

Ш.Р. ПОЗДНЯКОВ*, С.А. КОНДРАТЬЕВ*, Е.А. МИНАКОВА**, А.Ю. БРЮХАНОВ***, Н.В. ИГНАТЬЕВА*,
М.В. ШМАКОВА*, Е.В. ИВАНОВА*, Н.С. ОБЛОМКОВА***, А.В. ТЕРЕХОВ*

*Институт озерадения РАН,
196105, Санкт-Петербург, ул. Севастьянова, 9, Россия, tbgmaster@mail.ru, kondratyev@limno.org.ru,
natali_ignatieva@mail.ru, m-shmakova@yandex.ru, spb.spt@mail.ru, tepextepex@gmail.com

**Казанский федеральный университет,
420012, Казань, ул. Карла Маркса, 74, Россия, ekologyhel@mail.ru

***Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства —
филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения
«Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ИАЭП — филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ),
196625, Санкт-Петербург, пос. Тярлево, Филътровское шоссе, 3, Россия,
sznii@yandex.ru, oblomkovan@gmail.com

ОЦЕНКА БИОГЕННОЙ НАГРУЗКИ НА КУЙБЫШЕВСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ СО СТОРОНЫ ВОДОСБОРА

Проведена оценка современного уровня внешней биогенной нагрузки и отдельных ее составляющих на Куйбышевское водохранилище, крупнейшее на Евразийском континенте. Разработана математическая модель, позволяющая рассчитывать среднегодовой вынос азота и фосфора с речных водосборов неоднородной структуры и нагрузку на водные объекты. Основными составляющими нагрузки являются рассредоточенная эмиссия биогенных элементов подстилающей поверхностью, не подверженной в настоящее время сельскохозяйственному воздействию, нагрузка, сформированная в результате сельскохозяйственной деятельности, сбросы точечных источников загрязнения в гидрографическую сеть водосбора и непосредственно в водоем-водоприемник, а также массообмен с атмосферой. В модель включен блок расчета удержания химических веществ водосборами и их гидрографической сетью. Модель откалибрована по данным государственного мониторинга на пилотных объектах, в качестве которых выбраны водосборы рек Казанки (левобережный приток) и Свяги (правобережный приток). Биогенная нагрузка, сформированная сбросами точечных источников загрязнения, оценена с использованием данных статистической отчетности. Значения атмосферных выпадений азота и фосфора на поверхность пилотных водосборов рассчитаны по данным натурных наблюдений за химическим составом осадков. Показано, что внедрение в сельскохозяйственную практику наилучших доступных технологий не приведет к существенному снижению биогенной нагрузки на водохранилище, так как на большей части изучаемой территории дозы внесения питательных веществ с органическими и минеральными удобрениями в последние годы ниже среднего выноса азота и фосфора с урожая. Выполнена приближенная оценка биогенной нагрузки на Куйбышевское водохранилище, сформированной на левобережной и правобережной частях водосбора. Проведено выделение фоновой (природной) и диффузной (антропогенной) составляющих нагрузки.

Ключевые слова: водохранилище, водосбор, внешняя биогенная нагрузка, азот, фосфор, модель.

SH.R. POZDNYAKOV*, S.A. KONDRATYEV*, E.A. MINAKOVA**, A.YU. BRYUKHANOV***, N.V. IGNATYEVA*,
M.V. SHMAKOVA*, E.V. IVANOVA*, N.S. OBLOMKOVA***, A.V. TEREKHOV*

*Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences,
196105, St. Petersburg, ul. Sevastyanova, 9, Russia, tbgmaster@mail.ru, kondratyev@limno.org.ru,
natali_ignatieva@mail.ru, m-shmakova@yandex.ru, spb.spt@mail.ru, tepextepex@gmail.com

**Kazan Federal University, 420012, Kazan, ul. Karla Marksa, 74, Russia, ekologyhel@mail.ru

***Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production —
Branch of Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Scientific Agroengineering Center VIM»
(IEEP — branch of FSAC VIM),
196625, St. Petersburg, Tyarlevo, Fil'trovskoe shosse, 3, Russia, sznii@yandex.ru, oblomkovan@gmail.com

ESTIMATION OF NUTRIENT LOAD ON THE KUIBYSHEV RESERVOIR FROM THE CATCHMENT AREA

The present level of external nutrient load and its separate parts on the Kuibyshev reservoir — the largest one on the Eurasian continent, was estimated. The mathematic model for calculating mean annual input of nitrogen and phosphorus from

© 2019 Поздняков Ш.Р., Кондратьев С.А., Минакова Е.А., Брюханов А.Ю., Игнатьева Н.В.,
Шмакова М.В., Иванова Е.В., Обломкова Н.С., Терехов А.В.

river drainage areas of non-homogeneous structure, and load on water bodies was developed. The main components of the load are the nonpoint nutrient emission by the underlying surface which is currently not affected by agricultural impact, the load generated by agricultural activity, discharges of pollutants from point sources into the hydrographic network of the catchment area and directly into the water-receiving reservoir, and the mass exchange with the atmosphere. The model includes calculating the retention of chemicals by catchments and by their hydrographic network. The model was calibrated against the data of State monitoring for the pilot areas: the catchment area of the Kazanka river (the left bank tributary) and the Sviyaga (the right bank tributary). The nutrient load generated by discharges from point sources of pollution was estimated using statistical reporting data. The values of atmospheric deposition of nitrogen and phosphorus on the surface of the study catchments were calculated using the data of field studies on the chemical composition of deposits. It is shown that implementation of the best available technologies into agricultural practice will not lead to any significant reduction in the nutrient load on the reservoir, because in recent years across most of the study area the rates of application of nutrients with organic and mineral fertilizers have been lower than the average removal of nitrogen and phosphorus with the harvested crops. An approximate estimation of nutrient load on the Kuibyshev reservoir was carried out for the left and the right bank sides of the catchment area. The background (natural) and diffuse (anthropogenic) components of the load are identified.

