

УДК 556.512

## ПЕРСПЕКТИВЫ СОКРАЩЕНИЯ ВЫНОСА БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С РЕЧНЫХ ВОДОСБОРОВ ЗА СЧЕТ ВНЕДРЕНИЯ НАИЛУЧШИХ ДОСТУПНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ)<sup>1</sup>

© 2020 г. Ш. Р. Поздняков<sup>a</sup>, А. Ю. Брюханов<sup>b</sup>, С. А. Кондратьев<sup>a, \*</sup>,  
Н. В. Игнатьева<sup>a</sup>, М. В. Шмакова<sup>a</sup>, Е. А. Минакова<sup>c</sup>, А. М. Расулова<sup>a</sup>,  
Н. С. Обломкова<sup>b</sup>, Э. В. Васильев<sup>b</sup>, А. В. Терехов<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Институт озерадения РАН, Санкт-Петербург, 196105 Россия

<sup>b</sup>Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФНАЦ ВИМ, Санкт-Петербург, 196625 Россия

<sup>c</sup>Казанский федеральный университет, Казань, 420012 Россия

\*e-mail: kondratyev@limno.org.ru

Поступила в редакцию 09.01.2020 г.

После доработки 18.03.2020 г.

Принята к публикации 19.03.2020 г.

Выполнена оценка возможного снижения выноса биогенных элементов с водосборов притоков Куйбышевского водохранилища за счет внедрения наилучших доступных технологий сельскохозяйственного производства. Проанализирована деятельность более чем восьмисот сельскохозяйственных предприятий на водосборе водохранилища. На основе космических снимков проведена классификация различных типов подстилающей поверхности. С использованием методов математического моделирования рассчитана сначала рассредоточенная сельскохозяйственная нагрузка азотом и фосфором на водосбор, а затем вынос биогенных элементов с речным стоком в водохранилище как в современных условиях, так и после внедрения НДТ в сельскохозяйственное производство. Показано, что в условиях средней водности суммарный вынос с водосборов рек Свяги, Казанки, Мёши и Большой Черемшан снижается ориентировочно на 367 тN/год и 12 тP/год при условии внедрения НДТ в сельскохозяйственную практику. Выявлено, что внесение в почву азота и фосфора в составе минеральных и органических удобрений для большинства административных районов изучаемого региона ниже потребности растительных культур в биогенных элементах, что приводит к постепенному обеднению почв питательными веществами и снижению риска миграции этих элементов в водные объекты.

*Ключевые слова:* пилотные водосборы, азот, фосфор, рассредоточенная нагрузка, наилучшие доступные технологии.

**DOI:** 10.31857/S0321059620050168

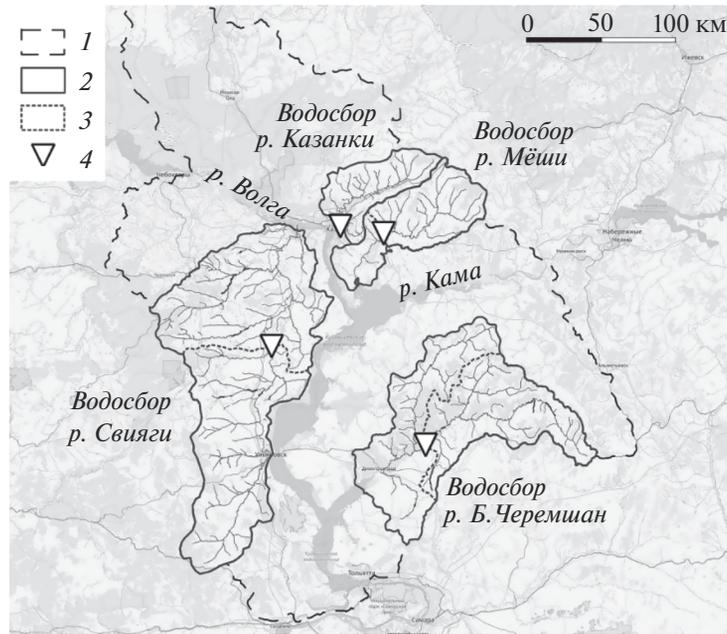
Цель настоящего исследования, выполненного в рамках приоритетного проекта “Сохранение и предотвращение загрязнения реки Волги”, – количественная оценка возможного снижения выноса биогенных элементов (БЭ) (азота и фосфора) с речных водосборов за счет внедрения

наилучших доступных технологий (НДТ) сельскохозяйственного производства применительно к различным физико-географическим районам, типам подстилающей поверхности и разнообразия видов источников загрязнения на притоках Куйбышевского водохранилища.

Для достижения поставленной цели решены следующие основные задачи:

1) для выбранных пилотных водосборов проведен анализ источников биогенной нагрузки сельскохозяйственного происхождения, с использованием методов математического моделирования рассчитана сельскохозяйственная нагрузка азотом и фосфором на водосбор как в современных условиях, так и при внедрении НДТ;

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансировании за счет средств федерального бюджета (тема 0154-2018-0006 “Разработка методики расчета выноса биогенных веществ от источников различного происхождения (в том числе диффузных) для неоднородных водосборов бассейна Куйбышевского водохранилища”, тема 0154-2019-0001 “Комплексная оценка динамики экосистем Ладожского озера и водоемов его бассейна под воздействием природных и антропогенных факторов”).



**Рис. 1.** Исследуемые водосборы: 1 – граница водосбора Куйбышевского водохранилища (без водосборов верхней Волги, Камы и Вятки), 2 – границы пилотных объектов, 3 – границы контролируемых территорий, 4 – пункты гидрохимического мониторинга.

2) с учетом воздействия других точечных и рас­средоточенных источников, расположенных в пределах пилотных водосборов, выполнены рас­четы выноса азота и фосфора для замыкающих створов рек, контролируемых Росгидрометом, как в современных условиях, так и при внедрении НДТ;

3) оценены перспективы внедрения НДТ в сельскохозяйственное производство на изучаемых объектах и работоспособность предложенной расчетной схемы.

Работы проводились Институтом озероведения (ИНОЗ) РАН совместно со специалистами Казанского Федерального Университета (КФУ), Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП-филиала ФНАЦ ВИМ) и Институтом проблем экологии и недропользования (ИПЭН) Академии наук Республики Татарстан.

