

УДК 556.531;631.6

ОЦЕНКА ДИФФУЗНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОТ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ В БАССЕЙНЕ ВЕРХНЕЙ ВОЛГИ И РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ЕГО СНИЖЕНИЮ НА ПРИМЕРЕ РЕКИ ЯХРОМЫ

© 2020 г. Л. В. Кирейчева^a, *, Е. А. Лентяева^a, А. Д. Тимошкин^a, В. М. Яшин^a

^aВсероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации
им. А.Н. Костякова, Москва, 127550 Россия

*e-mail: kireychevalw@mail.ru

Поступила в редакцию 17.01.2020 г.

После доработки 23.04.2020 г.

Принята к публикации 29.04.2020 г.

Выполнена оценка возможного поступления загрязняющих биогенных веществ в водные объекты бассейна Верхней Волги с сельскохозяйственных земель на примере водного объекта р. Яхромы площадью 1437 км². Проведены исследования качества воды по профилю реки, показавшие, что источники биогенного загрязнения, наряду со сточными водами городов Дмитров и Яхрома, – сельскохозяйственные угодья, расположенные на водоразделе и мелиоративный объект на пойме площадью >9 тыс. га. Выполнен расчет поступления азота, фосфора и калия с поверхностными и дренажными водами в речную сеть. Показано, что основную роль в загрязнении как поверхностных, так и дренажных вод играют соединения азота и калия, в меньшей степени – соединения фосфора. В бассейне Яхромы общий среднемноголетний годовой объем поверхностного стока оценен в 12358 тыс. м³, дренажных вод – 15952 тыс. м³. Вынос с поверхностным стоком азота – 27.36, фосфора – 6.06 и калия – 242.28 т/год; с дренажным стоком вынос азота – 96.88, фосфора – 0.38, калия – 37.04 т/год. Разработаны сценарии защитных мероприятий, обеспечивающие снижение поверхностных и очистку дренажных стоков от азотных и фосфорных соединений, что позволит уменьшить биогенное загрязнение реки при регулировании поверхностного стока на 73.7 т/год и при очистке дренажного стока на 160 т/год.

Ключевые слова: водные объекты, биогенное загрязнение, поверхностный сток, дренажные воды, азот, фосфор, калий.

DOI: 10.31857/S0321059620050090

Волга и ее притоки на протяжении последнего десятилетия характеризуются как чрезвычайно грязные реки, несмотря на снижение объема и повышение эффективности очистки контролируемых источников сброса сточных вод [2]. В этой связи особого внимания требует рассмотрение роли диффузного загрязнения водных объектов в бассейне Волги [5]. Существенным источником загрязнения могут быть сельскохозяйственные угодья, включая мелиорированные земли, на которых формируется как поверхностный сток, так в значительном объеме рассредоточенный дренажный сток, поступающий непосредственно в водные объекты.

В настоящее время в бассейне Верхней Волги используется под пашню 28457 тыс. га, что составляет 21% общей площади бассейна (1360 тыс. км²), площадь осущененных дренажем земель – 2175.7 тыс. га, из которой в сельскохозяйственном

производстве используется только 961.12 тыс. га. Осушение осуществляется преимущественно в долинах малых и средних рек на поймах, где сформировались плодородные аллювиальные или органогенные почвы, на которых возделываются овощи, картофель и кормовые культуры. Малые реки, являясь одновременно приемниками дренажного стока с осущаемых земель и составной частью гидрографической сети Волжского бассейна, транспортируют загрязнения, поступающие с бассейнов малых рек, непосредственно в Волгу. С дренажными водами в водные объекты поступают органическое вещество, остатки минеральных удобрений, отдельные ионы химических элементов [3, 13]. По материалам исследований [16–18, 21–24] концентрация дренажного стока и вынос солей из осущаемых минеральных почв меняется в зависимости от типа почвы. Для суглинистых почв вынос солей: по азоту 1.4–

4.1 кг/га, фосфору до 1, по калию 3–12 кг/га, по кальцию 20–147, магнию 10–76 кг/га; для супесчаных почв: по азоту 8–84 кг/га, фосфору 0.6–1, калию до 14, кальцию 22–238, магнию 32–62 кг/га.

В настоящее время отсутствуют репрезентативные сведения о составе диффузионного стока с сельскохозяйственных мелиорируемых земель, объемах и качестве дренажных и сбросных вод, поступающих с мелиоративных систем в водные объекты бассейна р. Волги. Недостаточно разработаны методики определения расчетных концентраций минеральных, органических веществ и пестицидов в дренажном и поверхностном стоке, а также пространственные математические модели миграции и трансформации загрязняющих веществ. Для оценки ситуации и разработки мер по снижению диффузного загрязнения с сельскохозяйственных полей в бассейне Волги необходимы детальные исследования на pilotных водных объектах малых рек. Цель настоящих исследований – оценка поступления загрязняющих биогенных веществ с сельскохозяйственных угодий в водные объекты бассейна Верхней Волги на примере р. Яхромы и разработка мероприятий по их снижению.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве试点ного водного объекта в Верхневолжском бассейне выбран водосборный бассейн р. Яхромы – притока р. Волги третьего порядка, в пределах которого используется более 9 тыс. га мелиорируемых земель сельскохозяйственного назначения. Осуществляемый массив Яхромской поймы – уникальный объект мелиорации как по площади системы, так и по интенсивности мелиоративного воздействия на природный комплекс. В результате длительной эксплуатации поймы на мелиорированных землях сформировался мелиоративный режим, характеризующийся использованием современных интенсивных агротехнологий с внесением высоких доз удобрений и применением различных агрохимикатов для борьбы с вредителями и сорняками на фоне орошения и дренажа [4]. Это обусловило весьма высокий уровень антропогенной нагрузки как на почвы, так и на водные объекты, что вызывает загрязнение почв и водных объектов биогенными веществами, тяжелыми металлами и пестицидами. Загрязнители с сельскохозяйственной территории поступают в р. Яхому, которая выполняет функции дrenирования пойменного массива, отвода паводкового стока с водораздела и дренажно-коллекторных вод с мелиорируемыми земель.

Яхрома имеет длину 78 км и площадь водосборного бассейна 1437 км² и относится к катего-

рии малых рек. Исток располагается в пределах Клинско-Дмитровской гряды, а впадает в р. Сестру у поселения Усть-Пристань [1]. Бассейн Яхромы практически полностью расположен на территории Дмитровского района Московской области и характеризуется высокой антропогенной нагрузкой, которая определяется сельскохозяйственным использованием земель, наличием промышленных зон, населенных пунктов, интенсивной дорожной сети, рекреационных зон и пр. Для оценки влияния различных источников загрязнения на качество речной воды в 2019 г. были проведены рекогносцировочные исследования качества речной воды по длине реки в характерных точках. Также использовались результаты ранее проведенных исследований и литературные источники.