Keywords: reservoir, catchment area, external nutrient load, nitrogen, phosphorus, model.

ВВЕДЕНИЕ

Поступление загрязнений от неконтролируемых рассредоточенных источников в водные объекты в бассейне реки Волги, как и в других хозяйственно освоенных речных бассейнах России, может многократно превосходить по величине их поступление от контролируемых источников. При этом анализ методической базы государственного мониторинга водных объектов показывает, что в настоящее время отсутствуют обоснованные универсальные и региональные расчетные методики рассредоточенного стока от различных источников, как и сам мониторинг этих источников. Не разработаны научно обоснованные подходы к ранжированию рассредоточенных источников по мощности воздействия на водные объекты, что негативно сказывается на эффективности разрабатываемых водоохранных мероприятий.

Цель настоящего исследования — оценка современного уровня внешней азотной и фосфорной нагрузки и отдельных ее составляющих на Куйбышевское водохранилище — крупнейшее по площади (6,45 тыс. км²) не только в Волжском каскаде водохранилищ, но и на Евразийском континенте.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ФОРМИРОВАНИЯ БИОГЕННОЙ НАГРУЗКИ

Алгоритм расчета суммарного выноса биогенных элементов с водосбора и формирования биогенной нагрузки на водоем представлен на рис. 1.

Согласно принятой схеме расчета, основными составляющими внешней азотной и фосфорной нагрузки на водный объект (L) являются: рассредоточенная эмиссия биогенных элементов подстилающей поверхностью, не подверженной в настоящее время сельскохозяйственному воздействию (L_c); нагрузка, сформированная в результате сельскохозяйственной деятельности (L_{agr}); сбросы точечных

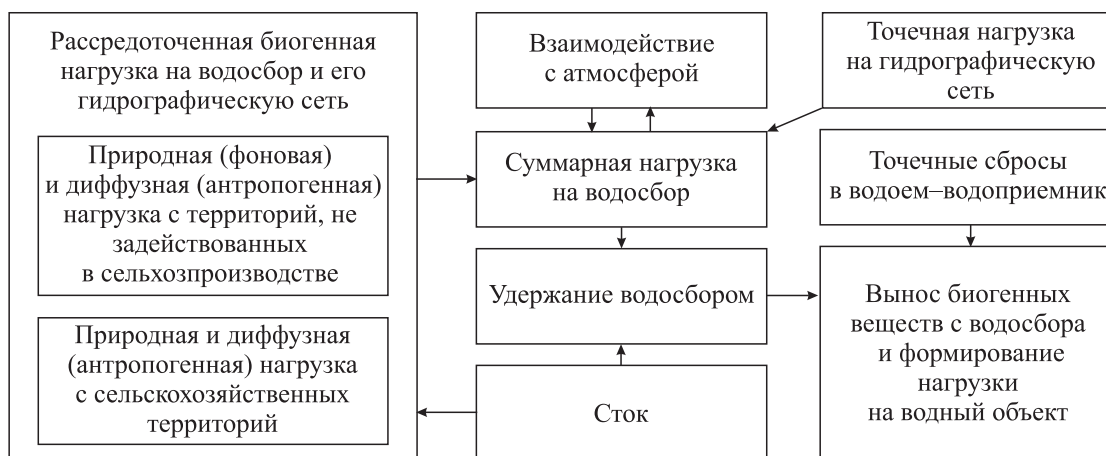


Рис. 1. Алгоритм расчета формирования суммарного выноса биогенных веществ с водосбора.

источников загрязнения в гидрографическую сеть водосбора (L_{p1}) и непосредственно в водоем-водоприемник (L_{p2}), а также массообмен с атмосферой (L_a) [1–4]:

$$L = (L_e + L_{agr} + L_{p1} + L_a)(1 - k_r) + L_{p2}, \quad (1)$$

где k_r — коэффициент удержания вещества водосбором и его гидрографической сетью. Все члены уравнения (1) имеют размерность т/год, кроме безразмерного коэффициента k_r .

Эффективным инструментом расчета нагрузки, сформированной на полях сельхозпредприятий, является метод, предложенный специалистами Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) [5–7]. Достоинство метода — расчет выноса биогенных элементов с учетом не только доз внесения удобрений и выноса азота и фосфора с урожаем, но и типов почв, слагающих сельскохозяйственный водосбор, их механического состава, удаленности поля от водного объекта. Кроме того, метод позволяет оценить снижение биогенной нагрузки при использовании наилучших доступных технологий (НДТ) [7–9] ведения сельскохозяйственного производства. Расчетная зависимость имеет следующий вид:

$$L_{agr} = 10^{-3} \sum_{i=1}^{n_1} A_i (M_{soil\ i} K_1 + (\alpha_1 M_{min\ i} + \alpha_2 M_{org\ i}) K_6) K_2 K_3 K_4 K_5, \quad (2)$$