В качестве пилотных объектов исследования выбраны реки Свияга (площадь водосбора – 9421 км<sup>2</sup> для створа Буинск), Казанка (2519 км<sup>2</sup> для створа Казань), Мёша (3229 км<sup>2</sup> для створа Пестрецы) и Большой Черемшан (6019 км<sup>2</sup> для створа Новочеремшанск). Указанные объекты расположены на территории Приволжского ФО в четырех субъектах РФ: Республике Татарстан, Чувашской Республике, Самарской и Ульяновской областях. Все изучаемые реки относятся к категории средних равнинных рек с площадями водосборов от 2000 до 50000 км<sup>2</sup>. Выбор именно

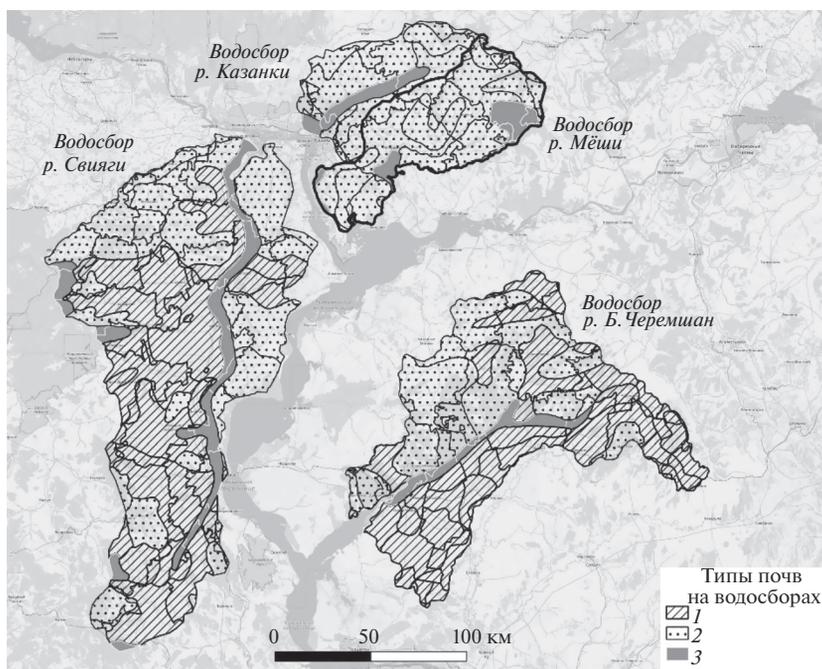
этих рек в качестве пилотных объектов объясняется следующими причинами [20]:

- 1) водосборы рек расположены в различных физико-географических районах;
- 2) водосборы рек расположены в различных ландшафтных подзонах;
- 3) гидрологические и почвенно-геологические условия на водосборах существенно различаются;
- 4) источники антропогенного воздействия на водосборах также существенно различаются.

На рис. 1 представлены схемы расположения водосборов перечисленных рек с выделением контролируемой части, т.е. той части водосбора, которая замыкается на створы гидрохимических наблюдений Росгидромета.

Распространение различных видов почв в границах изучаемых водосборных бассейнов представлено на рис. 2. Нетрудно видеть, что на водосборах Казанки и Мёши, а также в северной части водосборов Свияги и Черемшана преобладают серые лесные почвы. Черноземы доминируют в южных частях водосборов Свияги и Черемшана. Дерново-подзолистые почвы в основном приурочены к руслам рек.

В табл. 1 приведены величины выноса валовых форм (в нефилтрованных пробах) азота и фосфора, рассчитанные с использованием данных натуральных измерений на контролируемых Росгидрометом створах на пилотных водосборах за период 2000–2017 гг., а также средние за период наблюдений значения. Представленные данные – ос-



**Рис. 2.** Распространение различных видов почв в границах изучаемых водосборных бассейнов: 1 — серые лесные почвы, 2 — черноземы, 3 — дерново-подзолистые почвы.

нова для проведения калибровки используемого в настоящем исследовании расчетного метода.

Средний многолетний слой стока для пилотных водосборов за период 2000–2017 гг. по данным мониторинга Росгидромета составил, мм/год: 73.0 для Свияги, 144.1 для Казанки, 150.9 для Мёши, 90.2 для Черемшана.

Территория водосбора Куйбышевского водохранилища — один из наиболее развитых сельскохозяйственных регионов РФ, поэтому основное направление снижения рассредоточенной нагрузки на водные объекты связано с ведением сельскохозяйственной деятельности. Анализ процессов сельскохозяйственного производства как источника воздействия на окружающую среду и водные объекты показал, что основное негативное воздействие происходит при переработке навоза/помета, при его удалении из животноводческого помещения, а также при хранении и внесении на поля. При этом основные индикаторы воздействия на окружающую среду — высокое содержание биогенных элементов (азота и фосфора) в почве и почвенной воде.

В настоящее время основное направление повышения экологической безопасности промышленного производства и интенсивного сельскохозяйственного производства — переход на наилучшие доступные технологии. Согласно [12], к наилучшим доступным технологиям относят: технологические процессы, методы, порядок организации производства продукции и энергии,

выполнение работ или оказание услуг, включая системы экологического и энергетического менеджмента, а также проектирования, строительства и эксплуатации сооружений и оборудования, обеспечивающие уменьшение и (или) предотвращение поступления загрязняющих веществ в окружающую среду, образования отходов производства по сравнению с применяемыми, как наиболее эффективные для обеспечения нормативов качества окружающей среды, нормативов допустимого воздействия на окружающую среду при условии экономической целесообразности и технической возможности их применения. НДТ, связанные со снижением биогенной нагрузки на сельскохозяйственные территории, включают в себя технологии переработки и хранения навоза и помета животноводческих комплексов и птицефабрик, технологии внесения органических и минеральных удобрений с учетом агротехнических требований.

Технологии, технические средства и методы организации работ при разработке методики оценки влияния НДТ на сельхозпроизводство включены в Методические рекомендации по технологическому проектированию систем удаления и подготовки к использованию навоза и помета [24], утвержденные Минсельхозом РФ 23.05.2017 г., а также в российские справочники [13, 14] по интенсивному разведению свиней и сельскохозяйственной птицы, утвержденные приказами Росстандарта [22, 23]. В 2019 г. были приняты ГОСТ,

**Таблица 1.** Вынос валового азота и валового фосфора с пилотных водосборов, рассчитанный по данным наблюдений Росгидромета, т/год

Годы	Свияга		Казанка		Мёша		Черемшан	
	N <sub>вал</sub>	P <sub>вал</sub>						
2000			1623.95	140.61	4355.5	129.1	1892.9	141.8
2001			2591.09	157.51	1808.9	106.6	3151.6	177.3
2002	964.8	55.7	948.70	67.88	920.8	232.3	1728.4	109.4
2003	1339.2	121.0	1492.86	107.49	2680.0	192.6	1038.0	53.1
2004	1740.0	96.7	778.86	52.29	2614.5	29.6	1058.4	130.4
2005	2430.2	67.4	1536.41	90.46	1240.7	209.6	691.9	63.7
2006	1898.3	230.2	1122.66	90.18	2326.5	146.3	1048.9	119.8
2007	351.4	48.0	206.80	8.43	1469.5	86.9	789.3	133.8
2008	2709.2	85.4	1093.06	91.24	1563.4	126.6	1302.4	111.7
2009	1569.1	71.5	1729.21	58.38	1495.7	233.5	1046.7	45.7
2010	2301.5	76.4	1271.22	81.83	1877.8	150.8	881.1	111.1
2011	2530.3	128.5	1347.00	17.78	1727.0	84.5	783.9	77.1
2012	8198.7	276.2	1690.71	36.76	3590.3	218.1	914.0	92.2
2013	5289.4	296.6	1432.44	33.00	2328.4	144.8	808.5	118.2
2014	2598.6	89.3	355.06	3.11	886.6	16.6	849.2	62.3
2015	1845.7	112.7	971.92	21.83	1058.3	129.8		
2016	4325.9	143.2	839.53	10.61	1378.2	49.3		
2017					1601.4	97.2		
Среднее значение	2672.8	126.6	1237.1	62.9	1940.2	132.5	1199.0	103.2

регламентирующие внедрение НДТ в сельхоз-производство [9–11].

Разработка перечисленных ГОСТ и Рекомендаций выполнена при участии специалистов ИАЭП – филиала ФНАЦ ВИМ. Там же разработана методика оценки биогенной нагрузки на сельскохозяйственные территории, позволяющая рассчитывать не только реальную нагрузку, но и ее возможное снижение в результате внедрения НДТ [1–5].