В 2001–2005 гг. ВНИИГиМ проводил натурные исследования качества дренажного стока и других компонентов гидросферы на Яхромской пойме [19, 20]. Оценка гидрохимического режима выполнялась по результатам измерений общих показателей качества воды в компонентах гидросферы – речных водах, коллекторно-дренажном стоке, подземных и паводковых водах. Для измерений электропроводности, температуры, pH и концентрации растворенного кислорода в компонентах гидросферы использовались приборы фирмы “WTW” (Германия) соответственно (Cond 340i/SET), pH-метр (pH 330i / SET) и оксиметр (OXI 196). Выполненные в различные сезоны года измерения показали, что наибольшие значения электропроводности воды (>1000 мкСм/см) характерны преимущественно для стока из закрытых и открытых коллекторов, относительно средние (400–800 мкСм/см) – для стока р. Яхромы, притоков с левого и правого бортов долины и напорных вод в летний период. Низкие значения электропроводности получены для талой воды (2–25), паводковых вод (145–408) и весеннего стока Яхромы в начале и средней части массива (228–272 мкСм/см), когда сток реки увеличивается за счет поступления талых вод (табл. 1). Повышенная электропроводность воды в коллекторно-дренажном стоке обусловлена длительным использованием земель поймы при производстве овощной продукции с применением интенсивных агротехнологий и внесением повышенных доз минеральных удобрений ($N_{180}P_{120}K_{100}$).

В пределах мелиорируемого массива минерализация речной воды, как правило, увеличивается как по минимальным (от 218 до 346 мг/дм³), так и по максимальным (от 587 до 703 мг/дм³) значениям. При этом наименьшие значения приурочены к паводковому периоду, а повышенные – к зимнему. Похожие данные получены в 2009–2011 гг. Н.В. Кузнецовой по всей длине продольного профиля р. Яхромы, которые показывают, что

Таблица 1. Распределение электропроводности воды и pH в компонентах гидросферы на Яхромской пойме

Проба	Водный объект / место отбора проб	Электропроводность, мкСм/см		pH	
		весна	лето	весна	лето
	р. Яхрома				
Я-4	г. Яхрома, мост автодороги	207	500–642	7.3	8.0–8.1
Я-7	Начало осушаемого массива	272	666–728	7.1	7.3–7.7
Я-8	Центральная часть массива	228	505–722	7.3	7.4–7.7
Я-10	Выход с осушаемого массива	432	505–666	6.9	7.7
—	Канал им. Москвы	331	222–243	7.6	7.3–7.6
—	Коллекторно-дренажные воды	900–1650	860–1270	6.4	6.1–7.7
—	р. Старая Яхрома	381	371–418	7.1	7.1–7.4
—	Напорные воды	650	560–682	7.0	7.3
—	Сток с левого борта долины				
—	Канал Левый Нагорный	—	684–990	—	7.7–8.1
—	р. Дятлинка	—	597	—	7.4
—	р. Варварка	—	816	—	7.5
—	р. Лбовка	—	623	—	7.9
—	Сток с правого борта долины				
—	По открытых каналах	363	348–392	7.0	7.0–7.5
—	По канаве Ильинская	—	233–467	—	6.6–7.5
—	Паводковые воды				
—	Сток из леса	145	—	7.0	—
—	Сток на пашне	353–408	—	7.0	—
—	Снег	2–25	—	7.6–7.8	—

минерализация речной воды за весь период наблюдений колебалась в пределах 400–590 мг/л и увеличивалась от истоков к устью [8].

В рамках работ по проекту “Оздоровление Волги” в 2019 г. были проведены полевые исследования по распределению минерализации, pH и концентраций биогенных веществ в водных объектах по продольному профилю р. Яхромы. Наибольшая минерализация приурочена к участку реки в пределах пойменного мелиорируемого массива (точки Я-7, Я-8) (табл. 2). Минерализация воды в р. Яхроме в весенний период закономерно увеличивалась за счет диффузного стока и точечных источников от 89 мг/дм³ в верховье до 228 мг/дм³ в приусտевом участке (рис. 1).

Содержание биогенных веществ в речной воде характеризуется аналогичным распределением по длине продольного профиля, за исключением фосфатов, максимальное содержание которых приурочено к участку реки ниже сбросов сточных вод (точка Я-7). Минерализация воды притоков, поступающих в Левый Нагорный канал, меняется в пределах 227–465 мг/дм³, в открытой мелиоративной сети – от 283 до 939 мг/дм³ и уменьшается с увеличением водности мелиоративного канала. Максимальными значениями практически всех

показателей характеризуется вода в Левом Нагорном канале, который принимает сток притоков, склоновый сток и несанкционированный сток из населенных пунктов. В летний период общая картина распределения минерализации по створу реки аналогична весеннему периоду, но с более высокими величинами (от 321 до 509 мг/дм³).

Повышение концентрации фосфатов и аммонийного азота в начале мелиорированной поймы обусловлено влиянием сброса сточных вод г. Дмитрова. В то же время на мелиорированной пойме наблюдается увеличение концентрации нитритов от 0.24 до 0.60 мг/дм³ вследствие внесения высоких доз минеральных удобрений при выращивании овощных культур. В мелиоративной сети содержание нитритов меняется в пределах 0.01–0.54 мг/дм³. Проведенные исследования показали, что в весенний период в процессе стока паводковых вод происходит вынос с поверхностью стоком биогенных веществ в речную сеть, что особенно характерно для ландшафтов, близких к естественным, наблюдаемым в верхней части водосбора. В пределах пойменной части содержание биогенных веществ в реке возрастает под влиянием агромелиоративных технологий. Концентрации фосфатов в мелиоративной сети

Таблица 2. Показатели качества воды в компонентах гидросферы в бассейне р. Яхромы (2019 г.)