где $M_{soil\ i}$, $M_{min\ i}$ и $M_{org\ i}$ — содержание биогенного элемента в пахотном слое почвы, а также дозы внесения минеральных и органических удобрений на поля i -го сельхозпредприятия, кг/га; A_i — площадь угодий i -го сельхозпредприятия, га; n_1 — количество сельхозпредприятий; α_1 — коэффициент, учитывающий усвоение минеральных удобрений сельхозкультурами; α_2 — коэффициент, учитывающий усвоение органических удобрений сельхозкультурами; K_1 — коэффициент, характеризующий вынос биогенных элементов из пахотного слоя почв; K_2 — коэффициент удаленности контура сельскохозяйственных угодий от гидрографической сети; K_3 — коэффициент, характеризующий тип почв (по происхождению); K_4 — коэффициент, характеризующий механический состав почв; K_5 — коэффициент, учитывающий структуру сельхозугодий, т. е. соотношение площадей пашни, многолетних трав, лугов, пастбищ; K_6 — коэффициент, учитывающий использование НДТ. Все коэффициенты безразмерные.

Использование метода расчета сельскохозяйственной рассредоточенной нагрузки, основанного на уравнении (2), не требует проведения специальных полевых исследований. Вычисления выполняются на основе информации государственной статистической отчетности с привлечением ГИС-технологий.

Рассредоточенная нагрузка на водосбор, сформированная в результате эмиссии химических веществ с различных типов подстилающей поверхности (естественных и антропогенных), не задействованных в настоящее время в сельскохозяйственном производстве, в стекающие дождевые и талые воды (L_e), рассчитывается по формуле:

$$L_e = 10^{-3} \sum_i C_i y_i A_i, \quad (3)$$

где C_i — средние концентрации биогенных элементов в стоке с i -го типа подстилающей поверхности, мг/л; y_i — слой стока с i -го типа подстилающей поверхности, мм/год; A_i — площадь i -го типа подстилающей поверхности, км².

Для оценки значений C_i , входящих в формулу (3), могут быть использованы результаты обобщения данных натуральных наблюдений на малых водотоках с преобладанием какого-либо типа подстилающей поверхности. Определение слоя стока y_i , заданной вероятности превышения, выполняется на основе кривых распределения, построенных по данным многолетних наблюдений за стоком на реках исследуемого региона. Оценка значений площадей различных типов подстилающей поверхности A_i выполняется на основе картографического материала, ГИС или по результатам дешифрирования аэрокосмических снимков [10, 11].

Как правило, значительная часть химических веществ, поступивших на водосбор от различных источников, не достигает замыкающих створов крупных рек, так как удерживается различными звеньями гидрографической сети. Одним из рекомендованных Хельсинской комиссией (ХЕЛКОМ) [12] методов расчета удержания химических веществ водосборами и их гидрографической сетью является эмпирическая модель, разработанная в Институте водной экологии и внутреннего рыбоводства Германии [13–17]. Авторами модели предложено следующее эмпирическое соотношение, связывающее

значение коэффициента удержания азота и фосфора k_r в формуле (1) со значением модуля стока q , л/(км²·с):

$$k_r = k^* \left(1 - \frac{1}{1 + aq^b} \right), \quad (4)$$

где a и b — безразмерные эмпирические параметры, значения которых составляют соответственно 26,6 и $-1,71$; k^* — калибровочный параметр, введенный в расчетные формулы в рамках отечественных исследований для возможного учета локальных особенностей процесса удержания биогенных элементов водосбором и его гидрографической сетью. Значение модуля стока q связано со слоем стока y (мм/год) соотношением $q = 0,03171y$.

Кроме расчета выноса биогенных элементов с водосбора и формирования нагрузки на водный объект, в модели предусмотрен расчет фоновой нагрузки. В соответствии с рекомендациями ХЕЛКОМ [12], при проведении расчета фонового выноса из рассмотрения должны быть исключены все антропогенные источники. Концентрации в стоке с антропогенных типов подстилающей поверхности (сельскохозяйственные угодья, урбанизированные территории) заменяются концентрациями в стоке с естественных территорий. В этом случае фоновый вынос химических веществ с водосбора L^{nat} рассчитывается следующим образом:

$$L^{\text{nat}} = (1 - k_r) \cdot 10^{-3} \sum_i C_{\text{nat } i} y_i A_i, \quad (5)$$

где k_r — коэффициент удержания химического вещества водосбором и его гидрографической сетью; $C_{\text{nat } i}$ — концентрация в стоке с i -го типа естественной подстилающей поверхности, мг/л; A_i — площадь i -го типа подстилающей поверхности, км². При этом $\sum A_i$ составляет площадь поверхности всего водосбора без учета водных объектов.

Диффузная (антропогенная) составляющая выноса биогенных элементов с водосбора L^{dif} (т/год) оценивается как разность между суммарным выносом и фоновым, при этом точечные источники в расчетах не учитываются. Атмосферные выпадения L_a могут быть отнесены к антропогенной нагрузке в случае их экстремально высоких значений на исследуемой территории:

$$L^{\text{dif}} = \left(L_c + L_{\text{agr}} + L_a - 10^{-3} \sum_i C_{\text{nat } i} y_i A_i \right) (1 - k_r). \quad (6)$$

Для выполнения расчетов выноса азота и фосфора с речных водосборов по изложенному выше алгоритму необходима следующая исходная информация.

1. Слой стока y , мм/год. Задается по результатам оценки слоя стока за год или осреднением за период наблюдений по данным мониторинга.

2. Площади различных типов подстилающей поверхности A_i (селитебные территории, леса и естественная растительность, залежь), км². Определяются с использованием ГИС-технологий по цифровым картам или с помощью дешифрирования космических снимков подстилающей поверхности.