### РАСЧЕТ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ БИОГЕННОЙ НАГРУЗКИ НА ВОДОСБОРЫ

Эффективный инструмент расчета нагрузки на полях сельхозпредприятий – метод, предложенный специалистами ИАЭП – филиал ФНАЦ ВИМ [2, 3]. Достоинство метода – расчет выноса БЭ 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. Метод позволяет давать оценку снижения биогенной нагрузки при использовании наилучших доступных технологий

ведения сельскохозяйственного производства. Расчетная зависимость имеет следующий вид:

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

$M_{soil\ i}$ ,  $M_{min\ i}$  и  $M_{org\ i}$  – содержание БЭ 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; коэффициенты, характеризующие:  $\alpha_1$  – усвоение минеральных удобрений сельхозкультурами;  $\alpha_2$  – усвоение органических удобрений сельхозкультурами;  $K_1$  – вынос БЭ из пахотного слоя почв;  $K_2$  – удаленности контура сельскохозяйственных угодий от гидрографической сети;  $K_3$  – тип почв (по происхождению);  $K_4$  – механический состав почв;  $K_5$  – структуру сельхозугодий, т.е. соотношение площадей пашни, многолетних трав, лугов, пастбищ;  $K_6$  – использование наилучших доступных технологий применения органических и минеральных удобрений. Все коэффициенты безразмерные.

**Таблица 2.** Принятые в расчетах значения коэффициентов уравнения (1)

Коэффициент	Спецификация	Азот	Фосфор
$\alpha_1$	Минеральные удобрения	0.3	0.03
$\alpha_2$	Органические удобрения	0.1	0.02
$K_1$	Серые лесные почвы периодические промывные	0.0086	0.0011
	Черноземы периодические промывные	0.0129	0.00138
	Дерново-подзолистые почвы периодические промывные	0.0052	0.00029
	Дерново-подзолистые почвы промывные	0.030	0.008
$K_2$	Удаленность контура 50–500 м	0.2	0.2
	500–2000 м	0.2	0.2
	2000–5000 м	0.1	0.2
	>5000 м	0.0	0.0
$K_3$	Серые лесные почвы	1.0	1.0
	Черноземы	1.50	1.25
	Дерново-подзолистые почвы	0.60	0.26
$K_4$	Тяжелые глинистые и суглинистые почвы	1.0	1.0
	Легкие супесчаные и песчаные почвы	1.8	2.0
$K_5$	Категория 1*	1.00	0.85
	Категория 2*	0.88	0.87
	Категория 3*	0.46	0.37
	Категория 4*	0.40	0.20

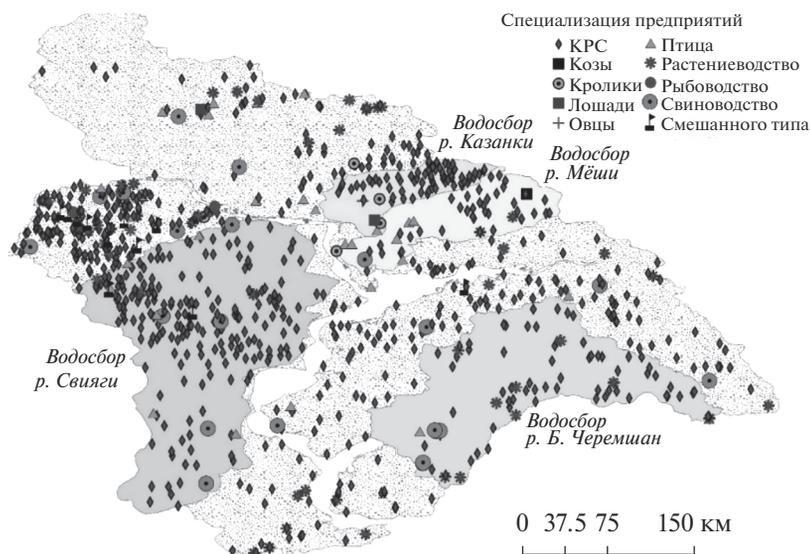
\* Категория 1 – пропашные; категория 2 – зерновые и зернобобовые культуры, однолетние травы; категория 3 – кормовые культуры; категория 4 – залежные земли.

Значения коэффициентов уравнения (1) для изучаемых пилотных водосборов, полученные в результате анализа литературных данных, материалов полевых исследований и экспертной оценки специалистов ИАЭП – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ [8, 18, 24, 25, 33, 44], представлены в табл. 2.

Особое внимание в настоящей работе уделено оценке коэффициента  $K_6$  – соответствия технологии применения органических и минеральных удобрений наилучшим доступным технологиям. Внедрение НДТ предусматривает оценку качества почвы, потребности выращиваемых культур в необходимых дозах удобрений, совокупности методов, приемов и способов (технических и организационных) работы с органическими и минеральными удобрениями, обеспечивающих минимизацию негативного воздействия на окружающую среду. Поэтому коэффициент  $K_6$  отражает комплексное влияние наилучшего сочетания показателей экологической безопасности и экономической эффективности сельскохозяйственного производства на снижение выноса азота и фосфора. При определении значений коэффициентов учитывалось влияние используемых машинных технологий и регламентов их соблюдения на объем выноса азота и фосфора,

содержащихся в органических и минеральных удобрениях. На основе анализа отечественного и зарубежного опыта внедрения НДТ [1–5, 27, 29, 38–45] приняты следующие значения коэффициента  $K_6$  как для азота, так и для фосфора: 1.0 (без применения НДТ) и 0.25 (с применением НДТ).

При выполнении расчетов сельскохозяйственной биогенной нагрузки на пилотные водосборы с использованием уравнения (1) и перечисленных выше значений коэффициентов содержание азота и фосфора в пахотном слое почв (20–25 см)  $M_{soil}$  определялось по справочным материалам и литературным данным [8, 21]. Так, для хорошо окультуренной серой лесной почвы значение  $M_{soil}$  составило в среднем 6 тN/га и 4 тP/га. При определении массы азота и фосфора, поступающей с минеральными и органическими удобрениями ( $M_{min}$ ,  $M_{org}$ ), используются официальные данные статистики по агропромышленному комплексу, данные конкретных сельхозпредприятий, нормативные и справочные материалы. По итогам проведенной в рамках настоящего исследования инвентаризации в бассейне Куйбышевского водохранилища выявлено 888 предприятий (рис. 3), большинство которых занимаются разведением крупного рогатого скота (КРС). В границах исследуемых водосборов наибольшее количество



**Рис. 3.** Картограмма территории расположения предприятий, формирующих биогенную нагрузку на водосбор Куйбышевского водохранилища.

таких предприятий находится в пределах самого крупного водосбора р. Свяги, где соответственно образуется больше навоза и поступление азота и фосфора в составе органических удобрений составляет максимальную величину. Среди птицеводческих предприятий наиболее крупные расположены в бассейнах рек Мёша и Черемшан.

Высокая концентрация крупных предприятий отмечается в северо-западной части водосбора Куйбышевского водохранилища. В бассейнах рек Мёши, Черемшан и Свяги находится от 2 до 6 предприятий 1-й категории, для которых в ближайшее время будет применяться система экологического регулирования на основе НДТ.