Проба	Водный объект / место отбора проб	Электропроводность, мкСм/см		рН	Нитриты (NO_2^-), мг/дм ³		Аммоний (NH_4^+), мг/дм ³	Фосфаты (PO_4^{3-}), мг/дм ³		Калий (К ⁺)			
		12 апреля	16 апреля		12 апреля	16 апреля		12 апреля	16 апреля				
Я-1	р. Яхрома Верховье/ д. Герасимиха	111	400	7.05	8.14	0.05	0.024	1.94	<0.05	0.18	<0.05	1.5	0.5
Я-3	Среднее течение/ д. Шустиню	194	478	7.81	8.3	0.05	0.028	1.86	<0.05	0.25	<0.05	2.3	0.85
Я-4	г. Яхрома, мост автодороги	—	560	—	7.91	—	0.059	—	<0.05	—	0.45	—	1.7
Я-6	г. Дмитров	241	559	7.35	8.16	0.12	0.078	1.83	1.25	0.31	0.39	3.2	1.4
Я-7	На начало осушаемого массива	256	635	7.28	8.00	0.15	0.239	2.81	4.95	0.6	1.59	3.6	2.42
Я-8	Центральная часть массива	227	565	7.71	7.83	0.17	0.36	2.27	1.91	0.41	1.38	3.7	1.8
Я-10	Выход с осушаемого массива	224	554	7.64	8.02	0.2	0.614	2.63	0.55	0.36	1.05	3.8	1.2
Я-11	Устье/ д. Усть-Пристань Мелиоративные каналы	228	548	7.3	7.96	0.17	0.471	2.27	<0.05	0.39	0.92	3.6	1.6
14	Канал в центре массива	805	747	7.6	8.1	0.79	0.11	9.46	2.31	0.11	2.5	2.0	0.64
МЯ-21	Канал МЯ-21	583	517	7.4	7.7	0.08	0.162	4.49	<0.05	0.49	0.31	6.0	0.8
МЯ-25	Канал МЯ-25	939	555	6.9	8.0	1.24	0.136	11.03	0.45	0.18	<0.05	2.3	1.33
МЯ-12	Канал МЯ-12	283	283	7.7	8.75	0.22	0.014	1.30	<0.05	0.06	0.39	3.0	0.6
12	Канал Левый Нагорный	1027	1061	7.7	7.8	0.23	0.069	34.0	—	12.2	7.64	14.7	9.4
18	Канава Ильинская	208	345	7.5	7.6	0.05	—	2.76	—	0.01	—	1.0	—
14A	Напорные воды р. Волгуша/	370	—	8.0	—	—	—	1.86	—	—	—	3.0	—
B-3	нижнее течение	232	—	7.44	—	0.05	—	1.59	—	0.22	—	2.8	—
5	р. Котловка/ приток Волги	200	—	7.2	—	—	—	—	—	—	—	1.96	—
6	р. Икли	465	—	7.7	—	—	—	—	—	—	—	3.0	—

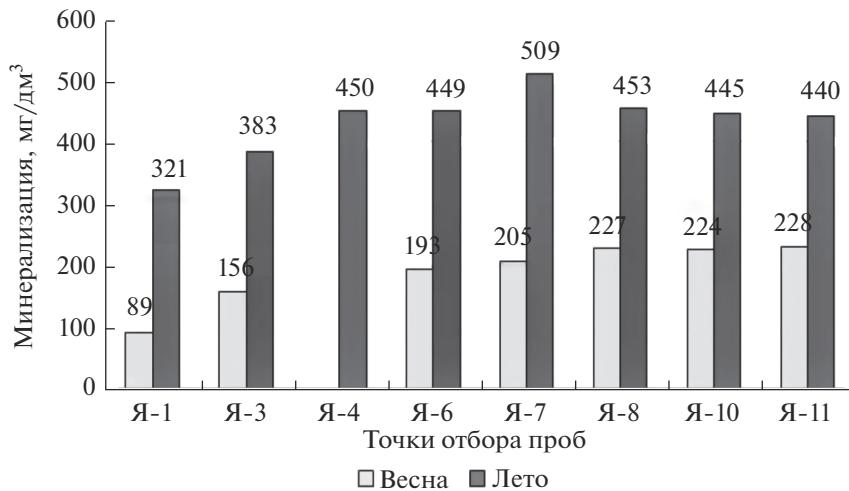


Рис. 1. Изменение минерализации воды р. Яхромы по продольному профилю от верховья до устья.

достигает 2.5 мг/дм³, нитритов – 0.54, аммонийного азота – 6.44 мг/дм³, что превышает рыбохозяйственные нормативы ПДК.

В летний период проводились сельскохозяйственные работы, минерализация речной воды увеличилась в 2–3 раза и, соответственно, увеличился вынос биогенных веществ, в особенности аммония и фосфатов, несмотря на то, что июль был аномально холодным и дождливым месяцем и орошение овощей не проводилось.

На карте гидрографической сети показаны точки отбора проб и концентрации фосфатов и нитритов в водных объектах бассейна р. Яхромы в весенний период (рис. 2).

Таким образом, выполненные исследования показали, что диффузный сток играет заметную роль в загрязнении реки, наиболее ярко это выражено в районе мелиорируемой поймы, где дренажный сток и сток из мелиоративных каналов сбрасывается непосредственно в речную сеть. Содержание аммония в мелиоративной сети в весенний период составляет 9–11 мг/дм³, а в речной воде 2.6–2.8, содержание нитритов весной в мелиоративной сети достигает 0.22–1.24, в реке 0.15–0.2 мг/дм³. Это дает основание для проведения расчетов по выносу биогенных веществ в бассейне р. Яхрома.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Оценка диффузного загрязнения с сельскохозяйственных территорий, включая мелиорированный массив, выполнялась по эмпирическим зависимостям. В предложенных методиках расчета поверхностного и дренажного стока использовано действующее руководство [11]. На основе литературных данных [2–4, 6, 7, 12, 13, 16, 17]

устанавливалась связь между водностью года и объемом поверхностного стока.

Величина поверхностного стока с осушенней территории оценивалась по коэффициенту стока σ в зависимости от суммы выпавших осадков по формуле [10]:

$$\sigma = W_{\text{пов ст}} / W_{\text{oc}}, \quad (1)$$

где $W_{\text{пов ст}}$ – объем поверхностного стока м³, W_{oc} – среднегодовой объем выпавших осадков, м³, определяемый по формуле:

$$W_{\text{oc}} = 10H_{\text{ср г}}^{\text{oc}} F, \text{ м}^3, \quad (2)$$

где $H_{\text{ср г}}^{\text{oc}}$ – среднегодовые осадки за весенний и осенний период, мм; F – площадь водосбора, га. При этом учитывалось, что сток поверхностных вод с прилегающих территорий поступает в водоприемник. В качестве водоприемника рассматривалась река или пруд, имеющий сброс в реку.

Объем стока определялся по формуле:

$$W_{\text{пов ст}} = K_c \sigma 10H_{\text{ср г}}^{\text{oc}} F, \text{ м}^3, \quad (3)$$

где K_c – поправочный коэффициент стока для искусственно дренируемой территории. Результаты расчета сравнивались с данными натурных исследований по нечерноземной зоне и при необходимости корректировались [16, 17].

