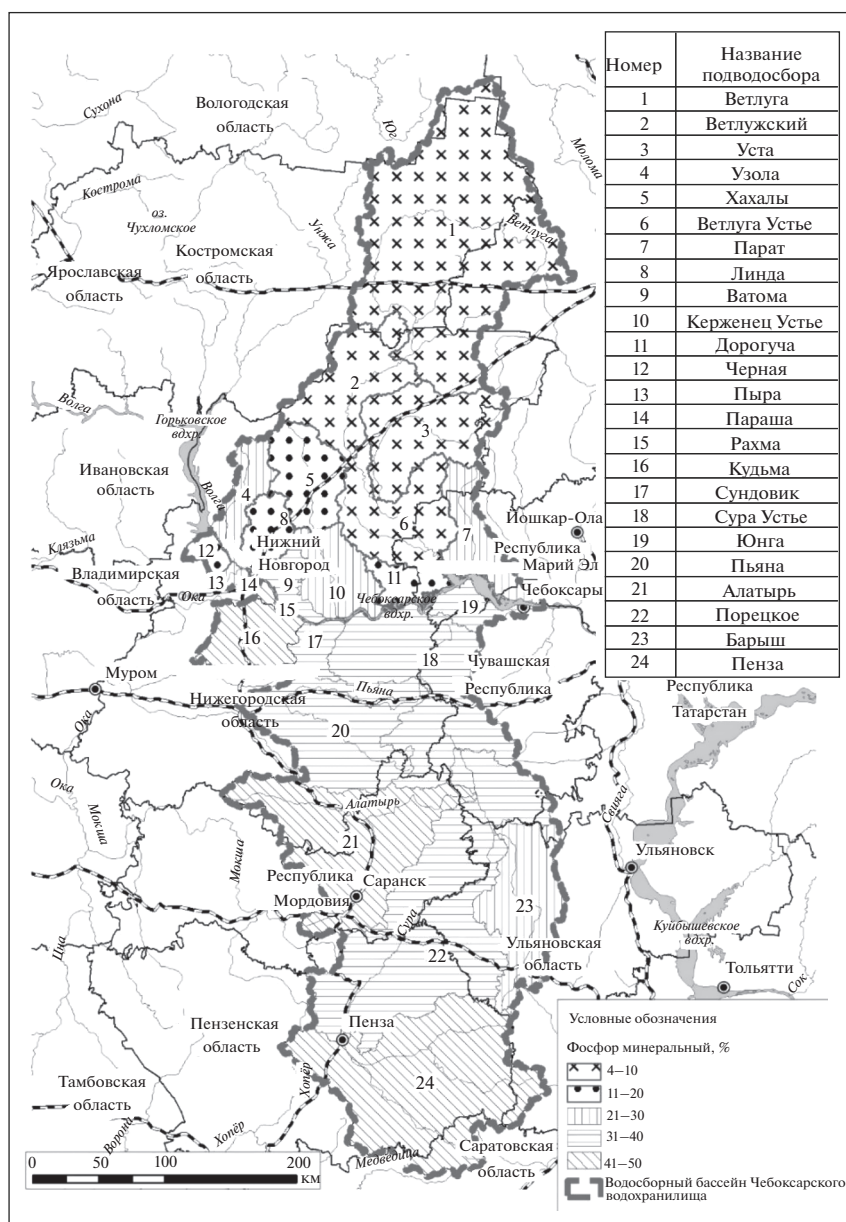


Рис. 10. Вклад прямой антропогенной нагрузки (внесения удобрений и поступления отходов жизнедеятельности населения) в диффузный сток фосфора с водосбора в Чебоксарское водохранилище, %.