Результаты расчетов биогенной сельскохозяйственного нагрузки на поверхность пилотных водосборов для условий 2017 г. и в предположении о внедрении НДТ представлены в табл. 3.

Из табл. 3 следует, что внедрение НДТ в сельскохозяйственное производство приведет к снижению нагрузки азотом и фосфором на пилотные водосборы в целом на 1187 тN/год и 28.8 тP/год. Максимальное снижение нагрузки по азоту (до 13% от нагрузки в 2017 г.) может быть достигнуто на водосборах Казанки и Мёши, по фосфору (15.7%) – на водосборе Свяги.

Кроме расчета сельскохозяйственной биогенной нагрузки на пилотные водосборы для 2017 г. выполнена оценка ее динамики за 2008–2017 гг.

**Таблица 3.** Рассчитанная биогенная нагрузка сельскохозяйственного происхождения на пилотные водосборы для условий 2017 г. и в предположении внедрения НДТ

Река	N <sub>2017</sub> , т/год	P <sub>2017</sub> , т/год	N <sub>НДТ</sub> , т/год	P <sub>НДТ</sub> , т/год	ΔN, т/год	ΔP, т/год	ΔN, %	ΔP, %
Контролируемая часть водосбора								
Свяга	5880	320.0	5568	312.4	312	7.6	5.60	2.43
Казанка	1016	68.3	907	65.4	109	2.9	12.02	4.43
Мёша	1165	79.3	1031	75.8	134	3.5	13.00	4.62
Черемшан	3229	184.5	3073	180.9	156	3.6	5.08	1.99
Весь водосбор								
Свяга	9929	574.1	9284	558.4	645	15.7	6.95	2.81
Казанка	1016	68.3	907	65.4	109	2.9	12.02	4.43
Мёша	1440	97.4	1274	93.0	166	4.4	13.03	4.73
Черемшан	5127	282.1	4860	276.3	267	5.8	5.49	2.10

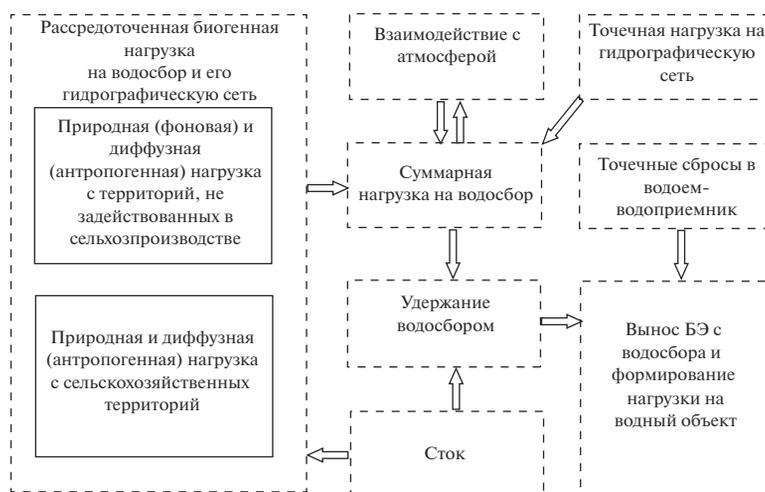


Рис. 4. Блок-схема расчета выноса БЭ с водосбора в соответствии со структурой модели ILLM.

Анализ динамики поголовья животных и птицы за период 2008–2017 гг. показал, что на рассматриваемой территории преобладает производство КРС. При этом на водосборе Казанки за рассматриваемый период поголовье КРС сократилось на 5, свиней на 89, сельскохозяйственной птицы на 80, лошадей на 11%. На водосборе Мёши в связи с ликвидацией ряда свиноводческих и птицеводческих предприятий также сократилось поголовье свиней на 92% и сельскохозяйственной птицы на 73%. На водосборе Свяги за анализируемый период не произошло существенного сокращения поголовья сельскохозяйственных животных, а на водосборе Черемшана поголовье свиней выросло на 23% и сельскохозяйственной птицы на 671%.

Удалось показать, что на водосборах Казанки и Мёши в 2017 г. поступление БЭ сократилось за счет как небольшого сокращения площади возделываемых земель, так и снижения дозы БЭ в составе минеральных удобрений. Посевные площади увеличились на ~3% в контролируемой части бассейна р. Черемшан, однако это увеличение нивелировано более существенным сокращением поступления азота и фосфора в составе органических и минеральных удобрений, что в конечном итоге привело к снижению сельскохозяйственной нагрузки на водосбор в 2017 г. Иная ситуация сложилась в бассейне р. Свяги. Здесь площадь посевных земель увеличилась на 5%, что компенсировало достаточно существенное снижение поступления БЭ в составе удобрений (на ~30%) и привело к увеличению общей нагрузки на водосбор при одновременном снижении выноса с 1 га за счет увеличения площади угодий.

Необходимо отметить, что в исследуемый период использование азота и фосфора в составе минеральных и органических удобрений в боль-

шинстве административных районов меньше потребности растительных культур в БЭ, что приводит к постепенному обеднению почв питательными веществами и снижению риска миграции БЭ в водные объекты.

#### РАСЧЕТЫ ВЫНОСА АЗОТА И ФОСФОРА ДЛЯ ЗАМЫКАЮЩИХ СТВОРОВ РЕК

Расчет выноса БЭ с водосбора в заданном створе выполнялся на основе модели ILLM (Institute of Limnology Load Model), разработанной в ИНОЗ РАН [16]. Модель разработана с учетом отечественного и зарубежного опыта моделирования стока и выноса химических веществ с водосборных территорий [15, 36], а также рекомендаций ХЕЛКОМ по оценке нагрузки на водные объекты бассейна Балтийского моря [43]. Модель учитывает вклад точечных и рассредоточенных источников в формирование биогенной нагрузки на водосбор, позволяет рассчитывать вынос примесей с водосбора с учетом влияния гидрологических факторов и удержания БЭ водосбором и гидрографической сетью. Конечный итог моделирования – количественная оценка среднегодового выноса БЭ с водосбора и отдельных его составляющих, в том числе и диффузного выноса (диффузного загрязнения). Алгоритм расчета суммарного выноса БЭ с водосбора и формирования биогенной нагрузки на водоем-водоприемник представлен на рис. 4.

Согласно принятой схеме расчета, основные составляющие суммарного выноса ( $L$ , т/год) с водосбора валовых форм азота и фосфора, а также нагрузки на водный объект: нагрузка, сформированная в результате сельскохозяйственной деятельности  $L_{agr}$ , рассредоточенная эмиссия БЭ подстилающей поверхностью, не подверженной

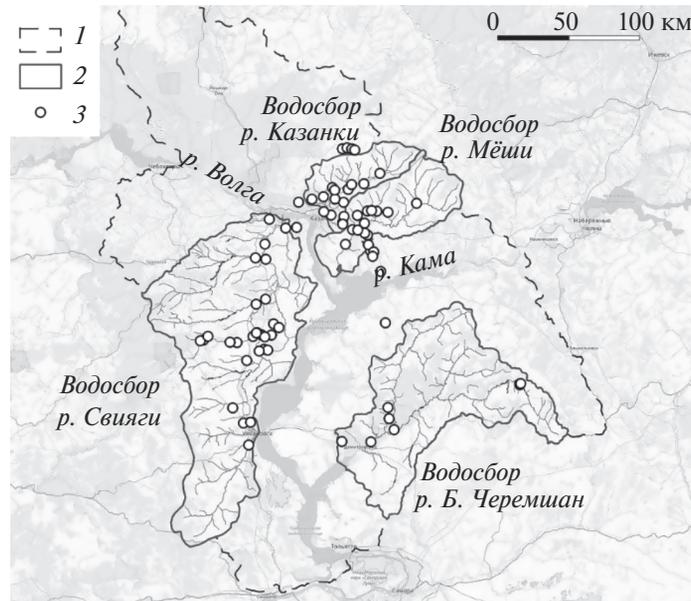


Рис. 5. Картограмма территории расположения точек отбора проб воды во время проведения полевых работ 2018–2019 гг. 1 – граница водосбора Куйбышевского водохранилища, 2 – границы пилотных водосборов, 3 – точки отбора проб.