3. Концентрации валового азота ($N_{\text{вал}}$) и фосфора ($P_{\text{вал}}$) в стоке с перечисленных типов подстилающей поверхности, мг/л. Определяются по результатам осреднения результатов гидрохимического анализа проб, отобранных в первичных звеньях гидрографической сети на однородных площадях, или по имеющимся таблицам.

4. Коэффициенты α_1 , α_2 , K_1 – K_6 в формуле (2) для расчета выноса азота и фосфора с сельскохозяйственных территорий безразмерные. Определяются индивидуально для каждого сельхозпредприятия с учетом его расположения, количества вносимых минеральных и органических удобрений, выращиваемых культур, типов и механического состава почв, способов ведения сельскохозяйственной деятельности.

5. Атмосферная нагрузка на водосбор L_a , т/(год·км²). Рассчитывается с помощью моделей атмосферного переноса или оценивается по данным химического анализа жидких и твердых осадков или задается по имеющимся картам и литературным данным.

6. Сбросы азота и фосфора точечными источниками загрязнения в гидрографическую сеть водосбора L_{p1} или в водоем-водоприемник L_{p2} , т/год. Задаются по данным статистической отчетности по форме 2ТП (водхоз).

7. Безразмерные параметры a и b в формуле для расчета удержания (4).

8. Калибровочный безразмерный параметр k^* в формуле (4). Определяется в результате калибровки модели по данным натурных наблюдений в замыкающих створах изучаемых водосборов.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Крупнейшее в Евразии и третье в мире по площади Куйбышевское водохранилище на Волге [18] образовалось в 1955–1957 гг., после завершения строительства Волжской плотины (ныне Жигулёвской) ГЭС у г. Ставрополя (ныне Тольятти). Основным объектом настоящего исследования является частный водосбор Куйбышевского водохранилища с площадью ≈ 91 тыс. км², ограниченный на севе-

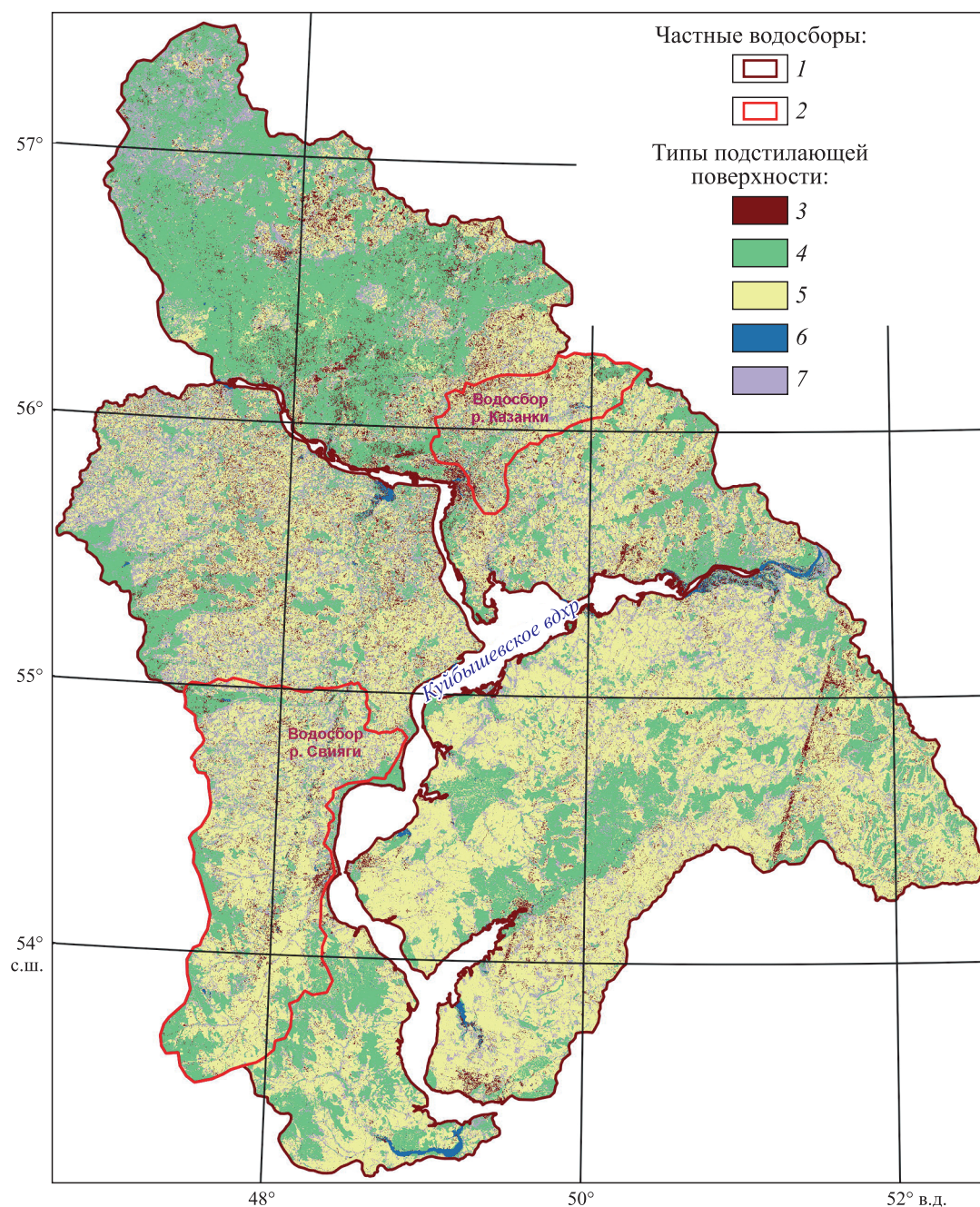


Рис. 2. Схема частного водосбора Куйбышевского водохранилища и результаты идентификации различных типов подстилающей поверхности по космическим снимкам.