Вынос растворенных и сорбированных соединений азота, фосфора и калия поверхностным стоком определялся по зависимостям, изложенными в нормативном документе [11]. Расчетные зависимости учитывают практически все источники поступления азота, фосфора и калия в почву, включая конкретный состав вносимых минеральных и органических удобрений, содержание в почве валовых и подвижных форм азота, фосфора и калия через соответствующие поправочные

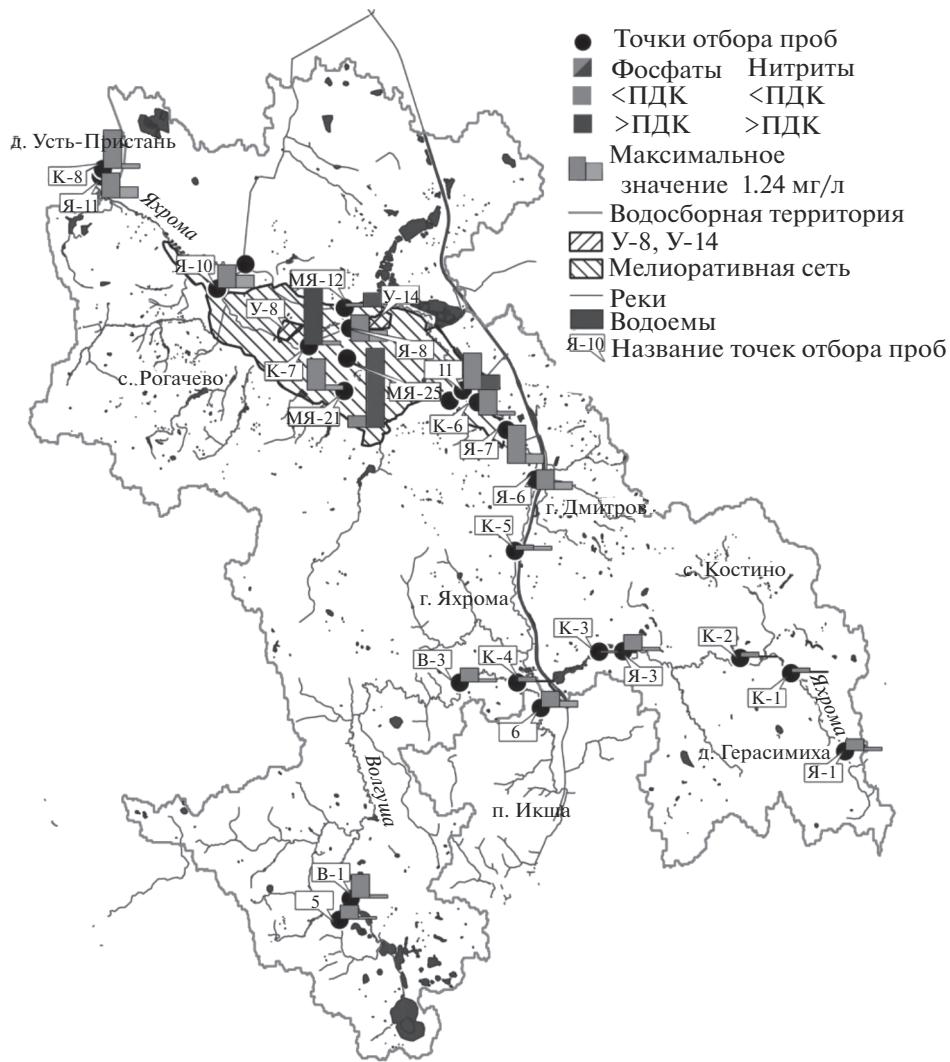


Рис. 2. Картосхема размещения пунктов исследований и содержания в воде нитритов и фосфатов. К – точки по данным [8].

ные коэффициенты, а также их остаточное количество в почве после выноса с урожаем сельскохозяйственных культур.

Годовой вынос поверхностным (твердым) стоком сорбированного и растворенного азота B_N^{tc} рассчитывался по формуле [11]:

$$B_N^{tc} = \omega(K_2 N_y + 0.002 N_0 + 0.66 N_n + N_v) + \gamma(K_2 N_y + 0.002 N_0 + 0.7 N_n), \text{ кг/га}, \quad (4)$$

где K_1 – коэффициент, определяющий остаточное количество подвижных форм азота в минеральных удобрениях после использования сельскохозяйственными растениями (для аммиачной селитры – 0.02, сульфата аммония – 0.03, хлористого аммония – 0.06); K_2 – коэффициент, определяющий количество азота, фиксированного

почвой и усвоенного почвенными микроорганизмами из удобрений (для аммиачной селитры – 0.65, сульфата аммония – 0.35, натриевой селитры – 0.18, известковой аммиачной селитры – 0.065); N_y , N_o – норма внесения соответственно минеральных (у) и органических (о) удобрений, кг/га действующего вещества (д. в.); N_n , N_v – содержание минерального (n) и валового (v) азота в пахотном слое почвы; ω , γ – коэффициенты, характеризующие вынос сорбированного азота твердым стоком и растворенного – с поверхности почвы (для торфяных почв: $\omega = 3.1 \times 10^{-5}$, $\gamma = 4.3 \times 10^{-3}$; для дерново-подзолистой суглинистой почвы: $\omega = 7.2 \times 10^{-5}$, $\gamma = 4.8 \times 10^{-3}$; для серых лесных: $\omega = 1.8 \times 10^{-4}$, $\gamma = 1.4 \times 10^{-2}$; для выщелоченных оподзоленных черноземов: $\omega = 4 \times 10^{-5}$, $\gamma = 2.4 \times 10^{-2}$).

Вынос за год сорбированного фосфора с твердым стоком B_p^{tc} определялся следующим образом [11]:

$$B_p^{\text{tc}} = \omega(n_2 P_y + n_3 P_o + n_4 P_n + P_b), \text{ кг/га}, \quad (5)$$

P_y, P_o – объемы внесения минеральных и органических удобрений, кг/га д. в.; P_n, P_b – содержание подвижного фосфора и валовое содержание фосфора в пахотном слое; n_2, n_3, n_4 – коэффициенты, определяющие остаточное количество фосфора из минеральных, органических удобрений и почвы соответственно ($n_2 = 0.8$ для почв легкого состава; 0.26 – почв тяжелого состава; 0.32 – торфяных почв; $n_3 = 0.0014, 0.0004, 0.0005$ соответственно; $n_4 = 0.85, 0.28$, и 0.34 соответственно).

Вынос за год калия в сорбированном и растворенном виде с поверхностным стоком B_K^{pc} вычислялся по формуле [11]:

$$B_K^{\text{pc}} = \omega(0.2K_y + 0.0012K_b + 0.008K_v + K_v) + \gamma[(0.2K_y + 0.0012K_b + 0.008K_v + K_v)0.018], \quad (6)$$

где K_y – объем внесения минерального удобрения, кг/га д. в.; K_b – валовое содержание калия в пахотном слое почвы: для дерново-подзолистых глеевых почв – 50000, дерново-подзолистых суглинистых – 58000, серых лесных – 50600, выщелоченных черноземов – 51250 кг/га.