в настоящее время сельскохозяйственному воздействию  $L_e$ ; сбросы точечных источников загрязнения в гидрографическую сеть водосбора  $L_{p1}$  и непосредственно в водоем водоприемник  $L_{p2}$ ; массообмен с атмосферой  $L_a$ :

$$L = (L_e + L_{agr} + L_{p1} + L_a)(1 - k_r) + L_{p2}, \quad (2)$$

где  $k_r$  – безразмерный коэффициент удержания вещества водосбором и его гидрографической сетью. Все члены уравнения (2) имеют размерность т/год, кроме безразмерного коэффициента  $k_r$ . Расчет биогенной нагрузки, сформированной на поля сельхозпредприятий  $L_{agr}$ , выполнен с использованием изложенного выше метода ИАЭП, основанном на уравнении (1).

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  $L_e$ , рассчитывалась по формуле:

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

где  $C_i$  – средние концентрации примеси в стоке с  $i$ -го типа подстилающей поверхности, мг/л;  $y_i$  – слой стока с  $i$ -го типа подстилающей поверхности, мм/год;  $A_i$  – площади, км<sup>2</sup>.

Оценка размеров площадей различных типов подстилающей поверхности  $A_i$  выполнялась с использованием результатов дешифрирования кос-

мических снимков спутника Landsat-8 за летние и осенние месяцы 2017 г., полученных с веб-сервиса Геологической службы США [7]. Результаты классификации типов подстилающей поверхности изучаемого водосбора приведены в табл. 4.

Для оценки концентраций БЭ в стоке с различных типов подстилающей поверхности  $C_i$ , входящих в формулу (3) и характеризующих эмиссию общего азота и общего фосфора из почв в поверхностные воды, использованы результаты обобщения данных натуральных наблюдений за содержанием БЭ в стоке с малых водосборов с преобладанием какого-либо типа подстилающей поверхности. Расположение пунктов натуральных наблюдений в 2018–2019 гг., выполненных в рамках настоящего исследования, представлено на рис. 5.

Для анализа полученных данных использовались непараметрические методы оценки, которые применяются, когда распределение генеральной совокупности нельзя определить, так как выборка мала или распределение не следует нормальному закону и параметрические методы неприменимы. Согласно [28, 32], в качестве оценки центра распределения могут быть использованы медиана и трехсреднее значение Тьюки (центральное среднее), а в качестве оценки масштаба распределения – интерквартильный размах (табл. 5). Причем, при количестве членов выборки  $n < 5$  лучше использовать медиану, а при  $n > 5$  – трехсреднее значение [31], что и сделано в рамках настоящей работы, т.е. в последующих расчетах

**Таблица 4.** Структура подстилающей поверхности пилотных водосборов по результатам дешифрирования космических снимков, км<sup>2</sup>

Ландшафты (р. Свяга)	Весь водосбор	Створ Буинск
Водохозяйственные	25.1	19.6
Открытые площади (поля, луга)	2840	5523.2
Урбанизированные	714.5	299.1
Лесохозяйственные	10630.5	1454.2
Прочая естественная растительность	3617.5	2124.9
Всего	17827.6	9421
Ландшафты (р. Казанка)	Весь водосбор	Створ Казань
Водохозяйственные	13.6	13.6
Открытые площади (поля, луга)	1720.8	1720.8
Урбанизированные	151.2	151.2
Лесохозяйственные	415.1	415.1
Прочая естественная растительность	218.3	218.3
Всего	2519	2519
Ландшафты (р. Мёша)	Весь водосбор	Створ Пестрецы
Водохозяйственные	11.3	3.5
Открытые площади (поля, луга)	1025.6	765.4
Урбанизированные	121.4	55.1
Лесохозяйственные	2743	1962.1
Прочая естественная растительность	547.4	442.4
Всего	4448.7	3228.5
Ландшафты (р. Большой Черемшан)	Весь водосбор	Створ Новочеремшанск
Водохозяйственные	0.0	0.0
Открытые площади (поля, луга)	3020.0	1608.2
Урбанизированные	323.2	176.5
Лесохозяйственные	6156.1	2571.1
Прочая естественная растительность	3436.9	1663.5
Всего	12936.2	6019.3

использовались именно трехсредние значения концентраций.

Для определения слоя стока  $u_i$  могут быть использованы его аналитические кривые распределения, построенные по данным многолетних наблюдений на реках исследуемого региона, или результаты детерминированного моделирования речного стока и расходов воды в зависимости от конкретных гидрометеорологических параметров (осадков и температуры воздуха). При решении настоящей задачи использованы средние многолетние значения слоя стока с пилотных водосборов, приведенные выше.

Приближенная оценка атмосферных выпадений азота и фосфора на территории Приволжского ФО, представленная в работе [19], получена на основе обобщения данных натурных измерений.

Рассчитанные значения выпадающих БЭ для водосбора Куйбышевского водохранилища составили 0.68 тN/(км<sup>2</sup> год) и 0.024 тP/(км<sup>2</sup> год).

Биогенная нагрузка на первичные звенья гидрографической сети пилотных водосборов, сформированная сбросами точечных источников загрязнения, рассчитанная с использованием данных статистической отчетности 2ТП(водхоз) и осредненная за период 2013–2017 гг., составила 170.2 тN/год и 0.6 тP/год для водосбора Свяги, 55.6 тN/год и 3.7 тP/год для водосбора Казанки, 170.2 тN/год и 0.6 тP/год для водосбора Мёши, 55.6 тN/год и 3.7 тP/год для водосбора Черемшана.

Как правило, значительная часть химических веществ, поступивших на водосбор от различных источников, не достигает замыкающих створов крупных рек, так как удерживается различными

**Таблица 5.** Результаты непараметрической оценки данных натуральных измерений концентраций азота и фосфора в стоке с малых водосборов ( $C_M$  – медиана,  $C_T$  – трехсреднее значение,  $H$  – интерквартильный размах)

	Казанка и Мёша			Свияга и Черемшан	
	поле	лес	урбан.	поле	лес
<b>Азот</b>					
$C_M$	1.72	1.33	3.50	1.48	1.01
$C_T$	1.87	1.38	3.13	1.60	1.13
$H$	2.06	1.14	1.93	1.39	1.54
<b>Фосфор</b>					
$C_M$	0.121	0.077	0.202	0.115	0.103
$C_T$	0.144	0.084	0.193	0.123	0.106
$H$	0.197	0.076	0.159	0.126	0.123
$n$	72	51	10	79	51

**Таблица 6.** Рассчитанные величины выноса азота и фосфора с пилотных водосборов в Куйбышевское водохранилище для условий 2017 г. и в предположении внедрения НДТ

Река	N – 2017, т/год	P – 2017, т/год	N – НДТ, т/год	P – НДТ, т/год
Свияга	4809	231	4676	228
Казанка	3093	153	2984	150
Мёша	2622	179	2537	175
Черемшан	2250	195	2210	193

звеньями гидрографической сети. Один из рекомендованных ХЕЛКОМ методов расчета удержания химических веществ водосборами и их гидрографической сетью [43] – эмпирическая модель, разработанная в Институте водной экологии и внутреннего рыбоводства Германии [35–37, 46, 47], которая и использована в настоящей работе. Расчеты проводились по следующему эмпирическому соотношению, связывающему в формуле (2) коэффициент удержания  $k_r$  с модулем стока  $q$ , л/(км<sup>2</sup> 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 БЭ водосбором и его гидрографической сетью. Модуль стока  $q$  связан со слоем стока  $y$  (мм/год) соотношением  $q = 0.03171y$ .