Частные водосборы: 1 — Куйбышевского водохранилища, 2 — рек Казанки и Свяги (до гидрохимических постов). Типы подстилающей поверхности: 3 — селитебные, 4 — лесохозяйственные, 5 — сельскохозяйственные, 6 — водохозяйственные; 7 — прочая естественная растительность.

Таблица 1
**Структура подстилающей поверхности
 левобережной и правобережной частей
 частного водосбора Куйбышевского водохранилища
 (по данным дешифрирования космических снимков)**

Типы подстилающей поверхности (ландшафты)	Водосбор			
	Левый берег		Правый берег	
	%	км ²	%	км ²
Водохозяйственные	9,22	5550,6	12,35	3813,1
Сельскохозяйственные	45,98	27 685,2	50,72	15 658,2
Селитебные	2,74	1648,1	1,98	612,1
Лесохозяйственные	34,16	20 565,6	24,17	7464,3
Прочая естественная растительность	7,90	4757,8	10,78	3329,7
Всего	100	60 207,3	100	30 877,5

ре Чебоксарской ГЭС, на востоке — местом впадения Вятки в Каму, на юге — Жигулёвской ГЭС. Схема водосбора с результатами идентификации основных типов подстилающей поверхности по космическим снимкам представлена на рис. 2. Значения площадей, занятых выделенными типами подстилающей поверхности на левобережной и правобережной частях водосбора, приведены в табл. 1.

Для калибровки изложенной выше расчетной методики были выбраны два пилотных объекта — водосборы рек Казанки (створ — г. Казань) и Свияги (створ — г. Буинск), расположенные на левобережной и правобережной частях изучаемого бассейна (см. рис. 1). Обе реки относятся к категории средних равнинных рек с площадями водосбора 2–50 тыс. км². Вы-

бор именно этих рек в качестве пилотных объясняется следующими причинами: водосборы рек расположены в различных физико-географических районах [19] (Свияга — в Предволжье, Казанка — в Предкамье) и в различных ландшафтных подзонах [20] (Свияга — в широколиственной и южной лесостепной подзонах, Казанка — в подтаежной и широколиственной); гидрологические условия на водосборах неодинаковые (среднее многолетнее значение слоя стока на водосборе Казанки в полтора раза выше, чем на Свияге).

Цель полевых работ 2018 г., выполняемых в бассейне Куйбышевского водохранилища сотрудниками Института озероведения РАН, — оценка концентраций азота и фосфора в стоке с различных типов подстилающей поверхности (C_i) на водосборах рек Свияги и Казанки. В качестве объектов для

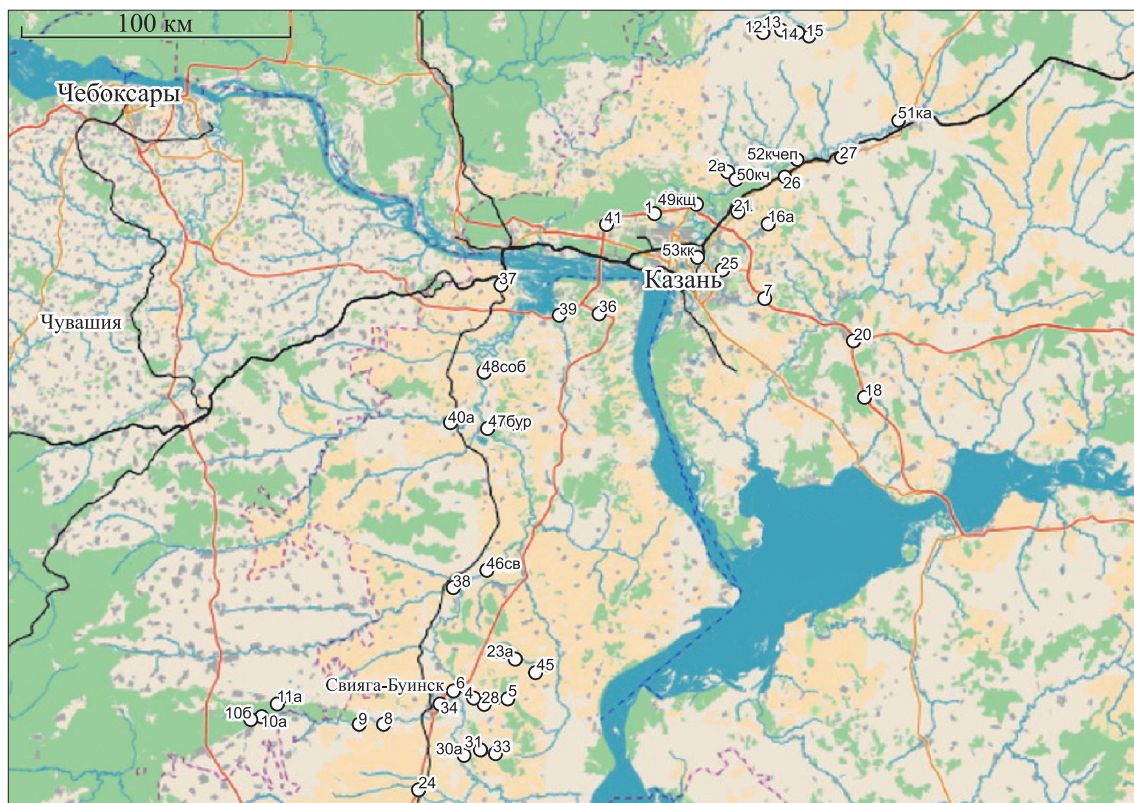


Рис. 3. Схема расположения точек отбора проб воды в Предкамье (р. Казанка и близлежащие территории) и в Предволжье (р. Свияга и близлежащие территории).