Расчет объема дренажного стока $W_{\text{др}}$ выполнялся по известным зависимостям по среднегодовому модулю дренажного стока [17]:

$$W_{\text{др}} = \frac{qFt}{1000}, \text{ м}^3, \quad (7)$$

$$B_K^{\text{dp}} = \frac{[(0.2K_y + 0.0012K_o + 0.008K_v)0.018]W_{\text{др}}}{W_{\text{пп}} + W_{\text{др}}}, \text{ кг/га}, \quad (10)$$

где K_o – норма внесения органического удобрения, кг/га д. в.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Поверхностный сток формируется на водосборной территории, представляющей собой пологий склон, на котором выделены 3 зоны смыва: зона слабого смыва с уклоном до 0.01, площадью 10333.6 га; зона умеренного смыва при уклонах местности 0.01–0.05, площадью 12234 га; зона сильного смыва с крутизной склона >0.05, площадью 66.5 га. Для этого в системе ГИС создана оригинальная карта уклонов местности (рис. 3). Карта уклонов создавалась с использованием снимков SRTM, позволяющих построить карту высот определенного участка земной поверхно-

q – среднегодовой модуль дренажного стока, л/с га; F – площадь осушаемой территории, га; t – количество секунд в году, с.

При расчетах выноса биогенных веществ с дренажным стоком вводился поправочный коэффициент выноса биогенных веществ для водности среднемноголетнего года.

Вынос за год азота дренажным стоком B_N^{dp} определяется по формуле [11]:

$$B_N^{\text{dp}} = \frac{(K_1 N_y + 0.0002 N_0 + 0.007 N_n) W_{\text{др}}}{W_{\text{пп}} + W_{\text{др}}}, \text{ кг/га}, \quad (8)$$

где $W_{\text{пп}}$ – запас влаги в расчетном слое почвы до уровня грунтовых вод или до глубины заложения дрен при предельной полевой влагоемкости: для торфяных почв – 4500, дерново-подзолистых суглинистых – 2682, серых лесных – 2138, выщелоченных черноземов – 2765 м³/га.

Вынос за год растворенного фосфора дренажным стоком B_P^{dp} определяется по формуле [11]:

$$B_P^{\text{dp}} = \frac{n_1 W_{nx}^{\text{пп}} W_{\text{др}}}{W_{\text{пп}} + W_{\text{др}}}, \text{ кг/га}, \quad (9)$$

где n_1 – величина, характеризующая содержание растворенного фосфора в почвах: легких – 0.002, тяжелых – 0.00017, торфяных – 0.0015; $W_{nx}^{\text{пп}}$ – запас влаги в пахотном слое почв: торфяных – 1350, дерново-подзолистых суглинистых – 537, серых лесных – 428, выщелоченных черноземов – 553 м³/га.

Вынос за год растворенного калия с дренажным стоком B_K^{dp} рассчитывался по формуле [11]:

сти. Необходимость построения карты связана с расчетами интенсивности диффузного стока в зависимости от уклона местности и возможных мероприятий по снижению стока.

Для получения исходной информации при расчетах диффузного стока использовались следующие электронные карты водосборного участка в системе ГИС: карта гидрологической сети (для определения границ водосбора и получения геоморфологических, гидрологических характеристик зоны смыва); карта сельскохозяйственных участков по данным Росреестра (тип землепользования участка, и его площадь); почвенная карта (для определения типов почв и их характеристик). Все электронные карты снабжены атрибутивными таблицами, содержащими исходную информацию, необходимую для расчетов.

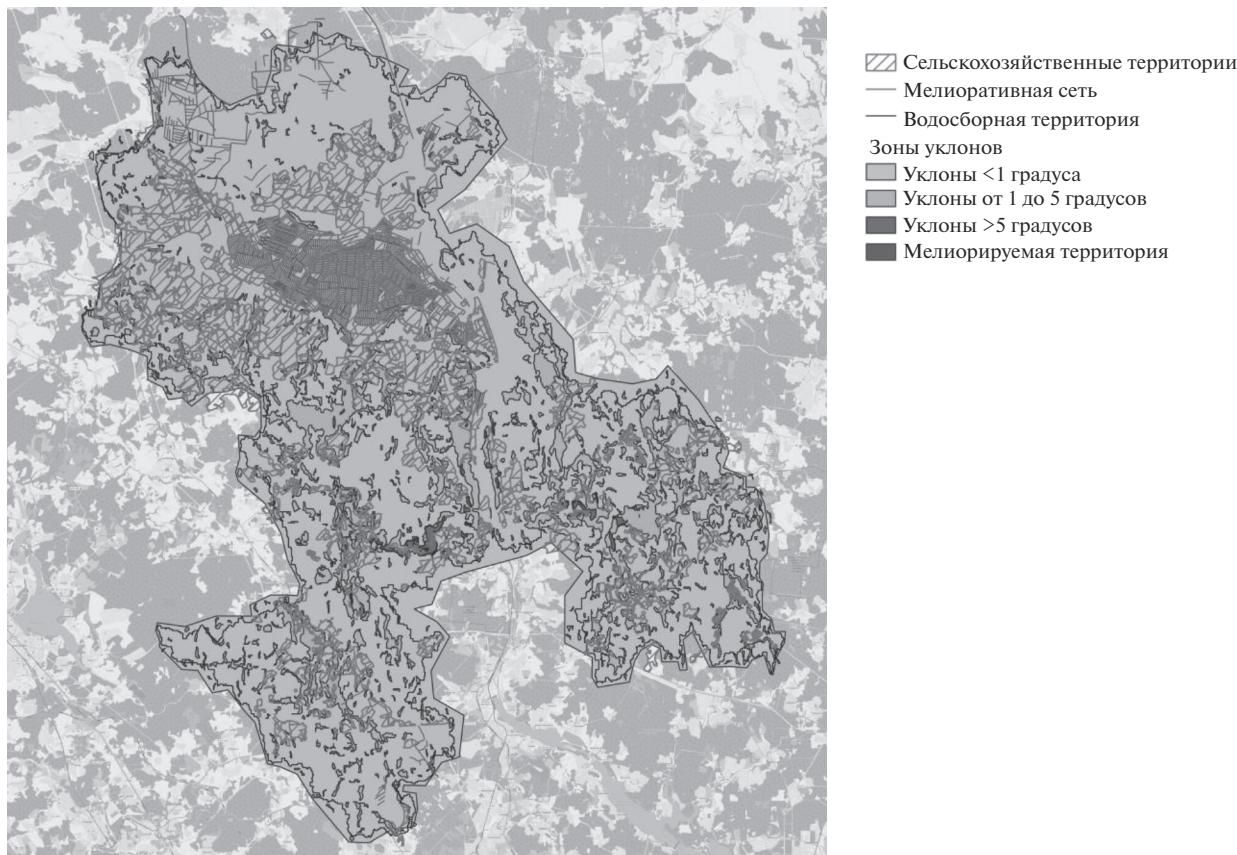


Рис. 3. Распределение сельскохозяйственных участков по зонам смыва.