При отсутствии стока ( $q = 0$ ) рассчитывается максимальное удержание БЭ, выраженное коэффициентом удержания  $k_r$ , равным единице. При этом вынос отсутствует, все БЭ, поступившие на водосбор, на нем остаются. С увеличением стока вынос также увеличивается; соответственно, удержание БЭ водосбором и его гидрографической сетью уменьшается.

По средним многолетним данным гидрохимического мониторинга Росгидромета (табл. 1) выполнена калибровка модели для всех четырех пилотных водосборов. В результате калибровки определены значения параметра  $k^*$  в формуле (4) по азоту: 1.10 – для Свияги, 1.04 – для Казанки, 0.86 – для Мёши, 1.25 – для Черемшана; по фосфору: 0.92 – для Свияги, 0.88 – для Казанки, 0.40 – для Мёши, 0.88 – для Черемшана. С указанными значениями параметра выполнены расчеты выноса БЭ со всей площади пилотных водосборов в Куйбышевское водохранилище как для современных условий, так и в предположении о внедрении НДТ в сельскохозяйственное производство. Результаты расчетов представлены в табл. 6.

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НДТ НА БИОГЕННУЮ НАГРУЗКУ НА КУЙБЫШЕВСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ СО СТОРОНЫ ПИЛОТНЫХ ВОДОСБОРОВ

Анализ сельскохозяйственной деятельности на водосборе Куйбышевского водохранилища показал, что уже в 2008 г. в большинстве административных районов дозы внесения в почвы азота и фосфора с минеральными и органическими удобрениями были ниже среднего выноса указанных БЭ с урожаем. За последующий период указанная тенденция, способствующая обеднению почв питательными веществами, сохранилась. Следовательно, избыточное поступление азота и фосфора в почву на большей части территории водосбора не происходило. Таким образом, едва ли можно надеяться на существенное снижение биогенной нагрузки на водные объекты региона за счет сокращения внесения азота и фосфора с минеральными и органическими удобрениями. При этом снижение объемов получаемой сельскохозяйственной продукции весьма вероятно, хотя и никогда не планируется. В данном случае внедрение НДТ в сельскохозяйственное производство связано в первую очередь с оптимизацией переработки навоза и помета, его удаления из животноводческого помещения, а также хранения и внесения на поля. При этом переход на НДТ предусматривает освоение: современных технологий работы с органическими отходами сельскохозяйственного производства, системы производственного экологического контроля на уровне предприятий, системы регионального мониторинга и координации деятельности по работе с органическими и минеральными удобрениями.

Проведенные расчеты показали, что использование НДТ на сельскохозяйственных предприятиях рассматриваемых территорий позволит сократить сельскохозяйственную нагрузку азота на водосборы Казанки и Мёши на 12–13%. Для водосборов Черемшана и Свяги этот показатель  $\leq 7\%$ . Повышенный потенциал снижения нагрузки на водосборах Казанки и Мёши обусловлен более интенсивным применением минеральных и органических удобрений на этих территориях (доза внесения азота с удобрениями здесь почти в 2 раза выше, чем на водосборах Черемшана и Свяги). Перспективное снижение сельскохозяйственной нагрузки по фосфору на пилотные водосборы составит 2–6%, за исключением водосбора Свяги, где фосфорная сельскохозяйственная нагрузка снизится на 15.7%.

Представленные результаты расчетов сельскохозяйственной нагрузки на пилотные водосборы использованы в качестве входных данных для моделирования выноса азота и фосфора с пилотных водосборов в Куйбышевское водохранилище на основе модели ILLM. При этом учитывался как

вклад других точечных и рассредоточенных источников биогенной нагрузки, так и удержание питательных веществ водосбором и его гидрографической сетью. В результате удалось показать, что в условиях средней водности суммарный вынос БЭ с водосборов рек Свяги, Казанки, Мёши и Большой Черемшан снизится ориентировочно на 367 тN/год и 12 тP/год соответственно по сравнению с условиями 2017 г. при внедрении НДТ в сельскохозяйственную практику (табл. 6).

При обсуждении перспектив улучшения экологического состояния водных объектов за счет снижения антропогенной нагрузки часто встречаются рекомендации по снижению доз внесения БЭ с удобрениями как одно из средств снижения риска антропогенного эвтрофирования водоемов. Однако очевидно, что в ситуации, когда на поля вносятся меньше питательных веществ, чем выносятся с урожаем, снижение вносимых удобрений ведет к снижению производства сельскохозяйственной продукции. При этом в реальности руководители предприятий в первую очередь заботятся о повышении объемов производства и изыскивают средства для увеличения доз внесения удобрений. В такой ситуации внедрение НДТ — единственный реальный механизм сочетания снижения негативного воздействия на окружающую среду с увеличением производства сельхозпродукции и минимизацией трудо- и энергозатрат. А методы математического моделирования — реальный инструмент количественной оценки воздействия различных компонентов сельскохозяйственного производства на окружающую среду и поиска оптимального их сочетания для достижения поставленных целей. Можно отметить, что в решаемой задаче кардинального улучшения состояния водохранилища и водных объектов его водосбора едва ли можно ожидать от рассчитанного снижения биогенной нагрузки. Однако, как отмечалось выше, здесь следует помнить, что внедрение НДТ проводится не только с целью снижения негативного воздействия на окружающую среду. При этом лицам, принимающим управленческие решения в области улучшения экологической ситуации в регионе, важно реально оценивать перспективы проведения тех или иных мероприятий.

Поскольку в настоящей работе сделан акцент именно на природоохранную роль внедрения НДТ, сотрудниками ИНОЗ РАН проведена экономическая оценка предотвращенного ущерба от загрязнения водной среды в результате поступления БЭ сельскохозяйственного происхождения с территории исследуемых объектов в результате снижения нагрузки за счет внедрения НДТ (по сравнению с условиями 2017 г.). Согласно расчетам, выполненным с использованием рекомендаций работы [6], суммарный экономический

эффект для всех четырех пилотных водосборов составит 61.19 млн руб/год.

### ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПРЕДЛОЖЕННОЙ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ

Для оценки работоспособности расчетного метода и перспективности его дальнейшего применения на объектах с различными физико-географическими условиями формирования стока и выноса веществ важно оценить фактор обеспеченности исходной информацией. Для выполнения расчетов выноса азота и фосфора с речных водосборов по изложенному выше алгоритму необходима следующая ниже исходная информация.