проведения полевых работ выбраны 34 экспериментальных водосбора первичных звеньев гидрографической сети, расположенных в Предкамье и Предволжье. Объекты выбирались исходя из условий репрезентативности для пилотных водосборов, относительной однородности поверхности и доступности. Схема расположения пунктов отбора проб воды представлена на рис. 3.

Отбор проб выполнялся в период весеннего половодья, интенсивных ливневых паводков, проходивших в регионе в начале июня 2018 г., а также летней (август) и осенней (октябрь) межени. Концентрации азота и фосфора в стоке с различных типов поверхности определялись исходя из условия доминирования того или иного типа поверхности. Полученные медианные значения концентраций представлены в табл. 2.

Нагрузка, сформированная в результате сельскохозяйственной деятельности (L_{agr}), рассчитывалась по формуле (2) для территорий административных районов, расположенных на изучаемых пилотных водосборах. Сотрудниками ИАЭП собрана и обработана информация о 87 крупных сельскохозяйственных предприятиях с учетом особенностей их деятельности, сведения о количестве вносимых минеральных и органических удобрений, выращиваемых культурах, типах почв и их механическом составе, удаленности от гидрографической сети, т. е. о тех показателях сельскохозяйственной активности, которые описываются параметрами уравнения (2). По результатам расчетов, нагрузка на водосбор Казанки составила в современных условиях для N 911 т/га, P — 86 т/га, в предположении после внедрения НДТ — 851 и 83 т/га соответственно; на водосбор Свяги в современных условиях для N — 4502 т/га, P — 306 т/га, после внедрения НДТ — 4337 и 301 т/га соответственно.

Невысокая эффективность внедрения НДТ, обеспечивающая снижение сельскохозяйственной нагрузки на водосборы не более чем на 6 %, объясняется тем, что на большей части изучаемой территории дозы внесения питательных веществ с органическими и минеральными удобрениями ниже среднего выноса азота и фосфора с урожаем.

Биогенная нагрузка на первичные звенья гидрографической сети пилотных водосборов, сформированная сбросами точечных источников загрязнения и рассчитанная с использованием данных статистической отчетности по форме 2ТП (водхоз), составила 170,2 т N/год и 0,6 т P/год для водосбора Свяги, а также 55,6 т N/год и 3,7 т P/год для водосбора Казанки. Значения атмосферных выпадений азота и фосфора на поверхность пилотных водосборов, рассчитанные специалистами Казанского федерального университета по данным натурных наблюдений за химическим составом осадков, составили 0,81 кг N/(км²·год) и 0,035 т P/(км²·год) для водосбора Свяги, а также 0,80 т N/(км²·год) и 0,030 т P/(км²·год) для водосбора Казанки.

Калибровка расчетного метода проводилась по средним за период 2008–2016 гг. значениям выноса азота и фосфора, рассчитанным с использованием данных гидрохимического мониторинга, проводимого на Свяге в створе Буинска и на Казанке в створе Казани. Полученные в результате калибровки значения параметра k^* в формуле (4) составили 1,05 по N и 0,93 по P для водосбора Свяги и 1,08 по N и 1,09 по P для водосбора Казанки. Результаты расчетов среднегодового выноса азота и фосфора с пилотных водосборов Свяги и Казанки при различных значениях слоя стока в период 2008–2015 гг. представлены на рис. 4.

Средний за период 2008–2016 гг. вынос азота и фосфора, т/год, с пилотных водосборов, рассчитанный по данным государственного мониторинга Росгидромета, составил 3106 т N/год и 189 т P/год для водосбора Свяги, а также 1225 т N/год и 58 т P/год для водосбора Казанки.

Для оценки достоверности вычислений использован критерий Стьюдента и рассчитан коэффициент достоверности t [21]. Анализ результатов расчета показал, что вероятность достоверного соответствия наблюдаемого и рассчитанного рядов составляет 95 %.

В последующих приближенных оценках биогенной нагрузки на Куйбышевское водохранилище значения параметров модели, полученные для Свяги, использовались при расчете формирования нагрузки на водохранилище с правобережной части водосбора (табл. 3). Параметры выноса с водосбора Казанки позволили оценить левобережную биогенную нагрузку на водохранилище (см. табл. 3). Расчеты выполнялись в предположении, что интенсивность повышения сельскохозяйственной на-

Таблица 2

Медианные значения концентраций (C_i) в стоке с рассматриваемых типов подстилающей поверхности

Типы подстилающей поверхности (ландшафты)	Вещество	C_i , мг/л
Сельскохозяйственные	$P_{вал}$	0,085
Естественная подстилающая поверхность	$P_{вал}$	0,054
Селитебные	$P_{вал}$	0,20
Сельскохозяйственные	$N_{вал}$	1,45
Естественная подстилающая поверхность	$N_{вал}$	1,15
Селитебные	$N_{вал}$	3,59