Расчеты выполнены согласно кадастровой карте для 1309 сельскохозяйственных участков, 96 из которых сведены в отдельную группу как мелиорируемые участки. Все участки агрегированы в три выделенные крупные зоны с разной интенсивностью смыва. В зону слабого смыва (зона I) при уклоне поверхности <0.01 вошли 427 сельскохозяйственных участка, к зоне умеренного смыва с уклоном от 0.01 до 0.05 (зона II) отнесены 768 участков, и в зону интенсивного смыва (зона III) сведены 5 сельскохозяйственных участков, мелиорируемая территория (зона IV).

При расчете учитывались основные факторы, влияющие на формирование поверхностного и дренажного стока, его качество и вынос биогенных веществ: среднегодовые осадки, модуль дренажного стока, уклон и длина склона, рельеф местности, состояние поверхности почвы, фильтрационные свойства почвы и нижележащих слоев, структура севооборота, ведущая сельскохозяйственная культура, проектная (фактическая) урожайность, дозы вносимых минеральных и органических удобрений и их состав, содержание в почве растворенных и сорбированных биогенных веществ, миграционная способность питательных веществ.

При расчете диффузного загрязнения было принято, что в зоне слабого смыва преимущественно выращивается картофель, в зоне умеренного смыва на дерново-подзолистых почвах преобладают зерновые культуры, а на торфяных почвах – картофель; в зоне интенсивного смыва на склоновых землях выращивают, как правило, зерновые, а на мелиорируемых землях – овощные культуры и частично картофель ($\leq 20\%$). Дозы внесения удобрений приняты по региональным рекомендациям: под картофель объем внесения минеральных удобрений составлял 320 кг д. в./га для дерново-подзолистых почв и 240 кг/га для торфяных почв, а объем внесения органических удобрений 60 и 30 т/га соответственно; под зерновые культуры – 240 кг д. в./га минеральных удобрений и 20 т/га органических; под овощи при интенсивном земледелии средняя доза внесения минеральных удобрений принималась 400 кг д. в./га и 80 т/га – органических удобрений.

Результаты расчетов выноса биогенных веществ с сельскохозяйственных полей в бассейне р. Яхромы по зонам смыва приведены в табл. 3.

Как видно из табл. 3, объем поверхностного стока составляет 12.4, дренажного стока 15.9 млн м³/год, при этом с дренажным стоком

Таблица 3. Результаты расчета выноса азота, фосфора и калия с водосборного бассейна р. Яхромы по зонам

Показатели	Зона I	Зона II	Зона III	Зона IV
Площадь, га	10 333	12 233	66.5	9731
Объем поверхностного стока, тыс. м ³ /год	4174	6551	61	1572
Объем дренажного стока, тыс. м ³ /год	—	—	—	15957
Вынос азота поверхностным стоком, т/год	9.59	6.42	0.03	11.32
Вынос фосфора поверхностным стоком, т/год	2.02	2.41	0.01	1.62
Вынос калия с поверхностным стоком, т/год	79.67	100.94	0.52	61.15
Вынос азота дренажным стоком, т/год	—	—	—	96.88
Вынос фосфора дренажным стоком, т/год	—	—	—	0.38
Вынос калия дренажным стоком, т/год	—	—	—	37.04
Концентрация азота в поверхностном стоке, мг/л	2.30	0.98	0.49	7.20
Концентрация азота в дренажном стоке, мг/л	—	—	—	6.07
Концентрация фосфора в поверхностном стоке, мг/л	0.48	0.37	0.14	1.03
Концентрация фосфора в дренажном стоке, мг/л	—	—	—	0.02

Таблица 4. Сопоставление расчетных величин выноса биогенных веществ с дренажным и поверхностным стоком с данными литературных источников [6, 12–14, 16, 17, 21, 22, 24]

Источники получения данных	Исследуемый показатель		
	NO ₃ ⁻ + NH ₄ ⁺	P ₂ O ₅	K ₂ O
Расчетные значения выноса биогенных веществ с дренажным стоком, кг/га	6.81–12	0.02–0.06	0.8–5.7
Расчетные значения выноса биогенных веществ с поверхностным стоком, кг/га	1–11	0.01 0.3	до 9.2
Данные натурных наблюдений из литературных источников (для суглинистых почв)	1.4–65	<1	3–12
Погрешность	±10%	±10%	±10%

выносится 96.9, а с поверхностными водами только 27.4 т/год азотных соединений, что в 3.5 раза меньше, а соединений фосфора – наоборот: с поверхностным стоком выносится 6.1, с дренажным 0.4 т/год, или в 15 раз меньше. Это объясняется тем, что фосфор мало растворим в воде, адсорбируется на почвенных частицах и с эрозионным стоком выносится в водные объекты. Что касается азотных соединений, то аммиак и нитриты хорошо растворимы, легко проникают в грунтовые воды и выносятся с дренажным стоком.

Расчеты показали, что с поверхностным стоком с сельскохозяйственных полей в год выносится от 1 до 11 кг/га биогенных веществ в зависимости от зоны смыва, типа почв, сельскохозяйственной культуры и доз внесения минеральных и органических удобрений, из них азота от 0.4 до 1.5, фосфора от 0.01 до 0.3 и калия до 9 кг/га год. Вынос биогенных веществ с дренажным стоком на осушаемых землях почти в 2 раза больше, чем с поверхностным стоком и составляет 134 кг/га год. В дренажном стоке преобладает растворенные соединения азота, их вынос составляет от 7 до 12 кг/га год, фосфорных соединений с дренаж-

ным стоком выносится 0.02–0.06 кг/га год, а калия от 0.8 до 5.7 кг/га год. Сопоставление расчетных значений с натурными данными, полученными из многочисленных литературных источников (табл. 4), показало расхождение ≤10%, что позволяет использовать предложенную методику в практических целях для оценки диффузного стока с поверхностными и дренажными водами с сельскохозяйственных территорий.