1. Слой стока  $u$ , мм/год, задается по результатам оценки слоя стока за год по данным мониторинга или осреднением за период наблюдений.

2. Площади различных типов подстилающей поверхности  $A_i$  (селитебные территории, леса и естественная растительность, залежь), км<sup>2</sup>, определяются с использованием ГИС-технологий по цифровым картам или с помощью дешифрирования космических снимков подстилающей поверхности.

3. Концентрации общего азота и общего фосфора в стоке (в нефилтрованных пробах воды) с перечисленных типов подстилающей поверхности, мг/л, определяются по осредненным результатам гидрохимического анализа проб воды, взятых в первичных звеньях гидрографической сети на однородных площадях, или по имеющимся таблицам.

4. Коэффициенты  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $K_1$ – $K_6$  (безразмерные) для расчета выноса азота и фосфора с сельскохозяйственных территорий 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, т/(год км<sup>2</sup>), или рассчитывается с помощью моделей атмосферного переноса, или оценивается по данным гидрохимического анализа жидких и твердых осадков, или задается по имеющимся картам и литературным данным.

6. Сбросы, т/год, общего азота и общего фосфора точечными источниками загрязнения в гидрографическую сеть водосбора задаются по данным статистической отчетности (как правило, 2ТП(водхоз)).

7. Сбросы, т/год, общего азота и общего фосфора точечными источниками загрязнения в водоем-водоприемник или непосредственно перед гидрохимическим створом задаются по данным

статистической отчетности (как правило, 2ТП(водхоз)).

8. Параметры  $a$  и  $b$  (безразмерные) в формуле для расчета удержания задаются по литературным данным.

9. Калибровочный параметр  $k^*$  (безразмерный) в формуле (4) определяется в результате калибровки модели по данным натуральных наблюдений в замыкающих створах пилотных водосборов.

Такие параметры расчетной схемы, как слой стока, площади различных типов подстилающей поверхности, концентрации общего азота и общего фосфора в стоке с них, значения коэффициентов, связанных с различными типами почв, атмосферные выпадения, имеют привязку к региональным физико-географическим условиям. Поэтому каждая конкретная задача требует тщательной и осознанной процедуры сбора исходной информации и последующего анализа полученных результатов с учетом условий формирования биогенной нагрузки на исследуемых объектах.

Допущения и ограничения при использовании методики расчета сельскохозяйственной нагрузки сводятся к следующему. Расчеты выполняются для условий средней водности. Переход от величин выноса для всего муниципального района к той его части, которая попадает в границы водосборного бассейна, выполняется с учетом допущения о равномерности распределения сельскохозяйственной деятельности в границах района. В расчетах не учитывается возможная естественная изменчивость коэффициентов в пределах рассматриваемых однородных площадей. Но при этом учитывается средневзвешенное значение удаленности поля от первичных звеньев гидрографической сети. Потенциал снижения нагрузки при внедрении НДТ принят одинаковым для всех категорий сельскохозяйственных предприятий. В рамках разработанной методики не учитывается несоблюдение сельскохозяйственными предприятиями природоохранного законодательства, принято допущение о том, что все сельхозпроизводители выполняют требования законодательства в части хранения, обработки и внесения навоза и помета. Учитывая, что в реальных условиях зачастую наблюдаются существенные нарушения экологических требований при утилизации органических отходов сельскохозяйственного производства, ведущие к загрязнению водных объектов, природоохранный эффект от внедрения НДТ может быть существенно выше расчетных.

Модель ILLM выноса с водосбора БЭ ориентирована на существующие ограниченные возможности информационного обеспечения со стороны системы государственного мониторинга водных объектов. Обычно это 3–5 измерений в

год ограниченного числа химических веществ для ограниченного числа створов, по которым сложно воспроизвести внутригодовую динамику химического стока. Структуры государственной статистической отчетности о сбросах сточных вод и сельскохозяйственной деятельности на водосборах содержат информацию с шагом по времени в один год. Перечисленные факторы определяют использование в рассматриваемой модели шага расчетов по времени в один год. Переход на меньший расчетный шаг возможен, но в настоящее время связан в России со сложностями информационного обеспечения на уровне официальной статистической отчетности. Обычно источник информации о точечных сбросах загрязнений – формы 2ТП(водхоз), которые, как известно, недостаточно полно отражают воздействие точечных источников загрязнения на водные объекты. Тем не менее для территорий с большим количеством промышленных и муниципальных предприятий этот источник данных – единственный официальный, так как обращаться с просьбой предоставить данные к каждому предприятию не представляется возможным. Чтобы компенсировать неадекватность данных 2ТП(водхоз), приходится вводить в модель калибровочные коэффициенты.

### ВЫВОДЫ

Можно заключить, что используемая в настоящей работе расчетная схема (модель) – некий промежуточный вариант между простейшими эмпирическими моделями с сосредоточенными параметрами и физико-математическими моделями с распределенными параметрами. Модель ориентирована на ограниченные возможности информационного обеспечения и, тем не менее, позволяет рассчитывать среднегодовые величины выноса БЭ с водосборов и биогенную нагрузку на водоемы-водоприемники. В будущих исследованиях структура модели и ее компоненты будут совершенствоваться по мере накопления знаний об изучаемых процессах и расширения возможностей мониторинга – источника необходимой для расчетов информации.

С использованием предложенной модели рассчитана сначала рассредоточенная сельскохозяйственная нагрузка азотом и фосфором на водосбор, а затем вынос БЭ с речным стоком в водохранилище как в современных условиях, так и после внедрения НДТ в сельскохозяйственное производство. Показано, что в условиях средней водности суммарный вынос с водосборов рек Свияги, Казанки, Мёши и Большой Черемшан снизится ориентировочно на 367 тN/год и 12 тP/год при условии внедрения НДТ в сельскохозяйственную практику. Выявлено, что внесение в почву азота и фосфора в составе минераль-

ных и органических удобрений для большинства административных районов изучаемого региона ниже потребности растительных культур в БЭ, что приводит к постепенному обеднению почв питательными веществами и снижению риска миграции БЭ в водные объекты.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брюханов А.Ю., Васильев Э.В., Шалавина Е.В. Решение проблем утилизации отходов жизнедеятельности птицы // Птица и птицепродукты. 2018. № 3. С. 21–24.
2. Брюханов А.Ю., Кондратьев С.А., Васильев Э.В., Минакова Е.А., Терехов А.В., Обломкова Н.С. Оценка сельскохозяйственной биогенной нагрузки, сформированной на речных водосборах бассейна Куйбышевского водохранилища // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2018. № 96. С. 175–186.
3. 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.
4. Брюханов А.Ю., Уваров Р.А., Субботин И.А. Опыт освоения наилучших доступных технологий утилизации помета в Ленинградской области // Птица и птицепродукты. 2018. № 3. С. 26–28.
5. Брюханов А.Ю., Шалавина Е.В., Эрк А.Ф., Субботин И.А., Васильев Э.В., Уваров Р.А. Алгоритм оценки и выбора машинных технологий с учетом показателей экологической устойчивости сельских территорий // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2018. № 97. С. 215–227.
6. Временная методика определения предотвращенного экологического ущерба. М.: Госкомэкология России, 1999. 41 с.
7. Геологическая служба США (USGS). [Электронный ресурс]. <http://earthexplorer.usgs.gov>
8. Гинзбург К.Е. Фосфор основных типов почв СССР. М.: Наука, 1981. 242 с.
9. ГОСТ Р 113.41.01-2019 Наилучшие доступные технологии. Интенсивное разведение свиней. Рекомендации по производственному экологическому контролю. [Электронный ресурс]. <http://docs.cntd.ru/document/1200166672>
10. ГОСТ Р 113.42.01-2019 Наилучшие доступные технологии. Интенсивное разведение сельскохозяйственной птицы. Рекомендации по производственному экологическому контролю. [Электронный ресурс]. <http://docs.cntd.ru/document/1200166673>