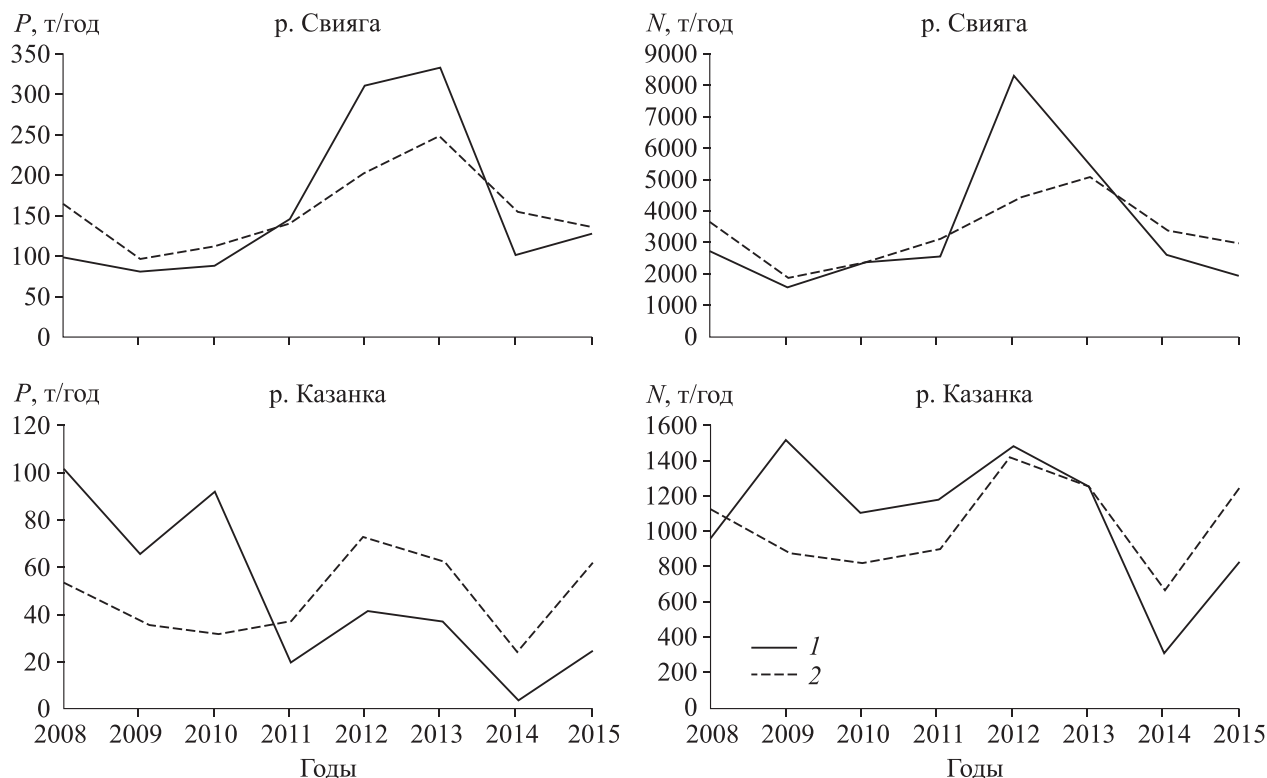


Рис. 4. Измеренные (1) и рассчитанные (2) значения выноса фосфора и азота с водосборов рек Свияги и Казанки.

Таблица 3

Приближенная оценка средней многолетней биогенной нагрузки на Куйбышевское водохранилище с правобережной (площадь 30 878 км², средний слой стока 74 мм/год) и с левобережной частей водосбора (площадь 60 207 км², средний слой стока 125 мм/год)

Показатель	Элемент	
	N	P
Правобережная нагрузка на Куйбышевское водохранилище, т/год	10 836,2	468,3
природная (фоновая) составляющая	566,9	22,3
диффузная (антропогенная) составляющая, включая атмосферные выпадения	10 241,2	444,7
модуль выноса, кг/(км ² ·год)	350,9	15,2
Левобережная нагрузка на Куйбышевское водохранилище, т/год	29 723,4	1028,0
природная (фоновая) составляющая	2710,6	79,0
диффузная (антропогенная) составляющая, включая атмосферные выпадения	25 367,6	918,1
модуль выноса, кг/(км ² ·год)	493,7	17,1

грузки пропорциональна увеличению полевых площадей, идентифицируемых по данным космической съемки. Кроме суммарного выноса азота и фосфора, рассчитаны его природная (фоновая) и диффузная (антропогенная) составляющие с использованием формул (5) и (6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты проведенных исследований, направленных на оценку биогенной нагрузки на Куйбышевское водохранилище со стороны водосбора, заключаются в следующем.

Построенная схема расчета (математическая модель) позволила рассчитать среднегодовой вынос валовых форм азота и фосфора с речных водосборов неоднородной структуры. Модель откалибрована по данным государственного мониторинга на пилотных объектах, расположенных в левобережной

и правобережной частях частного водосбора Куйбышевского водохранилища (без водосборов Вятки и Камы). Согласно ориентировочной оценке биогенной нагрузки на Куйбышевское водохранилище, сформированной на левобережной и правобережной частях водосбора в современных условиях, значения суммарной нагрузки на водохранилище составили 40 559 т N/год и 1496 т P/год для условий средней водности. При этом вклад левобережной части составляет около 69 % по фосфору и 73 % по азоту от значения суммарной нагрузки. Выделение фоновой (природной) и диффузной (антропогенной) составляющих нагрузки позволило определить, что вклад диффузной составляющей в общую биогенную нагрузку на водохранилище со стороны водосбора весьма велик (85–95 % от суммарной нагрузки).