Основные мероприятия по снижению диффузного стока с сельскохозяйственных угодий должны быть направлены на предупреждение появления поверхностного стока, снижение объема дренажного стока и его очистку. Для предупреждения эрозии с сельскохозяйственных и мелиорированных земель используются агротехнические мероприятия, строительство контурных дамб, буферных лесных полос, посадка сельскохозяйственных и сопутствующих культур и специальные почвозащитные севообороты. Для снижения диффузной нагрузки с сельскохозяйственных угодий рассмотрены 4 сценария мероприятий применительно к бассейну р. Яхромы:

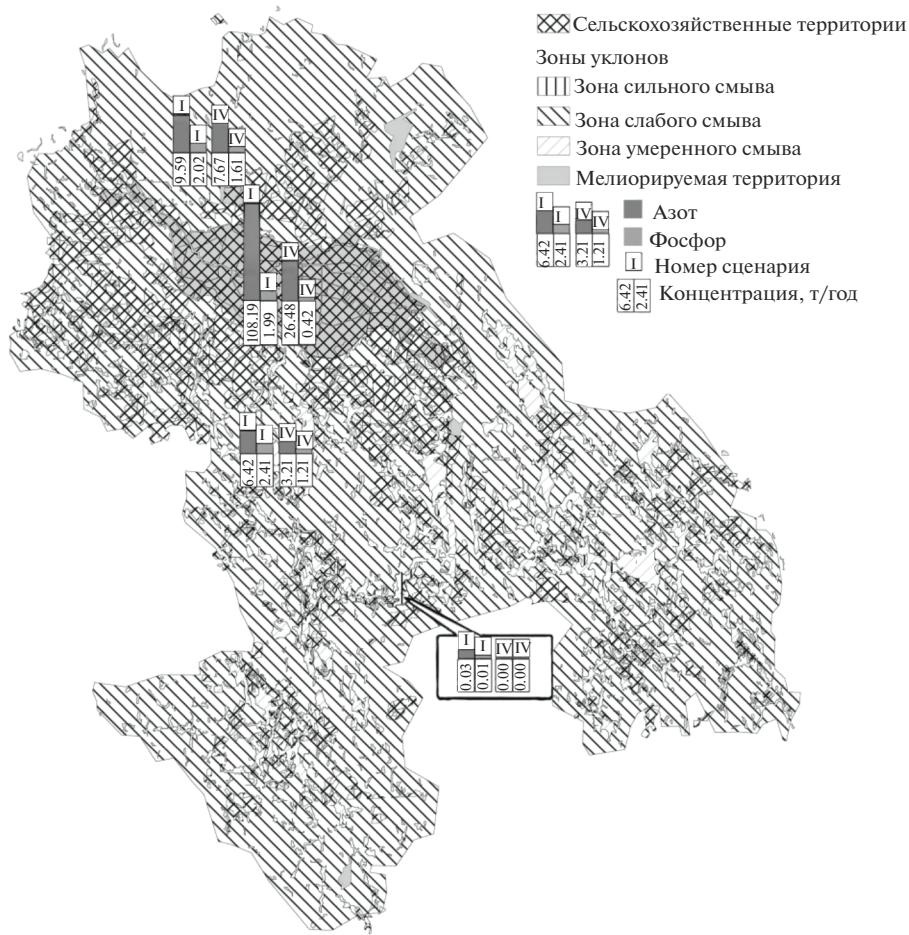


Рис. 4. Картосхема поступления азота и фосфора с сельскохозяйственных территорий в речную сеть по зонам смыва и по результатам сценарных исследований.

Сценарий 1 (базовый) – отсутствие мероприятий по сокращению и улучшению качества диффузного стока.

Сценарий 2 – снижение объема поверхностного стока с сельскохозяйственных угодий (пашни) на водосборе. По предотвращению смыва на сельскохозяйственной территории площадью 22632 га определены организационно-хозяйственные мероприятия, снижающие диффузный сток на 20%, агротехнические приемы – на 25–50, агромелиоративные на – 50–75 и гидротехнические сооружения на 55–85%. В зоне слабого смыва рекомендуется проведение узкозагонной вспашки, при уклонах местности 0.01–0.05 – гребневание поверхности или глубокая гребнистая вспашка, при сильном смыве – устройство валов-террас как долговременных земляных сооружений.

Сценарий 3 – очистка дренажного стока от биогенных загрязнителей на мелиоративном мас-

сиве площадью 9731 га в русловом биоплато, устраиваемом ниже мелиоративной системы в отводном канале.

Сценарий 4 (комплексный) – комбинация 2 и 3-го сценариев.

Расчеты показали, что поступление биогенных веществ в водные объекты бассейна р. Яхромы для года 50%-й обеспеченности по осадкам с поверхностными водами (створы К1–К6) и дренажным стоком (створы Я7–Я10) по сценарию 1 составило: азота – 124.2, фосфора – 6.4, калия – 279.3, суммарное значение – 409.9 т. По сценарию 2 поступление: азота – 119 т, фосфора – 4.8, калия – 212.4, всего – 336.3 т, что на 18% меньше по сравнению с базовым сценарием. По сценарию 3: азота – 42.5, фосфора – 3.2, калия – 135.7 т, всего – 250 т (на 40% меньше). По сценарию 4 поступление: азота – 37.36, фосфора – 3.24, калия – 135.7 т, суммарное поступление биогенных веществ составило – 176.3 т (на 57% меньше).

ОЦЕНКА ДИФФУЗНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

533

Таблица 5. Результаты расчета предотвращенного ущерба при проведении мероприятий по сценариям (зона I – слабого смыва, уклон <0,01; зона II – умеренного смыва, уклон от 0,01 до 0,05; зона III – сильного смыва, уклон >0,05; зона IV – сельскохозяйственные земли с мелиоративными системами)

Показатели	Сценарий 1				Сценарий 2				Сценарий 3				Сценарий 4			
	зона I	зона II	зона III	зона IV	зона I	зона II	зона III	зона IV	зона I	зона II	зона III	зона IV	зона I	зона II	зона III	зона IV
Вынос азота, т/год	9.59	6.42	0.03	108.19	7.67	3.21	0.00	108.19	9.59	6.42	0.03	26.48	7.67	3.21	0.00	26.48
Вынос фосфора, т/год	2.02	2.41	0.01	1.99	1.61	1.21	0.00	1.99	2.02	2.41	0.01	0.42	1.61	1.21	0.00	0.42
Вынос калия, т/год	79.67	100.94	0.52	98.19	63.73	50.47	0.00	98.19	79.67	100.94	0.52	21.49	63.73	50.47	0.00	21.49
					175.03	292.88	2.75	0.00	0.00	0.00	7456.04	175.03	292.88	2.75	7456.04	
									470.66			7456.04				7926.70
					36.79	110.09	0.80	0.00	0.00	0.00	143.70	36.79	110.09	0.80	143.70	
						147.68				143.70						291.38
					72.69	230.27	2.39	0.00	0.00	0.00	349.94	72.69	230.27	2.39	349.94	
						305.35					349.94					655.29
					284.51	633.24	5.94	0.00	0.00	0.00	7949.69	284.51	633.24	5.94	7949.69	
						923.68					7949.69					8873.37

Таким образом, чтобы сократить диффузный сток в 2 раза, необходимо реализовать мероприятия по сокращению объема поверхностного стока и снижению содержания биогенных веществ в дренажном стоке.

На карте объекта (рис. 4) дана масса азотных и фосфорных соединений по выделенным зонам для четырех сценариев. По всем формулам рассчитывается вынос из почвы биогенных веществ, их поступление в поверхностный или дренажный сток и далее со стоком в речную сеть.