На правом берегу прямая антропогенная нагрузка в диффузном выносе БЭ составляет 40–60%, на левом берегу – до 10%. Соответственно вклад ландшафтов в диффузный сток составляет ~50% на правом берегу и ~90% на левом берегу водохранилища.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Авандеева О.П.* Методические аспекты мониторинга качества вод для зон повышенного экологического риска нефтегенных загрязнений (на примере Чебоксарского водохранилища). Дис. ... канд. геогр. наук. М.: ИВП РАН, 2015. 149 с.
2. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) [Электронный ресурс]. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> (дата обращения: 10.05.2020)
3. *Бобровицкая Н.Н.* Исследование и расчет смыва почвы со склонов // Сб. работ по гидрологии. Л.: Гидрометеиздат, 1977. № 12. С. 93–99.
4. *Брюханов А.Ю., Кондратьев С.А., Обломкова Н.С., Оглуздин А.С., Субботин И.А.* Методика определения биогенной нагрузки на водные объекты от сельскохозяйственного производства // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2016. № 89. С. 175–183.

5. Всероссийская сельскохозяйственная перепись 2016 года [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gks.ru/519> (дата обращения: 10.05.2020)
6. *Голосов В.Н.* Эрозионно-аккумулятивные процессы в верхних звеньях флювиальной сети освоенных равнин умеренного пояса. Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. М.: МГУ, 2003. 45 с.
7. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. 2014. [Электронный ресурс]. URL: <http://egrpr.soil.msu.ru/index.php> (дата обращения: 10.04.2020)
8. *Кондратьев С.А., Брюханов А.Ю., Терехов А.В.* Структура поверхности водосбора как определяющий фактор биогенной нагрузки на водоем (по данным математического моделирования) // *Вопр. географии*. 2018. № 145. С. 89–108.
9. *Кондратьев С.А., Шмакова М.В.* Математическое моделирование массопереноса в системе “водосбор–водоток–водоем”. СПб.: Нестор-История, 2019. 247 с.
10. *Коронкевич Н.И.* Водный баланс Русской равнины и его антропогенные изменения. М.: Наука, 1990. 204 с.
11. *Литвин Л.Ф., Голосов В.Н., Добровольская Н.Г., Иванова Н.Н., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф.* Стационарные исследования эрозии почвы при снеготаянии в Центральном Нечерноземье // *Эрозия почв и русловые процессы*. Вып. 11 / Под ред. Р.С. Чалова. М.: Изд-во МГУ, 1998. С. 57–76.
12. Население. Оперативная информация. Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Нижегородской области. [Электронный ресурс]. URL: <https://nizhstat.gks.ru/folder/33271> (дата обращения: 10.04.2020)
13. О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 г. Указ президента РФ от 7 мая 2018 г.
14. Оценка регулирующего воздействия [Электронный ресурс]. URL: <http://orv.gov.ru/Regions/Details/34> (дата обращения: 10.04.2020)
15. *Хрисанов Н.И., Осипов Г.К.* Управление эвтрофированием водоемов. СПб.: Гидрометеоздат, 1993. 279 с.
16. *Ясинский С.В., Веницианов Е.В., Вишневская И.А.* Диффузное загрязнение водных объектов и оценка выноса биогенных элементов при различных сценариях землепользования на водосборе // *Вод. ресурсы*. 2019. Т. 46. № 2. С. 232–244.
17. *Ясинский С.В., Гуров Ф.Н., Шилькрот Г.С.* Метод оценки выноса биогенных элементов в овражно-балочную и речную сеть малой реки // *Изв. РАН. Сер. географ.* 2007. № 4. С. 44 – 53.
18. *Ясинский С.В., Какутина Е.А., Сидорова М.В., Нарыков А.Н.* Антропогенная нагрузка на водосбор и ее учет при оценке выноса биогенных элементов в крупный водный объект (на примере Чебоксарского водохранилища) // *Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения*. Сб. науч. тр. Нижний Новгород; М.: Студия Ф1, 2019. С. 487–491.
19. *Behrendt H., Dannowski R.* Nutrients and heavy metals in the Odra River system: Emissions from Point and Diffuse Sources, their Loads, and Scenario Calculations on Possible Change. Berlin: Weissensee Verlag Publ., 2005. 353 p.
20. *Behrendt H., Opitz D.* Retention of nutrients in river systems: dependence on specific runoff and hydraulic load // *Hydrobiologia*. 1999. V. 410. P. 111–122.
21. HELCOM Guidelines for the compilation of waterborne pollution to the Baltic Sea (PLC-water). Helsinki: HELCOM, 2005. 80 p.