11. ГОСТ Р 113.15.01-2019 Наилучшие доступные технологии. Рекомендации по обработке, утилизации и обезвреживанию органических отходов сельскохозяйственного производства. [Электронный ресурс]. <http://docs.cntd.ru/document/1200166699>
12. ГОСТ Р 56828.15-2016 Наилучшие доступные технологии. Термины и определения. [Электронный ресурс]. <http://docs.cntd.ru/document/1200140738>
13. ИТС 41-2017 Интенсивное разведение свиней. М.: Бюро НДТ, 2017. 312 с.
14. ИТС 42-2017 Интенсивное разведение сельскохозяйственной птицы. М.: Бюро НДТ, 2017. 137 с.
15. Кондратьев С.А. Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. СПб.: Наука, 2007. 253 с.
16. Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор–водоток–водоем. СПб.: Нестор-История, 2019. 246 с.
17. 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.
18. Методические указания по расчету поступления биогенных элементов в водоемы от рассредоточенных нагрузок и установлению водоохраных мероприятий. М.: Госагропром, 1988. 87 с.
19. Минакова Е.А., Шлыков А.П., Поздняков Ш.Р., Кондратьев С.А. Оценка величины выпадений биогенных веществ из атмосферы на частный водосбор Куйбышевского водохранилища в пределах Республики Татарстан // Проблемы региональной экологии. 2019. № 1. С. 34–38.
20. Поздняков Ш.Р., Кондратьев С.А., Брюханов А.Ю., Минакова Е.А., Игнатъева Н.В., Шмакова М.В., Иванова Е.В., Обломкова Н.С., Терехов А.В. Оценка биогенной нагрузки на Куйбышевское водохранилище со стороны водосбора // География и природ. ресурсы. 2019. № 3. С. 67–76.
21. Почвоведение / Под ред. А.С. Фатьянова, С.Н. Тайчинова. М.: Колос, 1972. 480 с.
22. Приказ Росстандарта от 29 ноября 2017 г. № 2667 “Об утверждении информационно-технического справочника по наилучшим доступным технологиям “Интенсивное разведение сельскохозяйственной птицы”.
23. Приказ Росстандарта от 13 декабря 2017 г. № 2819 “Об утверждении информационно-технического справочника по наилучшим доступным технологиям “Интенсивное разведение свиней”.
24. РД-АПК 1.10.15.02-17 Методические рекомендации по технологическому проектированию систем удаления и подготовки к использованию навоза и помета.
25. Справочник агрохимика / Под ред. Д.А. Коренькова. М.: Россельхозиздат, 1976. 350 с.
26. Справочник агрохимика Кубани / Под ред. Э.К. Эйсерт. Краснодар: Кн. изд-во, 1987. 255 с.
27. Субботин И.А., Васильев Э.В., Брюханов А.Ю., Маркова А.Е. Оценка вымывания фосфора в зависимости от разновидности почвы и степени минерализации удобрения // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2018. № 97. С. 208–215.
28. Тьюки Д. Анализ результатов наблюдений. Разведочный анализ. М.: Мир, 1981. 688 с.
29. Уваров Р.А. Обзор технологий биоконверсии навоза КРС, наиболее адаптированных к условиям Северо-Запада России // Инновации в сел. хоз-ве. 2015. № 2 (12). С. 273–276.
30. Хампель Ф., Ронгетти Э., Рауссеу П., Штаэль В. Робастность в статистике. Подход на основе функций влияния. М.: Мир, 1989. 512 с.
31. Харлеман Д.Р., Инпен А.Д., Кейлган Д.Т. Гидродинамика береговой зоны и эстуариев. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 394 с.
32. Хьюбер П. Робастность в статистике. М.: Мир, 1984. 303 с.
33. Amberger A., Schweiger P. Wanderung der Pflanzennährstoffe in Boden und deren Bedeutung in einer umweltbewussten Landwirtschaft // Die Bodenkultur. 1973. № 24. P. 221–237.
34. Barrows H.L., Kilmer V.J. Plant nutrient losses from soil by water erosion // NORMANN. A.G. Advances in Agronomy. 1963. № 15. P. 303–316.
35. Behrendt H. Inventories of point and diffuse sources and estimated nutrient loads. A comparison for different river basins in Central Europe // Wat. Sci. Technol. 1996. № 33. P. 99–107.
36. Behrendt H., Dannowski R. Nutrients and heavy metals in the Odra River system. Berlin: Weissensee Verlag Publ., 2007. 337 p.
37. Behrendt H., Opitz D. Retention of nutrients in river systems: dependence on specific runoff and hydraulic load // Hydrobiologia. 1999. № 410. P. 111–122.
38. Briukhanov A., Alexeev L., Oblomkova N., Subbotin I. Results of field studies on nitrogen and phosphorus input from agricultural production to selected water bodies in Western Dvina // Proc. 17th Int. Sci. Conf. “Engineering for Rural Development”. Jelgava, Latvia, 2018. P. 278–284.
39. Briukhanov A., Vasilev E., Kozlova N., Lukin S. Environmental assessment of livestock farms in the context of BAT system introduction in Russia // Innovative solutions for sustainable management of nitrogen. Conf. Proc. Tjele, Denmark, 2017. 126 p.
40. Briukhanov A., Vasilev E., Kozlova N., Shalavina E. Background for introduction of BAT system in intensive dairy farming in Russia // Proc. 7th Int. Sci. Conf. “Engineering for Rural Development”. Jelgava, Latvia, 2018. P. 278–284.
41. Briukhanov A., Kondratyev S., Tarbaeva V., Vorobyeva E., Oblomkova N. Contribution of Agricultural Sources to Nutrient Load Generated on the Russian Part of the

- Baltic Sea Catchment Area // Rural development 2017 Bioeconomy Challenges. 2017. P. 226–231.
42. *Briukhanov A., Trifanov A., Spesivtsev A., Subbotin I.* Logical-Linguistic Modeling in Addressing Agro-Environmental Challenges // Proc. XIX IEEE Int. Conf. “Soft Computing and Measurements”. 2016. P. 164–166.
43. Guidelines for the compilation of waterborne pollution to the Baltic Sea (PLC-water). Helsinki: HELCOM, 2005. 80 p.
44. *Johnes P.I., Heathwaite A.I.* Modelling the impact of land use change on water quality in agricultural catchments // Hydrol. Processes. 1997. № 11. P. 269–286.
45. *Subbotin I., Briukhanov A., Ogluzdin A.* Comparison of phosphorus leaching on different soils to tuning IEEP-AgrDLM model // Proc. 17th Int. Sci. Conf. “Engineering for Rural Development”. Jelgava, Latvia, 2018. P. 665–669.
46. *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 Sci. Technol. 2005. V. 51 (3–4). P. 19–29.
47. *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. V. 16. P. 3227–3244.