Эффективность предлагаемых водоохранных мероприятий оценивалась по величине предотвращенного экологического ущерба согласно Методике определения предотвращенного экологического ущерба [9]. Наибольший предотвращенный ущерб, составляющий 8873.37 тыс. руб., обеспечивает комплексный сценарий 4 (табл. 5). При этом поступление биогенных веществ в речную сеть уменьшается на 233.69 т/год. По сценарию 2 предотвращенный ущерб составил 923.68 тыс. руб., уменьшение поступления биогенных веществ – 73.7 т/год; по сценарию 3 – 7949.69 тыс. руб., уменьшение поступления – 159.99 т/год. Таким образом, для данного водосбора рекомендуется выполнение комплексного сценария 4, заключающегося в том, что на водоразделе проводятся мероприятия по снижению поверхностного стока, а на пойме необходимо дренажный сток собрать в отводной канал, в котором создать русловое биоплато с последующим сбросом очищенного стока в р. Яхрому. Этот комплекс обеспечит уменьшение диффузного загрязнения от сельскохозяйственной деятельности в 2.3 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Актуальность исследования обусловлена необходимостью оценки возможного загрязнения водных объектов в процессе агропроизводства с целью их защиты и снижения рисков для жизни и здоровья населения. В связи с этим, данная статья направлена на выявление причин диффузного загрязнения водных объектов от сельскохозяйственной и мелиоративной деятельности и на оценку диффузного стока, включая поверхностные и дренажные воды. Рассматриваемый методический подход к оценке диффузного загрязнения обеспечивает решение одной из приоритетных задач природопользования и имеет практическую значимость при оценке загрязнения биогенными веществами любого водного объекта.

Выявлены закономерности диффузного загрязнения водных объектов бассейна р. Яхромы: основная диффузная нагрузка связана со сбросом дренажных вод с мелиорируемого массива, объем которых в 1.3 раза больше поверхностного стока с

сельскохозяйственных полей, при этом вынос биогенных веществ составляет 78% от общего диффузного загрязнения. Основные загрязнители – азотные соединения, составляющие >30% общего объема, из них почти 80% выносится с дренажным стоком.

Предложены сценарии водоохранных мероприятий по регулированию диффузного загрязнения, обеспечивающие снижение поверхностного стока и очистку дренажных вод посредством создания руслового биоплато с последующим сбросом очищенного стока в р. Яхрому. Этот комплекс позволит снизить диффузное загрязнение от сельскохозяйственной и мелиоративной деятельности в 2.3 раза, что обеспечит предотвращенный ущерб в размере ~9 млрд руб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вагнер Б.Б. Реки и озера Подмосковья. М.: Вече, 2006. 480 с.
2. Государственный доклад “О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2016 году”. М.: Минприроды России, НИА-Природа, 2017. 760 с.
3. Кирейчева Л.В. Дренажные системы на орошаемых землях: прошлое. настоящее. будущее. М.: РОМА, 1999. 200 с.
4. Кирейчева Л.В., Юрченко И.Ф., Яшин В.М. Модели и информационные технологии управления водопользованием на мелиоративных системах, обеспечивающие благоприятный мелиоративный режим // Мелиорация и водное хоз-во. 2014. № 5, 6. С. 50–55.
5. Комаров И.К. Возрождение Волги шаг к спасению России. М.; Нижний Новгород: Экология, 1996. 464 с.
6. Компарасас И.И. О режиме выщелачивания дренажным стоком питательных веществ на дренированных минеральных почвах // Тр. ЛитНИИГиМ. 1966. 324 с.
7. Крейер К.Г. Особенности формирования почвенных лизиметрических растворов в дерново-подзолистых почвах и их возможная роль в питании растений // Плодородие почв и питание растений. Л., 1973. 240 с.
8. Кузнецова Н.В. Современное гидробиологическое состояние реки Яхрома как модельной малой реки Подмосковья. Дис. ... канд. биол. наук. М.: ВНИИРО, 2015. 193 с.
9. Методика определения предотвращенного экологического ущерба. Утв. в 1999 г. Приказ Госкомэкологии РФ от 30.12.1999 г. № 816 71 с.
10. Рекомендации по расчету систем сбора, отведения и очистки поверхностного стока с селитебных территорий, площадок предприятий и определению условий выпуска его в водные объекты. М.: НИИ ВОДГЕО, 2015.146 с.
11. Руководство по определению расчетных концентраций минеральных, органических веществ и пестицидов в дренажном и поверхностном стоке с

- мелиоруемых земель. ВТР-П-30-81. Утв. приказом Минводхоза СССР № 276 от 22.06.1981 г. 1981. 42 с.
12. Томсон Х., Хоннолайнен Г. О выносе питательных веществ дренажным стоком из тяжелых дерново-глеевых почв при возделывании озимой пшеницы // Сб. науч. тр. ЭстНИИ земледелия и мелиорации. 1973. № 29. 207 с.
 13. Федотова З.Д., Страутыня В.П. Вынос питательных элементов дренажным стоком осущенных почв. Елгава // Тр. ЛатНИИГиМ. 1969. № 9. С. 43–47.
 14. Хрисанов Н.И., Осипов Г.К. Эвтрофирование водоемов. СПб.: Гидрометеоиздат, 1993. 276 с.
 15. Шавлиашвили Л.У. Исследование влияния удобрений и ядохимикатов на химический состав природных вод и почв в условиях избыточного увлажненных районов Западной Грузии // Сб. тр. VIII Междунар. конгресса по минеральным удобрениям. Тбилиси, 1976. 221 с.
 16. Шкиникис Ц.Н. Проблемы гидрологии дренажа. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 348 с.
 17. Шкиникис Ц.Н. Гидрологическое действие дренажа. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. 311с.
 18. Экологические проблемы Верхней Волги: Коллективная монография. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2001. 427 с.
 19. Яшин В.М. Загрязнение дренажного стока с мелиоруемых пойм // Наукометкие технологии в мелиорации (Костяковские чтения). Международ. конф. М.: Изд-во ВНИИА, 2005. С. 457–463.
 20. Яшин В.М. Формирование качества дренажного стока на Яхромской пойме // Мелиорация и вод. хоз-во. 2017. № 6. С. 21–26.
 21. Betson R.P., McMaster M. Non-point source mineral water quality model // J. Water Pol-lut. Contr. Fed. 1975. V. 47. № 10. P. 42.
 22. Hock B. Water quality balance. Technical and economic water management series VMGT. Budapest: VIZDOK Press, 1970. № 27. P. 124.
 23. Maidment D.R. Handbook of Hydrology. N. Y.: McGraw-Hill Inc., 1992. P. 87.
 24. O'Brien W.G. Modeling discharge and conservative water quality in the Lower Kansas River basin // Univ. of Kansas. 1972. Bull. 204. Pt 3. P. 153.