В ходе оценки сельскохозяйственной нагрузки на водосбор установлено, что внедрение в сельскохозяйственную практику наилучших доступных технологий не приведет к существенному снижению биогенной нагрузки на водохранилище. Причиной может служить тот факт, что на большей части изучаемой территории дозы внесения питательных веществ с органическими и минеральными удобрениями в последние годы ниже среднего выноса азота и фосфора с урожаем.

Работа выполнена в рамках приоритетного проекта «Сохранение и предотвращение загрязнения реки Волги» по теме 3.4. «Разработка Концепции по снижению поступления загрязняющих веществ с естественных ландшафтов, селитебных территорий, земель сельскохозяйственного значения, промышленных площадок предприятий, предприятий животноводческого комплекса, полигонов захоронений и свалок, объектов транспортной инфраструктуры».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондратьев С.А. Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. — СПб.: Наука, 2007. — 255 с.
2. Кондратьев С.А., Казмина М.В., Шмакова М.В., Маркова Е.Г. Метод расчета биогенной нагрузки на водные объекты // Региональная экология. — 2011. — № 3–4. — С. 50–59.
3. Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Опыт создания математических моделей, описывающих процессы стока и выноса примесей с водосбора // Общество. Среда. Развитие. — 2017. — № 1 (42). — С. 80–84.
4. Кондратьев С.А., Шмакова М.В., Брюханов А.Ю., Викторова Н.В., Ершова А.А., Обломкова Н.С. К оценке биогенного стока в Финский залив Балтийского моря // Уч. зап. Рос. гидрометеоролог. ун-та. — 2018. — № 51. — С. 109–120.
5. Брюханов А.Ю., Максимов Д.А., Хухта Х., Васильев Э.В., Минин В.Б., Субботин И.А. Рекомендации по организации и проведению производственного экологического контроля систем переработки и использования навоза (помета). Порядок разработки Технологического регламента. — СПб.: Изд-во Сев.-Зап. НИИ механизации и электрификации сельского хозяйства, 2012. — 53 с.
6. Брюханов А.Ю., Шалавина Е.В., Васильев Э.В. Методика укрупненной оценки суточного и годового выхода навоза/помета // Молочнохоз. вестн. — 2014. — № 1 (13). — С. 78–85.
7. Брюханов А.Ю., Кондратьев С.А., Обломкова Н.С., Огуздин А.С., Субботин И.А. Методика определения биогенной нагрузки сельскохозяйственного производства на водные объекты // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. — 2016. — № 89. — С. 175–183.
8. Кондратьев С.А., Шмакова М.В., Брюханов А.Ю., Чичкова Е.Ф., Маркова Е.Г. Оценка возможного снижения биогенной нагрузки, сформированной на речном водосборе, в результате внедрения наилучших доступных сельскохозяйственных технологий // Общество. Среда. Развитие. — 2016. — № 1. — С. 92–99.
9. Поздняков Ш.Р., Кондратьев С.А., Тарбаева В.М., Шмакова М.В., Брюханов А.Ю., Воробьева Е.А., Обломкова Н.С. Научное обоснование выполнения рекомендаций ХЕЛКОМ по снижению биогенной нагрузки на Финский залив со стороны России // Вестн. Санкт-Петерб. ун-та. Сер. Геология, география. — 2016. — Вып. 4. — С. 53–65.
10. 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. — Вып. 145. — С. 89–108.
11. Кондратьев С.А., Брюханов А.Ю. Оценка биогенной нагрузки на водоемы с природных и антропогенных ландшафтов // Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири. В 5 т. Т. 3: Мониторинг и моделирование ландшафтов. — М.: Изд-во Всерос. НИИ агрохимии, 2018. — С. 287–293.
12. Guidelines for the Compilation of Waterborne Pollution to the Baltic Sea (PLC-water). HELCOM. — Helsinki, 2005. — 80 p.

13. **Behrendt H.** Inventories of point and diffuse sources and estimated nutrient loads. A comparison for different river basins in Central Europe // *Water Scienc and Technology*. — 1996. — Vol. 33. — P. 99–107.
14. **Behrendt H., Dannowski R.** Nutrients and Heavy Metals in the Odra River System. — Weissensee Verlag Publ., Germany, 2007. — 337 p.
15. **Behrendt H., Opitz D.** Retention of nutrients in river systems: dependence on specific runoff and hydraulic load // *Hydrobiologia*. — 1999. — N 410. — P. 111–122.
16. **Venohl M., Donohue I., Fogelberg S., Arheimer D., Irvine K., Behrendt H.** Nitrogen retention in a river system and effects of river morphology and lakes // *Water Sciences and Technology*. — 2005. — Vol. 51 (3–4). — P. 19–29.
17. **Vink R., Behrendt H.** Heavy metal transport in large river systems: heavy metals emission and load in the Rhine and Elbe river basins // *Hydrol. Process*. — 2002. — N 16. — P. 3227–3244.
18. **Куйбышевское водохранилище** / Ред. А.В. Монаков. — Л.: Наука, 1983. — 213 с.
19. **Климат Татарской АССР** / Под ред. Н.В. Колобова. — Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1983. — 160 с.
20. **Атлас Республики Татарстан** / Отв. ред. И.Ю. Каменская. — М.: Картография, 2005. — 216 с.
21. **Кобзарь А.И.** Прикладная математическая статистика. — М.: Физматлит, 2006. — 816 с.

Поступила в редакцию 15.10.2018

После доработки 21.11.2018

Принята к публикации 02.04.2019